



Rozprawa doktorska

mgr inż. Krzysztof Wałęsa

Tytuł:

Analiza zautomatyzowanego procesu doczołowego łączenia termozgrzewalnych pasów napędowych i transportujących

Promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Talaśka, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Dominik Wilczyński

Poznań, 2022

Streszczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z problematyką produkcji termozgrzewalnych pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym, wykonanych z elastomerów termoplastycznych. Jednym z ważniejszych etapów procesu produkcyjnego takich części maszyn, jest łączenie doczołowe półproduktu pasa do postaci zamkniętego obwodu o ściśle określonej długości. W praktyce przemysłowej proces ten jest realizowany poprzez zgrzewanie doczołowe ciągną metodą gorącej płyty, przy czym w większości przypadków jest on wykonywany ręcznie, za pomocą zestawu prostych narzędzi. W celu poprawy powtarzalności cech otrzymywanych pasów, a także polepszenia efektywności produkcji, podjęto prace badawczo-rozwojowe nad opracowaniem takiej technologii zgrzewania tych elementów, która pozwoli na zautomatyzowanie tego procesu produkcyjnego. Efektem końcowym tych działań jest konstrukcja zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, a także metodologia doboru parametrów technologicznych zapewniających efektywne zgrzewanie.

W pierwszym etapie prac badawczych dokonano rozpoznania właściwości materiału podlegającego zgrzewaniu. Na przykładzie określonego rodzaju pasa, wybranego jako studium przypadku, który jest wykonany z elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu i ma średnicę zawierającą się w przedziale od 4 mm do 18 mm, rozpoznano podstawowe właściwości mechaniczne tego materiału w dziedzinie stałej i zmiennej wartości temperatury. Wyznaczono również wartości wybranych właściwości termicznych, niezbędne do dalszych prac badawczych nad zgrzewaniem. Obserwacje poczynione podczas wykonanych badań, pozwoliły wysunąć wnioski na temat zachowania się tego tworzywa w warunkach obciążeń mechanicznych, szczególnie w zakresie wyższych wartości temperatury, bliskich przewidywanej temperaturze zgrzewania.

W następnym etapie prac badawczych, dokonano szczegółowej analizy operacji zgrzewania doczołowego, zorientowanej na rozpoznanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas tego procesu. Pozwoliło to na ocenę rozwiązań technologicznych zgrzewania znanych z literatury naukowej, a także następujące po tym opracowanie autorskiej metodologii przeprowadzania tego procesu, umożliwiającej jego zautomatyzowanie i implementację w projektowanym urządzeniu zgrzewającym. Rozważania te stanowiły podstawę teoretyczną do dalszych badań nad zgrzewaniem doczołowym pasów. Dotyczy to w szczególności jednej z najbardziej kluczowych operacji technologicznych wchodzących w skład tego procesu – uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie.

Na podstawie przeprowadzonych badań empirycznych, ściśle odwzorowujących warunki uplastyczniania w rzeczywistym procesie produkcyjnym, rozpoznano zachodzące zjawiska fizyczne, co pozwoliło opracować wytyczne do przeprowadzania tej operacji w sposób efektywny, zapewniający jej właściwy przebieg. W następnej kolejności, na podstawie: wartości rozpoznanych wcześniej właściwości termomechanicznych, wniosków z analizy wymiany ciepła podczas uplastyczniania, a także wyników analizy zachowania się materiału pod wpływem podwyższonej temperatury, opracowano metodologię szacowania wartości naprężenia uplastyczniającego. Działanie to pozwoliło na dobór parametrów technologicznych tej operacji, dla całego zakresu analizowanych średnic pasa, w taki sposób, aby przebiegała ona efektywnie. Biorąc pod uwagę dalsze planowane prace wdrożeniowe, szczegółowej analizie poddano również usuwanie

wypływkę po zgrzewaniu. W wyniku tego, opracowano metodologię przeprowadzania tej czynności, a także sformułowano model matematyczny pozwalający na szacowanie wartości siły technologicznej niezbędnej do ścinania wypływkę za pomocą jednej krawędzi tnącej.

Wyniki przeprowadzonych prac badawczych, znalazły zastosowanie podczas projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego. Szczególnie ważnym etapem procesu projektowego, było opracowywanie struktury podstawowego elektromechanicznego układu napędowego, umożliwiającego zrealizowanie założonej metodologii zgrzewania. Rezultaty badań materiałowych oraz analiz związanych z operacją uplastyczniania, pozwoliły na opracowanie konstrukcji cechującej się możliwie dużym stopniem uproszczenia, co wpływa pozytywnie na możliwości zastosowania przemysłowego. Zaprojektowane urządzenie zostało zbudowane i wykorzystane do przeprowadzenia pilotażowych badań eksperymentalnych zautomatyzowanego zgrzewania, w warunkach przemysłowej produkcji pasów.

Dissertation title

Analysis of the automated butt joining process of the thermoweldable drive and conveyor belts

Abstract

The subject of the dissertation is connected with the manufacturing of the thermoweldable belts which are used in drive and transportation systems. These belts have a circular cross-section and are made of thermoplastic elastomers. One of the most important stages of their production process is butt joining of the semi-finished product, in order to obtain the closed-loop with precisely defined length. In industrial practice, this process is performed by butt welding, using the hot plate method. In most cases this operation is carried out manually, using simple tools. In order to improve the repeatability of the quality of final products, as well as the efficiency of the production process, the research activity was undertaken in order to develop welding technology, that will allow performing this technological operation in the automated way. The final effect of the work is the construction of the automated welding machine and methodology of selection the technological parameters, which allows performing the hot plate welding process in an effective way.

In the first stage of the research work on welding, the properties of the welded material were recognized. On the example of a particular type of belt selected as a case study, which is made of thermoplastic polyurethane (TPU elastomer), and has a diameter from 4 mm to 18 mm, the basic mechanical properties of this material in the field of constant and variable temperature were recognized. Additionally, the values of selected thermal properties, which were necessary for further research work on welding were determined. The observations made during the tests, allowed to formulate conclusions connected with the behaviour of the material, especially in terms of higher temperatures, close to the predicted welding temperature.

In the next stage of research, a detailed analysis of a butt welding operation oriented to identify physical phenomena which occur during this process was made. This allows to evaluate the technical solutions applied to welding known from scientific literature, as well as the following development of the original methodology for carrying out this process, allowing its automation and implementation in a designed welding device. These considerations constituted the theoretical basis for further research on the butt welding process of the belts and in particular the most important operation – the plasticization of the belt.

On the basis of empirical tests, which strictly reproduced the plasticization conditions present at the actual production process, the occurring physical phenomena were diagnosed, which allowed to formulate guidelines for carrying this operation in an effective way that ensures a proper course. Next, on the basis of: values of previously recognized thermomechanical properties, conclusions from the analysis of heat exchange during plasticization, as well as the results of the analysis of material behaviour under the influence of high temperature, a methodology for estimating the values of the plasticization stress was developed. This action allowed to select technological parameters of this operation, for the entire scope of the analyzed diameters of the belt, so that it will work effectively. Taking into account future planned

implementation works, a detailed analysis of the flash removing after the welding process was performed. On the basis of that, a methodology for carrying out this operation was developed. In consequence, the mathematical model which allows to estimate the value of the technological force which is necessary to remove the flash by single edge cutting was derived.

The results of the research carried out, found the application during designing the automated welding device. A particularly important stage of the design process was to develop a structure and construction of the basic electromechanical drive system of this device, that allows the proposed welding methodology to be implemented. The results of the material research and analyses related to the plasticizing operation allowed to develop a structure characterized by a highly possible simplification, which affects positively on the possibility of industrial use. The designed device has been built and used for the experimental research connected with automated welding, during the industrial belt manufacturing.

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract.....	5
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	9
Wykaz oznaczeń ważniejszych części urządzenia do zgrzewania pasów (Rys. 127-158)	12
1. Wprowadzenie	17
1.1. Pasy napędowe i transportujące – podział, charakterystyka, stosowane materiały	17
1.1.1. Przekładnie ciągnowe	17
1.1.2. Przenośniki pasowe.....	22
1.1.3. Okrągłe pasy napędowe i transportujące.....	24
1.2. Bezkońcowe pasy napędowe i transportujące – wymagania i problemy produkcyjne	33
1.3. Wykonywanie złączy polimerowych pasów ciągnowych.....	38
1.3.1. Metodyka łączenia tworzyw sztucznych.....	38
1.3.2. Łączenie pasów napędowych i transportujących	47
1.4. Podsumowanie rozdziału	55
2. Uzasadnienie podjętej tematyki	56
3. Teza i zadania badawcze.....	59
4. Właściwości termomechaniczne elastomerowych pasów ciągnowych	60
4.1. Przegląd stanu wiedzy.....	60
4.2. Rozpoznanie właściwości termomechanicznych zgrzewanych pasów – metodologia.....	80
4.2.1. Badania właściwości fizycznych w warunkach stałej wartości temperatury	80
4.2.2. Badania właściwości fizycznych w warunkach zmiennej wartości temperatury.....	85
4.3. Właściwości termomechaniczne pasa termozgrzewalnego – dyskusja rezultatów.....	97
4.3.1. Wyniki badań właściwości fizycznych w warunkach stałej wartości temperatury.....	97
4.3.2. Wyniki badań właściwości fizycznych w zmiennej temperaturze otoczenia	105
4.4. Podsumowanie rozdziału	135
5. Proces technologiczny zgrzewania doczołowego pasów	138
5.1. Aktualny stan wiedzy na temat doczołowego zgrzewania pasów.....	138
5.2. Proponowana technologia zgrzewania pasów napędowych i transportujących.....	156
5.3. Badania empiryczne procesu uplastyczniania pasa.....	162
5.3.1. Metodyka badań.....	162
5.3.2. Badania wstępne uplastyczniania pasa – dyskusja rezultatów.....	167
5.3.3. Badania finalne uplastyczniania pasa – dyskusja rezultatów.....	176
5.3.4. Modelowanie charakterystyki uplastycznienia materiału	179
5.3.5. Optymalizacja parametrów technologicznych uplastyczniania	187
5.4. Rozkład temperatury podczas zgrzewania.....	191
5.4.1. Wstępne prace nad modelowaniem rozkładu temperatury	191
5.4.2. Wyznaczanie rozkładu temperatury podczas uplastyczniania materiału	201

5.5.	Estymacja parametrów uplastyczniania efektywnego	209
5.6.	Badania nad ścinaniem wyłływki.....	217
5.7.	Podsumowanie rozdziału	223
6.	Projekt konstrukcji zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów ciągłych	225
6.1.	Założenia projektowe.....	225
6.2.	Przegląd aktualnego stanu techniki.....	225
6.3.	Koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego.....	229
6.4.	Projekt i budowa zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego.....	233
6.5.	Przykład wdrożenia wyników wykonanych prac badawczych	270
6.6.	Podsumowanie rozdziału	280
7.	Podsumowanie	281
7.1.	Podsumowanie wykonanych prac	281
7.2.	Plan dalszych prac nad zgrzewaniem pasów	282
	Literatura.....	284
	Spis tabel.....	297
	Spis rysunków	299

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- a – odległość osi w przekładni cięgnowej
 A – pole przekroju poprzecznego
 a_{dc} – współczynnik dyfuzyjności cieplnej
 a_g – przyspieszenie grawitacyjne
 a_n – odcinek propagacji temperatury
 a_{pl} – odległość uplastycznienia
 b – szerokość próbki
 C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
 d – średnica pasa
 D – średnica skuteczna koła pasowego
 D_{min} – minimalna zalecana średnica rolki
 d_o – średnica otworu w pasie o przekroju pierścieniowym
 D_o – średnica obwodu utworzonego przez zamkniętą pętlę pasa
 D_w – średnica zewnętrzna wypływki
 d_1 – średnica koła czynnego
 d_2 – średnica koła biernego
 E – moduł sprężystości wzdłużnej/moduł proporcjonalności
 F_{ch} – siła docisku podczas chłodzenia złącza
 F_{dp} – siła doprasowania materiału pasa
 F_{d1} – siła docisku wstępnego podczas zgrzewania tarcowego
 F_{d2} – siła docisku spęczania podczas zgrzewania tarcowego
 F_{max} – maksymalna siła rozciągająca przenoszona przez pas
 F_{nw} – wymagana siła napięcia wstępnego
 F_{n1}, F_{n2} – siła potrzebna do napędu chwytnika przesuwne i zespołu zgrzewającego
 F_{ow} – siła obciążająca wały przekładni
 F_{pl} – siła uplastycznienia materiału pasa
 F_R – siła rozciągająca
 F_T – całkowita siła ścinania wypływki
 F_{t1} – poosiowa siła technologiczna podczas wykonywania połączenia pasa
 F_{t2} – promieniowa siła technologiczna podczas wykonywania połączenia pasa
 g – grubość próbki
 G – moduł sprężystości poprzecznej
 G' – składowa zachowawcza modułu sprężystości poprzecznej
 G'' – składowa stratności modułu sprężystości poprzecznej
 h – wysokość próbki
 i – przełożenie przekładni
 i_{g1-2} – przełożenie geometryczne przekładni pasowej

- i_{k1-2} – przełożenie kinematyczne przekładni pasowej
- l – długość próbki
- L_c – całkowita długość odcinka pasa przed wykonaniem połączenia
- L_h – trwałość godzinowa przekładni
- L_o – całkowita długość pełnego obwodu gotowego pasa
- m – masa
- n – naddatek na wykonanie połączenia
- n_{pl} – naddatek na uplastycznienie materiału pasa
- n_w – naddatek na wyrównanie powierzchni pasa na gorącej płycie
- n_{zt} – prędkość obrotowa podczas klasycznego zgrzewania tarcowego
- n_1 – prędkość obrotowa koła czynnego
- n_2 – prędkość obrotowa koła biernego
- p – względne napięcie wstępne pasa
- P_s – moc silnika podstawowego układu napędowego urządzenia
- P_u – moc użyteczna przenoszona przez przekładnię
- p_1, p_2 – skok zwoju śruby kulowej
- Q_c – ciepło wymieniane poprzez konwekcję
- Q_p – ciepło wymieniane poprzez przewodzenie
- Q_r – ciepło wymieniane poprzez promieniowanie
- R – promień dna rowka koła pasowego
- S – pole powierzchni zewnętrznej materiału
- s_{pl} – odległość podczas uplastyczniania
- T – wartość temperatury
- T_c – temperatura podczas badań ściskania materiału
- t_{ch} – czas technologiczny chłodzenia złącza
- T_d – temperatura degradacji termicznej materiału
- T_{DSC} – temperatura badania DSC
- T_{DMTA} – temperatura badania DMTA
- t_{dp} – czas technologiczny doprasowania złącza
- T_g – temperatura zeszklenia
- T_{kr} – temperatura przemiany kruchej
- T_o – standardowa temperatura użytkowania/temperatura otoczenia
- t_p – czas technologiczny trwania całego procesu zgrzewania
- T_p – temperatura gorącej płyty
- T_{p_eff} – efektywna temperatura gorącej płyty
- t_{pl} – czas technologiczny uplastyczniania materiału pasa
- T_{pp} – temperatura plastycznego płynięcia
- T_t – temperatura topnienia

- T_{TGA} – temperatura badania termogravimetrycznego
- T_u – temperatura uplastycznienia
- t_{wp} – czas technologiczny wysuwania płyty grzewczej
- T_z – temperatura zgrzewania
- T_{z_min} (T_{u_min}/T_{DMTA_pl}) – minimalna temperatura uplastycznienia pasa/zgrzewania
- T_{z_max} – maksymalna temperatura zgrzewania ze względu na degradację termiczną
- t_{II} – czas przejścia pomiędzy kluczowymi fazami uplastyczniania
- v – prędkość liniowa transportowanego ładunku/prędkość liniowa ciągnąca przenośnika pasowego
- V – objętość materiału
- v_c – prędkość podczas badań ściskania
- v_{ch} – prędkość podczas chłodzenia złącza
- v_{DMTA} – szybkość zmiany temperatury podczas badania DMTA
- v_{dp} – prędkość doprasowania złącza
- v_{DSC} – szybkość zmiany temperatury podczas badania DSC
- v_p – prędkość technologiczna podczas procesu zgrzewania
- v_{pl} – prędkość uplastyczniania materiału pasa
- v_{pl_eff} – efektywna prędkość uplastyczniania materiału pasa
- v_r – prędkość podczas badań rozciągania
- v_t – prędkość podczas badań ścinania
- α – kąt rozwarcia ścian bocznych rowka koła pasowego
- α_k – konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła
- α_p, α_o – współczynnik rozszerzalności termicznej w kierunku promieniowym i osiowym
- γ – odkształcenie poprzeczne
- $\dot{\gamma}$ – prędkość odkształcenia poprzecznego
- δ – kąt stratności mechanicznej
- ε – odkształcenie wzdłużne
- $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia wzdłużnego
- ε_p – poślizg względny ciągnąca
- η – lepkość dynamiczna poprzeczna
- η_e – lepkość dynamiczna wzdłużna (zgodnie z definicją Troutona)
- η_p – sprawność przekładni
- λ – współczynnik przewodności cieplnej
- ν – współczynnik Poissona
- μ – współczynnik tarcia
- ρ – gęstość
- σ_{pl} – naprężenie uplastyczniające
- φ – kąt wierzchołkowy ostrza stożkowego
- ω_{DMTA} – częstość kołowa oscylacji podczas badania DMTA

Wykaz oznaczeń ważniejszych części urządzenia do zgrzewania pasów (Rys. 127-158)

A – rama główna

- A1.1 – kształtowy profil aluminiowy 50x50
- A1.2 – kształtowy profil aluminiowy 50x100
- A1.3 – kształtowy profil aluminiowy 50x150
- A2.1 – kątownik mocujący 50x50
- A2.2 – kątownik mocujący 100x100
- A3.1 – silnik BLDC podstawowego elektromechanicznego układu napędowego
- A3.2 – reduktor planetarny
- A3.3 – płyta montażowa silnika podstawowego elektromechanicznego układu napędowego
- A3.4 – sprzęgło kłowe z wkładką elastomerową
- A3.5 – blok łożysk kulkowych skośnych
- A3.6 – śruba toczna modułu chwytaka przesuwne
- A3.7 – nakrętka toczna modułu chwytaka przesuwne
- A3.8 – obudowa nakrętki tocznej
- A3.9 – blok łożyska kulkowego poprzecznego
- A3.10 – nakrętka toczna modułu grzewczego
- A3.11 – śruba toczna modułu grzewczego
- A3.12 – szyna profilowa górnej prowadnicy modułu grzewczego
- A3.13 – wózek górnej prowadnicy modułu grzewczego
- A3.14 – szyna profilowa prowadnicy dolnej
- A3.15 – wózek prowadnicy modułu chwytaka przesuwne
- A3.16 – wózek dolnej prowadnicy modułu grzewczego
- A4 – płyta montażowa elektropneumatycznego układu sterującego

B – moduł dozujący

- B1.1 – podstawa zintegrowanego modułu dozującego
- B1.2 – płyta boczna
- B1.3 – pokrywa przednia
- B1.4 – pokrywa tylna
- B1.5 – pokrywa górna
- B1.6 – płyta montażowa silnika pomocniczego elektromechanicznego układu napędowego
- B1.7 – płyta montażowa siłownika zespołu cięcia
- B2.1 – silnik BLDC pomocniczego elektromechanicznego układu napędowego
- B2.2 – sprzęgło kłowe z wkładką elastomerową
- B2.3 – wał dozujący
- B2.4 – rolka dozująca
- B2.5 – blok łożyskowania wału dozującego
 - B2.5.1 – obudowa łożyska wału dozującego

- B2.5.2 – łożysko wału dozującego
- B2.6 – wał dociskający
- B2.7 – rolka dociskająca
- B2.8 – blok łożyskowania wału dociskającego
 - B2.8.1 – obudowa łożyska wału dociskającego
 - B2.8.2 – łożysko wału dociskającego
- B2.9 – prowadnik pasa
- B3.1 – siłownik pneumatyczny zespołu cięcia
- B3.2 – płyta prowadząca noża
- B3.3 – wózek prowadnicy liniowej noża
- B3.4 – szyna prowadnicy liniowej noża
- B3.5 – nóż
- B3.6 – pokrywa noża
- B3.7 – podstawa pokrywy noża
- B4.1 – uchwyt dociskacza
- B4.2 – płyta prowadząca dociskacza
- B4.3 – wózek prowadnicy liniowej dociskacza
- B4.4 – szyna prowadnicy liniowej dociskacza
- B4.5 – łącznik dociskacza
- B4.6 – sprężyna dociskacza
- C – moduł chwytaka nieprzesuwnego
 - C1 – płyta główna chwytaka nieprzesuwnego
 - C2 – siłownik pneumatyczny zacisku chwytaka
 - C3 – popychacz siłownika zacisku chwytaka
 - C4 – słup prowadzący płytę górną
 - C5 – tulejka toczna prowadnicy liniowej płyty górnej
 - C6 – płyta górna
 - C7 – płyta siłownika wahadłowego
 - C8 – siłownik pneumatyczny wahadłowy obrotu szczęk
 - C9 – koło pasowe siłownika wahadłowego
 - C10 – pas zębaty
 - C11 – koło pasowe wału górnego
 - C12 – wał górny
 - C13 – łożysko toczne wału
 - C14 – szczęka górna
 - C15 – szczęka dolna
 - C16 – wał dolny
 - C17 – łącznik kształtowy szczęk

C18 – ogranicznik

D – moduł chwytaka przesuwne

D1 – uchwyt nakrętki napędzającej chwytak przesuwny

D2 – płyta prowadząca lewa

D3 – płyta prowadząca prawa

D4 – profil nośny

D5 – łącznik górny

D6 – płyta główna chwytaka przesuwne

D7 – płyta siłownika pneumatycznego zacisku chwytaka

D8 – siłownik pneumatyczny zacisku chwytaka

D9 – popychacz siłownika zacisku chwytaka

D10 – słup prowadzący płytę górną

D11 – tulejka toczna prowadnicy liniowej płyty górnej

D12 – płyta górna

D13 – płyta siłownika wahadłowego

D14 – siłownik pneumatyczny wahadłowy obrotu szczęk

D15 – koło pasowe siłownika wahadłowego

D16 – pas zębaty

D17 – koło pasowe wału górnego

D18 – wał górny

D19 – łożysko toczne wału

D20 – szczeka górna

D21 – szczeka dolna

D22 – wał dolny

D23 – łącznik kształtowy szczęk

D24 – ogranicznik

E – moduł grzewczy

E1 – płyta montażowa dolna

E2 – płyta montażowa górna

E3 – słup prowadzący

E4 – płyta główna

E5 – uchwyt siłownika wysuwu urządzenia grzewczego

E6 – siłownik pneumatyczny wysuwu urządzenia grzewczego

E7 – łącznik prosty tłoczyska siłownika

E8 – łącznik kątowy tłoczyska siłownika

E9 – uchwyt urządzenia grzewczego

E10 – wózek prowadnicy liniowej urządzenia grzewczego

E11 – szyna prowadnicy liniowej urządzenia grzewczego

E12 – płytowe urządzenie grzewcze

F – moduł napinający

F1 – płyta przesuwna

F2 – tulejka toczna prowadnicy liniowej płyty przesuwnej

F3 – siłownik pneumatyczny wysuwu napinacza

F4 – podpora wału napinacza

F5 – łącznik napinacza

F6 – wał napinacza

F7 – płoza napinacza

F8 – łącznik płyt napinacza

G – moduł wydający

G1 – płyta montażowa modułu wydającego

G2 – płyta montażowa siłownika wydającego

G3 – siłownik pneumatyczny wydający

G4 – płyta górna ramienia wydającego

G5 – płyta dolna ramienia wydającego

G6 – łącznik ramienia wydającego

G7 – siłownik zaciskający

G8 – szczęka zaciskająca

H – elektropneumatyczny układ sterowania

H1 – szafa sterująca

H1.1 – sterownik PLC zintegrowany z ekranem HMI

H1.2 – wyłącznik bezpieczeństwa

H1.3 – wyłącznik główny zasilania

H1.4 – skrzynia połączeń elektrycznych na ramie maszyny

H1.5 – router WiFi

H1.6 – zasilacz układu sterującego

H1.7 – zasilacz silnika BLDC

H1.8 – przekaźnik urządzenia grzewczego

H1.9 – moduł rozszerzeń wejść i wyjść sterownika PLC

H1.10 – regulator silnika BLDC

H2 – układ pneumatyczny

H2.1 – zbiornik buforowy na sprężone powietrze

H2.2 – główny zawór odcinający

H2.3 – główny regulator ciśnienia

H2.4 – zawór odcinający układu zaciskania szczęk

H2.5 – zawór odcinający z regulatorem ciśnienia układu obrotu szczęk

H2.6 – zawór odcinający z regulatorem ciśnienia układu grzewczego i cięcia

H2.7 – regulator precyzyjny ciśnienia zacisku szczęk chwytaków

H2.8 – regulator ciśnienia modułu napinającego pas

H2.9 – regulator ciśnienia modułu wydawania pasa

H2.10 – zestaw zaworów elektropneumatycznych sterujących siłownikami

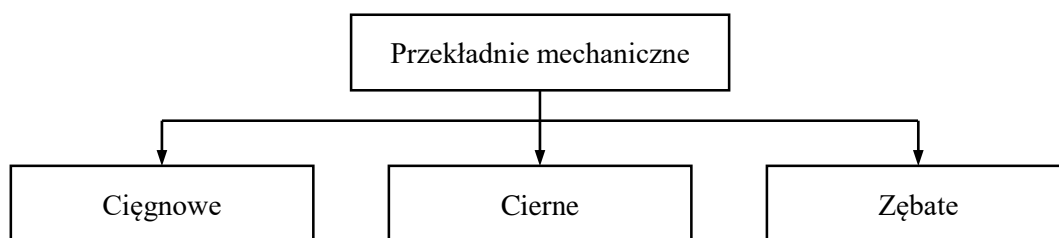
1. Wprowadzenie

1.1. Pasy napędowe i transportujące – podział, charakterystyka, stosowane materiały

1.1.1. Przekładnie cięgnowe

Przekładnie mechaniczne pełnią szczególną rolę w budowie maszyn. Stanowią jeden z podstawowych mechanizmów służących do przekazywania i przekształcania energii mechanicznej w ruchu obrotowym. W związku z tym pełnią kluczowe funkcje w strukturze układów napędowych w wielu inżynierskich aplikacjach. Przekładnie te stanowią często główne podzespoły maszyn energetycznych i roboczych, tuż obok: źródeł napędu (silników, siłowników, turbin), sprzęgieł, a także innych mechanizmów pomocniczych (np. wałów pośrednich). Ich podstawowe zadanie polega najczęściej na zamianie wartości prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Dzięki temu możliwe jest dopasowanie tych parametrów użytkowych do wymagań napędzanego mechanizmu [1, 2]. W związku z tym, maszyny robocze (technologiczne i transportujące) oraz maszyny energetyczne (prądnice, pompy i sprężarki), których rozwiązania konstrukcyjne (a tym samym wymagania dotyczące parametrów napędu) są bardzo różnorodne, mogą współpracować ze znanymi w technice źródłami napędu, których różnorodność jest nieco bardziej ograniczona [2].

Przekładnie cięgnowe są jednym z trzech podstawowych rodzajów przekładni mechanicznych, obok przekładni ciernych i zębatych (Rys. 1).



Rys. 1. Ogólna klasyfikacja przekładni mechanicznych (opracowano na podstawie [3])

Istotą funkcjonowania przekładni cięgnowej jest współpraca koła napędowego – czynnego (1) o średnicy skutecznej d_1 obracającego się z prędkością obrotową n_1 , z kołem napędzanym – biernym (2) o średnicy skutecznej d_2 obracającym się z prędkością obrotową n_2 (Rys. 2). Ze względu na wymagania funkcjonalne i wytyczne konstrukcyjne, jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących przekładnię pasową jest przełożenie [3]. W związku z tym, z punktu widzenia geometrii elementów roboczych, przekładnię można scharakteryzować za pomocą przełożenia geometrycznego:

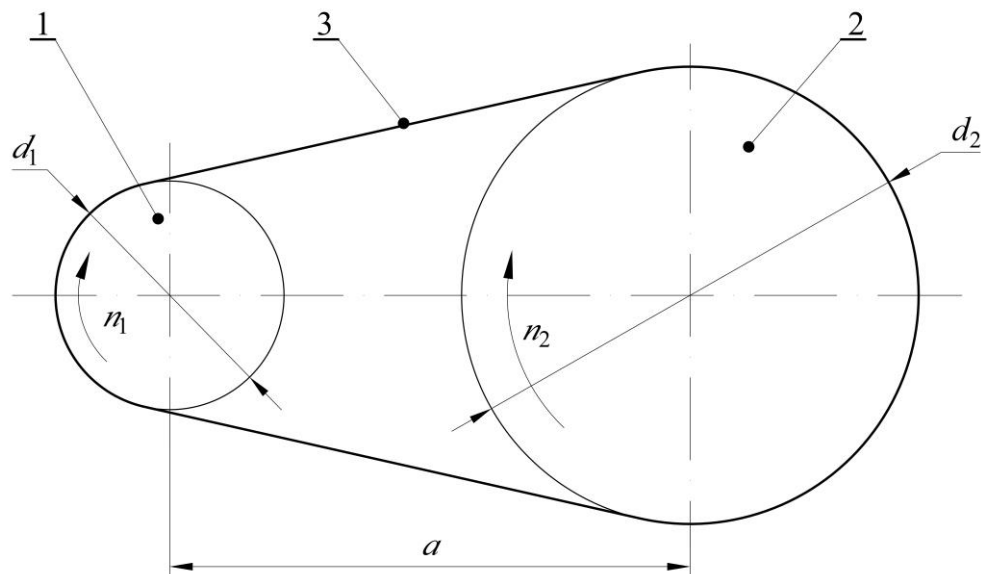
$$i_{g1-2} = \frac{d_2}{d_1}. \quad (1.1)$$

Biorąc jednak pod uwagę parametry ruchu takiego mechanizmu, przekładnię można opisać za pomocą przełożenia kinematycznego:

$$i_{k1-2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1.2)$$

Cechą charakterystyczną przekładni cięgnowej jest to, że współpraca pomiędzy kołami nie zachodzi w sposób bezpośredni w wyniku ich wzajemnego kontaktu, lecz poprzez cięgno (3), które opasa oba koła. W związku z tym, że koło czynne (1) i bierne (2) nie muszą leżeć w bezpośrednim sąsiedztwie, mogą być

od siebie oddalone o odległość a , która stanowi dystans pomiędzy ich osiami. Jej wartość może znacząco przekraczać wymiar średnic obu kół (Rys. 2).



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie przekładni cięgnowej: 1 – koło czynne, 2 – koło bierne, 3 – cięgno

Ta ważna zaleta przekładni cięgnowej powoduje, że źródło napędu może być zlokalizowane w dużej odległości od odbiornika, bez konieczności nadmiernego komplikowania konstrukcji urządzenia. Jest to ważne w wielu zastosowaniach, w przypadkach gdy:

- istnieją specyficzne wymagania konstrukcyjne dotyczące sposobu zabudowy źródła napędu (np. przekładnia pasowa w napędzie mechanizmu roboczego manualnej maszyny do szycia, gdzie źródło napędu – mechanizm korbowy podłączony do dźwigni nożnej – ze względów funkcjonalnych powinien być zamontowany w dolnej części urządzenia w przeciwieństwie do mechanizmów napędzanych, odpowiedzialnych za szycie, które są zamontowane zazwyczaj w strefie roboczej zlokalizowanej w górnej części urządzenia),
- ograniczona jest dostępna przestrzeń w obszarze napędzanego układu roboczego (np. przekładnia cięgnowa w układzie napędowym motocykla, stosowana głównie ze względu na brak przestrzeni do zabudowania silnika spalinowego lub elektrycznego bezpośrednio w piaście koła napędowego),
- warunki otoczenia podczas pracy mechanizmu napędzanego nie są korzystne dla funkcjonowania źródła napędu (np. zespół przekładni cięgowych – pasowych i łańcuchowych – w układzie napędowym kombajnu zbożowego, gdzie silnik spalinowy, ze względu na specyficzne wymagania, umieszczony jest w miejscu o najmniejszym zapyleniu powietrza, często jednak oddalonym od mechanizmów roboczych i jeźdnego układu napędowego).

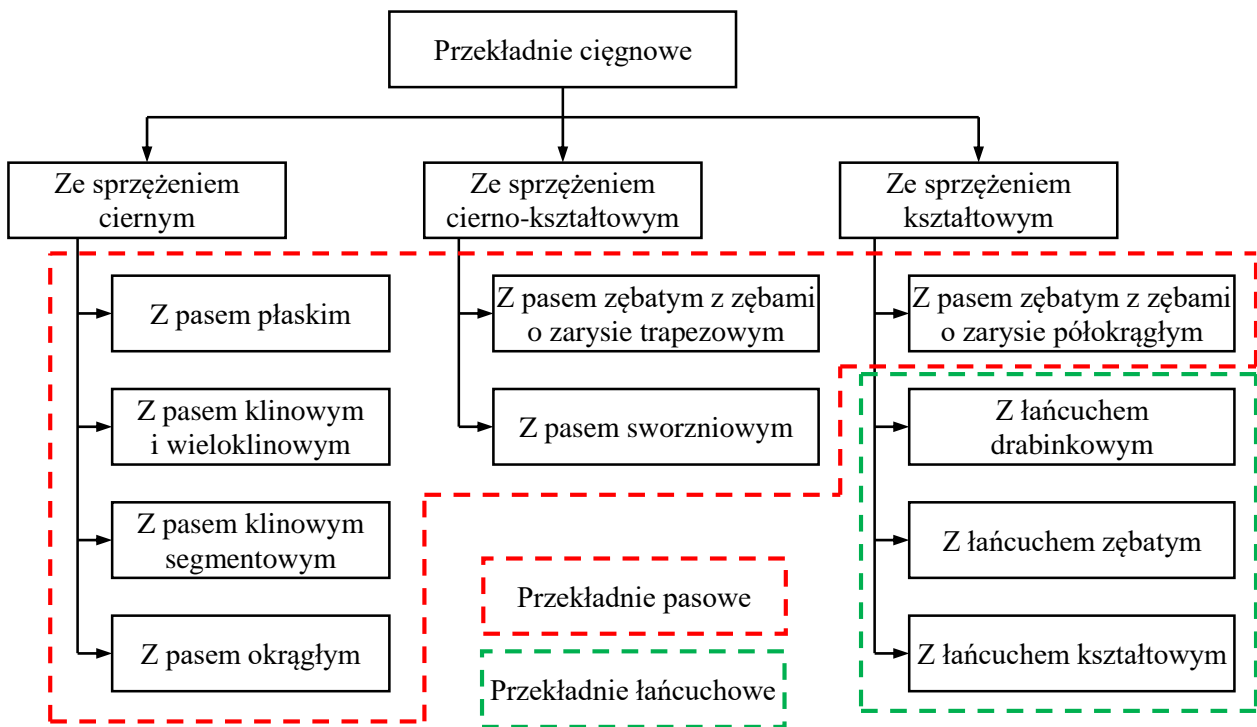
Możliwość odsunięcia od siebie osi kół: napędzającego i napędzanego, w wielu aplikacjach decyduje o funkcjonalnej przewadze przekładni cięgowych nad ciernymi lub zębatymi.

Dodatkowym atutem przekładni cięgnowej, jest umożliwienie napędzania wielu odbiorników za pomocą jednego źródła napędu, bez znaczącej rozbudowy mechanizmu (np. przekładnia cięgnowa napędu osprzętu silnika spalinowego, gdzie silnik spalinowy napędza wiele urządzeń jednocześnie np.: prądnice,

kompresor układu pneumatycznego, kompresor układu klimatyzacji, pompę cieczy chłodzącej, pompę układu wspomagania kierownicy).

Przekładnie cięgnowe mogą być wyposażone w różne rodzaje cięgna, co przekłada się na różne warunki współpracy cięgna z kołami. W związku z tym, możliwe jest dokonanie ich ogólnej klasyfikacji, ze względu na rodzaj sprzężenia pomiędzy kołem, a cięgnem (Rys. 3) [4]:

- przekładnie ze sprzężeniem ciernym,
- przekładnie ze sprzężeniem cierno-kształtowym,
- przekładnie ze sprzężeniem kształtowym.



Rys. 3. Klasyfikacja najbardziej rozpowszechnionych w przemyśle odmian przekładni cięgnowych (opracowano na podstawie [3, 4])

Przedstawiona, pogładowa klasyfikacja przekładni cięgnowych, pomimo że różnicuje ich podział ze względu na występujące w nich zjawiska fizyczne, nie jest powszechna w praktyce inżynierskiej. Znacznie częściej spotykanym jest nieco bardziej uproszczony podział tych mechanizmów, ze względu na rodzaj zastosowanego cięgna, co warunkuje również typ współpracujących z tym cięgnem kół. W związku z tym, przekładnie cięgnowe możemy podzielić na:

- pasowe, w których monolityczne lub kompozytowe, elastyczne cięgno nazywane pasem, współpracuje z kołami pasowymi,
- łańcuchowe, w których cięgno zbudowane ze sztywnych segmentów nazywane łańcuchem, współpracuje z odpowiednio ukształtowanym kołem łańcuchowym.

Należy jednak zauważyć, że rodzaj zastosowanego cięgna nie do końca warunkuje sposób sprzężenia pomiędzy kołem, a cięgnem (Rys. 3).

Przekładnie cięgnowe ze sprzężeniem ciernym pomiędzy kołem a cięgnem, charakteryzują się tym, że elementy robocze stanowią koło pasowe i pas, wyposażone w gładkie powierzchnie użytkowe,

współpracujące ze sobą wyłącznie ciernie. Dokonując klasyfikacji tych rozwiązań pod kątem kształtu geometrii pasa, w praktyce przemysłowej najczęściej spotykane są rozwiązania z pasami:

- płaskimi,
- klinowymi i wieloklinowymi litymi,
- klinowymi segmentowymi,
- okrągłymi o przekroju kołowym lub pierścieniowym.

Przekładnie ze sprzężeniem cierno-kształtowym pomiędzy cięgnem a kołem, charakteryzują się tym, że odpowiednio ukształtowany pas współpracuje z kołem pasowym, nie tylko poprzez siły tarcia, ale również kształtowo. Zjawisko to zachodzi w [3, 4]:

- przekładniach z pasem zębatym z zębami o zarysie trapezowym, które współpracują z kołami pasowymi wyposażonymi w zagłębienia o geometrii wymiarowo odpowiadającej zębom pasa,
- przekładniach z pasem sworzniowym, przy czym w zależności od rodzaju koła, współpraca pomiędzy kołem, a pasem zachodzi w sposób:
 - cierny, w przypadku zastosowania gładkich kół pasowych,
 - cierno-kształtowy, w przypadku zastosowania kół pasowych zębatych.

W przekładniach ze sprzężeniem kształtowym przenoszenie momentu obrotowego odbywa się na zasadzie kształtowej współpracy koła i cięgna, przy czym zjawisko to zachodzi [3, 4]:

- w przekładniach z pasem zębatym o półokrągłym zarysie uzębienia, gdzie współpracujące powierzchnie są utworzone poprzez odpowiednio ukształtowane zęby pasa z odpowiadającymi im kształtowo i wymiarowo rowkami na kole pasowym, naciętymi równoległe do jego osi,
- w przekładniach łańcuchowych, gdzie współpraca kształtowa zachodzi pomiędzy odpowiednimi powierzchniami ogniw łańcucha oraz odpowiadającymi im nacięciami na kole łańcuchowym, niezależnie od rodzaju łańcucha (drabinkowy, w tym: sworzniowy, rolkowy, tulejkowy, a także zębaty oraz kształtowy).

W przypadku przekładni cięgnowej, charakteryzującej się ciernym sposobem współpracy pasa i koła pasowego, istotnym zagadnieniem jest poślizg cięgna, który jest nieodłącznym elementem współpracy cierniej pasa i koła pasowego. Następstwem tego zjawiska jest wyraźna różnica pomiędzy przełożeniem geometrycznym i kinematycznym (zależności 1.1 i 1.2), charakterystyczna dla tego typu mechanizmów. Parametrem określającym to zjawisko w sposób ilościowy jest średni poślizg względny pasa ε_p , którego dopuszczalna wartość, zapewniająca prawidłową pracę mechanizmu wynosi od 1% do 2% [1, 3]. W związku z tym, dla przekładni cięgnowej ze sprzężeniem ciernym przełożenie kinematyczne można opisać jako:

$$i_{k1-2} = \frac{i_{g1-2}}{1-\varepsilon} \neq const. \quad (1.3)$$

Natomiast w przypadku sprzężenia kształtowego, prawdziwa jest zależność:

$$i_{k1-2} \cong i_{g1-2} \cong const. \quad (1.4)$$

Zależnie od geometrii współpracujących elementów, podczas projektowania przekładni cięgnowych brane pod uwagę są następujące cechy, które warunkują wybór określonego rodzaju cięgna i kół:

- konstrukcyjne, w skład których wchodzi m.in.:

- możliwa do uzyskania odległość osi a ,
- konieczność stosowania dodatkowych rolek prowadzących i napinających,
- wymagana siła napięcia wstępnego ciągu F_{nw} , co przekłada się na wartość sił obciążających wały F_{ow} . Wielkość ta ma bezpośredni wpływ na ich geometrię, a także na postać i rozmiar stosowanych węzłów łożyskowych,
- eksploatacyjne, w skład których wchodzi m.in.:
 - wartość przenoszanej mocy użytecznej P_u ,
 - trwałość godzinowa L_h ,
 - zdolność do przenoszenia chwilowych przeciążeń,
 - zdolność do tłumienia drgań.

Biorąc pod uwagę charakterystykę pracy przekładni cięgnowej, wybór odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego zależy głównie od oczekiwanych cech funkcjonalnych oraz możliwości zabudowy, a w szczególności dostępnej przestrzeni. Porównując wybrane rodzaje przekładni mechanicznych, w aspekcie zazwyczaj osiągniętych wartości parametrów eksploatacyjnych, można zauważyć, że przekładnie cięgnowe stanowią dobrą alternatywę dla przekładni zębatych i ciernych, zwłaszcza w zakresie mniejszych wartości mocy użytecznych P_u przenoszonych przez te mechanizmy, a także niższych wartości przełożeń i (Tab. 1).

Tab. 1. Wartości przeciętne charakterystycznych parametrów użytkowych wybranych rodzajów przekładni mechanicznych (opracowano na podstawie [1, 3, 5-7])

Rodzaj przekładni	Możliwe do zrealizowania przełożenia i [-]		Maksymalna moc użyteczna P_u [kW]		Sprawność η_p [%]
	średnio	maksymalnie	średnio	maksymalnie	średnio
Pasowa z pasem płaskim	1 ÷ 6	10	150	2500	98
Pasowa z pasem klinowym	1 ÷ 8	15	100	1500	92 ÷ 96
Pasowa z pasem zębatym	1 ÷ 8	12	500	1200	99
Pasowa z pasem okrągłym	1*	**	1	5	**
Łańcuchowa	1 ÷ 6	10	200	3500	97 ÷ 98
Zębata walcowa o stałych osiach	1 ÷ 8	16	3000	60000	98 ÷ 99
Zębata ślimakowa	5 ÷ 60	300	200	1000	55 ÷ 96
Cierna	1 ÷ 6	10	25	300	90 ÷ 98

*pasy zwyczajowo stosowane w układach przenośnikowych, z przełożeniem $i = 1$, **parametry nie podawane przez producentów pasów, zależne od sposobu montażu m.in. od napięcia wstępnego

Spśród przekładni cięgnowych, szczególną rolę w budowie maszyn pełnią przekładnie pasowe, przez co są powszechnie stosowane. Oprócz niewątpliwiej zalety, dotyczącej możliwości przenoszenia momentu obrotowego na względnie duże odległości, charakteryzują się dodatkowymi cechami, takimi jak:

- cichobieżność,
- dobra płynność ruchu i zdolność do łagodzenia zmian obciążenia, szczególnie w warunkach wahań wartości momentu obrotowego,
- zdolność do tłumienia drgań skrętnych, które mogą występować na wale wyjściowym i wejściowym przekładni,

- stosunkowo prosta i tania konstrukcja, szczególnie w porównaniu z przekładniami zębatymi, co wynika głównie z faktu, że przekładnie takie pracują bez smarowania. W wyniku tego, nie ma konieczności zadbania o odpowiednie zabudowanie i izolację od otoczenia elementów roboczych przekładni,
- możliwość przenoszenia ruchu obrotowego również w przypadku gdy osie wałów nie są równoległe, a nawet gdy nie leżą w jednej płaszczyźnie,
- mała wrażliwość na błędy wzajemnego rozstawienia osi wałów (dotyczy to zarówno odchyłek ich równoległości jak i zmiany odległości pomiędzy nimi),
- możliwość uzyskiwania zmiennych przełożeń (przekładnie wariatorowe, nierównobieżne).

Przekładnie cięgnowe pasowe, charakteryzują się również pewnymi wadami, do których zaliczyć można:

- obciążenie wałów, na których zamontowane są koła pasowe, siłą o dużej wartości,
- brak stałości przełożenia w wyniku nieuniknionego poślizgu pasa względem kół pasowych,
- niższa sprawność niż przekładnie zębate i łańcuchowe, ze względu na poślizg cięgna,
- niska odporność na oddziaływanie chemikaliów, zanieczyszczeń oraz podwyższonej wartości temperatury otoczenia.

Pomimo tych wad, przekładnie cięgnowe pasowe są powszechnie stosowane w technice napędowej maszyn i urządzeń, co skutkuje nieustającymi pracami rozwojowymi, zarówno w dziedzinie kół pasowych jak i pasów [4]. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się przekładnie cięgnowe pasowe z pasami płaskimi, klinowymi i okrągłymi. Wynika to z ich charakterystycznych cech eksploatacyjnych, takich jak:

- naturalna zdolność do tłumienia drgań skrętnych,
- zdolność do przenoszenia i łagodzenia chwilowych przeciążeń, w postaci skokowych zmian wartości momentu obrotowego.

Dzięki tym właściwościom przekładnie te świetnie sprawdzają się w urządzeniach pracujących w warunkach chwilowych przeciążeń i udarowego obciążenia, ponieważ nierównomierne warunki pracy odbiornika nie wywołują gwałtownych zmian obciążenia źródła napędu.

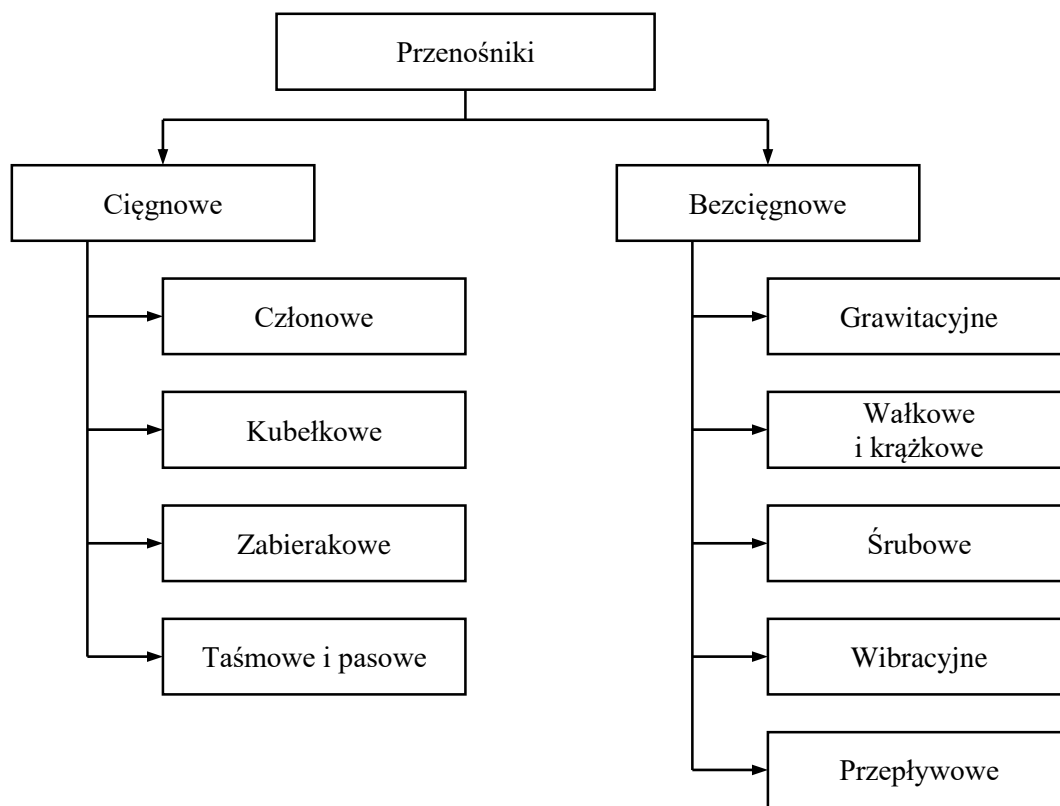
Analizując przedstawione w tabeli 1 parametry, na szczególną uwagę badacza zasługują przekładnie cięgnowe z pasem okrągłym. Wynika to z faktu, że dostępne w literaturze informacje na temat parametrów funkcjonalnych przez nie osiągniętych są bardzo ograniczone. Stwarza to ogromne pole do dalszych badań nad tymi rodzajami przekładni i przenośników.

1.1.2. Przenośniki pasowe

Urządzenia transportujące stanowią niezwykle popularną grupę maszyn, z powodu praktycznie nieograniczonych potrzeb transportowania wszelkiego rodzaju: surowców, półproduktów i gotowych produktów, głównie w obszarze linii produkcyjnych. Wśród urządzeń techniki transportowej szczególną rolę odgrywają przenośniki. Są to urządzenia transportu bliskiego, pracujące w sposób ciągły, służące do stałego odbierania i dostarczania przenoszonego materiału. Urządzenia te stosuje się głównie tam, gdzie drogi transportu bliskiego są geometrycznie ustalone i zgodne z przyjętym procesem technologicznym, bądź z planowanymi czynnościami magazynowymi lub manewrowymi [8].

Ogólna klasyfikacja przenośników stosowanych w technice transportowej, może być dokonana na podstawie cech konstrukcyjnych elementów roboczych przenośnika (Rys. 4). Rodzaj stosowanego przenośnika, dostosowany jest do charakterystyki transportowanego ładunku, na którą składa się wiele cech fizycznych, a przede wszystkim:

- kształt,
- konsystencja,
- jednostkowa masa usypowa,
- naturalny kąt zsypu,
- maksymalna wielkość geometryczna pojedynczego elementu,
- granulacja lub ziarnistość dla przypadku materiałów sypkich i granulowanych.



Rys. 4. Klasyfikacja przenośników pasowych (opracowano na podstawie [2, 8])

Szczególne miejsce w klasyfikacji przenośników zajmują przenośniki cięgnowe, a w szczególności rozwiązania taśmowe i pasowe. Mechanizmy te w przykładowym, jednym z najprostszych rozwiązań konstrukcyjnych (Rys. 5), charakteryzują się tym, że koło napędowe (1) o średnicy efektywnej d_1 obracające się z prędkością obrotową n_1 , połączone jest z kołem napinającym (2) o średnicy d_2 obracającym się z prędkością obrotową n_2 , za pomocą cięgna (3) w postaci: taśmy, pasa lub zestawu pasów. W przypadku przenośników, w odróżnieniu od przekładni pasowych, zazwyczaj średnice d_1 oraz d_2 , a co za tym idzie prędkości obrotowe n_1 oraz n_2 przyjmują taką samą wartość. Górna powierzchnia cięgna odpowiada za przeniesienie ładunku (4), w kierunku zgodnym z kierunkiem wektora prędkości liniowej cięgna v . W zależności od długości przenośnika, charakterystyki materiału cięgna oraz cech przenoszonego materiału, cięgno może być podparte na odcinku pomiędzy kołami (1 i 2) za pomocą swobodnie obracających się krążników (5).

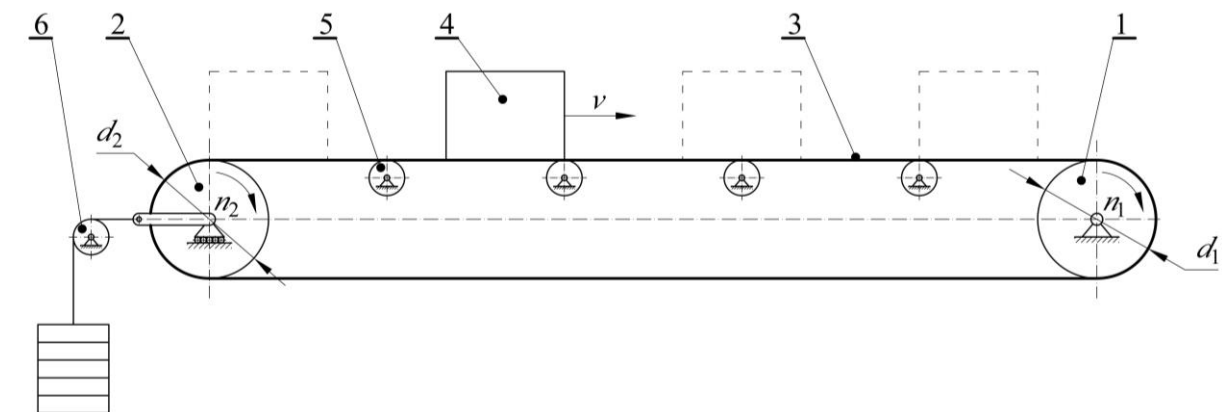
W celu uzyskania właściwych parametrów pracy takiego układu, czyli osiągnięcia wystarczających sił tarcia pomiędzy kołami (1 i 2), a ciągnem (3) lub zminimalizowania jego ugięcia zachodzącego pod wpływem obciążenia pionowego pochodzącego od ładunku (4), często w takich rozwiązaniach stosuje się grawitacyjny układ napinający (6), wywołujący ciągłe, niezmiennie naprężenie wstępne pasów lub taśm.

Przenośniki taśmowe i pasowe charakteryzują się wieloma zaletami w porównaniu do pozostałych rodzajów przenośników, m.in.:

- prostotą konstrukcji,
- względnie dużą wydajnością,
- niewielkimi kosztami eksploatacji.

Cechy te powodują, że są one powszechnie i szeroko stosowane do transportu głównie:

- materiałów sypkich i granulowanych o jednakowych lub różnych frakcjach (np. cukier na linii pakującej w cukrowni lub urobek w kopalni),
- drobnicy, czyli elementów o względnie niewielkich wymiarach geometrycznych i powtarzalnym kształcie, w postaci: surowców, półproduktów lub gotowych produktów, a także całych opakowań (np. wafli lub gotowych ciasteczek na linii produkcyjnej, kartonów z produktami na liniach pakujących w zakładach produkcyjnych itd.).



Rys. 5. Schemat funkcjonalny przenośnika pasowego: 1 – koło czynne (napędowe), 2 – koło bierne (napędzane, napinające), 3 – ciągnie (pas lub zespół pasów), 4 – transportowany ładunek, 5 – rolka podporowa (krążnik), 6 – układ napinający ciągnie

Ze względu na różnorodne wymagania funkcjonalne towarzyszące zastosowaniom przenośników pasowych i taśmowych w przemyśle, ich rozwiązania konstrukcyjne są bardzo zróżnicowane. Dotyczy to szczególnie rodzajów pasów i taśm. W związku z tym bardzo trudnym jest sklasyfikowanie i znormalizowanie rodzajów przenośników, w taki sposób jak np. przekładni cięgnowych (Rys. 3).

1.1.3. Okrągłe pasy napędowe i transportujące

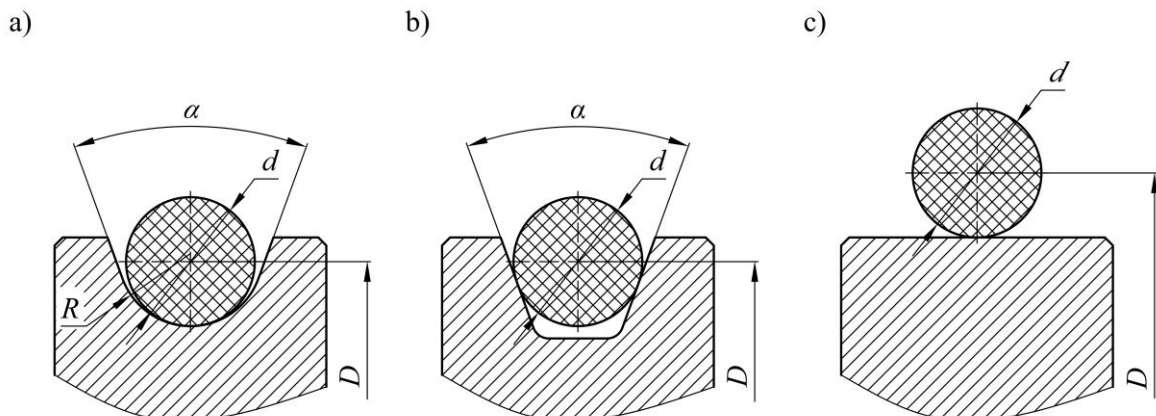
Zarówno w przypadku przekładni jak i przenośników pasowych, na szczególną uwagę zasługują rozwiązania konstrukcyjne mechanizmów z pasem okrągłym, który współpracuje ciernie z kołami pasowymi lub rolkami. Zastosowanie cięgna tego typu, przynosi wiele korzyści względem pasów klinowych i płaskich, w szczególności pozwala na uproszczenie rozwiązania konstrukcyjnego układów napędowych

i transportujących. Dotyczy to szczególnie rozwiązań, gdy wały na których osadzone są współpracujące koła, nie mogą być równoległe względem siebie. Ze względu na osiowosymetryczność, pas okrągły nie jest wrażliwy na zmianę płaszczyzny położenia kolejnych kół pasowych. Wynika to z tego, że może on być obrócony dookoła swojej osi symetrii, w dowolny sposób względem współpracujących powierzchni na kołach pasowych. Właściwość ta jest często wykorzystywana w przemyśle, szczególnie w układach napędowych przenośników pasowych, w których nie ma miejsca na zastosowanie układu napędowego w bezpośrednim otoczeniu elementów napędzanych, czyli np. rolek transportujących (Rys. 6).



Rys. 6. Przykład przekładni pasowej z pasem okrągłym, ilustrujący łatwość zmiany płaszczyzny, w której umieszczone są kolejne napędzane koła [9]

Pas okrągły współpracuje ciernie z kołem pasowym lub rolką w swoisty sposób, ponieważ geometrie wchodzące w kontakt, nie są dwiema odpowiadającymi sobie płaszczyznami (Rys. 7).



Rys. 7. Współpraca pasa o przekroju kołowym z typowymi przeznaczonymi dla nich kołami pasowymi a) koło z rowkiem zaokrąglonym, b) koło z rowkiem trapezowym (klinowym), c) koło gładkie

Najczęściej spotykane rodzaje kół pasowych (Rys. 7), współpracujące z tymi pasami to:

- koła z rowkiem o zaokrąglonym zarysie dna (Rys. 7a). Rozwiązanie to jest powszechnie stosowane zarówno w przekładniach jak i w przenośnikach. Współcześnie, charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest fakt, że promień zaokrąglenia dna rowka R względem średnicy pasa d charakteryzuje się następującą zależnością [10-13]:

$$R > \frac{1}{2} \cdot d, \quad (1.5)$$

co oznacza, że współpraca cierna pasa z rowkiem koła pasowego zachodzi punktowo, w obszarze dna rowka, przy założeniu doskonałej sztywności materiału pasa i koła. Zwyczajowo, we wcześniej stosowanych rozwiązaniach, zależność ta przyjmowała wartość:

$$R = \frac{1}{2} \cdot d, \quad (1.6)$$

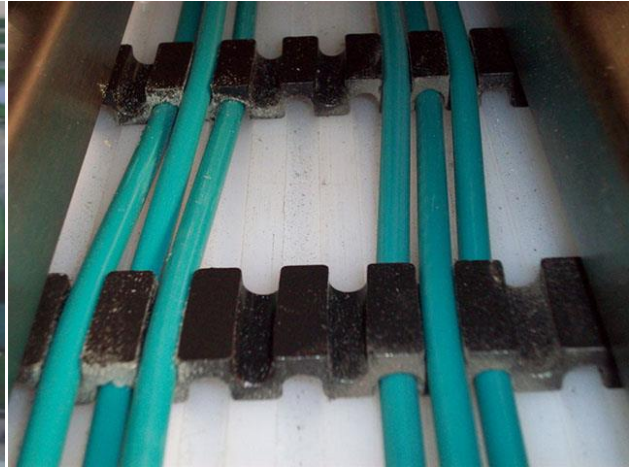
co oznaczało współpracę pasa z rowkiem koła na połowie powierzchni tworzącej pasa [3, 7, 14]. Taka geometria jednak, może powodować trudności ze zsuwaniem się pasa z koła, w fazie pracy związanej z zejściem z koła pasowego. Niektóre rowki kół pasowych z zaokrąglonym dnem charakteryzują się również obecnością płaskich powierzchni w górnej części rowka, pochylonych względem płaszczyzny symetrii koła pasowego, co ułatwia wsuwanie się pasa na koło i jego prowadzenie. Kąt α rozwarcia tej pochylonej powierzchni wynosi zazwyczaj od 40° do 60° [11, 12]. Rozwiązanie rowka z zaokrąglonym zarysem dna jest powszechnie spotykane zarówno w przypadku układów napędowych jak i transportujących,

- koła z rowkiem o przekroju trapezowym (Rys. 7b), z ewentualnymi zaokrągleniami wewnętrznych naroży na spodzie rowka. Rozwiązanie to charakteryzuje się wymiarami zapewniającymi cierną współpracę pomiędzy pasem a kołem w dwóch punktach, leżących na powierzchni tworzącej pasa. W takim przypadku kąt rozwarcia rowka zawiera się w granicach od nieco ponad 30° (co jest charakterystyczne dla pasów klinowych [3, 10, 14]) do 60° [11, 12]. Rozwiązanie to charakteryzuje się jednak możliwym brakiem stałości przełożenia kinematycznego (1.2), w przypadku zmiany naciągu pasa. Wynika to z faktu, że elastyczne cięgno pod wpływem np. zwiększania siły napięcia wstępnego F_{nw} ulega odkształceniu wzdłużnemu i poprzecznemu (zwiększenie długości i zmniejszenie średnicy), co może powodować głębsze osiadanie pasa w rowku koła pasowego. Zjawisko to powoduje zmianę średnicy skutecznej D , przez co zmianie ulega przełożenie. W związku z tym, rozwiązanie to jest stosowane raczej w układach transportujących, zazwyczaj charakteryzujących się przełożeniem równym jedności, dzięki czemu zjawisko to nie ma wpływu na funkcjonowanie mechanizmu,
- rolki o płaskiej powierzchni tworzącej. Mechanizm taki, charakteryzuje się punktową współpracą pasa z kołem (Rys. 7c i 8a). Rozwiązanie to jest zazwyczaj stosowane w przenośnikach pasowych. Jego ważną wadą jest brak pozycjonowania poosiowego pasa względem rolki (krążnika). W związku z tym, w takich przenośnikach często stosowane są dodatkowe prowadnice, współpracująco ślizgowo z pasem, których głównym zadaniem jest odpowiednie ustawienie poprzeczne pasa względem rolki (Rys. 8b).

a)



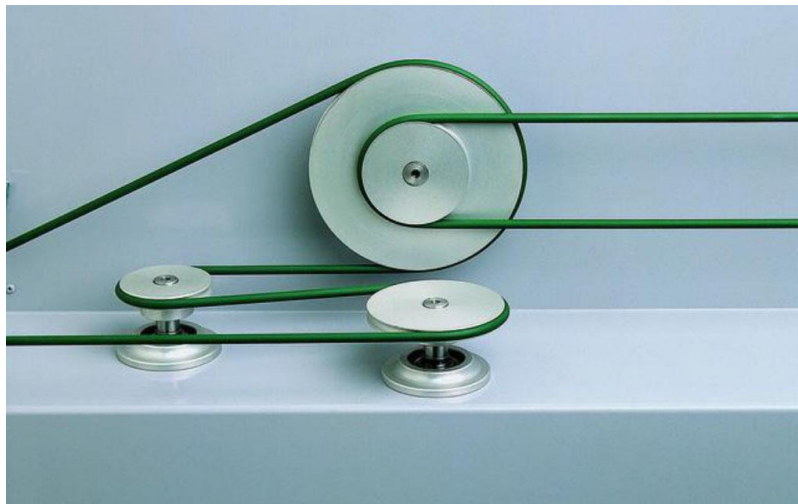
b)



Rys. 8. Rozwiązania przenośników pasowych z pasami o przekroju kołowym: a) współpraca pasa o przekroju kołowym z gładkim krążnikiem, b) wkładki ustalające wspomagające właściwe prowadzenie pasa na gładkich rolkach [9]

W odróżnieniu od klasycznej klasyfikacji rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących pasy okrągłe, (przenośniki i przekładnie), współcześnie te mechanizmy mogą pełnić jedną z trzech funkcji:

- jedynie napędową, w przypadku przekładni pasowych służących wyłącznie do przenoszenia momentu obrotowego (Rys. 9). Należy jednak pamiętać o tym, że ze względu na względnie niewielką powierzchnię kontaktu ciernego takich pasów z kołami, przekładnie te zazwyczaj przenoszą niewielkie momenty obrotowe, co skutkuje również względnie niewielkimi uzyskiwanymi przełożeniami. Dodatkowo, wartość parametrów mechanicznych takiego napędu (między innymi sprawność czy przenoszony moment obrotowy) bardzo mocno zależą od sposobu montażu przekładni (głównie od siły napięcia wstępnego pasa F_{nw}) [3, 14],



Rys. 9. Przekładnia pasowa z pasem okrągłym, służąca do przekazywania niewielkiej mocy, w przypadku braku możliwości równoległego usytuowania osi wałów [15]

- tylko przenośnikową, w przypadku gdy ciągnio odpowiada jedynie za transportowanie elementów (Rys. 10). W tym przypadku, pasy okrągłe stosowane są głównie w przenośnikach pasowych wielorzędowych, charakteryzujących się zastosowaniem wielu pasów rozmieszczonych względem siebie w określonej podziałce. Taka konstrukcja umożliwia transportowanie lekkich produktów,

o minimalnym wymiarze gabarytowym, który jest większy od odległości pomiędzy pasami. Przenośniki tego typu są stosowane szczególnie chętnie w przemyśle spożywczym do transportowania produktów, z jednoczesnym usunięciem niepotrzebnych frakcji, np. transport wafli podczas którego odłamki i kruszyny spadają do przestrzeni pod podajnikiem. Taka funkcjonalność umożliwia również separację i przesiewanie produktów ze względu na rozmiar (np. separacja orzechów poprzez odsiewanie produktów o mniejszym wymiarze geometrycznym [10]). Znane są również rozwiązania przenośników z pasem okrągłym, w których charakterystyczny przekrój okrągły pozwala uzyskać dodatkowe funkcjonalności przenośnika, np. wywołanie obrotu produktu na linii transportującej w wyniku zróżnicowania prędkości liniowych poszczególnych ciągów, dzięki zastosowaniu stożkowych kół napędowych (Rys. 11),



Rys. 10. Przenośnik pasowy zastosowany do transportu lekkich produktów w przemyśle spożywczym [16]

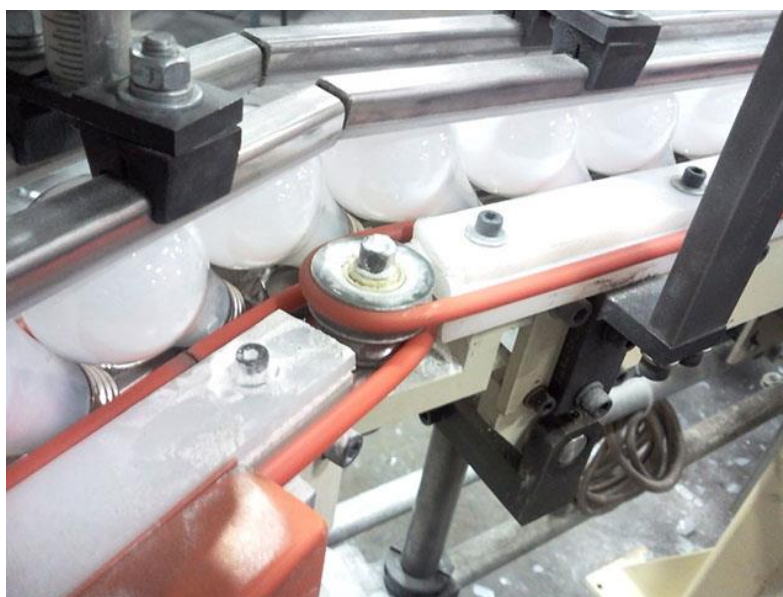


Rys. 11. Przenośnik z pasem okrągłym z funkcjonalnością obracania transportowanych produktów, dzięki zróżnicowaniu prędkości liniowych poszczególnych ciągów [17]

- hybrydową – transportująco-napędową (Rys. 12 i 13), realizowaną w przypadku gdy ciągnie pas (taśmę) odpowiada zarówno za transportowanie materiału (produktów) oraz za przekazywanie napędu do kolejnych odbiorników (np. do dalszych sekcji przenośnika). W praktyce przemysłowej rozwiązanie to jest najczęściej stosowane, ponieważ funkcjonalność transportowa oraz napędowa jest realizowana jednocześnie, co pozwala uprościć konstrukcję wielu urządzeń [4].



Rys. 12. Układ napędowy z pasem okrągłym, pełniącym jednocześnie funkcję transportującą i napędową na przykładzie linii transportu sera [18]



Rys. 13. Układ napędowy z pasem okrągłym, pełniącym jednocześnie funkcję transportującą i napędową na przykładzie linii produkcyjnej żarówek [9]

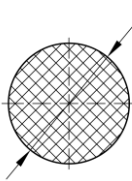
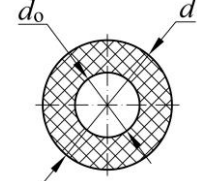
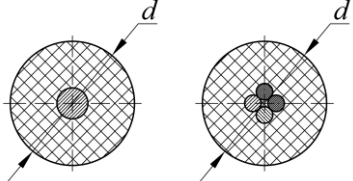


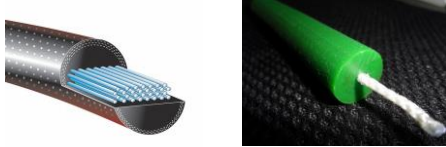
Tuż obok sposobu współpracy pasa z kołem, a także rodzaju funkcji realizowanej przez mechanizm z pasem okrągłym, niezwykle ważnym zagadnieniem jest rodzaj samego cięgna. W technice rozwiązań mechanizmów napędowych i urządzeń transportujących znanych jest wiele rodzajów pasów okrągłych. Klasyfikację tych elementów można przeprowadzić ze względu na postać geometryczną przekroju poprzecznego cięgna, z uwzględnieniem materiału, z którego jest ono wykonane. Z tego punktu widzenia, w układach napędowych i transportujących stosowane są:

- cięgna linowe, jedno- i wielowłóki, o różnej liczbie splotów i różnym kierunku zwijania,
- cięgna monolityczne o przekroju kołowym, wykonane z tworzyw sztucznych syntetycznych lub materiałów naturalnych (gumy, skóry itp.),
- cięgna monolityczne o przekroju pierścieniowym, wykonane z tworzyw sztucznych syntetycznych lub materiałów naturalnych (gumy, skóry itp.),
- cięgna kompozytowe o przekroju kołowym, w których osnowa wykonana jest z tworzyw sztucznych syntetycznych lub materiałów naturalnych (gumy, skóry itp.), a wzmocnienie w postaci linki lub włókien z materiałów metalicznych lub tworzyw sztucznych innych niż materiał osnowy (najczęściej charakteryzujących się wyższą wytrzymałością).

Cięgna linowe mogą być zwijane z: drutów stalowych, drutów z metali nieżelaznych oraz linek z materiałów niemetalicznych: głównie polimerów syntetycznych lub naturalnych [3]. Z powodu tego, że cięgna linowe nie mają gładkiej powierzchni, nie są stosowane w aplikacjach, gdzie występują duże prędkości obrotowe, ze względu na możliwe wprowadzanie znacznych nierównomierności przenoszonego momentu obrotowego, skutkujących powstawaniem drgań. Dodatkowo, stosowanie cięgien linowych wykonanych z materiałów metalicznych powoduje, że niemożliwym staje się zastosowanie kół i rolek wykonanych z tworzyw sztucznych lub stopów aluminium, ze względu na wysoce prawdopodobne niszczenie ich powierzchni przez bardziej wytrzymały materiał liny. Z drugiej jednak strony ich wysoka względna wytrzymałość na rozciąganie powoduje, że nadają się one do odpowiedzialnych zastosowań, w których przenoszone są względnie duże moce. Przykładami zastosowania mechanizmów z cięgnem linowym są: układy napędowe dźwigów towarowych i osobowych, przenośniki zabierakowe lub wciągarki [3].

Wady cięgien linowych powodują, że nie są one powszechnie stosowane w układach napędowych i transportujących maszyn przemysłowych. Znacznie bardziej rozpowszechnione są pozostałe rodzaje cięgien, wykonywane z tworzyw sztucznych i materiałów kompozytowych (Tab. 2).

Tab. 2. Najczęściej stosowane geometrie okrągłych pasów cięgowych (opracowano na podstawie [10, 11, 19])

Rodzaj pasa okrągłego	a) pas monolityczny o przekroju kołowym	b) pas monolityczny o przekroju pierścieniowym	c) pas kompozytowy wzmocniony włóknem (włóknami) lub linką
Kształt przekroju poprzecznego			
Przykład realizacji			

Cięgna monolityczne o przekroju kołowym (Tab. 2a) wykonane z tworzyw sztucznych lub materiałów naturalnych są jednymi z najczęściej stosowanych w budowie układów napędowych i przenośników. Charakteryzują się tym, że posiadają jednorodną strukturę w całym przekroju poprzecznym i na całej długości. Wykonanie ich z materiałów o dużej elastyczności zapewnia możliwość pracy nawet w przekładniach o niewielkich średnicach efektywnych rolek lub kół pasowych, co jest związane z dobrą wytrzymałością takiego cięgna na cykliczne przeginanie.

Cięgna monolityczne o przekroju pierścieniowym (Tab. 2b) charakteryzują się tym, że posiadają w przekroju poprzecznym centralnie umieszczony otwór o średnicy d_0 . Dzięki temu, w porównaniu do cięgien monolitycznych o przekroju kołowym, pasy te charakteryzują się:

- mniejszym zużyciem materiału do produkcji, przy nieznacznie mniejszej wytrzymałości na rozciąganie, co wpływa na niższe dopuszczalne obciążenie przypadające na pas przy wykorzystaniu w przenośniku pasowym (w porównaniu do pasów monolitycznych) [6, 7, 10-13],

- mniejszą masą, co w przypadku przekładni pasowych wpływa bezpośrednio na stan naprężenia w materiale cięga, ze względu na siły odśrodkowe [3],
- dodatkowymi możliwościami w zakresie ich łączenia, ze względu na obecność otworu, który może być wykorzystany np. do umieszczenia w nim mechanicznych elementów złącznych.

Cięgna kompozytowe wzmocnione (Tab. 2c) są stosowane w aplikacjach, w których układy napędowe przenoszą wyższe wartości mocy. Wzmocnienie cięga polega zazwyczaj na zastosowaniu włókien lub linek z tworzyw sztucznych syntetycznych (np. poliestru lub aramidu), umieszczonych w osnowie z bazowego materiału. W najbardziej wymagających aplikacjach stosuje się wzmocnienie linkami stalowymi. Dzięki zastosowaniu wzmocnienia osnowy pasa, cięgna te mogą być napinane z większymi siłami, dzięki czemu są zdolne do przenoszenia większych momentów obrotowych (ze względu na wyższą wartość momentu tarcia pomiędzy pasem, a kołem pasowym). W zastosowaniu transportowym natomiast, możliwe jest ich obciążenie ładunkiem o większej masie.

Pasy monolityczne o przekroju kołowym lub pierścieniowym są obecne w ofercie wielu renomowanych producentów pasów napędowych i przenośnikowych, przy czym należy zauważyć, że pasy monolityczne o przekroju kołowym są zdecydowanie najbardziej popularne (Tab. 3).

Tab. 3. Pasy okrągłe dostępne w ofercie wiodących producentów rozwiązań dla pasowych układów napędowych i transportujących (opracowano na podstawie [6, 7, 10-13, 18, 19])

Producent	Pas monolityczny o przekroju kołowym	Pas monolityczny o przekroju pierścieniowym	Pas kompozytowy wzmocniony
Bando	+	–	–
BEHAbelt	+	+	+
Chiorino	+	–	–
Fenner Drives	+	+	+
Gates	+	–	+
Mafdel	+	+	+
NSW	+	–	+
Volta	+	+	+

Pasy te, w katalogach producentów, charakteryzowane są za pomocą szeregu parametrów funkcjonalnych (Tab. 4), w skład których wchodzi m.in.:

- rodzaju materiału, z którego wykonany jest pas,
- twardości materiału, z którego wykonany jest pas,
- średnicy zewnętrznej d [mm],
- średnicy otworu w pasie d_o [mm],
- pola przekroju poprzecznego A [mm²],
- minimalnej zalecanej średnicy rolki D_{\min} [mm],
- maksymalnej siły rozciągającej przenoszonej przez pas F_{\max} [N],
- wymaganej siły napięcia wstępnego F_{nw} [N] lub względnego napięcia wstępnego p [%],

- współczynnika tarcia μ [-] w kontakcie z wybranymi materiałami, a w szczególności tymi, z których wykonywane są rolki.

Tab. 4. Przykładowe wartości parametrów użytkowych pasów okrągłych BEHAbelt (opracowano na podstawie [11])

Cecha	Oznaczenie	Pas monolityczny o przekroju kołowym	Pas monolityczny o przekroju pierścieniowym	Pas kompozytowy wzmocniony
Materiał	-	TPU, TPE	TPU	TPU, TPE
Twardość	[°Sh A] [°Sh D]	60-90°Sh A (TPU) 40-55°Sh D (TPE)	60-90°Sh A (TPU)	80-95°Sh A (TPU) 55-63°Sh D (TPE)
Rodzaj wzmocnienia	-	-	-	linka z włókien poliestrowych lub aramidowych; linka stalowa
Średnica zewnętrzna	d [mm]	2-20	4,8-15	5-20
Średnica otworu	d_o [mm]	-	1,8-5,2	-
Minimalna średnica rolki	D_{\min} [mm]	10-220	30-100	55-400*
Siła maksymalna	F_{\max} [N]	10-1500	40-700	70-2250**
Wymagane napięcie wstępne	p [%]	3-10	4-8	0,5-2

*najwyższe wartości dla linek stalowych, **w zależności od rodzaju połączenia pasa (z wykonanym połączeniem wzmocnienia lub bez)

Parametry, które można odnaleźć w katalogach producentów pasów, odgrywają kluczową rolę w procedurze doboru pasów do układów napędowych i transportujących. Materiały, z których wykonywane są powszechnie stosowane pasy o przekroju kołowym, to głównie elastomery termoplastyczne na bazie poliuretanu (TPU) lub poliestru (TPE). Cechą charakterystyczną tych materiałów jest możliwość ich odwracalnej obróbki termicznej, w związku z czym, materiały te często określa się mianem termozgrzewalnych, co ma duże znaczenie w aspekcie możliwości ich wielokrotnego przetwórstwa podczas procesu produkcyjnego pasów [20]. Dodatkowo, oprócz rodzaju materiału, w tabelach produktów (dotyczących rodzajów oferowanych pasów) podawana zazwyczaj jest jego twardość w skali Shore'a, określana zgodnie z międzynarodowymi normami [10, 11, 13, 21].

Jednym z najważniejszych użytkowych parametrów jest średnica zewnętrzna pasa d , której wartość zawiera się zazwyczaj w przedziale od 2 mm do 20 mm, przy czym jej gradacja wynosi zazwyczaj 1 mm. Dodatkowo, w przypadku pasów o przekroju pierścieniowym, oznaczana jest średnica otworu d_o , której wartość jest istotna m. in. ze względu na przewidywaną technologię łączenia pasa.

Bardzo ważnym parametrem, związanym bezpośrednio z konstrukcją przekładni pasowej lub przenośnika, jest minimalna średnica rolki D_{\min} jaką można zastosować do pasa o założonej średnicy d . Czym mniejsza jest średnica rolki D , tym większe są naprężenia zginające pas [3], w związku z czym, dla każdej średnicy pasa d powszechnie określa się minimalną wartość tego wymiaru.

Pasy okrągłe wykonane z tworzyw sztucznych, często scharakteryzowane są również za pomocą maksymalnej siły F_{\max} , przykładowej poosiowo, którą można obciążyć takie cięgno. Jak wynika z porównania pasów o przekroju kołowym lub pierścieniowym i strukturze monolitycznej, z pasami kompozytowymi

(wzmocnionymi) wartość tej siły wzrasta wraz ze zwiększeniem pola przekroju poprzecznego oraz w wyniku zastosowania wzmocnienia struktury pasa za pomocą linki lub włókna.

Aby pasy okrągłe mogły we właściwy sposób pracować w układach napędowych i transportujących muszą być wstępnie napięte. Działanie to zapewnia odpowiednią siłę docisku cięgna do powierzchni koła pasowego lub rolki, dzięki czemu uzyskane zostaje odpowiednie oddziaływanie cierne pomiędzy kołem a pasem, które jest wymagane do przeniesienia założonego momentu obrotowego. Napięcie wstępne podawane jest zazwyczaj na dwa sposoby:

- jako procentowa wartość względna p , odniesiona do długości cięgna, określająca wymaganą zmianę całkowitej długości obwodu pasa L_0 po jego zamontowaniu w układzie rolek (kół pasowych) przenośnika lub przekładni,
- jako wartość siły napięcia F_{nw} , która jest wymagana, aby uzyskać jego odpowiedni naciąg.

Wartość napięcia wstępnego cięgna podawana jest zazwyczaj w postaci przedziału, przy czym wyższe wartości dotyczą większego przewidywanego obciążenia mechanizmu, a także materiałów współpracującej pary powierzchni (kół i pasa), które charakteryzują się mniejszym współczynnikiem tarcia.

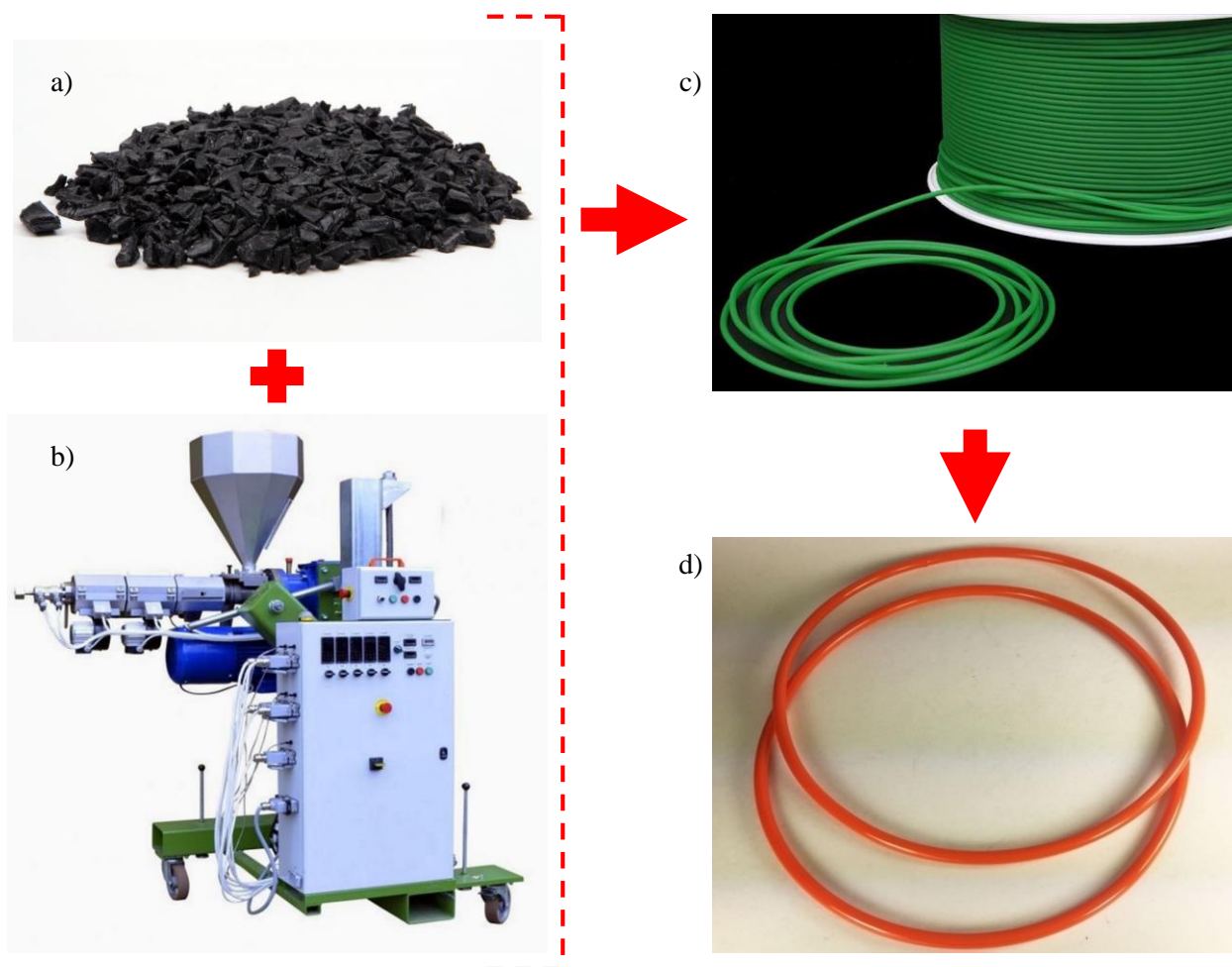
Informacja na temat wartości współczynnika tarcia, podawana przez producenta pasów jest bardzo ważna, ponieważ wpływa to bezpośrednio na moment obrotowy przenoszony przez taki mechanizm. Wartość tego parametru zależy przede wszystkim od materiału z którego wykonany jest pas, a w szczególności jego twardości i struktury powierzchni oraz rodzaju materiału współpracującego z pasem. Wielu producentów, oferuje pasy ciągnowe wykonane z poliestru termoplastycznego (TPE) lub poliuretanu termoplastycznego (TPU), które pozornie mają takie same właściwości fizyczne, ale różnią się w aspekcie struktury powierzchni. W katalogach producentów są one najczęściej opisywane jako *gładkie* i *szorstkie*. Te dwie odmiany pasa różnią się tylko współczynnikiem tarcia, w kontakcie z innymi materiałami. Wpływa to znacząco na warunki współpracy ciernej z kołami lub rolkami. Współczynnik tarcia, podawany jest dla kontaktu pasa z najbardziej popularnymi materiałami, z których wykonywane są rolki: stopów aluminium, stali, stali nierdzewnej i polietylenu [11, 13].

1.2. Bezkońcowe pasy napędowe i transportujące – wymagania i problemy produkcyjne

Proces produkcyjny syntetycznych okrągłych pasów termozgrzewalnych jest złożoną, wielofazową operacją (Rys. 14 i 15). Wynika to faktu, że głównym surowcem do produkcji pasów jest sypkie lub granulowane tworzywo, o ściśle określonym składzie chemicznym (Rys. 14a). Dodatkowym materiałem jest bardzo często półprodukt stanowiący wzmocnienie pasa (włókno lub splot włókien). Oczekiwany produktem natomiast jest pas okrągły (monolityczny o przekroju kołowym albo pierścieniowym lub kompozytowy ze wzmocnieniem), o zamkniętym obwodzie, jednorodnej gładkiej powierzchni na całej długości i ściśle określonych wymiarach geometrycznych (Rys. 14d).

Granulat w pierwszej kolejności jest poddawany przetwórstwu fizyczno-chemicznemu II rodzaju, określanemu jako przetwórstwo wstępne. Jest to grupa operacji polegających na przetwarzaniu materiału polimerowego, w których wiodącą rolę spełniają zjawiska i procesy fizyczne cieplne oraz reologiczne [22-24]. Do metod tych zalicza się między innymi: wtryskiwanie, wytłaczanie, prasowanie, formowanie

próżniowe, odlewanie czy kalandrowanie. Formy wytwarzanych półproduktów zależą od ich oczekiwanego zastosowania. Mogą przyjmować kształty znormalizowane (np. płyty lub pręty) oraz całkowicie dowolne, zależne od geometrii utworzonej formy.



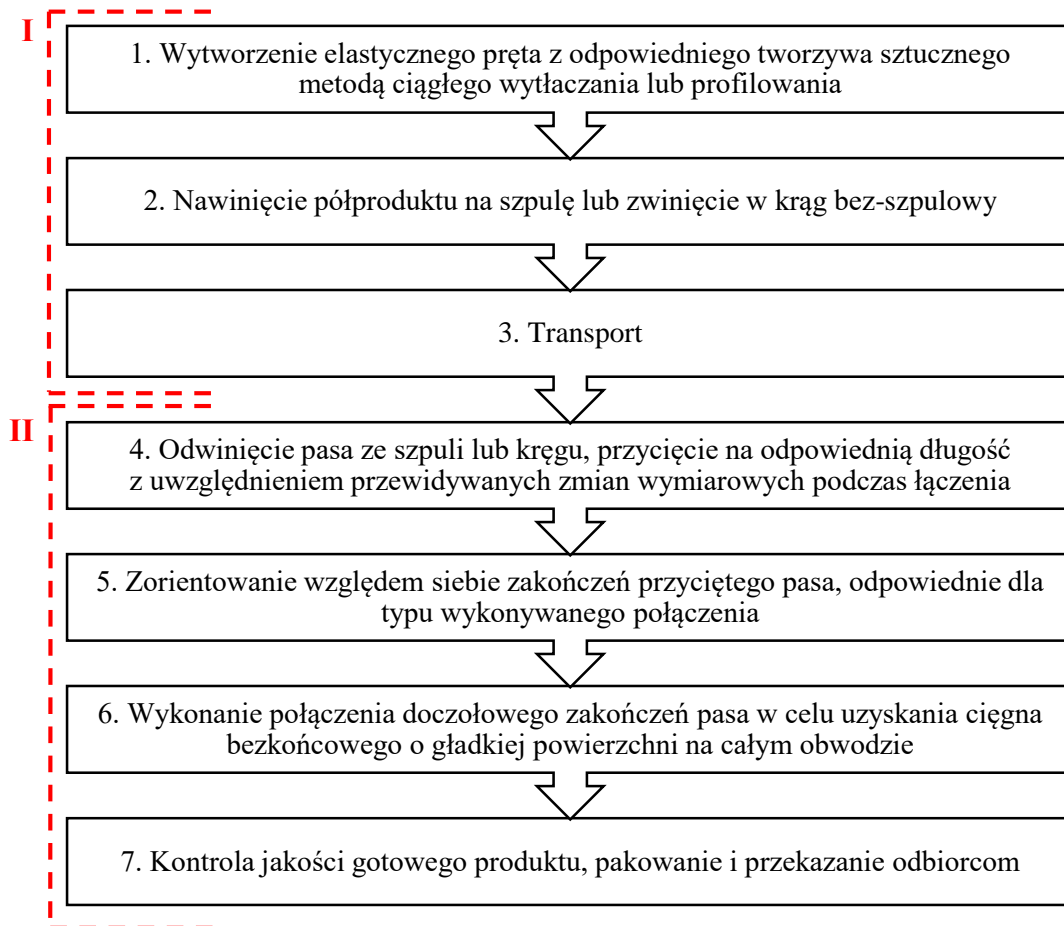
Rys. 14. Idea przebiegu procesu produkcji pasa ciągłego: a) granulat poliuretanowy barwiony na czarno [25], b) wylączarka ślimakowa [26], c) półprodukt w formie pasa poliuretanowego nawiniętego na szpulę [27], d) gotowy produkt w formie pasa ciągłego o zamkniętym obwodzie [27]

W przypadku produkcji pasów ciągłych, odnosi się to do operacji ciągłego wytłaczania lub profilowania na wylączarkach (Rys. 14b i 15:1) [4, 28]. Oba procesy są bardzo podobne do siebie. Wytłaczanie polega na tym, że rozgrzany materiał, który jest uplastyczniany na wylączarkach ślimakowych, jest przetłaczany przez matrycę kształtową, z otworem o odpowiedniej geometrii, która nadaje finalny kształt przekroju poprzecznego pasa. Proces profilowania, również jest wykonywany na wylączarkach ślimakowych, jednakże finalny kształt produktu nadawany jest przez obracające się rolki kształtowe, z rowkami o odpowiedniej geometrii. Funkcjonalnie, proces wytłaczania od profilowania różni się tym, że podczas profilowania niemożliwe jest uzyskiwanie pasów o przekroju pierścieniowym [4].

Gotowe pasy produkowane są z elastycznych prętów walcowych lub cylindrycznych, o średnicach mieszczących się w przedziale od kilku do kilkunastu milimetrów. Cechą charakterystyczną półproduktu otrzymanego w wyniku wytłaczania lub profilowania jest względnie duża długość, przekraczająca kilkadziesiąt metrów. Nie jest to jednak efektywne rozwiązanie, z punktu widzenia możliwości składowania i transportu. Materiał, z którego wykonane są pasy jest elastyczny, posiada w pewnym zakresie tzw. *pamięć*

kształtu oraz określony minimalny dopuszczalny promień gięcia. Z tego względu, w następnej fazie procesu produkcyjnego (Rys. 14c i 15:2), półprodukty są maszynowo nawijane na szpule lub zwijane w rolki bezszpulowe. Cechami charakterystycznymi tak przygotowanych pasów, są:

- długość wynosząca od kilkudziesięciu do kilkuset metrów, określana w ofercie producentów pasów jako wymiar standardowej rolki [10, 11, 13],
- obecność dwóch końców, co powoduje że taki pas nie stanowi zamkniętego obwodu.



Rys. 15. Uproszczony algorytm procesu produkcji pasa ciągłego: I – pierwszy etap procesu produkcyjnego pasa, II – drugi etap procesu produkcyjnego pasa

Obecne realia rynkowe powodują, że zazwyczaj proces produkcji długiego ciągła oraz następujące po nim przygotowanie pasa o zamkniętym obwodzie i ściśle określonej długości, są wykonywane przez różne przedsiębiorstwa. W wyniku tego, konieczność magazynowania i transportu półproduktów pasów ciągłych jest nieodzowna (Rys. 15:3). Takie przygotowanie tego półproduktu ułatwia te czynności.

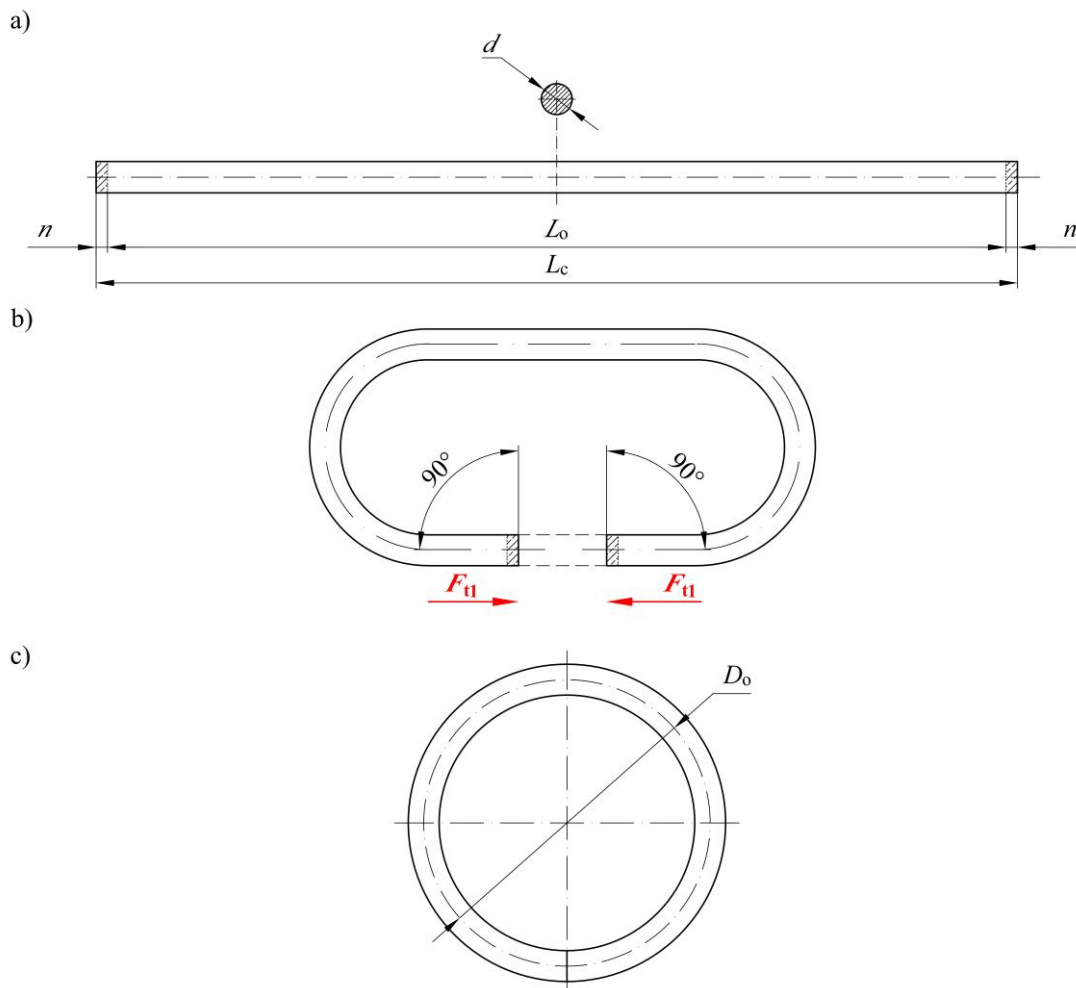
Należy jednak zauważyć, że nawijanie na szpule wpływa na właściwości pasa. Obserwowalnym efektem tych zmian jest zjawisko samoczynnego powrotu do poprzedniego kształtu po jego odwinięciu ze szpuli. Pas w takim przypadku wykazuje naturalną tendencję do powtórnego zwijania się. Wynika to z istnienia swoistej *pamięci kształtu* (co jest dużym uproszczeniem) tego materiału, co wywołane jest relaksacją naprężeń wewnętrznych, podczas składowania w formie zwiniętej o określonym promieniu gięcia.

Dostarczenie półproduktu w formie pasa ciągłego o dużej długości nawiniętego na szpulę lub w kręgi bezszpulowe kończy pierwszy etap procesu produkcyjnego (Rys. 15).

Drugi etap procesu produkcyjnego, realizowany u dystrybutora gotowych pasów ciągnowych, dotyczy jego finalnej obróbki. Ostateczny produkt ma formę pasa ciągnowego o zamkniętym obwodzie i określonej długości. Uzyskany w ten sposób wyrób jest gotowy do zamontowania w układzie napędowym lub przenośnikowym maszyny przemysłowej. Ten etap przetwarzania składa się z kilku następujących po sobie operacji (Rys. 15:4-7).

Pierwszą czynnością, którą należy wykonać, jest odwiniecie pasa ze szpuli, co można wykonać ręcznie lub automatycznie. Podczas tej operacji niezwykle ważnym jest, aby zadbać o to, żeby pas był swobodny, nieskręcony. Zadania tego nie ułatwia naturalna zdolność do samoczynnego zwijania się cięgna. Zależnie od sposobu odwijania konieczne jest jego rozkręcenie, aby podczas wykonywania połączenia był luźny, nienaciągnięty i nienaprężony.

Następnie po tym wykonuje się cięcie pasa do odpowiedniej długości początkowej L_c (Rys. 16a). Podczas tej operacji niezwykle ważnym jest, aby uwzględnić naddatki o długości n z obu stron, na ewentualne straty materiału w kolejnych fazach procesu produkcyjnego – podczas łączenia. Wymagana szerokość tego naddatku zależna jest od sposobu wykonywania połączenia. Po ich uwzględnieniu, długość gotowego produktu powinna być równa zakładanemu wymiarowi końcowemu L_o .



Rys. 16. Pas okrągły przed i po wykonaniu połączenia: a) pas przed połączeniem, b) orientacja zakończeń względem siebie w celu wykonania połączenia, c) pas po złączeniu; d – średnica pasa, n – naddatek na straty materiału podczas wykonania połączenia, L_o – zakładana długość końcowa, L_c – długość początkowa, D_o – średnica pętli utworzona przez zamknięty obwód pasa, F_{t1} – poosiowa siła technologiczna potrzebna do wykonania połączenia

Podczas cięcia pasa ważne jest również, aby płaszczyzna cięcia była skierowana prostopadle do osi symetrii przekroju poprzecznego (Rys. 16b). Zapewnia to poprawny kontakt obu powierzchni zakończeń w dalszej fazie procesu, którą stanowi zorientowanie zakończeń pasa i zbliżenie ich do siebie, pod wpływem działania poosiowej siły technologicznej F_{i1} , której wartość i sposób przyłożenia są zależne od metody przeprowadzania operacji łączenia pasa. Niezwykle ważnym jest zapewnienie odpowiedniej współosiowości zakończeń pasa względem siebie, przed wykonaniem połączenia. Uzyskuje się to najczęściej poprzez ich zbliżanie przy użyciu dodatkowych prowadnic.

Zbliżanie powierzchni czołowych zakończeń pasa do siebie powoduje zamykanie pętli. Zależnie od sposobu przeprowadzania tej operacji, pas może być zawinięty do postaci okręgu, elipsy lub dowolnego kształtu o zamkniętym obwodzie, z zachowaniem minimalnego dopuszczalnego promienia gięcia. Określony jest on najczęściej w kartach charakterystyk materiałowych, poprzez oznaczenie minimalnej średnicy rolki D_{\min} , która może być przez niego opasana [6, 7, 10-13, 18].

Następną czynnością jest wykonanie połączenia do postaci zamkniętego obwodu (Rys. 16c). Sposób przeprowadzenia tej operacji oraz parametry technologiczne tego etapu są kluczowe dla jakości produktu. Połączenie zakończeń pasa można wykonać różnymi metodami, szczególnie uwzględniając technologie zalecane przez producentów cięgna.

Ostatnim etapem tego procesu technologicznego jest odbiór gotowego pasa, po którym następuje kontrola jakości. Jej zakres powinien obejmować między innymi [29]:

- zachowanie odpowiednich wymiarów pasa w obszarze połączenia. Średnica gotowego cięgna w miejscu złączenia, nie może różnić się od średniej wartości dla litego materiału. Zgrubienia tworzywa mogą powstać np.: w wyniku niedokładnego usunięcia wypływki po procesie zgrzewania lub wskutek rozpęczenia pasa przez metalowy element złączny. Przewężenia natomiast mogą wynikać np.: z trwałego odkształcenia materiału, niedokładnego złączenia powierzchni czołowych, czy usunięcia zbyt dużej ilości materiału podczas usuwania wypływki. Tego typu niedoskonałości wymiarowe są niedopuszczalne w gotowym wyrobie. Wynika to z tego, że takie pasy współpracują zazwyczaj z precyzyjnie wykonanymi kołami pasowymi. Odchyłki od pożądaných wymiarów mogą wprowadzać wahania prędkości i momentu obrotowego. Skutkiem jest powstawanie niepożądanych drgań, które powodują dodatkowe, nadmierne naprężenia w przekroju poprzecznym pasa, powodujące jego przyspieszone zużycie [30],
- zachowanie współosiowości zakończeń pasa oraz równoległości powierzchni czołowych. Błędy tego typu powstają najczęściej przez niedokładne zestawienie obu końców pasa i wykonanie połączenia w takiej pozycji. Podobnie jak w przypadku niedokładności wymiarowych obszaru połączenia, wady te dyskwalifikują produkt. Nieprawidłowe wymiary w obszarze połączenia lub niewspółosiowo zestawione cięgno podczas łączenia, wprowadza drgania podczas pracy, przez co może ono ulegać przyspieszonemu zużyciu,
- możliwość wystąpienia niedokładnego połączenia, czyli np. nieobejmującego całego przekroju poprzecznego. Takie nieprawidłowości mogą powstawać przez błąd w mechanizmie łączenia albo w przypadku złego zorientowania zakończeń pasa względem siebie. Cięgno posiadające takie

wady, powinno być odrzucone ze względu na wysoce prawdopodobne niedotrzymywanie założonych parametrów wytrzymałościowych, co wiąże się jego przyspieszonym uszkodzeniem,

- długość obwodu gotowego pasa, która powinna wynosić L_0 , co należy skontrolować po wykonaniu połączenia, mierząc średnicę D_0 utworzonego przez niego okręgu (Rys. 16c). W praktyce przemysłowej, w szczególności dla pasów o względnie dużej długości obwodu, do tego celu wykorzystuje się proste narzędzia pomiarowe, pozwalające na zawinięcie pasa na rolce o określonych wymiarach geometrycznych i zmierzenie długości obwodu za pomocą odpowiednio wyskalowanego liniału (Rys. 17).

Ten etap kończy kluczowe fazy wytwarzania pasa ciągnowego. Gotowy, prawidłowo wykonany wyrób jest przekazywany do finalnego odbiorcy.



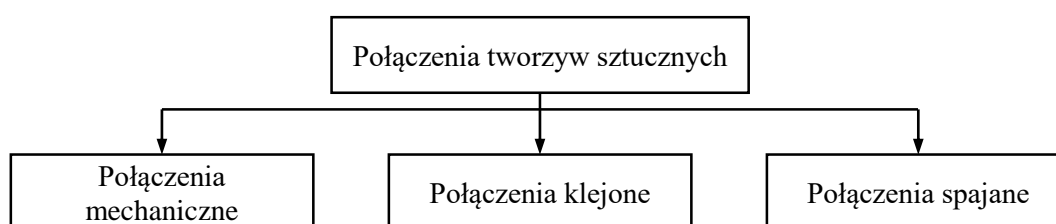
Rys. 17. Pomiar długości pasa o zamkniętym obwodzie za pomocą dedykowanego przymiaru z liniałem prostym [31]

Jak wynika z przeprowadzonej analizy procesu produkcji okrągłych pasów napędowych i transportujących, wykonanie doczołowego połączenia końcówek pasa jest jedną z kluczowych operacji tego procesu produkcyjnego. Dlatego celem jest przeprowadzenie szczegółowego przeglądu możliwości jej realizacji, w celu identyfikacji obszaru tematycznego na potrzeby analizy naukowej problemu zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych.

1.3. Wykonywanie złączy polimerowych pasów ciągnowych

1.3.1. Metodyka łączenia tworzyw sztucznych

W odniesieniu do różnych produktów wykonywanych z tworzyw sztucznych, wykonywanie ich połączeń realizowane jest na wiele sposobów, które ogólnie można podzielić na 3 główne grupy (Rys. 18).



Rys. 18. Ogólny podział częściej stosowanych metod łączenia tworzyw sztucznych

Połączenia mechaniczne tworzyw sztucznych są odmianą technik łączenia, gdzie zespolenie elementów zachodzi poprzez interakcję:

- cierną,
- cierno-kształtową,
- wyłączenie kształtową.

Połączenie części maszyn, z wykorzystaniem tego typu interakcji może zachodzić bezpośrednio pomiędzy łączonymi elementami (w przypadku połączeń bezpośrednich) lub między nimi, a dodatkowymi częściami złącznymi (w przypadku połączeń pośrednich) [1, 5, 14]. Połączenia te umożliwiają ustalenie położenia liniowego i kąтового łączonych elementów względem siebie. Połączenia mechaniczne, również w przypadku tworzyw sztucznych, mogą być rozłączne (gdy możliwe jest wielokrotne łączenie i rozłączanie elementów bez ich uszkodzenia), a także nierozłączne (w przypadku których rozłączenie powoduje zmianę geometrii łączonych części lub łączników).

Częściami złącznymi w tym przypadku są zazwyczaj śruby, kołki i wpusty, a także różnego rodzaju drobne mechanizmy typu: zamki, zatrzaśki, klamry, utworzone przez proste elementy maszynowe. Części złączne mogą być wykonane zarówno z tworzywa sztucznego, jak i stopów metali. Połączenia mechaniczne są powszechnie stosowane w przypadku łączenia okrągłych pasów ciągnowych, zarówno podczas ich przemysłowej produkcji jak i napraw układów napędowych i transportujących na liniach produkcyjnych [11, 13, 29]. Z tego względu, grupa ta zostanie poddana szczegółowej analizie w dalszej części pracy.

Połączenia klejone są metodą otrzymywania połączeń bezpośrednich, nierozłącznych, w których uzyskanie złącza wymaga wprowadzenia do obszaru połączenia materiału dodatkowego jakim jest klej. Klejenie jest powszechnie stosowaną metodą łączenia różnych materiałów inżynierskich np.: materiałów metalicznych, ceramik oraz tworzyw sztucznych. W wielu dziedzinach, m.in. technice lotniczej czy motoryzacji, klejenie zastąpiło połączenia mechaniczne. Wynika to z: atrakcyjnych właściwości wytrzymałościowych spoin, odporności złącza na korozję oraz mniejszej masy względem połączeń mechanicznych. Dobra zdolność do przenoszenia obciążeń, szczególnie połączeń narażonych na działanie sił ścinających, wynika z równomiernego rozkładu naprężeń w spoinie. Dodatkowo złącza klejowe pozbawione są niekorzystnych stref wpływu ciepła, które występują np. w przypadku połączeń spajanych, ponieważ ich wykonanie nie wymaga oddziaływania temperatury o wysokiej wartości na materiał łączony [1, 5, 14, 29].

Złożoność zjawisk fizycznych występujących podczas operacji klejenia, powoduje istnienie specyficznych wymagań dotyczących przygotowania elementów łączonych do operacji klejenia i postępowania po wykonaniu złącza. Przekłada się to na konieczność wykonywania dodatkowych operacji technologicznych, m. in.: oczyszczenia, odtłuszczenia i aktywacji powierzchni, na którą zostanie nałożony klej. Czynności te poprawiają warunki adhezji kleju do materiałów łączonych. Dodatkowo, po wykonaniu połączenia, złącza poddaje się utwardzaniu i sezonowaniu, często w specyficznych warunkach otoczenia (np. w temperaturze o podwyższonej wartości, w świetle promieniowania UV lub w warunkach podwyższonej wilgotności). Sposób przeprowadzenia tych operacji zależy od rodzaju zastosowanego kleju. Czynności te wpływają pozytywnie na spójność złącza, a tym samym wytrzymałość spoiny klejowej, a także jej przyczepność do powierzchni łączonych elementów [24, 29, 32].

Wszystkie te warunki sprawiają, że proces klejenia tworzyw sztucznych jest dość złożony i wieloetapowy. Należy również zauważyć, że wymaga on wprowadzenia dodatkowego materiału, który zazwyczaj wykazuje się odmiennymi właściwościami od łączonych tworzyw, co powoduje dość nieprzewidywalne właściwości spoiny. W wyniku tego, właściwości mechaniczne pasa połączonego za pomocą klejenia nie są jednorodne na całej długości obwodu cięgna. Jest to ważny argument, przemawiający za niestosowaniem klejenia do łączenia pasów. Dodatkowo z teorii wytrzymałości materiałów wynika, że połączenia klejone wykazują się największą wytrzymałością podczas przenoszenia obciążeń ścinających, których wartość może dochodzić do 150 MPa [24]. Siły rozciągające, podobnie jak momenty zginające, to niepożądane obciążenia dla spoin klejowych. Należy zauważyć, że pasy cięgnowe pracują głównie w takich warunkach obciążenia. W związku tym, wykorzystanie tej metody spajania powinno wiązać się z przeprojektowaniem złącza, przy czym najbardziej korzystne w takim przypadku byłoby złącze zakładkowe. Niestety obszar takiego złącza, może różnić się w zakresie właściwości mechanicznych (szczególnie sztywności) od litego pasa, co może powodować nieprawidłową pracę układu mechanicznego wykorzystującego ten element. Z tego powodu, klejenie pasów okrągłych stosowanych w układach napędowych i transportujących maszyn przemysłowych nie jest stosowane [20, 23, 29].

Połączenia spajane, stanowią odmianę złącz nierozłącznych bezpośrednich i są alternatywą do wcześniej wymienionych technologii. W ogólnym ujęciu, ich wykonywanie polega na zrealizowaniu ciągu następujących po sobie czynności [14, 24, 29, 32-35]:

- zbliżeniu do siebie łączonych elementów,
- nadtopieniu lub uplastycznieniu obszaru połączenia (powierzchni lub krawędzi łączonych elementów), z ewentualnym wprowadzeniem materiału dodatkowego w postaci spoiwa (tylko dla połączeń spawanych),
- ewentualnym dociśnięciu do siebie łączonych elementów (tylko dla połączeń zgrzewanych),
- ochłodzeniu złącza, w wyniku czego elementy łączą się dzięki reakcjom chemicznym i interakcjom fizycznym pomiędzy makrocząsteczkami.

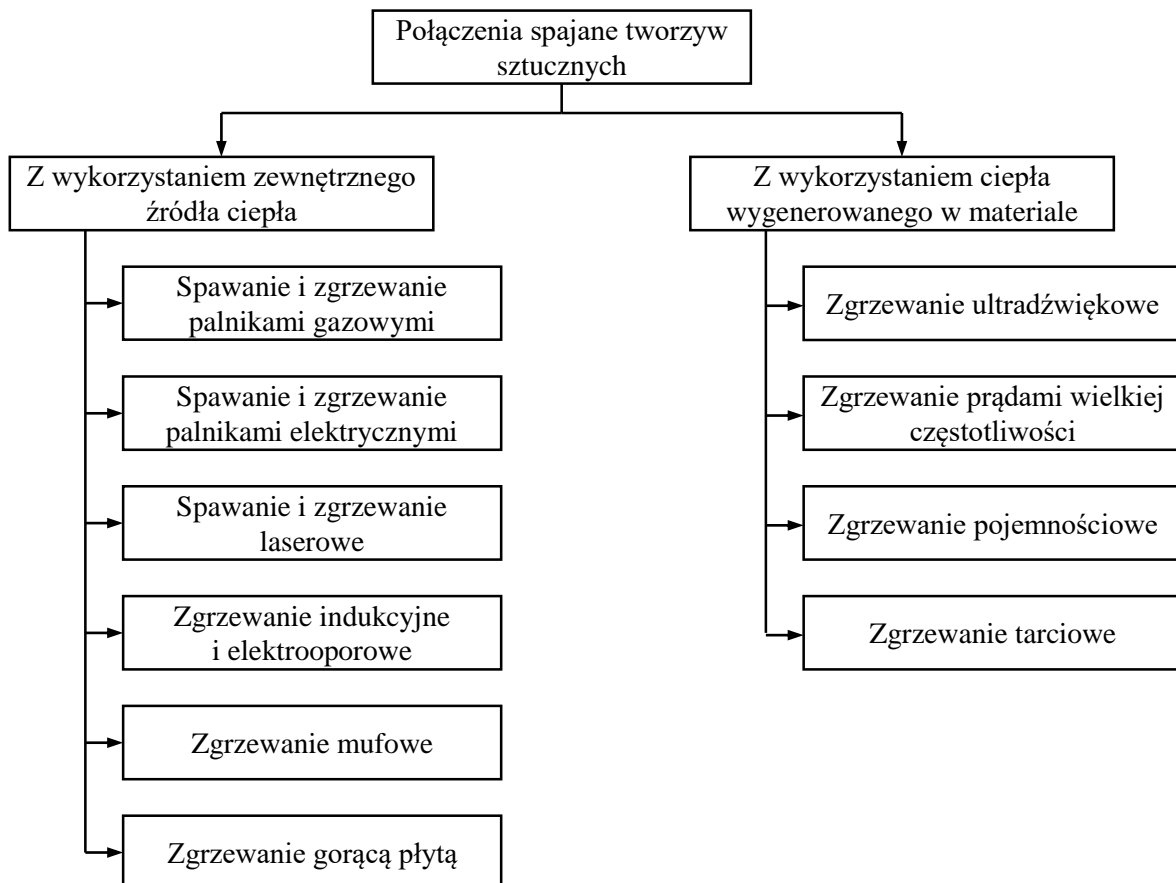
Połączenia spajane tworzyw sztucznych, mogą być wykonywane na wiele sposobów (Rys. 19). Biorąc pod uwagę specyfikę materiału łączonego, który jest termoplastyczny, ich zastosowanie jest możliwe i stosunkowo łatwe.

Ze względu na sposób przeprowadzania takiej operacji, a także metodę dostarczania energii cieplnej niezbędnej do jej wykonania, połączenia spajane mogą być sklasyfikowane w dwóch grupach [29, 35]:

- wymagające dostarczenia energii cieplnej niezbędnej do nadtopienia lub uplastycznienia materiału z zewnętrznego źródła,
- w których energia cieplna niezbędna do uplastycznienia lub nadtopienia materiałów generowana jest w łączonych materiałach, w wyniku specyficznych zjawisk fizycznych zachodzących w obszarze połączenia.

Spawanie gorącym gazem polega na nagrzewaniu obszaru kontaktu łączonych elementów za pomocą strumienia gorącego powietrza, wytwarzanego w palnikach gazowych lub elektrycznych. Operacja ta polega na rozgrzaniu materiału łączonych elementów w obszarze złącza, a także materiału dodatkowego

w postaci spoiwa, aż do nadtopienia, wymieszania się stopionych materiałów i następującego na koniec operacji ostudzeniu jeziora spawalniczego, co zapewnia trwałe połączenie elementów. Dostarczenie materiału dodatkowego w postaci spoiwa, powoduje zmianę właściwości fizykochemicznych w obszarze złącza. Dodatkowo, podczas tej operacji powstaje problem wypływania stopionego materiału z obszaru złącza, tworzącego wypływkę, niezależnie od rodzaju zastosowanej spoiny. Z racji sposobu przeprowadzania tego procesu, powstała wypływkę ma zazwyczaj nieregularny kształt. Stwarza to problem w aspekcie jej usuwania, jak i może być przyczyną powstawania wad złącza [29, 32-35].



Rys. 19. Wybrane, najczęściej stosowane metody spajania tworzyw sztucznych, sklasyfikowane ze względu na sposób dostarczania energii cieplnej do obszaru złącza (opracowano na podstawie [35])

W przypadku zgrzewania palnikami gazowymi lub elektrycznymi, w odróżnieniu do operacji spawania, zamiast dostarczania dodatkowego materiału do obszaru spoiny, stosuje się uplastycznienie brzegu łączonych elementów i wzajemny późniejszy ich docisk. Operowanie palnikiem z dyszą odpowiedzialną za rozprzeczanie rozgrzanego gazu, może jednak powodować nierównomierne nagrzewanie tworzywa, co jest szczególnie niepożądane w przypadku łączenia kształtek osiowoosymetrycznych, o niewielkich rozmiarach gabarytowych, jakimi są pasy okrągłe. W podobny sposób przeprowadzane jest spawanie i zgrzewanie laserowe, przy czym w tym przypadku źródłem energii cieplnej jest promień lasera. Operacja ta jest jednak dość skomplikowana, a oprzyrządowanie kosztowne [33, 34].

Analizując przedstawione metody, należy zauważyć że pomimo ich powszechnego wykorzystania w łączeniu różnych elementów z tworzyw sztucznych, nie są one powszechnie stosowane w przypadku pasów

napędowych i transportujących, szczególnie o przekroju kołowym [29]. Ze względu na geometrię łączonych elementów, zarówno spawanie, zgrzewanie pasów palnikami jak i zgrzewanie laserowe, są operacjami trudnymi technologicznie do wykonania, czasochłonnymi oraz kosztownymi, w wyniku czego nie znalazły powszechnego zastosowania.

Zgrzewanie indukcyjne polega na wprowadzeniu łączonego materiału do obszaru działania dwóch elektromagnesów. Oddziaływanie elektromagnetyczne cewek, przez które przepływa prąd elektryczny powoduje indukowanie się prądów wirowych w elemencie magnetycznie miękkim, co powoduje jego nagrzewanie się. Ciepło jest przekazywane następnie do otaczającego materiału, dzięki czemu możliwe jest jego rozgrzanie do temperatury potrzebnej do uplastycznienia [32]. Istotnym jest fakt, że w przypadku tworzyw sztucznych do obszaru połączenia musi być wprowadzony element, w którym możliwe jest wytworzenie prądów wirowych, czyli materiał magnetycznie miękki, ponieważ w większości przypadków nie jest to możliwe w rodzimym materiale. Pod kątem zasady wykonywania połączenia podobne jest zgrzewanie elektrooporowe. Polega ono na zastosowaniu wkładki rezystancyjnej umieszczonej w obszarze złącza. W tym przypadku jednak, do umieszczonego w obszarze zgrzewania elementu oporowego doprowadzany jest prąd elektryczny, powodujący jego nagrzewanie w wyniku wydzielania się energii cieplnej na rezystancji. Ciepło jest wykorzystywane do nadtopienia i uplastycznienia zgrzewanych powierzchni [33].

Obie wyżej wymienione metody charakteryzują się tym, że wymagają umieszczenia dodatkowego elementu w obszarze zgrzeiny. Po jej zastygnięciu, usunięcie tej wkładki jest w większości przypadków niemożliwe, w wyniku czego metody nie są powszechnie stosowane w łączeniu pasów napędowych i transportujących [29, 33, 34]. Pozostawienie wkładki wykonanej najczęściej z materiału metalicznego, spowodowałoby miejscową znaczną zmianę właściwości mechanicznych pasa, co jest efektem niepożądanym.

Zgrzewanie mufowe-polifuzyjne jest pewną odmianą wyżej wymienionych metod, jednakże polega na tym, że obszar wykonywanego złącza podczas tej operacji otoczony jest elementem grzejnym typu mufa, nakładanym na zgrzewane części, w obszarze powstawania oczekiwanej spoiny. Element rezystancyjny umieszczony w tym narzędziu, rozgrzewany jest w wyniku przepływającego prądu elektrycznego lub za pomocą prądów wirowych. Wygenerowane ciepło przenoszone jest w wyniku konwekcji do obszaru złącza, po czym następuje nadtopienie łączonych elementów. Po osiągnięciu odpowiedniego stanu przetopienia, nagrzewanie jest zatrzymywane, a połączenie zastyga [32-34]. Pomimo prostego przebiegu tej operacji, ten rodzaj zgrzewania nie jest stosowany do łączenia pasów okrągłych, ze względu na konieczność wykonania ciętna o zamkniętym obwodzie. W wyniku tego, usunięcie elementu typu mufa po procesie staje się utrudnione.

Ostatnią metodą spajania z pierwszej grupy, która jest stosowana do wykonywania połączeń tworzyw sztucznych jest zgrzewanie z wykorzystaniem gorącej płyty. Metoda ta polega na rozgrzaniu łączonych części za pomocą dodatkowego elementu grzejnego – powszechnie określanego jako gorąca płyta, która zazwyczaj jest rozgrzewana elektrycznie, poprzez wydzielanie się ciepła na oporniku, do którego podłączono źródło energii elektrycznej. Tego typu element grzejny jest wykorzystywany do zwiększania temperatury powierzchni lub wydzielonej objętości materiału, który ma podlegać zgrzewaniu, aż do wartości powodującej uplastycznienie lub nadtopienie materiału. Następnie po tym, element grzejny jest usuwany

z obszaru roboczego, a uplastycznione powierzchnie są do siebie dociskane [24, 28, 29, 32-38]. Ta metoda zgrzewania tworzyw sztucznych, będąca w istocie przedmiotem poniższego opracowania, zostanie poddana szczegółowej analizie w dalszej części pracy, ponieważ jest stosowana do łączenia pasów.

Druga grupa połączeń spajanych stosowanych do łączenia tworzyw sztucznych (Rys. 19) charakteryzuje się tym, że ciepło potrzebne do uplastycznienia i nadtopienia łączonego tworzywa wytwarzane jest bezpośrednio w jego objętości, tylko i wyłącznie w następstwie zjawisk fizycznych zachodzących w materiale, bez stosowania dodatkowych elementów grzejnych. Jednym z przykładów takiej operacji jest zgrzewanie ultradźwiękowe, które charakteryzuje się tym, że powierzchnie łączonych elementów, będące w kontakcie w obszarze złącza, poddawane są wzajemnemu naciskowi. Następnie za pomocą sonotrody wymuszane są ich drgania mechaniczne o zmiennym kierunku, niewielkiej amplitudzie i względnie wysokiej częstotliwości. Oprzyrządowanie do zgrzewania ultradźwiękowego obejmuje zazwyczaj generator prądu wysokiej częstotliwości, który doprowadzany jest do przetwornika elektrostrykcyjnego, wywołującego drgania sonotrody, czyli elementu będącego w bezpośrednim kontakcie z łączonymi materiałami. Parametry technologiczne takiej operacji przyjmują zazwyczaj następujące wartości [28]:

- amplituda drgań wynosi od 10 μm do 30 μm , czyli jest praktycznie niezauważalna gołym okiem,
- częstotliwość wynosi około 20 kHz,
- docisk łączonych elementów przyjmuje relatywnie dużą wartość wynoszącą około 10 MPa.

W związku z tym, w miejscu kontaktu łączonych elementów zachodzi intensywny proces tarcia, głównie w skali mikroskopowej, powodując nagrzewanie materiałów wewnątrz ich objętości. Udział tarcia obserwowanego w skali makroskopowej, wynikającego z wzajemnego przemieszczania się powierzchni łączonych jest niewielki [32, 36].

W podobny sposób zachodzi proces zgrzewania prądami wielkiej częstotliwości. Metoda ta opiera się na wytwarzaniu ciepła w zgrzewanym materiale pod wpływem prądów o dużej częstotliwości, oddziałujących na polarne cząsteczki tworzy sztucznych amorficznych, posiadających mierzalny moment dipolowy [28, 33]. Oddziaływanie prądów wielkiej częstotliwości, powoduje cykliczną zmianę orientacji przestrzennej naładowanych cząsteczek materiału, w wyniku czego zachodzi zjawisko tarcia międzycząsteczkowego, co powoduje intensywne wydzielanie się ciepła. Zjawisko to, w połączeniu z określonym czasem oddziaływania, powoduje nagrzewanie się materiału, aż do temperatury uplastycznienia. W związku z tym, proces ten można opisać jako nagrzewanie się materiału, za pomocą energii pochodzącej ze zmiennego pola elektrycznego o dużej częstotliwości, dzięki jej pochłanianiu przez polarne cząsteczki tworzywa. Aplikacja odpowiedniej siły docisku do obszaru połączenia, umożliwia przeprowadzenie zgrzewania [32, 34, 35].

Te dwa podobne sposoby zgrzewania wymagają jednak zastosowania oprzyrządowania, które jest kosztowne i wrażliwe na wpływ warunków otoczenia. Dodatkowo, wykonanie sonotrody dla zgrzewania ultradźwiękowego lub elektrod dla zgrzewania prądami wielkiej częstotliwości, w kształcie umożliwiającym doczołowe zgrzewanie prętów jest utrudnione. Wynika to głównie z dążenia do możliwie równomiernego i jednoczesnego nagrzewania całego obszaru połączenia. Z tego względu nie stosuje się zgrzewania ultradźwiękowego oraz prądami wielkiej częstotliwości, jako metody łączenia okrągłych pasów ciągnionych. Metody te są najczęściej wykorzystywane do zgrzewania elementów cienkich, np. folii.

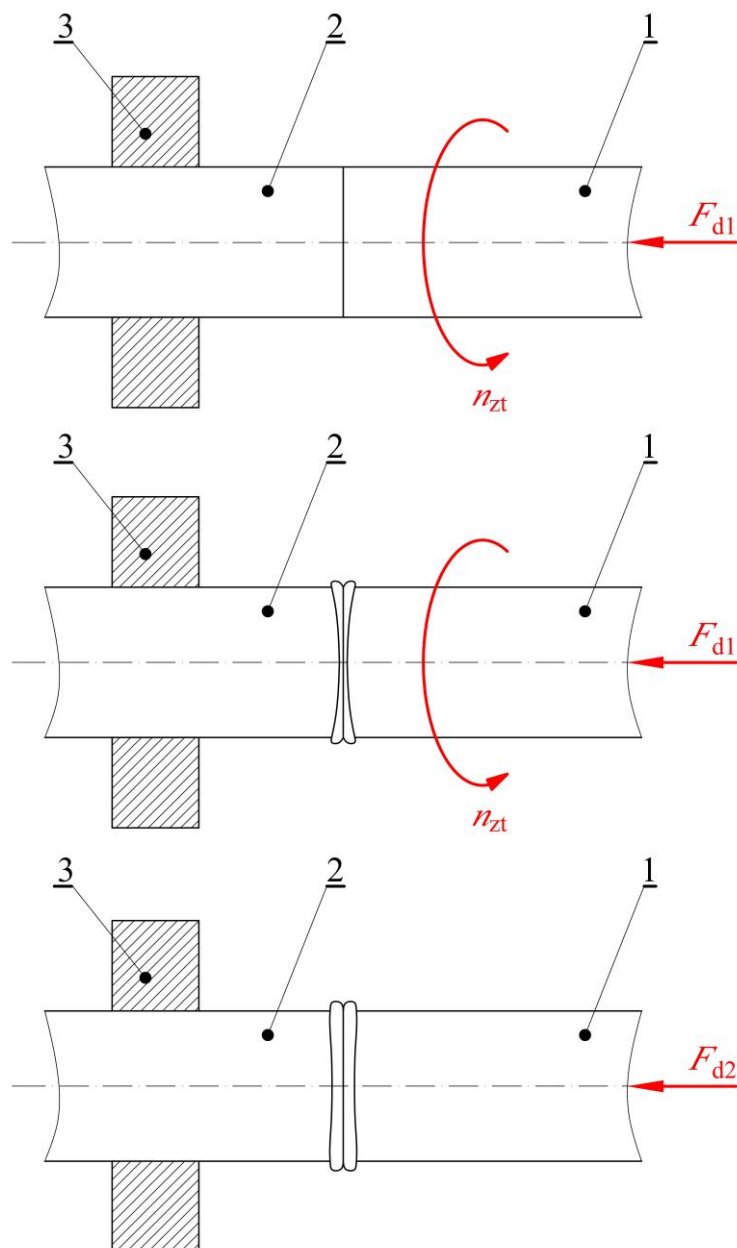
Pokrewną metodą łączenia tworzyw sztucznych jest zgrzewanie pojemnościowe. Polega ona na umieszczeniu obszaru wykonywanej spoiny pomiędzy specjalnymi płytami, stanowiącymi jednocześnie okładki kondensatora dużej pojemności. Podczas dostarczania do płyt zmiennego napięcia elektrycznego, o wysokiej częstotliwości, dochodzącej do 100 MHz, pomiędzy nimi wytwarza się szybkozmienne pole elektryczne. Jego działanie powoduje podwyższanie wartości temperatury tworzywa sztucznego, poprzez oddziaływanie na spolaryzowane makrocząsteczki. Działanie to wynika z faktu, że tworzywa sztuczne są materiałami dielektrycznymi. W warunkach normalnych, cząsteczki rozmieszczone są w sposób przypadkowy, stanowiąc różnoimienne ładunki elektryczne. W obecności pola elektrycznego wykazują zdolność do polaryzacji, czyli orientacji ładunków, zgodnie z kierunkiem linii pola elektrycznego. Zjawisku temu towarzyszy ruch cząsteczek w skali mikroskopowej, z czym wiąże się tarcie. W momencie, gdy wektor pola elektrycznego zmienia swój zwrot, cząsteczki ponownie orientują się w przeciwnym kierunku. Szybkozmiennne pole elektryczne powoduje, że ruch makrocząsteczek polimeru jest zintensyfikowany, czemu towarzyszy intensywne tarcie w skali mikroskopowej. W wyniku tego, w materiale wydziela się ciepło [36]. W konsekwencji uzyskuje się efekt jego uplastycznienia i nadtopienia. Dzięki zastosowaniu wzajemnego docisku nagrzewanych elementów, możliwe jest ich połączenie. Proces ten charakteryzuje się krótkim czasem trwania wynoszącym od 1 s do 6 s oraz stosunkowo krótkim okresem chłodzenia złącza, który trwa około 10 s, przy czym wartości te są zależne od grubości zgrzewanego tworzywa [28].

Metoda ta nie jest powszechnie wykorzystywana do łączenia elementów prętowych. Wynika to z konieczności stosowania w takim przypadku dużej odległości pomiędzy płytami kondensatora, która powinna być równa średnicy zgrzewanego elementu. Z tego względu, wymagane byłoby stosowanie wysokiej wartości napięcia elektrycznego dostarczonego do zasilenia płyt, co skutkowałoby potrzebą wykorzystania rozbudowanego oprzyrządowania elektrycznego. Dodatkowo niekorzystnym jest nierównomierny rozkład temperatury podczas nagrzewania. Z tych względów metoda ta nie jest powszechnie stosowana do zgrzewania pasów ciągnowych.

Wyżej wymienione trzy metody zgrzewania, z generowaniem energii cieplnej w wyniku tarcia zachodzącego w skali mikroskopowej (zgrzewanie pojemnościowe oraz prądami wysokiej częstotliwości) oraz quasi-mikroskopowej (zgrzewanie ultradźwiękowe) nie są stosowane do zgrzewania okrągłych pasów napędowych i transportujących również z powodu specyficznych właściwości materiału. Termoplastyczne tworzywa elastomerowe na bazie poliuretanu (TPU) i poliestru (TPE) wykazują w standardowej temperaturze otoczenia T_0 (a zatem w temperaturze o wartości większej niż temperatura zeszklenia T_g) dużą elastyczność oraz bardzo dobre zdolności tłumiące [20, 39-43]. Skutkuje to dobrą zdolnością do rozpraszania energii, co powoduje, że efektywność nagrzewania materiału za pomocą takich metod jest względnie niewielka.

Proces zgrzewania tarcowego, z tarciem zachodzącym w skali makroskopowej, w najbardziej klasycznym ujęciu polega na wprawieniu w ruch obrotowy jednego z elementów zgrzewanych (w rozpatrywanym przypadku dotyczy to jednego końca pasa), przy jednoczesnym jego dociśnięciu do drugiego elementu, który jest unieruchomiony, z siłą docisku F_{d1} (Rys. 20). Taka kinematyka procesu powoduje powstawanie zjawiska tarcia wiertnego na styku łączonych powierzchni. Czynnikiem temu towarzyszącym jest bardzo

intensywne wydzielanie się ciepła pomiędzy powierzchniami [33, 38]. Uzyskana energia cieplna powoduje uplastycznianie i nadtopianie łączonych powierzchni, co stanowi istotę zgrzewania tarcowego. Stan ten jest utrzymywany, do momentu uzyskania niezbędnego nadtopienia, pozwalającego na pewne połączenie obu powierzchni. Po uzyskaniu tego stanu ruch obrotowy jest zatrzymywany, a na elementy łączone działa siła docisku F_{d2} , o takim samym kierunku jak docisk podczas tarcia, jednak o mniejszej wartości, powodująca miejscowe spęczenie materiału [33, 38]. W wyniku nadtopienia powierzchni oraz oddziaływania nieprzerwanego docisku, następuje uaktywnienie łańcuchów polimerowych obu powierzchni, czego efektem jest ich splatanie się oraz łączenie [35]. Po upływie ściśle określonego czasu, docisk jest usuwany, a zastygnięty obszar spoiny nabiera właściwości litego tworzywa. Ostatnią czynnością, którą należy wykonać jest usunięcie wypływki, czyli nadmiaru nadtopionego materiału, który samoczynnie opuścił obszar złącza.



Rys. 20. Zgrzewanie doczołowe tarcowe prętów (opracowano na podstawie [33]): a) tarcie suche w obszarze złącza, b) tarcie płynne w obszarze złącza, c) krzepnięcie zgrzeiny; 1 – pręt ruchomy, 2 – pręt nieruchomy, 3 – uchwyt, F_{d1} – siła docisku wstępnego, F_{d2} – siła docisku spęczania, n_{zt} – prędkość obrotowa ruchomego pręta

Zjawiska zachodzące podczas tego rodzaju łączenia elementów są bardzo złożone. Przede wszystkim zmienny jest współczynnik tarcia, ponieważ w trakcie trwania procesu, tarcie suche występujące pomiędzy łączonymi powierzchniami zamienia się najpierw w tarcie mieszane, by w dalszej fazie procesu stać się tarcie lepkiem, obecnym w płynnych cząsteczkach łączonych materiałów. Z tego względu opis zjawiska wydzielania się ciepła jest złożony. Dodatkowym problemem jest nierównomierne nagrzewanie łączonych elementów, co wynika z nierównomiernego rozkładu prędkości wzdłuż promienia trących się po sobie zakończeń pasa. Powoduje to zazwyczaj nadmierne nadtopienie materiału przy powierzchni zewnętrznej, przy jednoczesnym niedogrzeniu w osi obrotu [34, 35].

Zgrzewanie tarciove doczołowe, jest metodą stosowaną podczas łączenia wyrobów osiowosymetrycznych z tworzyw sztucznych. Jego podstawową zaletą jest prostota oraz szybkość wykonywania złącza. Proces zgrzewania trwa zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu sekund [22]. W przypadku łączenia pasów napędowych i transportujących dużą trudnością w aplikacji tej metody zgrzewania jest uzyskanie odpowiedniej kinematyki. W przypadku łączenia pasów do postaci zamkniętego obwodu niemożliwe jest wymuszanie ruchu obrotowego jednego z końców pasa, ze względu na jego skręcanie. Stan taki jest niepożądany, ponieważ powoduje to dodatkowe naprężenia w strukturze materiału. Z tego względu, metoda w tej postaci nie jest stosowana do zgrzewania pasów napędowych i transportujących.

Istnieje jednak odmiana zgrzewania tarciovego, która cechuje się inną kinematyką – zgrzewanie wibracyjne (oscylacyjne). Metoda ta charakteryzuje się tym, że zamiast ruchu obrotowego, elementy zgrzewane wykonują ruch liniowy drgający lub oscylacyjny. Zgrzewanie takim sposobem jest z powodzeniem stosowane do łączenia doczołowego termozgrzewalnych pasów ciągnowych, ze względu na to, że kinematyka tego procesu pozwala na jego zastosowanie w przypadku zgrzewania końców zamkniętej pętli.

Jedyną metodą spajania z tej grupy, która jest stosowana do wykonywania połączeń pasów okrągłych jest zgrzewanie tarciove, z tarcie obserwowalnym w skali makroskopowej, w odmianie wibracyjnej lub oscylacyjnej. W związku z tym, ten rodzaj połączeń zostanie poddany szczegółowej analizie w dalszej części pracy. Po za tym, żaden z pozostałych opisanych sposobów zgrzewania należących do tej grupy nie ma zastosowania w przypadku łączenia pasów ciągnowych, głównie ze względu na problemy technologiczne związane z kształtem oczekiwanej spoiny oraz duże koszty oprzyrządowania, które dodatkowo jest wrażliwe na zmieniające się warunki pracy. Metody te są zazwyczaj wykorzystywane w badaniach laboratoryjnych, lub w precyzyjnej, seryjnej i powtarzalnej produkcji przemysłowej [35, 37].

Przeprowadzona analiza znanych w technice metod łączenia tworzyw sztucznych wskazuje, że jedyne metody łączenia tworzyw sztucznych, które w praktyce mogą być stosowane do zgrzewania pasów napędowych i transportujących do postaci zamkniętego obwodu są:

- połączenia mechaniczne, z wykorzystaniem specjalnie kształtowanych elementów złącznych,
- zgrzewanie z wykorzystaniem gorącej płyty jako zewnętrznego źródła ciepła,
- zgrzewanie z wykorzystaniem tarcia obecnego w skali makroskopowej, jako wewnętrznego źródła ciepła, w odmianie zgrzewania wibracyjnego (oscylacyjnego).

W związku z tym, celową jest bardziej szczegółowa analiza tych metod w aspekcie praktycznej realizacji łączenia pasów napędowych i transportujących.

1.3.2. Łączenie pasów napędowych i transportujących

W wielu rozwiązaniach przemysłowych pasy ciągnowe wykonane z tworzyw sztucznych lub materiałów kompozytowych, łączone są do postaci zamkniętego obwodu w sposób mechaniczny. Dotyczy to większości wyrobów dostępnych na rynku. Pasy płaskie, zębate, a także o każdym dowolnym przekroju, łącznie z pasami okrągłymi, mogą być łączone za pomocą różnego rodzaju spinek, zszywek oraz kształtowych elementów łącznych [10-13, 18].

W przypadku pasów okrągłych wykonanych z elastomerów termoplastycznych, przewidziano możliwość ich łączenia za pomocą specjalnych elementów łącznych, wykonanych ze stopów metali. Jednym z przykładów jest element łączny z serii FBN, dostarczany przez firmę BEHAbelt (Rys. 21) [11].

a)



b)



Rys. 21. Elementy łączne z serii FBN firmy BEHAbelt: a) grupa elementów łącznych dla różnych średnic, b) zamontowany element łączny w pasie o przekroju pierścieniowym [11]

Łączenie pasów z wykorzystaniem takiego typu elementu łącznego polega na jego wsunięciu, swoją stożkowo ukształtowaną częścią, do otworu w osi pasa, aż do kontaktu jego powierzchni czołowej z walcowym kołnierzem tego elementu łącznego. Siła tarcia, pomiędzy zaciśniętą przez elastyczny pas częścią stożkową a samym pasem powoduje, że nie wysuwa się on z ciągu. Dodatkowo, w tym przypadku, część stożkowa swoją ostrą krawędzią odkształca powierzchnię otworu w pasie. Zastosowanie takiego elementu łącznego jest szczególnie łatwe w przypadku łączenia pasa o przekroju pierścieniowym, z otworem o średnicy d_o . Producenci takich pasów, posiadających w ofercie tego typu elementy łączne dostosowują ich wymiary do pozostałych oferowanych produktów, w taki sposób aby możliwe było wzajemne wykorzystanie. Możliwe jest również zastosowanie tego typu elementów łącznych do pasów o przekroju kołowym, jednakże wtedy konieczne jest wykonanie otworu o ściśle określonej średnicy i głębokości, w osi pasa. Zazwyczaj tych elementów łącznych nie wykorzystuje się do łączenia pasów kompozytowych, ze względu na obecność w osi pasa materiału wzmocnienia.

Drugim ze znanych w technice rozwiązań mechanicznego łączenia pasów okrągłych, jest połączenie za pomocą mechanizmu Eagle SureConnect firmy Fenner Drives (Rys. 22) [10]. Istota tego typu połączenia jest podobna jak w przypadku rozwiązania firmy BEHAbelt. Do otworu w przekroju pasa napędowego lub

transportującego montowany jest łącznik, który składa się z dwóch elementów walcowych, z czopami posiadającymi zewnętrzny zwój spiralny, przy czym para tych elementów, składająca się na jeden łącznik, posiada na swoich dwóch czopach zwoje nacięte w przeciwnych kierunkach. Elementy te są połączone ze sobą za pomocą dwóch złączy przegubowych, umożliwiających ich odchylenie się w dwóch prostopadłych płaszczyznach. Połączenie powstaje poprzez jednoczesne wkręcanie obu części ich spiralnymi zwojami w końce łączonego pasa, co jest możliwe dzięki temu, że na środku podwójnego przegubu wykonane jest podcięcie, umożliwiające obracanie elementu za pomocą specjalnego klucza.



Rys. 22. Złącze do pasów Eagle SureConnect firmy Fenner Drives [10]

Dzięki podwójnie przegubowemu połączeniu części montowanych do pasa, możliwe jest zgrubne dopasowanie kształtu tego łącznika, a w konsekwencji tak złączonego pasa, do powierzchni tworzącej koła pasowego, podczas jego przeginania. Tego typu złącze z zasady jest rozłączne. Należy jednak pamiętać, że każdorazowy montaż takiego połączenia powoduje deformację powierzchni otworu wewnątrz pasa. Spiralne zwoje powodują powstawanie trwałych odkształceń w łączonym materiale, w związku z czym przyjmuje się, że takie połączenie jest jednorazowe. Ponowne połączenie pasów może nie być trwałe, złącze może ulec samoczynnemu poluzowaniu. Podobnie jak w przypadku elementu złącznego firmy BEHAbelt, ten typ połączeń jest stosowany zazwyczaj do pasów o przekroju pierścieniowym, ze względu na występujący otwór w przekroju poprzecznym. Nie jest on również stosowany do pasów kompozytowych.

Analizując mechaniczne sposoby łączenia okrągłych pasów napędowych i przenośnikowych, należy zwrócić uwagę na to, że wprowadzenie dodatkowego elementu złącznego, wykonanego najczęściej ze stopów metali, powoduje miejscową zmianę właściwości mechanicznych w obszarze złącza. W miejscu połączenia następuje jego usztywnienie. Stan taki jest w wielu przypadkach niedopuszczalny, ponieważ pas zawsze współpracuje z kołami pasowymi, często o niewielkiej średnicy, co skutkuje wymogiem możliwie małego dopuszczalnego promienia gięcia. Usztywnienie materiału na pewnej długości elementu złącznego, może spowodować zwiększenie wartości tego parametru. Dodatkowo, umieszczenie elementu sztywnego w otworze wewnątrz pasa, może powodować jego rozpękanie, powodując miejscowe zwiększenie średnicy zewnętrznej, co jest niepożądane.

Odmianą połączenia spajanego stosowanego do łączenia pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym jest zgrzewanie wibracyjne. Metoda ta do nagrzewania łączonych elementów wykorzystuje ciepło powstałe w wyniku pracy tarcia [29]. Zgrzewanie to charakteryzuje się tym, że w celu wywołania tarcia między powierzchniami następuje wymuszenie ruchu drgającego, liniowego lub oscylacyjnego, jednego lub obu elementów, w płaszczyźnie równoległej do łączonych powierzchni. Dodatkowym oddziaływaniem jest wymuszenie wzajemnego docisku powierzchni, poprzez przyłożenie siły docisku w kierunku normalnym w stosunku do trących po sobie powierzchni [33]. Kluczowymi parametrami zgrzewania wibracyjnego są: częstotliwość drgań, amplituda, siła docisku oraz czas trwania. Drgania zazwyczaj zachodzą z częstotliwością od 30 Hz do 800 Hz, przy amplitudzie wynoszącej od 0,25 mm do 5 mm. Czas takiego zgrzewania, jest zależny od rodzaju materiału oraz wielkości powierzchni, ale zazwyczaj zawiera się w przedziale od 2 s do 10 s. Ciśnienie docisku wynosi zazwyczaj od 0,5 MPa do 8 MPa [34]. Parametry te zależą od rodzaju zgrzewanych materiałów, a także wymiarów geometrycznych łączonych elementów.

Fizyczne aspekty tego procesu są takie same jak w przypadku klasycznego zgrzewania tarcowego, realizowanego poprzez ruch obrotowy elementów (Rys. 20). Różnicą jest kinematyka, ponieważ w tym przypadku ruch obrotowy zamieniony jest na oscylacyjny. Ten sposób zgrzewania jest z powodzeniem wykorzystywany do wykonywania połączeń zgrzewanych pasów napędowych i transportujących. Proces ten realizowany jest najczęściej za pomocą ręcznego urządzenia (Rys. 23), które wyposażone jest w dwie szczęki przytrzymujące zakończenia zgrzewanego pasa. Pierwsza z nich jest nieruchoma (3), druga natomiast (2) wykonuje oscylacyjny ruch roboczy. Obie szczęki są dociskane do siebie za pomocą mechanizmu dociskowego ze sprężynami. Dzięki temu realizowany jest jednoczesny docisk zgrzewanych powierzchni pasa (1) i główny ruch roboczy odpowiedzialny za generowanie energii cieplnej, w wyniku intensywnego tarcia, obserwowalnego w skali makroskopowej.

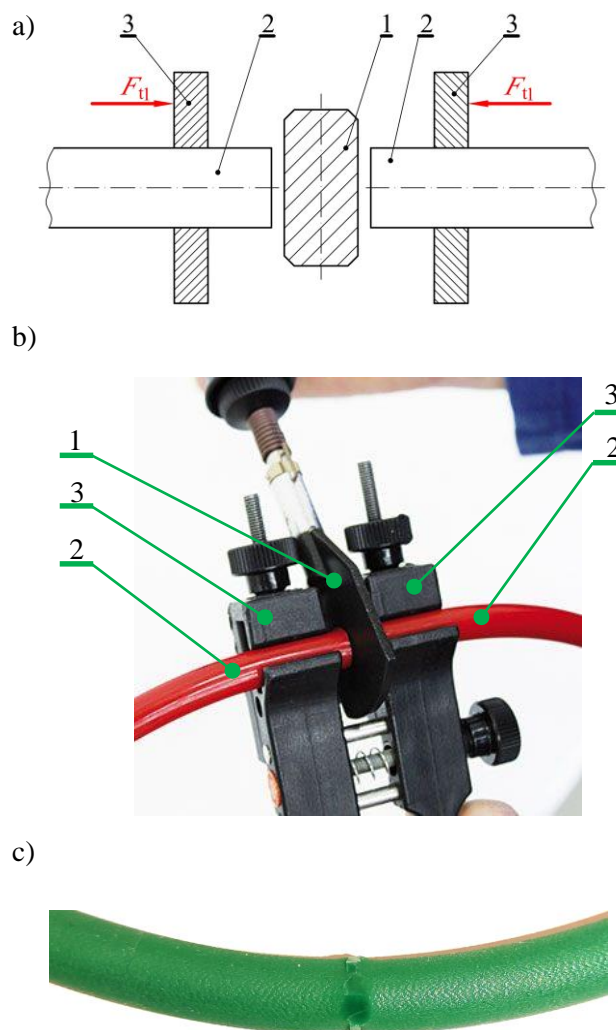


Rys. 23. Zgrzewarka wibracyjna ręczna firmy Optibelt [44]: 1 – zgrzewany pas, 2 – szczęka ruchoma, 3 – szczęka stała

W praktyce przemysłowej najczęściej spotykaną metodą łączenia pasów napędowych i transportujących jest zgrzewanie za pomocą gorącej płyty. Metoda ta polega na nagrzewaniu łączonych elementów w wyniku przenoszenia energii cieplnej, od elementu grzejnego do spajanego materiału. W tym celu

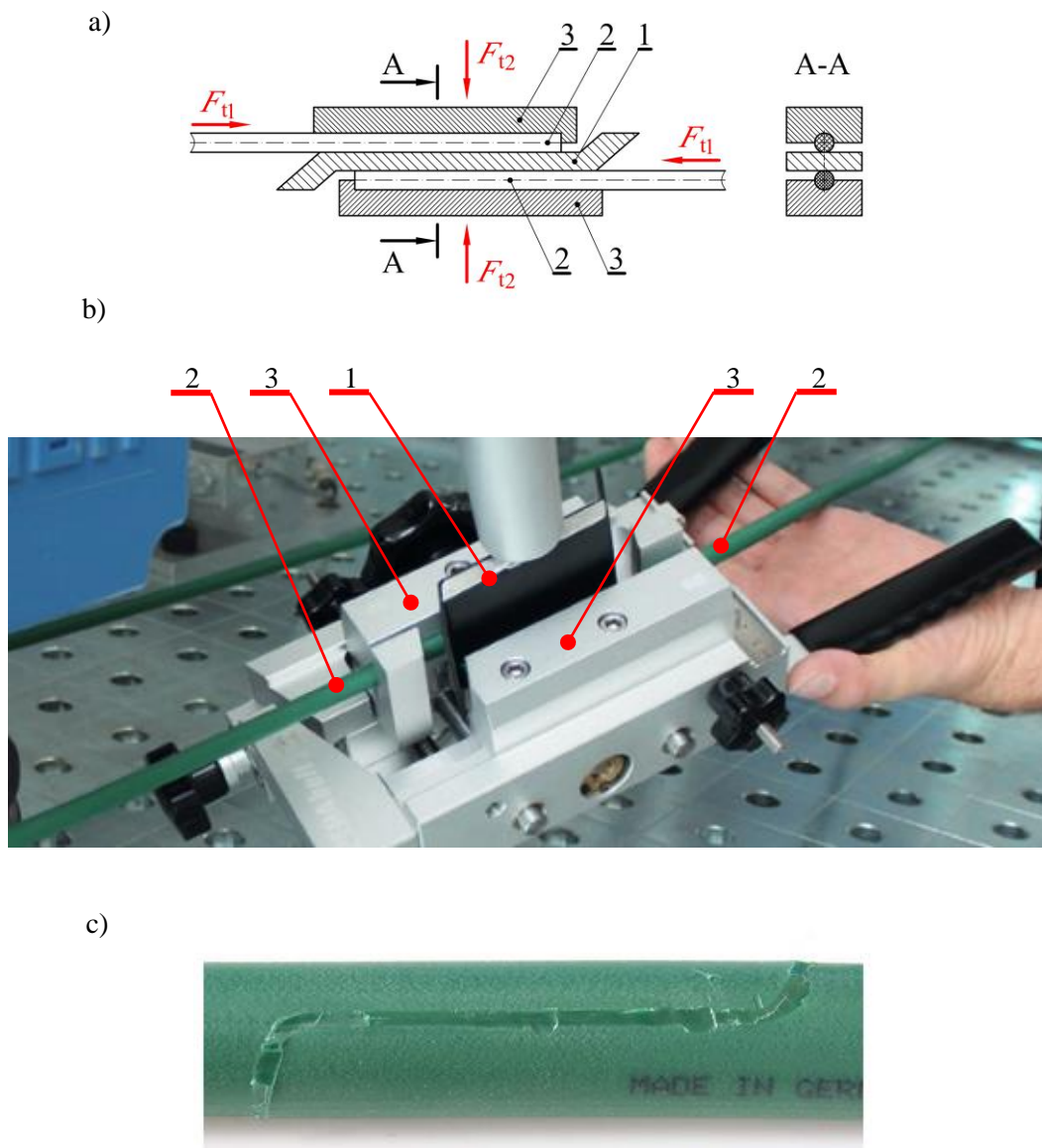
wykorzystuje się zewnętrzne, płytowe urządzenie grzewcze, zasilane energią elektryczną. Dostarczenie prądu elektrycznego do elementu oporowego, umieszczonego w płycie grzewczej, powoduje nagrzewanie się jej powierzchni [29, 33-35, 38]. W zależności od geometrii głównego elementu roboczego, czyli gorącej płyty, wyróżnia się dwie powszechnie stosowane metody zgrzewania gorącą płytą:

- zgrzewanie doczołowe (Rys. 24), które charakteryzuje się tym, że element grzewczy (1) umieszczony jest pomiędzy czołowymi powierzchniami uciętego pasa (2). Końcówki pasa (2) są dociskane do gorącej płyty (1) poprzez uchwyty (3), do których przyłożona jest poosiowa siła technologiczna F_{ti} . W tym przypadku wzrost wartości temperatury materiału, niezbędny do rozpoczęcia operacji zgrzewania, rozpoczyna się od powierzchni czołowej pasa. Istotnym warunkiem przeprowadzenia tego procesu jest wywołanie odpowiedniego docisku zgrzewanego elementu do gorącej płyty, tak aby zapewnić dobre warunki przewodzenia ciepła. Po uzyskaniu odpowiedniego stopnia uplastycznienia termicznego materiału, element grzewczy jest wyjmowany z obszaru znajdującego się pomiędzy powierzchniami czołowymi pasa, po czym są one dociskane do siebie, dzięki czemu możliwe jest połączenie struktury materiału [14, 28, 29, 33, 34, 38],



Rys. 24. Zgrzewanie doczołowe pasów metodą gorącej płyty: a) uproszczony schemat nagrzewania, b) praktyczna realizacja nagrzewania pasa poliestrowego [11], c) zgrzany pas poliuretanowy; 1 – płyta grzewcza, 2 – końcówki pasa, 3 – uchwyt końcówek pasa; F_{ti} – poosiowa siła technologiczna przyłożona podczas nagrzewania pasa

- zgrzewanie zakładkowe (Rys. 25), które charakteryzuje się tym, że dwie końcówki pasa (2) umieszczone w elementach matrycowych (3), podczas nagrzewania dociskane są do gorącej płyty (1) poprzez siłę technologiczną promieniową F_{t2} – będącą prostopadłą w stosunku do osi pasa. Jednocześnie na pas oddziałuje siła technologiczna poosiowa F_{t1} , zapobiegająca wysunięciu się pasa podczas nagrzewania. W tej operacji, następuje nagrzewanie objętości materiału pasa prowadzące do jego uplastycznienia głównie poprzez powierzchnię boczną. Po uzyskaniu odpowiedniego stopnia uplastycznienia gorąca płyta jest wyjmowana, a połówki matrycy są zamykane, tworząc zamkniętą przestrzeń, z otworem o geometrii odpowiadającej pożądanemu kształtowi zgrzewanego pasa. W wyniku tego następuje połączenie uplastycznionego materiału obu końcówek pasa, a po ochłodzeniu otrzymywane jest złącze, ze spoiną odcinkową zorientowaną w przybliżeniu równoległe względem osi pasa (Rys. 25c).



Rys. 25. Zgrzewanie zakładkowe pasów ciągnowych: a) schemat funkcjonalny, b) rzeczywista operacja zgrzewania [11], c) zgrzany pas z widoczną spoiną [11]; 1 – kształtowa płyta grzewcza, 2 – końcówki pasa, 3 – matryca; F_{t1} – siła docisku poosiowego, F_{t2} – siła docisku promieniowego

Zgrzewanie pasów metodą gorącej płyty jest względnie tanim i szybkim sposobem wykonywania tego rodzaju połączeń [29, 35, 37, 38]. Odmiana doczołowa (Rys. 24), w porównaniu do zakładkowej (Rys. 25) charakteryzuje się następującymi zaletami:

- oprzyrządowanie niezbędne do przeprowadzenia tej operacji jest bardziej uniwersalne (w przypadku zgrzewania zakładkowego, dla każdej średnicy pasa d istnieje konieczność stosowania innego zestawu matryc),
- ewentualna zmiana właściwości fizycznych (a w szczególności mechanicznych) zachodząca w spoinie, występuje na krótszym odcinku pasa,
- straty materiału (w postaci nadatku n na wykonanie połączenia) są mniejsze.

Pomimo oczekiwanej większej wytrzymałości spoiny w połączeniu zakładkowym, co wynika z bardziej korzystnego rozkładu obciążenia [1, 5, 14] (siły rozciągające pas powodują w tym przypadku głównie ścinanie spoiny, zamiast rozciągania jak to ma miejsce w złączu doczołowym), wymienione korzyści płynące ze stosowania złącz doczołowych powodują, że złącza zakładkowe nie są tak popularne.

Ogólne porównanie zgrzewania doczołowego z wykorzystaniem gorącej płyty oraz zgrzewania wibracyjnego tworzyw sztucznych, jak dotychczas było dokonywane wielokrotnie. Analizując literaturę naukową związaną z tym tematem, szczególną uwagę zwracają prace dotyczące:

- porównania zgrzewania doczołowego z wykorzystaniem gorącej płyty i promieniowania podczerwonego ze zgrzewaniem wibracyjnym kształtek wykonanych z kopolimeru akrylonitrylu, styrenu i akrylanów [45]. Badania te wykazały, że wytrzymałość złącz wykonanych metodą zgrzewania wibracyjnego oraz zgrzewania z wykorzystaniem gorącej płyty jest porównywalna. Równocześnie jest ona zauważalnie wyższa od wytrzymałości złącza wykonanego z wykorzystaniem nagrzewania bezkontaktowego za pomocą promieniowania podczerwonego,
- porównania zgrzewania wibracyjnego i z wykorzystaniem gorącej płyty, podczas łączenia różnych tworzyw sztucznych. Badania te zostały wykonane dla przypadku łączenia dwóch par materiałowych: poli(metakrylanu metylu) z poliwęglanem [46] oraz poli(metakrylanu metylu) z kopolimerem akrylonitryl-butadien-syren [47]. Wnioski z tych badań wskazują również na porównywalną wytrzymałość złącz otrzymanych obiema metodami. Co ważne, obie metody pozwalają na praktyczną realizację zgrzewania różnych tworzyw sztucznych ze sobą, choć w tym przypadku łączone materiały wykazują zbliżone właściwości fizyczne,
- porównania zgrzewania wibracyjnego oraz metody gorącej płyty, dla przypadku kształtek wykonanych ze sztywnych tworzyw sztucznych: poliwęglanu oraz poli(tereftalanu butylenu) [48]. Badania te dotyczyły w głównej mierze porównania struktury złącz zgrzewanych wytworzonych obiema metodami, obserwowanych pod mikroskopem. Ważnym wnioskiem płynącym z tych badań, jest informacja na temat strefy wpływu ciepła, która jest zdecydowanie szersza dla zgrzewania z wykorzystaniem gorącej płyty. Wynika to głównie z dynamiki nagrzewania materiału, która jest mniejsza dla tego rodzaju zgrzewania co powoduje, że wysoka temperatura oddziałuje na materiał przez dłuższy czas. Związane z tym są również pewne różnice w strukturze złącza, która jest nieco bardziej jednorodna dla zgrzewania z wykorzystaniem gorącej płyty,

- porównania zgrzewania z wykorzystaniem gorącej płyty oraz wibracyjnego dla zgrzewania trzech materiałów: poliamidu [49], poli(chlorku winylu) [50] oraz kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren [51], w aspekcie wytrzymałości złączy otrzymanych obiema metodami. W przypadku poliamidu zauważono znacząco wyższą wytrzymałość spoin otrzymanych za pomocą zgrzewania wibracyjnego. Poli(chlorek winylu) wykazał porównywalną wytrzymałość złącza dla obu metod łączenia. W przypadku kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren wyższą wytrzymałość złącza zaobserwowano dla zgrzewania metodą gorącej płyty. Choć wyniki tych prac badawczych nie dostarczają jednoznacznej informacji na temat tego, która z tych metod zapewnia uzyskanie spoiny o większej wytrzymałości, to analizując te wyniki można zauważyć, że wytrzymałość złącza wykonanego poprzez zgrzewanie wibracyjne we wszystkich badanych przypadkach jest bardziej powtarzalna (wytrzymałość złączy zgrzewanych gorącą płytą charakteryzuje się większym rozrzutem wartości).

Przedstawione przykłady zrealizowanych prac badawczych charakteryzują się jeszcze jednym czynnikiem, wspólnym dla wszystkich. Relacja pomiędzy wytrzymałością złącza dla zgrzewania metodą gorącej płyty i wibracyjnego, zmienia swój charakter w zależności od sposobu przygotowania materiałów do zgrzewania, a także metody obróbki złącza po zgrzewaniu, na co składają się następujące czynności:

- suszenie materiału przed wykonaniem złącza,
- kondycjonowanie w podwyższonej temperaturze przed i po wykonaniu połączenia,
- obróbka powierzchni czołowych przed wykonaniem połączenia,
- usuwanie powstałej wypłytki.

Czynniki te wpływają nie tylko na końcową wytrzymałość złącza, określaną jako maksymalne naprężenie rozciągające, które może zostać przez nie przeniesione, ale również jego strukturę, przez co należy rozumieć m.in. wielkość strefy wpływu ciepła, a także obecność pęcherzyków gazu, stanowiących nieciągłości struktury. Analizując wyniki otrzymane w przytoczonych publikacjach naukowych [45-51], nie sposób jest wskazać jednoznacznego wpływu któregośkolwiek z wymienionych czynników na końcowe właściwości złącza, zarówno dla zgrzewania gorącą płytą jak i wibracyjnego.

Dodatkowym czynnikiem zmiennym w pracach badaczy jest rodzaj materiału. Jak wynika z przytoczonych badań [45-51] relacja pomiędzy właściwościami eksploatacyjnymi dla zgrzewania wibracyjnego i z wykorzystaniem gorącej płyty może być zgoła odmienna w zależności od materiału, który podlega łączeniu. W związku z tym, niezwykle trudnym jest wskazanie, która z tych metod spajania jest lepsza, a także która z nich jest bardziej korzystna w aspekcie łączenia doczołowego pasów, tym bardziej, że nie odnaleziono informacji na temat łączenia tego konkretnie produktu.

Dokonując porównania zgrzewania wibracyjnego oraz doczołowego metodą gorącej płyty, w aspekcie łączenia pasów napędowych i transportujących, zwracając szczególną uwagę na wytyczne technologiczne i praktyczną realizację procesu, można wysunąć następujące wnioski [29, 38, 45, 52, 53]:

- zgrzewanie gorącą płytą charakteryzuje się dłuższym okresem wykonywania spoiny dlatego wydajność procesu jest mniejsza,
- zgrzewanie gorącą płytą charakteryzuje się mniejszym gradientem temperatury podczas nagrzewania i chłodzenia łączonego materiału. Procesy te przebiegają wolniej, w dłuższym czasie. Z tego

względem materiału przy zgrzewaniu gorącą płytą ma szerszą strefę wpływu ciepła. Z jednej strony zjawisko to jest niekorzystne, ponieważ obszar zmiany właściwości względem materiału rodzimego jest większy, z drugiej strony natomiast ewentualny gradient zmian właściwości mechanicznych pasa po zgrzewaniu może być dzięki temu mniejszy,

- podczas zgrzewania gorącą płytą występują mniejsze wartości naprężeń szczątkowych po nagrzewaniu, co wynika z mniejszej szybkości chłodzenia złącza. Ten stan jest korzystny, ponieważ naprężenia szczątkowe ograniczają rzeczywistą wytrzymałość spoiny,
- zgrzewanie gorącą płytą jest korzystniejsze od wibracyjnego w przypadku zgrzewania materiałów o małej sztywności w tym np. elastomerów termoplastycznych. Wynika to z tego, że ten typ tworzyw ulega stosunkowo dużym odkształceniom, przy niewielkim obciążeniu i ma dobre zdolności do tłumienia drgań. W związku z tym, podczas wymuszonego ruchu drgającego w zgrzewaniu wibracyjnym, o relatywnie niewielkiej amplitudzie, wymagane parametry np. amplituda lub częstotliwość mogą nie być dotrzymywane. Wpływa to niekorzystnie na wydajność procesu,
- zgrzewanie doczołowe w porównaniu do wibracyjnego nie wymaga tak precyzyjnego przygotowania powierzchni czołowych łączonych elementów. W tym przypadku faza wyrównania z wstępnym nadtopieniem materiału zapewnia usunięcie niedokładności wymiarowych powstałych np. w wyniku nieprawidłowego ucięcia pasa,
- proces zgrzewania doczołowego charakteryzuje się mniejszą ilością zmiennych parametrów, które są łatwiejsze do sterowania. Nawet w przypadku wykonywania tych połączeń przez niedoświadczonych pracowników, łatwo jest dobrać odpowiedni czas, siłę docisku czy temperaturę. W przypadku zgrzewania wibracyjnego, ustalenie amplitudy, częstotliwości, siły docisku i wartości czasu, wymaga większej wiedzy osoby nadzorującej wykonywanie połączenia,
- oprzyrządowanie do wykonywania zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty jest znacznie prostsze konstrukcyjnie, a przez to mniej kosztowne od zgrzewarek wibracyjnych.

Obie grupy wniosków i obserwacji, zarówno z punktu widzenia naukowego jak i wytycznych technologicznych, w większości są ze sobą zgodne. Czynniki te powodują, że zgrzewanie doczołowe z wykorzystaniem gorącej płyty, jest prawdopodobnie częściej stosowane w praktyce przemysłowej. Pomimo tego, że nie odnaleziono w literaturze jednoznacznego porównania liczbowego w tym aspekcie, wniosek ten można wyciągnąć na podstawie ofert producentów pasów i oprzyrządowania do ich obróbki. Zśród wiodących firm oferujących termozgrzewalne pasy ciągnowe [6, 10-13, 18] (6 firm), wszystkie z nich posiadają w swojej ofercie oprzyrządowanie do ich zgrzewania metodą gorącej płyty, a tylko jedna [11] oferuje urządzenie do zgrzewania wibracyjnego. Może to świadczyć o odmiennej skali popularności obydwóch rozwiązań.

Analizując praktyczne, przemysłowe zastosowanie zgrzewania doczołowego z wykorzystaniem gorącej płyty, oprócz pasów napędowych i transportujących wykonanych z materiałów termoplastycznych o strukturze monolitycznej [4, 6, 7, 10-13, 18, 19, 29, 38, 54-66], będących w istocie przedmiotem tej pracy, można wysunąć wniosek, że ta metoda jest bardzo często stosowana do łączenia szerokiej gamy elementów

wykonanych z różnego rodzaju tworzyw sztucznych. Analizując wybrane obszary zastosowań można wyróżnić inne, bardzo charakterystyczne aplikacje tej metody łączenia:

- rury służące do transportu cieczy, gazów, proszków i granulatów, wykonane z tworzyw sztucznych i materiałów kompozytowych [32-35, 67-69],
- różnego rodzaju opakowania i elementy służące do transportu i magazynowania m.in. pudełka, butelki i palety wykonane z tworzyw sztucznych, gdzie łączone elementy mogą być wykonane z takiego samego materiału lub z różnych rodzajów tworzywa sztucznego, w tym wydruki 3D [35, 70-73]. Przedmioty te są powszechnie wykorzystywane w tradycyjnej produkcji przemysłowej jak i w gałęziach przemysłu, w których występują szczególne wymagania dotyczące środków do produkcji i transportujących np. w przemyśle spożywczym oraz medycznym [37, 74],
- elementy konstrukcyjne maszyn i urządzeń, stosowane zarówno w maszynach technologicznych (obudowy, wyposażenie aparatury elektrycznej lub proste części maszyn przenoszące niewielkie obciążenia jak np. obudowy bezpieczników, skrzynki elektryczne, przełączniki, zbiorniki) jak i w finalnych produktach (części maszyn, łączniki, części samochodowe, niewielkie zespoły i mechanizmy jak np. korpusy filtrów, obudowy lamp, obudowy akumulatorów, kolektory dolotowe) [35, 68, 70-76].

W aspekcie pasów napędowych i transportujących należy zauważyć, że ta metoda łączenia jest wdrożona i rekomendowana przez licznych producentów pasów [6, 7, 10-13, 18]. Zgrzewanie doczołowe z wykorzystaniem gorącej płyty jest szeroko stosowane zarówno w procesie produkcyjnym pasów o zamkniętym obwodzie, jak i w pracach serwisowo-naprawczych przenośników oraz przekładni pasowych.

1.4. Podsumowanie rozdziału

Pasy napędowe i transportujące stanowią bardzo ważną grupę części maszyn ze względu na to, że są podstawowymi elementami roboczymi wielu rodzajów przekładni cięgnowych oraz przenośników pasowych, powszechnie stosowanych w przemyśle. W ogólnej, bardzo rozbudowanej klasyfikacji tych mechanizmów, szczególne miejsce zajmują przekładnie i przenośniki z pasami o przekroju kołowym lub pierścieniowym i strukturze monolitycznej lub kompozytowej. Rozwiązania te pozwalają przekazywać niewielką moc, a także przenosić lekkie towary, nawet w przypadku bardzo złożonej geometrii układu napędowego lub przenośnika.

Łączenie do postaci zamkniętego obwodu pasów o strukturze monolitycznej i przekroju kołowym, wykonanych z polimerów wykazujących cechy termoplastyczne, może być zrealizowane na wiele sposobów. Połączenia mechaniczne są łatwe w wykonywaniu, jednakże powodują pewne ograniczenie funkcjonalności takich pasów. Zgrzewanie wibracyjne, cechujące się, jak wynika z przeglądu literatury naukowej, dużą powtarzalnością właściwości wytrzymałościowych złącza, nie jest powszechnie stosowane, głównie ze względów ekonomicznych i technologicznych. Połączenia spajane, wykonywane za pomocą zgrzewania z wykorzystaniem gorącej płyty, w szczególności doczołowe, są metodą zdecydowanie dominującą w zakresie procesu finalnej obróbki takich pasów. Wynika to głównie z: łatwości stosowania, niskich kosztów oprzyrządowania oraz korzystnych właściwości eksploatacyjnych tak przygotowanych części maszyn.

2. Uzasadnienie podjętej tematyki

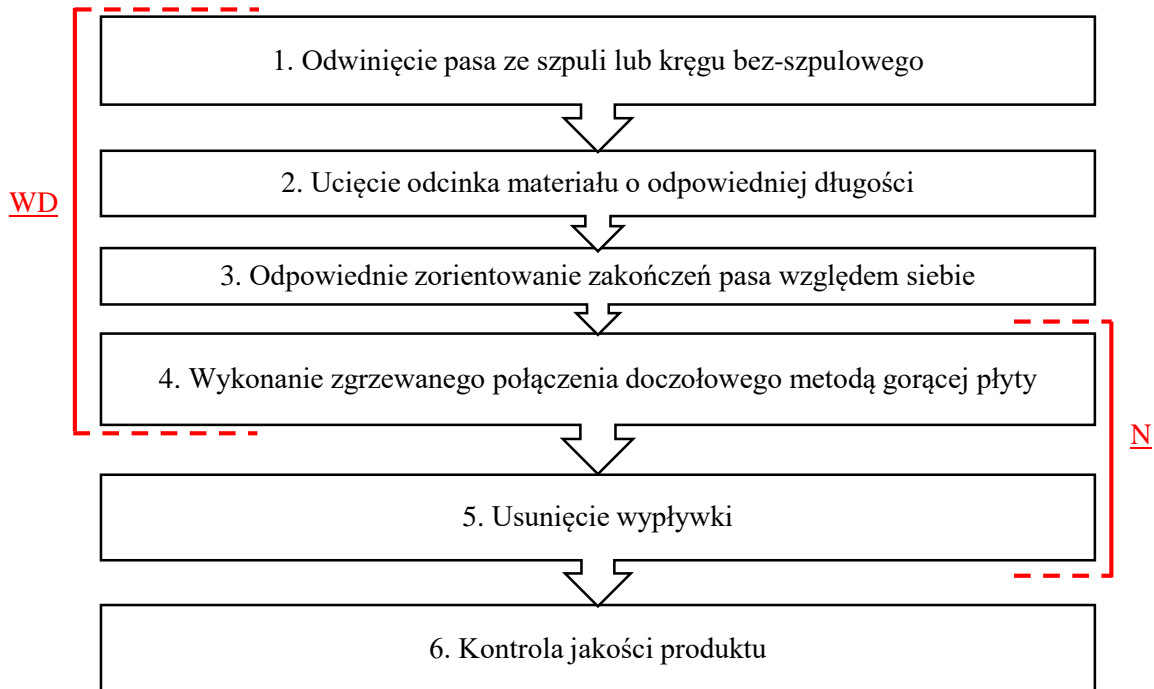
Powszechność stosowania pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym i strukturze monolitycznej, wykonanych z materiałów wykazujących cechy termoplastyczne powoduje, że problematyka usprawniania ich produkcji jest aktualna i bardzo ważna dla producentów. Dotyczy to szczególnie aspektów związanych z udoskonalaniem przebiegu poszczególnych operacji technologicznych, co wpływa na poprawę ogólnego bilansu ekonomicznego produkcji, poprzez m.in. poprawę jakości i powtarzalności cech produktów oraz obniżenie ilości czasu potrzebnego do ich wykonania.

Podczas analizy procesu produkcyjnego takich pasów wykonano przegląd rynku w aspekcie stosowanych rozwiązań produkcyjnych. Zauważono, że łączenie pasów o przekroju kołowym do postaci zamkniętego obwodu za pomocą zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty, przeprowadzane jest zazwyczaj w sposób ręczny. Nie odnaleziono informacji na temat funkcjonowania w przemyśle urządzenia wykonującego te operacje technologiczne w sposób automatyczny, poza materiałami reklamowymi jednej z firm, wskazującymi na wykorzystanie automatycznego urządzenia realizującego podobny proces dla pasa klinowego (rozdział 6.2). Dodatkowo należy zauważyć, że ogólnie istnieją w technice rozwiązania zautomatyzowanych urządzeń do zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty (rozdziały 1.3.2, 5.1 i 6.2), jednakże mają one zastosowanie zazwyczaj do produkcji odmiennego rodzaju elementów, o znacznie różniących się od pasów wymiarach geometrycznych i wykonanych z innych materiałów (m.in. bardziej złożony przekrój poprzeczny, większe wymiary gabarytowe, brak konieczności uzyskania zamkniętego obwodu po zgrzewaniu, większa sztywność niż elastyczne pasy ciągnowe). Z tych powodów, podczas współpracy z producentem gotowych pasów ciągnowych, powstała idea zautomatyzowania procesu doczołowego zgrzewania pasów o przekroju kołowym, wykonanych z materiału termozgrzewalnego. Dotychczas stosowana ręczna metoda zgrzewania (rozdział 5.1) powoduje zmniejszenie efektywności zakładu produkcyjnego ze względu na czas, który jeden z pracowników musi poświęcić na wykonanie takich złącz. Dodatkowo, szczególnie w przypadku mniej doświadczonych operatorów, powtarzalność geometrii i właściwości mechanicznych wytwarzanych pasów jest ograniczona ze względu na ręczne zadawanie parametrów technologicznych oraz związany z tym specyficzny sposób sterowania procesem (rozdział 5.1).

Ogólnym założeniem towarzyszącym rozpoczęciu działań w tym temacie było opracowanie rozwiązania technologicznego procesu zgrzewania, które będzie pozwalać na zautomatyzowanie tego procesu, a w konsekwencji opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów, które może zostać wdrożone do seryjnej produkcji tych części maszyn. W związku z tym, opracowano modelowy algorytm wykonywania takiego pasa (Rys. 26). Biorąc pod uwagę poszczególne operacje technologiczne, niezbędne do wykonania połączenia zgrzewanego takiego produktu ustalono, że urządzenie będzie spełniać pierwsze cztery punkty algorytmu, co będzie skutkowało przetworzeniem półwyrobu (ciągną o dużej długości nawiniętego na szpulę lub zwiniętego w krąg) do postaci pasa o zamkniętym obwodzie i określonej długości. W celu ograniczenia kosztów budowy prototypu, na tym etapie odstąpiono od zautomatyzowanego ucinania wypływkę. Operacja ta, dla pasów wykonanych przez projektowane urządzenie, będzie wykonywana ręcznie, przy okazji szczegółowej kontroli jakości uzyskiwanych złącz.

Po przyjęciu tych założeń wykonano szczegółowy przegląd literatury obejmujący dwa główne aspekty:

- charakterystykę materiałów, z których wykonywane są pasy, w celu pozyskania informacji przydatnych w aspekcie projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego (rozdział 4.1),
- aktualne podejście naukowe i praktyczne do realizacji procesu zgrzewania elastycznych tworzyw sztucznych, a w szczególności pasów (rozdziały 5.1 oraz 6.2).



WD – wymagania funkcjonalne zautomatyzowanego systemu łączenia pasów

N – obszar działań naukowych

Rys. 26. Algorytm wykonywania zgrzewanego połączenia doczołowego pasa napędowego lub transportującego z określeniem zaplanowanego zakresu prac

Niestety nie odnaleziono w literaturze (publikacjach naukowych, katalogach i ofertach poszczególnych producentów) potrzebnych informacji, ściśle związanych z pasami tego rodzaju. W odniesieniu do właściwości zgrzewanego materiału, główne ograniczenie stanowił brak jednoznacznej informacji na temat powiązania pomiędzy konkretnym rodzajem pasa ciągnowego (oferowanego w katalogach producentów półwyrobów), a surowcem z którego może być produkowany (w rozumieniu dostępnych w handlu tworzyw sztucznych w formie np. granulatu do przetworzenia, dla których właściwości materiałowe są określone w kartach katalogowych wydawanych przez firmy chemiczne je produkujące). Dodatkowo nie odnaleziono również informacji na temat wpływu procesu produkcji półwyrobu (ciągłe wytłaczanie lub profilowanie) na końcowe właściwości takiego półproduktu. W odniesieniu do procesu technologicznego zgrzewania, dostępnych jest dużo informacji, jednakże dotyczą one zgrzewania sztywnych tworzyw sztucznych, o złożonym przekroju poprzecznym. Procesy te sterowane są za pomocą siły lub ciśnienia docisku w poszczególnych fazach tej operacji (różne wartości poosiowej siły technologicznej F_{11}). Uznano, że takie podejście w aspekcie zgrzewania pasów, dla których oczekiwane wartości poosiowej siły technologicznej F_{11} są niewielkie, w praktyce przemysłowej może być trudne do zrealizowania i kosztowne. W związku z tym, postanowiono opracować własny, autorski sposób przeprowadzania tego procesu.

Czynniki te przyczyniły się do sformułowania problematyki badawczej, skupionej na operacji zgrzewania, w której występują dwa podstawowe wątki:

- badań materiałowych, realizowanych w celu rozpoznania właściwości termomechanicznych tworzywa z którego wykonany jest pas, których wyniki będą użyteczne w pracach badawczych nad zgrzewaniem,
- analizy procesu zgrzewania, pod kątem zjawisk fizycznych zachodzących podczas niego, ze zwróceniem szczególnej uwagi na uplastycznienie pasa na gorącej płycie, jako jednej z najważniejszych operacji tego procesu technologicznego.

Dodatkowo, do prac o charakterze naukowo-badawczym włączono również badania nad ścinaniem wyplýwki. Pomimo tego, że operacja ta nie została zaplanowana do realizacji w pierwszej wersji konstrukcji urządzenia zgrzewającego, to jest ona przewidywana do wykonywania łącznie ze zautomatyzowanym zgrzewaniem, podczas dalszego rozwoju tego urządzenia. W związku z tym, przy okazji wykonywania badań zorientowanych na wyznaczenie właściwości materiałowych, zaplanowano również te, które mogą się przyczynić do szczegółowej analizy naukowej operacji usuwania wyplýwki, którą później również przeprowadzono.

Celem wykonanych prac jest zatem dokładne rozpoznanie potrzebnych właściwości materiałowych pasa oraz szczegółowa analiza procesu zgrzewania (a w szczególności uplastyczniania pasa), skutkujące opracowaniem rozwiązania technologicznego zautomatyzowanego zgrzewania pasów, możliwego do wdrożenia w projektowanym zautomatyzowanym urządzeniu zgrzewającym.

3. Teza i zadania badawcze

Na podstawie poczynionych założeń i zaplanowanych działań związanych z opracowaniem technologii zautomatyzowanego zgrzewania pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym, sformułowano następującą tezę rozprawy doktorskiej:

Wykorzystując wyniki analizy procesu zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty oraz rezultaty rozpoznania właściwości termomechanicznych pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym, które są wykonane z elastomerów termoplastycznych, możliwe jest opracowanie metodologii przeprowadzania operacji zgrzewania takich pasów w sposób efektywny oraz zaproponowanie metodyki wyznaczania parametrów technologicznych, na potrzeby projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego.

Biorąc pod uwagę sformułowaną tezę, a także aktualny stan wiedzy naukowej w aspekcie zautomatyzowanego zgrzewania termozgrzewalnych pasów napędowych i transportujących o przekroju kołowym, wyszczególniono następujące zadania badawcze:

- rozpoznanie właściwości materiału, z którego wykonany jest pas, w warunkach obciążenia mechanicznego i temperatury o stałej lub zmiennej wartości, w celu określenia podstawowych wytycznych do przeprowadzenia procesu zgrzewania oraz oceny dalszych perspektyw w zakresie możliwości poprawy jego efektywności,
- opracowanie metodologii przeprowadzania procesu zgrzewania pasa metodą gorącej płyty, możliwej wykorzystania w warunkach przemysłowej produkcji pasów o przekroju kołowym i zamkniętym obwodzie, a także pozwalającej na zautomatyzowanie poszczególnych operacji wchodzących w skład tego procesu technologicznego,
- analiza przebiegu uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie i wyznaczenie parametrów technologicznych umożliwiających jego efektywny przebieg,
- wyznaczenie rozkładu temperatury podczas uplastyczniania materiału pasa,
- opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów napędowych i transportujących metodą gorącej płyty, o konstrukcji umożliwiającej wdrożenie do badań eksploatacyjnych w warunkach przemysłowych, wraz z opracowaniem metodologii wyznaczania parametrów nastawczych.

4. Właściwości termomechaniczne elastomerowych pasów ciągnowych

4.1. Przegląd stanu wiedzy

Pasy ciągnowe o przekroju kołowym wykonywane są zazwyczaj z elastomerów termoplastycznych, czyli materiałów należących do grupy tworzyw sztucznych. W ogólnym ujęciu, tworzywa sztuczne należą do grupy polimerów, które oprócz bazowych jednostek strukturalnych (monomerów połączonych w łańcuchy – stąd określenie *polimery*), zawierają w swoim składzie syntetyczne lub naturalne dodatki, pełniące określone funkcje, m.in.: napełniacze, zmiękczacze, stabilizatory, środki smarujące i barwiące. Dzięki temu możliwa jest modyfikacja właściwości bazowego polimeru, w celu uzyskiwania pożądanych cech: użytkowych, wytrzymałościowych, estetycznych oraz wymaganej trwałości [20, 54, 77, 78]. Elastomery termoplastyczne, są szczególną grupą tworzyw sztucznych, wykazując unikatowe właściwości.

Polimery są materiałami organicznymi, zbudowanymi ze związków węgla z innymi pierwiastkami zdolnymi do utworzenia wiązania kowalencyjnego z węglem np.: wodorem, tlenem, fluorem czy siarką. Surowcami do ich produkcji są przede wszystkim: ropa naftowa, węgiel oraz gaz ziemny. Są to związki wielkocząsteczkowe, których cząsteczki posiadają co najmniej 1000 atomów. Powstają w procesie polimeryzacji, czyli łączenia w długie łańcuchy jednostek podstawowych jakimi są *monomery*. Zwyczajowo są one nazywane: *makrocząsteczkami*, *łańcuchami monomerów* lub *łańcuchami polimerowymi*. Makrocząsteczka zbudowana jest z powtarzalnych segmentów, połączonych ze sobą za pomocą wiązań kowalencyjnych, przy czym makrocząsteczki mogą między sobą być połączone za pomocą wiązań kowalencyjnych, wodorowych lub van der Waalsa [41, 54, 78, 79].

Ogólne właściwości polimerów są odmienne od cech reprezentowanych przez inne grupy materiałów inżynierskich, czyli szkielek, ceramiki czy stopów metali. W porównaniu do materiałów reprezentujących ostatnią z tych grup, charakteryzują się stosunkowo niewielkimi wartościami właściwości wytrzymałościowych, dość niską i zmienną wartością sztywności (zmiana następuje zazwyczaj w funkcji czasu oraz wartości temperatury), a także względnie niską odpornością na działanie temperatury o podwyższonej wartości [41, 54, 78-81]. Z jednej strony, jest to wada tworzyw sztucznych, szczególnie w aspekcie eksploatacyjnym. Wynika to z tego, że nie mogą one bezpośrednio konkurować ze stopami metali w aplikacjach, gdzie istotne są tego typu cechy i wymagane są wysokie wartości parametrów materiałowych, szczególnie w aspekcie właściwości wytrzymałościowych.

Z drugiej jednak strony, cechy te stanowią zaletę tych tworzyw w kontekście technologii przetwarzania i finalnej obróbki materiału. Procesy te, w przypadku tworzyw sztucznych, są stosunkowo łatwe w przeprowadzaniu i względnie tanie, ze względu na stosunkowo niewielki nakład energetyczny potrzebny do ich przetwarzania (w porównaniu do stopów metali). Wartości typowej temperatury obróbki polimerów są dużo niższe niż w przypadku stopów metali, podobnie jak siły technologiczne niezbędne do zmiany ich kształtu. Powoduje to, że wytworzenie produktów o złożonej geometrii (co zazwyczaj wiąże się z dużymi wymaganiami w zakresie technologii wykonania) jest stosunkowo łatwe do przeprowadzenia [23, 24, 28, 32, 54]. Z tych powodów, możliwości obróbcze polimerów są względnie duże, przez co technologia przetwarzania tworzyw sztucznych jest dość mocno rozpowszechniona.

Dodatkową zaletą tworzyw sztucznych, jest względna łatwość uzyskiwania materiału o pożądanym, ściśle określonych właściwościach użytkowych. Takie cechy jak:

- względnie niskie nakłady energetyczne związane z przetwarzaniem materiału,
- możliwość prawie nieograniczonego komponowania mieszanek materiałowych,
- możliwość uzupełnienia struktury materiału za pomocą innych frakcji (np. domieszek nieorganicznych ciał stałych w postaci proszków, włókien itd.),

powodują, że tworzywa sztuczne są bardzo atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym, powszechnie stosowanym w wielu aspektach życia. W inżynierii powszechnie wykorzystywane są elementy konstrukcyjne służące do budowy maszyn, wykonane z tworzyw sztucznych lub ich mieszanek stanowiące struktury samoistne, a także z materiałów kompozytowych. W ogólnym ujęciu, kompozyty są stanowione przez wielofazowe kompozycje złożone z osnowy i wzmocnienia. Tworzywa sztuczne zazwyczaj pełnią rolę osnowy kompozytu, przez co stanowią podstawowy surowiec do ich otrzymywania [41, 79, 80].

Polimery charakteryzują się względnie niską gęstością, około czterokrotnie mniejszą od stali, co stanowi zaletę tych materiałów [41]. Pomimo zazwyczaj gorszych właściwości wytrzymałościowych w porównaniu do materiałów metalowych, co wiąże się z koniecznością stosowania większych wartości parametrów geometrycznych wytwarzanych elementów konstrukcyjnych (np. grubości ścianek), części wykonane z tworzyw sztucznych na ogół są lżejsze od tych wykonanych ze stopów metali [41, 79, 80].

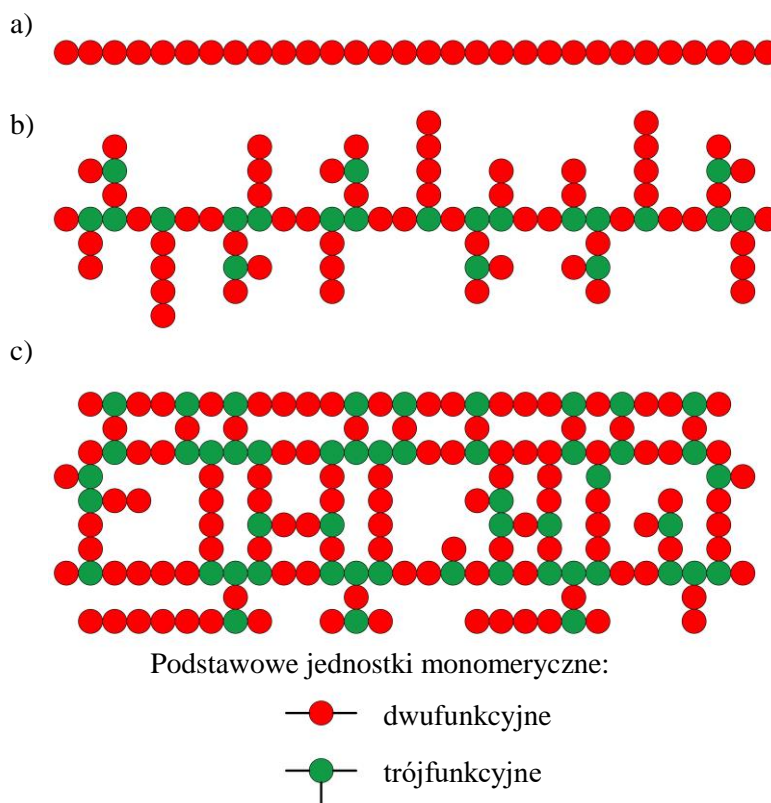
W wielu zastosowaniach przydatne są szczególne właściwości fizyczne i chemiczne, które można uzyskać poprzez odpowiednie sterowanie składem chemicznym tworzywa. Analizując najbardziej charakterystyczne przypadki znane w inżynierii, powszechnie uzyskiwana jest odporność na działanie różnego rodzaju substancji chemicznych (jest to istotne w przemyśle przetwórczym, spożywczym i farmaceutycznym), dielektryczność (skutkuje to powszechnym stosowaniem polimerów w roli izolatorów elektrycznych) lub przezroczystość (dzięki czemu w pewnych aplikacjach mogą zastępować szkło). Ważną grupą tworzyw sztucznych są materiały charakteryzujące się dobrymi właściwościami ślizgowymi i małym współczynnikiem tarcia, przy współpracy z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Ze względu na te właściwości, z niektórych polimerów wykonuje się łożyska ślizgowe [20, 41, 54, 79].

Zgrzewane pasy ciągnowe będące przedmiotem zainteresowania wykonane są z elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu. Jest to dość specyficzne tworzywo sztuczne, które zależnie od składu chemicznego, może przynależeć wyłącznie do grupy materiałów termoplastycznych lub posiadać cechy z pogranicza termoplastów i elastomerów, a w pewnych warunkach reprezentować cechy typowe dla elastomerów. Właściwości fizyczne tego materiału silnie zależą od jego składu chemicznego, budowy strukturalnej oraz masy cząsteczkowej [20, 82, 83]. Z tego powodu celem jest przeprowadzenie analizy cech charakterystycznych podstawowych grup tworzyw sztucznych.

W ogólnym ujęciu, polimery można podzielić na trzy zasadnicze grupy [41, 79]:

- termoplasty czyli materiały, które podczas zwiększania wartości ich temperatury podlegają plastycznemu płynięciu, co w konsekwencji prowadzi do ich topnienia. Z drugiej jednak strony, po ponownym obniżeniu wartości temperatury wykazują one skłonność do powrotu do swoich pierwotnych właściwości mechanicznych,

- duroplasty czyli tworzywa, które pod wpływem temperatury o podwyższonej wartości lub specjalnych związków chemicznych, stają się nietopliwe i trudno rozpuszczalne, przez co nie podlegają uplastycznieniu. W tym przypadku, dalsze zwiększanie wartości temperatury materiału zazwyczaj prowadzi do chemicznego rozpadu. Ze względu na czynnik, który powoduje ich umocnienie, można je podzielić na duroplasty termoutwardzalne (wykazujące opisane zachowanie pod wpływem podwyższonej wartości temperatury) oraz chemoutwardzalne (wykazujące opisane zachowanie pod wpływem dodatkowych substancji chemicznych, intencjonalnie umieszczanych w ich otoczeniu). W ogólnym ujęciu tworzywa utwardzalne są bardziej wytrzymałe od termoplastycznych,
- elastomery czyli tworzywa, które charakteryzują się możliwością uzyskiwania dużych wartości odkształceń sprężystych, dochodzących do 1000%, przy względnie niewielkiej wartości naprężenia, pochodzącego od siły wymuszającej. Dodatkową ich cechą jest zdolność do powrotu do pierwotnego kształtu (cecha ta jest często określana jako *pamięć kształtu*). Oznacza to, że po odkształceniu i usunięciu wymuszenia powodującego deformację, tworzywa te potrafią powrócić do swoich pierwotnych cech geometrycznych, czyli kształtu i wymiarów nadanych w procesie wytwarzania (podczas sieciowania i wulkanizacji) [84].

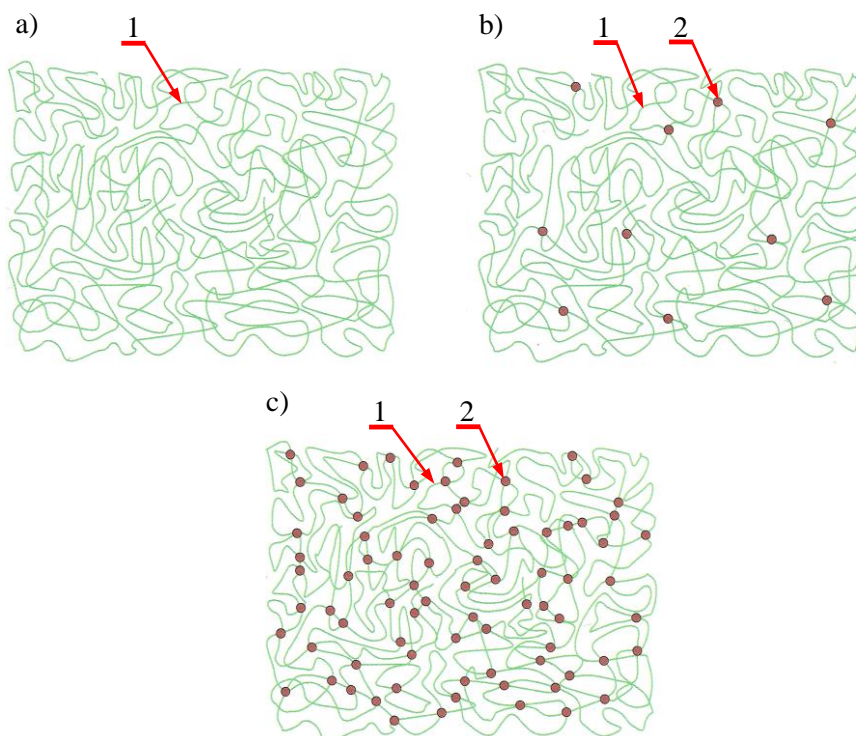


Rys. 27. Przykładowe schematy organizacji przestrzennej jednostek monomerycznych w podstawowych rodzajach łańcuchów polimerowych (opracowano na podstawie [41]): a) łańcuch liniowy, nierozgałęziony, b) łańcuch nieznacznie rozgałęziony, c) łańcuch rozgałęziony – usieciowany

Makrocząsteczki w tworzywach sztucznych połączone są w długie łańcuchy, w których pojedyncze cząsteczki, zespolone są ze sobą za pomocą silnych wiązań kowalencyjnych (Rys. 27). Dzięki temu właściwości wytrzymałościowe, odporność na działanie różnych czynników chemicznych oraz podwyższonej temperatury, rozpatrywane wzdłuż łańcuchów, są bardzo wysokie. Łańcuchy te mogą być prostoliniowe

lub w różnym stopniu rozgałęzione. Zazwyczaj są one ze sobą splecione oraz pozawijane, tworząc przestrzenną strukturę, która w ujęciu makroskopowym stanowi o objętości tworzywa.

Struktura łańcuchów makrocząsteczek liniowa lub nieznacznie rozgałęziona (Rys. 27a i b) jest charakterystyczna dla tworzyw termoplastycznych [41]. Koherentność materiału w standardowej temperaturze użytkowania utrzymywana jest dzięki względnie słabym wiązaniom wtórnym van der Waalsa, którymi łańcuchy są wzajemnie ze sobą połączone. Dodatkowym czynnikiem pomagającym w utrzymaniu spójności takich polimerów, jest splątanie makrocząsteczek (Rys. 28a).



Rys. 28. Przykładowe struktury łańcuchów makrocząsteczek w typowych polimerach (opracowano na podstawie [85]): a) typowy łańcuch polimeru termoplastycznego, b) typowy łańcuch elastomeru – nieznacznie usieciowanego, c) typowy łańcuch polimeru usieciowanego – duroplastu; 1 – łańcuch monomerowy, 2 – wiązanie sieciujące (kowalencyjne)

Należy jednak zauważyć, że powyżej pewnej wartości temperatury wiązania wtórne pomiędzy łańcuchami są na tyle osłabione że się rozpadają, co powoduje pogorszenie właściwości wytrzymałościowych i sztywności polimeru. Skutkuje to zdolnością do łatwiejszego odkształcania takiego materiału. Wynika to z braku sił mogących utrzymać łańcuchy we wzajemnym, ściśle określonym położeniu. Z tego względu makrocząsteczki łatwo ślizgają się po sobie, co sprzyja powstawaniu odkształceń pod wpływem przyłożenia dowolnej, niewielkiej siły lub oddziaływania podwyższonej temperatury. Z tego względu cechami charakterystycznymi tworzyw termoplastycznych są: niewielkie wartości właściwości wytrzymałościowych oraz mięknięcie (plastyczne płynięcie) wraz ze wzrostem wartości temperatury, prowadzące do topnienia. Sprzyja to ich uplastycznianiu w temperaturze o podwyższonej wartości [41, 54, 77, 79, 85], co ułatwia przetwórstwo fizyczne I i II rodzaju (wtórne i wstępne) [28, 86].

Inną odmianą budowy cząsteczkowej polimerów jest ukształtowanie, w którym łańcuchy polimerowe są wzajemnie powiązane silnymi wiązaniami kowalencyjnymi. Struktura taka jest określana jako usieciowana (Rys. 27c oraz 28b i c).

Budowa ta jest charakterystyczna dla tworzyw termoutwardzalnych oraz elastomerów. Silne wiązania pierwotne pomiędzy sąsiadującymi ze sobą łańcuchami makrocząsteczek powodują, że tworzywa te z reguły są bardziej wytrzymałe i odporne na działanie różnych substancji chemicznych. Zazwyczaj są one nierozpuszczalne, nie topią się ani nie podlegają plastycznemu płynięciu. Wzrost wartości temperatury ponad pewną granicę (temperatura degradacji T_d), powoduje ich rozkład chemiczny [20, 54, 79].

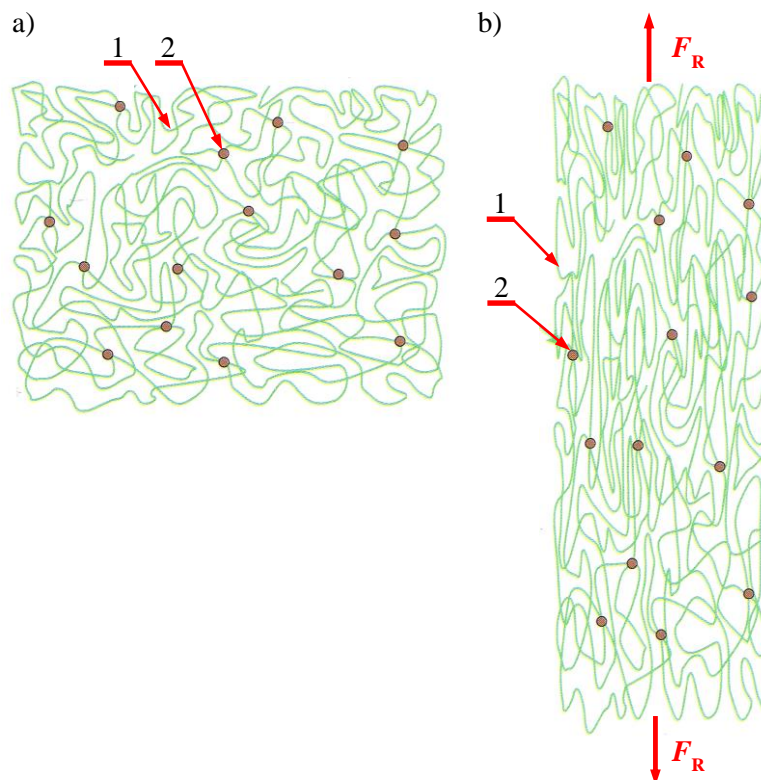
Różnica pomiędzy tworzywami utwardzalnymi, a elastomerowymi wynika z ilości wiązań sieciujących. Materiały elastomerowe posiadają ich mniej w porównaniu do duroplastów, a ich ilość oscyluje w granicy kilku wiązań sieciujących na 100 cząsteczek w łańcuchu (w przypadku tworzyw utwardzalnych, ta liczba jest co najmniej 10-krotnie większa) [20, 79, 85].

Typowe tworzywa elastomerowe są polimerami prawie liniowymi, o małej gęstości sieciowania. W temperaturze pokojowej większość ich wiązań sieciujących ulega rozpadowi, dzięki czemu są one łatwo odkształcalne pod wpływem niewielkiego naprężenia. Ich najbardziej charakterystyczną cechą, czyli zdolność do powrotu do poprzedniego kształtu po usunięciu czynnika wywołującego odkształcenie, wynika z obecności wiązań sieciujących. Pozwalają one na ponowne usytuowanie makrocząsteczek, w tych samych położeniach, po ustaniu obciążenia (Rys. 29). Są to wiązania pierwszorzędowe, więc nie ulegają zniszczeniu pod wpływem odkształceń ani temperatury o podwyższonej wartości (bez przekraczania wartości temperatury degradacji tworzywa T_d). Elastyczność takiej struktury przestrzennej (z względnie niewielką liczbą wiązań sieciujących) umożliwia jednak ich znaczne odkształcenia. W związku z tym, obserwowalnym skutkiem takiej budowy jest fakt, że odkształcenia nie są trwałe, po ustaniu obciążenia materiał powraca do pierwotnego stanu [20, 54, 79, 84, 85].

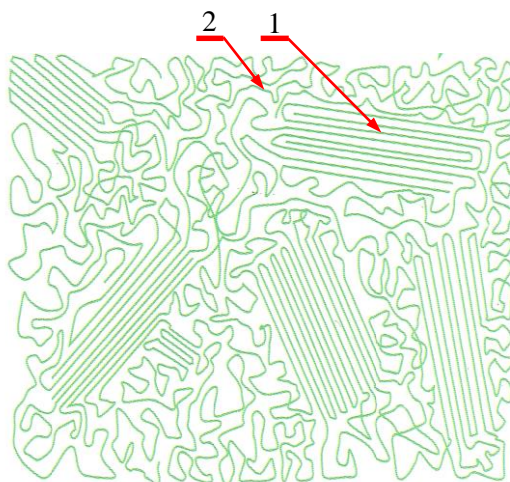
Makrocząsteczki tworzyw sztucznych, zależnie od składu chemicznego, ze względu na swoje uporządkowania mogą przyjmować dwie odmienne struktury: ciała amorficznego lub krystalicznego.

Ciało amorficzne charakteryzuje się całkowitym brakiem uporządkowania łańcuchów w swojej strukturze (Rys. 30 oraz 32a). Skutkuje to tym, że wszelkie przemiany fizykochemiczne następują w sposób stopniowy wraz ze zmianą wartości temperatury. W przypadku tworzyw amorficznych nie ma ściśle określonych granic temperaturowych, w których zmieniają swój stan fizyczny. Zmiany te zazwyczaj odbywają się w pewnych przedziałach wartości temperatury. Wynika to z tego, że ich nieuporządkowana struktura nie podlega przemianom w jednakowych warunkach i w tych samych przedziałach czasowych, w całej objętości. W ogólnym ujęciu polimery amorficzne podlegają plastycznemu płynięciu, reprezentują stan wysokoelastyczny w standardowych warunkach otoczenia, a także rozpuszczają się w wybranych rozpuszczalnikach. Czym większa masa cząsteczkowa takiego tworzywa, tym ich zachowanie się jest bardziej pokrewne grupie elastomerów oraz duroplastów niż termoplastów [41, 54, 77, 78].

Obszary krystaliczne w polimerach to miejsca, w których łańcuchy makrocząsteczek są uporządkowane, tworząc strukturę względnie gęsto upakowanych pakietów łańcuchów (Rys. 30 oraz 32a). Najczęściej są one zorientowane równolegle względem siebie, co pozwala zmniejszyć odległości pomiędzy nimi. Wpływa to pozytywnie przede wszystkim na właściwości wytrzymałościowe takiej struktury. Dodatkowo skutkiem takiego uporządkowania jest obecność wyraźnych wartości temperatury, przy których zachodzą w nich przemiany fizykochemiczne.



Rys. 29. Zachowanie się łańcuchów polimerowych podczas odkształcania nieznacznie usieciowanego elastomeru w wyniku działania siły rozciągającej F_R (opracowano na podstawie [85]): a) brak siły rozciągającej, b) elastomer podczas rozciągania; 1 – łańcuch monomerowy, 2 – wiązanie sieciujące (kowalencyjne)



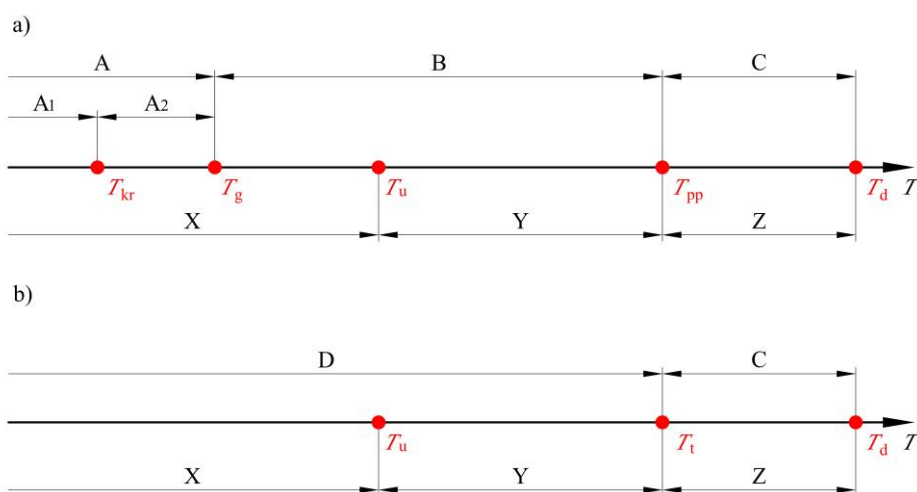
Rys. 30. Struktura makrocząsteczek polimeru częściowo krystalicznego (opracowano na podstawie [85]): 1 – obszar uporządkowanych makrocząsteczek (krystaliczny), 2 – obszar nieuporządkowanych makrocząsteczek (amorficzny)

Należy jednak zauważyć, że materiały w których wszystkie makrocząsteczki są uporządkowane, w sposób naturalny praktycznie nie występują [41, 79, 85]. Najczęściej struktura materiału jest pomieszana, gdzie część objętości tworzywa stanowią obszary amorficzne, a część krystaliczne. Wynika to z faktu, że zmniejszanie się objętości materiału podczas ochładzania go do temperatury o wartości niższej od temperatury topnienia, a także konieczność dostarczenia dodatkowej energii do przeprowadzenia przemiany fazowej krystalizacji powodują, że nie zachodzi ona nigdy w całej objętości tworzywa [41, 54, 77, 78]. Z tego względu, materiały takie przyjmują strukturę dwufazową, będącą mieszaniną krystalitów oraz nieuporządkowanych cząsteczek. Parametrem charakteryzującym ten stan jest stopień krystalizacji. Wyraża on

stosunek objętości skryształizowanej do całkowitej objętości tworzywa. Jego wartość zazwyczaj waha się w granicach od 10% do 90%. Resztę objętości polimeru wypełnia struktura amorficzna [41].

Polimery częściowo krystaliczne, w porównaniu do amorficznych, charakteryzują się zazwyczaj: większą twardością, lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi, lepszą odpornością na działanie wysokiej wartości temperatury oraz mniejszą wrażliwością na działanie czynników chemicznych. Właściwości te polepszają się wraz ze wzrostem stopnia skryształizowania, co wynika ze zmniejszania odległości pomiędzy łańcuchami makrocząsteczek. Podobnie jak w przypadku ciał amorficznych, im większa masa cząsteczkowa tworzywa, tym ich właściwości są bardziej pokrewne tworzywom elastomerowym. W związku z faktem, że ich budowa jest bardziej uporządkowana, charakteryzują się one ściśle określonymi temperaturami, w których zmieniają swój stan fizyczny. W przeważającej liczbie przypadków ich parametry np. lepkość i gęstość zmieniają się w sposób skokowy [41, 54, 77, 78].

W przypadku analizy procesu zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych wykonanych z materiałów termoplastycznych (które mogą być amorficzne lub częściowo krystaliczne), niezwykle ważnym jest uwzględnienie wpływu wartości temperatury tworzywa na jego stan fizykochemiczny oraz właściwości, które są obserwowalne w skali makroskopowej. Aby to uczynić w możliwie przystępny sposób, można przeprowadzić analizę obecności poszczególnych stanów fizykochemicznych dla polimerowych struktur amorficznych i krystalicznych, w funkcji ogólnie pojętej wartości temperatury T (Rys. 31).



Rys. 31. Stany fizykochemiczne polimerów i ich położenie na osi temperatury wraz z temperaturami charakterystycznych przemian (opracowano na podstawie [22, 77]): a) faza amorficzna, b) faza krystaliczna; A, B, C i D – stany fizykochemiczne z punktu widzenia użytkowego: A – stan szklisty, A₁ – stan kruchy sprężysty, A₂ – stan kruchy z wymuszoną elastycznością, B – stan wysokoelastyczny (lepko-sprężysty), C – stan ciekły, D – stan stały; X, Y i Z – stany fizykochemiczne z punktu widzenia przetwórczego: X – stan stały, Y – stan plastyczny, Z – stan ciekły; T_{kr} – temperatura przemiany kruchej, T_g – temperatura zeszklenia, T_u – temperatura uplastycznienia, T_{pp} – temperatura plastycznego płynięcia, T_i – temperatura topnienia, T_d – temperatura degradacji termicznej materiału, T – temperatura (ogólnie)

Podjmując tego typu analizę, należy zwrócić uwagę na dwa odmienne kryteria oceny stanu fizykochemicznego polimeru [22]:

- kryterium użytkowe (stany A, B, C i D), które wskazuje na makroskopowo obserwowalne cechy użytkowe materiału, uwzględniające m.in.: właściwości mechaniczne (w tym sztywność, wytrzymałość i podatność na pękanie) [41, 77, 79, 85]. To podejście do opisu przemian fizycznych wraz

ze zmianą wartości temperatury materiału jest uproszczone i wskazuje ogólną zasadę zmiany stanu fizycznego polimeru. Opis ten jest często wykorzystywany do zobrazowania ogólnego zachowania się tworzyw i porównania ich z innymi grupami materiałów,

- kryterium przetwórcze (stany X, Y i Z), określające szeroko pojętą zdolność do przetwarzania polimeru metodami fizyczno-chemicznymi (przetwórstwo wstępne i wtórne) [22, 28, 86]. Ten rodzaj opisu stanów fizycznych, jest specjalistycznym i uwzględnia operacje termicznego przetwórstwa tworzyw sztucznych (do grupy tych operacji zaliczamy m. in. spajanie, w tym zgrzewanie). Według tego opisu, punkty charakterystyczne przemian fizycznych klasyfikowalne, ze względu na kryterium użytkowe, są doprecyzowane o wartości istotne z punktu widzenia przetwórstwa.

Obszary amorficzne w polimerach, z punktu widzenia użytkowego, wykazują następujące stany fizykochemiczne (i związane z nimi wartości temperatury przejścia) (Rys. 31a) [22, 77]:

- stan szklisty (A), w którym fizycznie polimer jest w stanie stałym, występuje aż do temperatury zeszklenia T_g . Poniżej wartości tej temperatury łańcuchy polimerowe są na tyle umocnione wiązaniami wtórnymi, że w skali makroskopowej materiał staje się twardy i sprężysty. Takie właściwości tworzywa pokrewne są w stosunku do materiałów typu szkła, w związku z tym stan ten jest nazwany szklistym [80]. W tym zakresie temperaturowym, pod wpływem działania obciążenia, utrudnione jest przemieszczanie się i ślizganie makrocząstek, możliwe są jedynie lokalne ruchy segmentów poszczególnych łańcuchów [41]. W przypadku niektórych polimerów, w zakresie stanu szklistego, można wyróżnić również temperaturę przemiany kruchej T_{kr} , która jest niższa od temperatury zeszklenia T_g . Temperatura przemiany kruchej T_{kr} stanowi granicę pomiędzy [77]:
 - stanem kruchym sprężystym (A_1), w którym przenoszenie naprężeń zachodzi zgodnie z prawem Hooke'a. Wynika to z braku możliwości giętkiego odkształcania łańcuchów polimerowych w tym zakresie wartości temperatury, możliwe są jedynie drgania pojedynczych atomów. Z tym wiąże się możliwość występowania jedynie sprężystych odkształceń. Materiał w tym stanie charakteryzuje się skłonnością do kruchego pęknięcia, przy niewielkich wartościach odkształcenia względnego (nieprzekraczających 5%),
 - stanem kruchym z wymuszoną elastycznością (A_2), w którym energia atomów jest już na tyle duża, że oprócz drgań pojedynczych atomów, możliwe jest zwiększenie wartości energii cieplnej układu (atomów) przez działanie obciążenia zewnętrznego do tego stopnia, że możliwe jest przekroczenie wartości bariery energetycznej blokującej ruch segmentów sieci. Skutkuje to tym, że oprócz odkształceń sprężystych łańcuchów polimerowych możliwe jest wystąpienie odkształceń wysokoelelastycznych i plastycznych.

Podczas analizy pracy (bądź obróbki np. podczas zgrzewania) elementów typu pas napędowy lub transportujący, wartość temperatury przemiany kruchej T_{kr} nie jest istotna. Wynika to z faktu, że jej wartość jest dużo niższa od temperatury pracy T_o , która zazwyczaj zawiera się w przedziale od 20°C do 25°C. W związku z tym, tego typu materiał nie pracuje w zakresie kruchym,

- stan wysokoelastyczny (lepko-sprężysty) zawarty pomiędzy temperaturą zeszklenia T_g , a temperaturą plastycznego płynięcia T_{pp} (B). W tym zakresie wartości temperatury energia cieplna układu

jest większa od wartości bariery energetycznej umożliwiającej ruchy makrocząsteczek, w związku z czym stają się one bardzo giętkie. W wyniku tego, możliwa jest zmiana ich wzajemnej orientacji, co umożliwia ruchy całych łańcuchów. Dzięki temu w strukturze materiału zachodzą odkształcenia wysokoelastyczne, sięgające kilkuset procent,

- stan ciekły (C), który występuje po przekroczeniu temperatury plastycznego płynięcia T_{pp} , w której polimer jest zdolny do przepływu w określonych warunkach. W tym zakresie temperatury, wartość energii oddziaływań pomiędzy makrocząsteczkami jest znikomo mała, a podatność łańcuchów polimerowych bardzo duża. Powyżej temperatury plastycznego płynięcia T_{pp} , osłabieniu i zdysocjowaniu ulegają wiązania wtórne. Dzięki temu przyłożenie nawet względnie niewielkiej siły do takiego materiału, powoduje jego odkształcenie czyli przemieszczenie łańcuchów polimerowych (np. ich rozprostowanie podczas rozciągania). W tym momencie rozpoczyna się plastyczne płynięcie materiału, bez udziału znaczących odkształceń sprężystych. W wyniku tego sieć odkształca się znacząco nawet pod wpływem znikomych obciążeń.

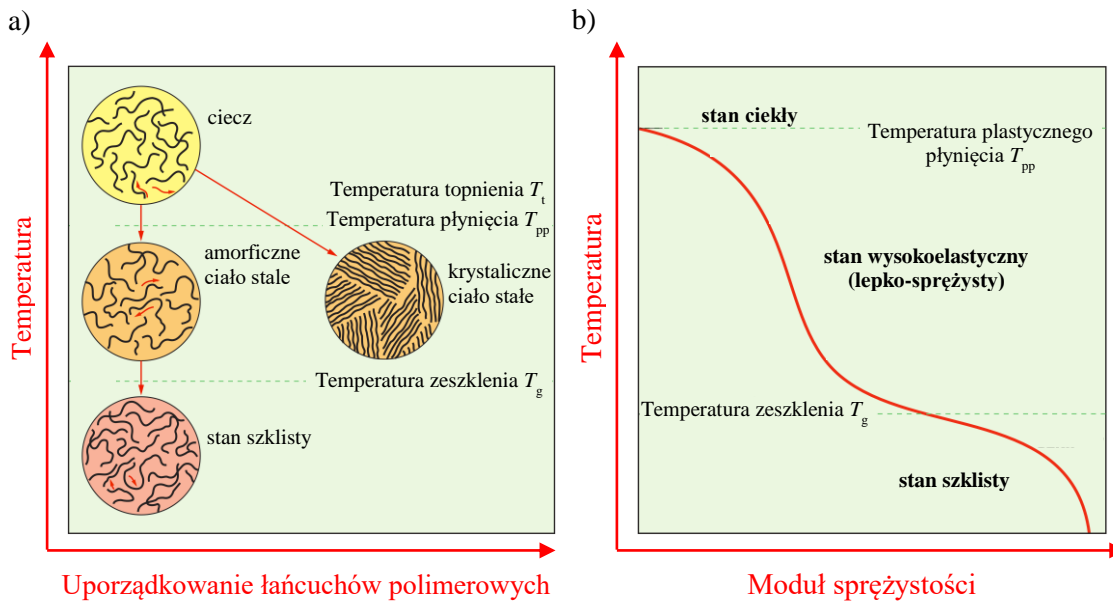
Poszczególne stany fizykochemiczne osiągnane przez amorficzny polimer skutkują określonym typem zachowania w skali makroskopowej. Po odpowiednim zwiększeniu wartości temperatury, powyżej temperatury zeszklenia T_g , polimery amorficzne najpierw przyjmują stan wysokoelastyczny (lepko-sprężysty ze znacznym i zwiększającym się wraz z wartością temperatury udziałem fazy lepkiej), a następnie stan ciekły, w którym są one łatwo formowalne i obrabialne [54, 77, 78]. Operacja ta dla polimerów amorficznych, wykazujących cechy termoplastyczne, jest w pełni odwracalna. Oznacza to, że w miarę ochładzania poniżej temperatury plastycznego płynięcia T_{pp} , wiązania wtórne umacniają się, przez co łańcuchy makrocząsteczek stają się ponownie splecione ze sobą i skręcone. Wraz z obniżaniem wartości temperatury materiału, ich odkształcenie zachodzi z coraz większym udziałem oddziaływania sprężystego (zamiast typowo plastycznego jak w przypadku wysokich wartości temperatury). Towarzyszy temu konieczność przykładania większej wartości siły w celu zmiany kształtu, niż w stanie ciekłym [79].

Z punktu widzenia przetwórstwa materiału, polimery amorficzne można scharakteryzować za pomocą następujących stanów fizykochemicznych [22]:

- stan stały (X), w którym polimer jest typowym ciałem stałym, który jest obserwowalny aż do temperatury uplastycznienia T_u . Jej wartość jest umowna i trudna do ustalenia, ze względu na to że przyjmuje odmienne wartości dla różnych technologii przetwórstwa (zależy to od konkretnych parametrów technologicznych). Określa ona przejście ze stanu stałego do plastycznego,
- stan plastyczny (Y), określa postać polimeru, która umożliwia rozpoczęcie obróbki materiału typowymi metodami przetwórstwa fizyczno-chemicznego,
- stan ciekły (Z), który zachodzi po przekroczeniu temperatury plastycznego płynięcia T_{pp} .

Należy pamiętać o tym, że w przypadku struktury amorficznej wartości temperatury zeszklenia (T_g) oraz plastycznego płynięcia (T_{pp}), nie są możliwe do określenia w sposób precyzyjny, a przemiany zachodzą w pewnym zakresie wartości temperatury. Opisanie zmiany objawiają się obserwowalną makroskopowo zmianą zachowania się tworzywa pod wpływem obciążenia, w zależności od warunków termicznych. Najbardziej charakterystycznym, mierzalnym skutkiem przemian strukturalnych zachodzących w polimerach

amorficznych (Rys. 32a) jest zmiana sztywności materiału, którą można określić poprzez wzrost lub spadek modułu sprężystości (Rys. 32b).



Rys. 32. Zmiana struktury oraz właściwości polimerów termoplastycznych wraz ze zmianą wartości temperatury (opracowano na podstawie [41]): a) postać struktury makrocząsteczek w zależności od wartości temperatury i stopnia uporządkowania łańcuchów polimerowych, b) moduł sprężystości polimeru amorficznego w zależności od wartości temperatury

Postać materiału zawierającego strukturę amorficzną, pracującego w temperaturze T o wartości spełniającej warunek:

$$T_g < T < T_{pp} \quad (4.1)$$

można opisać jako lepko-sprężystą (stan wysokoelastyczny), w której zależnie od aktualnej wartości temperatury zmienny jest udział właściwości sprężystych w stosunku do właściwości lepkich. Zazwyczaj wartość temperatury zeszklenia T_g , jest mniejsza od temperatury pokojowej, w związku z czym przyjmują stan wysokoelastyczny w normalnych warunkach otoczenia, w standardowej temperaturze pracy T_o .

Opis przemian fizycznych dla przypadku polimerowej struktury krystalicznej jest nieco prostszy. Ze względu na cechy użytkowe, możliwe dla tego typu materiału jest wyróżnienie dwóch podstawowych stanów użytkowych:

- stan stały (D) występujący aż do temperatury topnienia T_t struktury krystalicznej,
- stan ciekły (C) występujący w temperaturze o wyższej wartości.

Istotną różnicą w porównaniu do polimerów amorficznych jest brak występowania struktury szklistej oraz występowanie temperatury topnienia T_t zamiast plastycznego płynięcia T_{pp} . Temperatura topnienia T_t opisuje wartość stanu energetycznego układu, w którym zachodzi przemiana fizyczna I rzędu, polegająca na rozpuszczaniu fazy krystalicznej, która stanowi uporządkowany obszar zbliżonych do siebie i równoległych makrocząsteczek (Rys. 32a). Wartość tej temperatury może być precyzyjnie określona. Po jej przekroczeniu, oddziaływanie między cząsteczkami jest na tyle niewielkie, że materiał podlega plastycznemu płynięciu, bez udziału znaczących sił zewnętrznych.

W przypadku opisu przemian fizycznych z uwzględnieniem kryterium przetwórczego, zachodzące zjawiska są dokładnie takie same jak w przypadku polimerów amorficznych, z tą jednak różnicą, że faza ciekła może być zauważalna po przekroczeniu temperatury topnienia T_t struktury krystalicznej, zamiast temperatury plastycznego płynięcia T_{pp} , jak w przypadku polimerów o strukturze amorficznej.

Należy jednak zwrócić uwagę, że w większości przypadków, znane polimery mają struktury mieszane – częściowo krystaliczne. W takim przypadku, obecność przedstawionych stanów fizycznych i wartości temperatury charakterystycznych przemian dla materiału są kombinacją parametrów obu grup.

W przypadku analizy zgrzewania pasów wykonanych z elastomerów termoplastycznych, istotnym wydaje się zwrócenie szczególnej uwagi na temperaturę przemiany, w której materiał zmienia swój stan na uplastyczniony lub ciekły oraz wartości temperatury pozostałych punktów charakterystycznych i ich korelację z temperaturą zgrzewania T_z . Biorąc pod uwagę możliwą częściową krystaliczność tworzywa i zakładając, że temperatura plastycznego płynięcia części amorficznej T_{pp} jest porównywalna z temperaturą topnienia części krystalicznej T_t , temperatura zgrzewania powinna spełniać zależność [77]:

$$T_z \approx T_{pp} \approx T_t, \quad (4.2)$$

jednak ze względu na to, że określenie tych wartości temperatury w przypadku wielu polimerów może być problematyczne, a samo precyzyjne sterowanie tym parametrem niemożliwe, to w bardziej ogólnym ujęciu, biorąc pod uwagę uwarunkowania technologiczne, temperatura zgrzewania T_z powinna spełniać warunki:

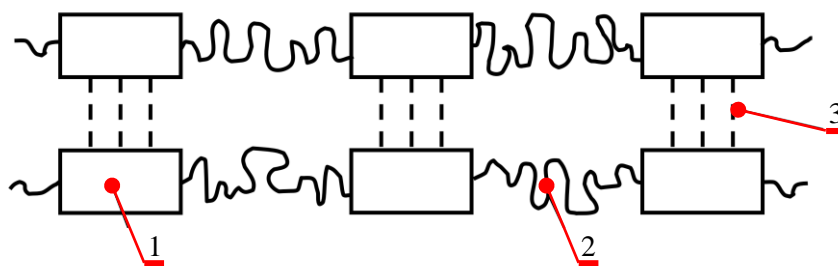
$$T_u < T_z < T_d. \quad (4.3)$$

Działanie takie powinno zapewnić wystarczającą wartość energii cieplnej, która pozwoli na dostateczne uaktywnienie makrocząsteczek w celu utworzenia połączenia pomiędzy zgrzewanymi powierzchniami.

Szczególne ciekawą grupę materiałów inżynierskich, należących do grupy tworzyw sztucznych, tworzą elastomery termoplastyczne, czyli materiały z pogranicza elastomerów i termoplastów. Tworzywa te powstają zazwyczaj z wykorzystaniem metody polimeryzacji addycyjnej diizocyjanianów z dialkoholami [20]. W zależności od warunków wytwarzania mogą one zawierać różnorodne grupy: estrowe, eterowe, uretanowe, mocznikowe oraz pierścienie aromatyczne. Z tego względu jego łańcuch węglowodorowy jest znacznie rozgałęziony, co wpływa na właściwości, które mogą być modyfikowane w szerokim zakresie, na drodze odpowiednich reakcji chemicznych [20, 42, 77]. Dodatkowo podczas wytwarzania elastomery takie podlegają procesowi sieciowania. Zależnie od substancji bazowej, z której wyprodukowano taki materiał, proces ten może być inicjowany za pomocą siarki lub izocyjanianów, bowiem zachodzi on dzięki obecności grup nienasyconych w makrostrukturze [20, 42, 77, 81]. Jego przebieg wpływa na rodzaj otrzymanego tworzywa, przez co należy rozumieć skład chemiczny oraz kompozycję łańcuchów makrocząsteczek. Ma to bezpośrednie przełożenie na końcowe właściwości użytkowe takiego materiału, m.in.:

- twardość,
- ścieralność,
- wytrzymałość mechaniczną i sztywność,
- odporność na oddziaływanie innych substancji chemicznych (rozpuszczalników),
- zdolność do powtórnego przetwarzania w temperaturze o podwyższonej wartości.

W ogólnym ujęciu elastomery termoplastyczne charakteryzują się segmentową budową (Rys. 33). Ich łańcuch węglowodorowy składa się z naprzemiennie usytuowanych segmentów giętkich (2) np.: metylenowych, estrowych lub eterowych, a także segmentów sztywnych (1) np.: mocznikowych, uretanowych lub aromatycznych. Zwyczajowo, segmenty sztywne, nadają tworzywu wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych. Giętkie natomiast znacznie wpływają na jego zdolność do odkształcania. Segmenty te nie mieszają się ze sobą, tworząc dwufazową, heterogeniczną strukturę [20, 42, 77].



Rys. 33. Schemat struktury poliuretanów termoplastycznych (opracowano na podstawie [20]): 1 – segment sztywny, 2 – segment giętki, 3 – wiązanie sieciujące

Segmenty giętkie i sztywne tworzą lokalnie separowane obszary w postaci domen miękkich i twardych, w postaci segmentowych kopolimerów. Domeny miękkie (których temperatura zeszklenia T_g ma niższą wartość niż temperatura pracy materiału) stanowią swego rodzaju osnowę, w której rozmieszczone są domeny twarde (dla których wartość temperatury zeszklenia T_g jest zazwyczaj wyższa od wartości standardowej temperatury eksploatacji materiału). W takim przypadku domeny twarde spełniają funkcję węzłów tak utworzonej fizycznej sieci makrocząsteczek [77]. Przy temperaturze o wartości wyższej niż temperatura przemiany domen twardych (temperatura zeszklenia T_g dla struktury amorficznej lub topnienia fazy krystalicznej T_i dla obszarów krystalicznych), segmenty sztywne w tych domenach stają bardziej ruchliwe, dzięki czemu elastomer termoplastyczny można przetwarzać w taki sposób, jak klasyczne tworzywa termoplastyczne. Dodatkowo, łańcuchy makrocząsteczek elastomeru termoplastycznego, są sieciowane za pomocą wiązań fizycznych wodorowych i van der Waalsa, które ulegają odwracalnemu rozpadowi w podwyższonej temperaturze, co również ułatwia ich przetwarzanie.

Tworzywa te mogą zawierać zarówno obszary amorficzne jak i krystaliczne. W związku z tym, właściwości tego typu tworzywa są kombinacją cech obu grup. Jego parametry wytrzymałościowe oraz odporność na działanie czynników chemicznych są pokrewne cechom tworzyw krystalicznych. Zdolność do plastycznego formowania oraz rozpuszczalność w pewnych typach rozpuszczalników wynika z obecności w objętości tego materiału obszarów amorficznych [20].

Rezultatem tej szczególnej budowy strukturalnej i zachodzących zjawisk jest charakterystyczna cecha elastomeru termoplastycznego, czyli specyficzne (w stosunku do innych tworzyw sztucznych) zachowanie się pod wpływem zmiany wartości temperatury. W podstawowej temperaturze użytkowania (np. w warunkach normalnych przy temperaturze otoczenia o wartości $T_o = 25^\circ\text{C}$), materiał wykazuje stan wysokoelastyczny. Makroskopowym objawem tych zjawisk jest utrzymywanie właściwości typowych dla elastomerów, do temperatury o wartości około 100°C . W tym przypadku odwracalne odkształcenia sięgające kilkuset procent wywołane względnie niewielkimi obciążeniami, wynikają z możliwości rozprostowywania

łańcuchów makrocząsteczek pod wpływem obciążenia. W temperaturze o wartości wyższej, obserwowane jest mięknięcie materiału i zachowywanie typowe dla tworzyw termoplastycznych, co wynika z rozpadu wiązań sieciujących oraz przekroczenia wartości temperatury przemiany fizycznej dla domen twardych tego materiału [20, 42, 77, 78].

Takie właściwości sieci strukturalnej materiału powodują, że w skali makroskopowej materiał ten wykazuje właściwości z pogranicza tworzyw elastomerowych i termoplastycznych. Umożliwia to jego wtórne przetwórstwo termiczne podczas zgrzewania (lub spawania), bez istotnych zmian strukturalnych powodujących wyraźne zmiany makroskopowych właściwości tego tworzywa. Dzięki temu powszechnie w przemyśle jest wielokrotnie przetwarzanie termiczne, m.in.: wytłaczanie, wtryskiwanie czy zgrzewanie. W związku z tym, biorąc pod uwagę przetwórstwo fizyczno-chemiczne I rodzaju (wtórne, a w skład tej grupy wchodzi m.in.: spajanie), a w szczególności operacje spawania i zgrzewania, w inżynierii przyjęło się określić, że materiał ten jest termozgrzewalny [11, 28, 42, 77, 78, 82, 83].

Elastomery termoplastyczne są materiałami powszechnie znanymi i stosowanymi w różnych gałęziach inżynierii. Tworzywa te są wykorzystywane do produkcji między innymi różnego rodzaju uszczelek, elastycznych osłon i łączników, wyposażenia narzędzi oraz osłon przewodów elektrycznych i hydraulicznych [78]. Szczególnie znanym zastosowaniem materiałów należących do tej grupy są różnego rodzaju pasy napędowe i transportujące, powszechnie stosowane w przemyśle przetwórczym. Pasy wykonane z tych materiałów mogą mieć strukturę monolityczną lub kompozytową, przy czym w takim przypadku elastomer termoplastyczny zazwyczaj stanowi ośnowę. Dwie podstawowe grupy elastomerów termoplastycznych, z których produkowane są pasy to [10-13]:

- tworzywa na bazie poliuretanu, o handlowym oznaczeniu TPU,
- tworzywa na bazie poliestru, o handlowym oznaczeniu TPE.

Analizując produkty dostępne w ofercie wiodących producentów termozgrzewalnych pasów o przekroju kołowym, można zauważyć że pasy wykonane z elastomerów termoplastycznych na bazie poliuretanu są bardziej popularne, o czym może świadczyć ich większa liczebność w ofertach [6, 7, 10-13, 18]. Biorąc pod uwagę ten fakt oraz aktualne zapotrzebowanie przemysłu, jako studium przypadku do dalszych analiz nad zgrzewaniem pasa z wykorzystaniem gorącej płyty przyjęto pas o przekroju kołowym i średnicy d zawierającej się w przedziale od 4 mm do 18 mm, wykonany z elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu, o oznaczeniu handlowym TPU C85A [11] firmy BEHAbelt.

Ten elastomer termoplastyczny, z racji obecności w swojej strukturze polimeru występującego zazwyczaj w postaci krystalicznej, jakim jest poliuretan, może wykazywać strukturę częściowo krystaliczną. Charakterystyka fizyczna i właściwości tych tworzyw silnie zależą od procentowego udziału fazy krystalicznej, ale także od udziału segmentów sztywnych i giętkich. W pełni elastyczne, w normalnej temperaturze użytkowania, elastomery termoplastyczne na bazie poliuretanu, zawierają od 60% do 80% segmentów giętkich. Dla domen utworzonych przez te segmenty, temperatura zeszklenia T_g ma wartość niższą od standardowej wartości temperatury pracy T_o . Powoduje to, że są one zazwyczaj elastyczne i łatwo się odkształcają w normalnej temperaturze użytkowania. Z drugiej strony obecność segmentów sztywnych, o temperaturze zeszklenia T_g i topnienia fazy krystalicznej T_i o wartości wyższej od temperatury normalnego użytkowania

T_0 , sprzyja polepszeniu ich wytrzymałości mechanicznej poprzez polepszenie twardości, sztywności i wytrzymałości [20, 77, 87]. Ze względu na to, w temperaturze do 100°C ich zachowanie jest podobne do gumy. W temperaturze o wartości wyższej, następuje dysocjacja wiązań sieciujących i reorganizacja makrostruktury, co umożliwia ich uplastycznienie [78]. Dzięki temu poliuretany zachowują bardzo dobre właściwości sprężyste i zdolność do odkształceń w niskich wartościach temperatur. W warunkach podwyższonej temperatury, możliwe jest ich zgrzewanie. Należy zauważyć, że zjawisko rozpadania się wiązań jest odwracalne. Umożliwia przywrócenie pierwotnych właściwości po wykonanej obróbce termicznej [20].

Rozpatrywane tworzywo posiada szereg właściwości, które są pożądane w przypadku zastosowania ich do wytwarzania pasów napędowych i przenośnikowych. Jego cechy fizyczne można modyfikować w szerokim zakresie, co czyni je materiałami uniwersalnymi [20]. Poliuretany posiadają względnie duży moduł sprężystości, dobrą wytrzymałość na rozciąganie i wielokrotne zginanie, co jest istotne w pasach napędowych i transportowych. Ich odporność na ścieranie, rozdieranie i zdolność do tłumienia drgań jest zazwyczaj wyższa niż w przypadku innych tworzyw termoplastycznych. Charakteryzują się również dobrymi właściwościami termoizolacyjnymi. Istotny w rozpatrywanym zastosowaniu jest brak podatności tego materiału na oddziaływanie różnorodnych czynników chemicznych. Odnaczają się odpornością na działanie: utleniaczy, roztworów kwasów, smarów, olejów oraz rozpuszczalników organicznych [80]. Dzięki temu z powodzeniem mogą być stosowane w układach przenośnikowych na różnego rodzaju liniach produkcyjnych, w których obecność różnorodnych czynników chemicznych może być problemem dla innych materiałów konstrukcyjnych.

Różnorodność tworzyw poliuretanowych utrudnia określenie dokładnych wartości liczbowych ich właściwości bez przeprowadzenia szczegółowych badań, a dostępne dane są szacunkowe. Górna granica odporności na działanie podwyższonej temperatury, w której zachowują swój stan fizyczny, waha się od 80°C do 120°C [80]. Można przyjąć, że ich maksymalna wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej waha się od 20 MPa do 70 MPa, przy wydłużeniu od 200% do 800 %, a twardość od 35° do 98° według skali A metody Shore'a [20].

Bardzo korzystne właściwości mechaniczne różnego rodzaju poliuretanów powodują, że są one powszechnie stosowane do produkcji części maszyn pracujących w różnorodnych urządzeniach. Wykonuje się z nich między innymi: uszczelki, osłony przewodów, łożyska, koła zębate, rolki, czy różnego rodzaju części specjalistyczne, np. sita do sortowników wibracyjnych. Materiały z tej grupy również są powszechnie wykorzystywane do produkcji przedmiotów codziennego użytku (np. podeszw butów, etui ochronnych do telefonów) czy elementów wyposażenia mebli [20, 77, 81]. Najważniejszym zastosowaniem, z punktu widzenia niniejszego opracowania, są jednak pasy ciągnowe.

Pasy monolityczne, które zostały wybrane jako studium przypadku do dalszej analizy, wykonane z elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu TPU C85A, scharakteryzowano w katalogu jednego z producentów (którego produkty zostały użyte w dalszych pracach badawczych) za pomocą szeregu właściwości użytkowych (Tab. 5), które odnoszą się głównie do gotowego produktu – czyli pasa, który może być zastosowany w przenośniku lub przekładni.

Tab. 5. Wybrane właściwości pasa o przekroju kołowym wykonanego z elastomeru termoplastycznego TPU C85A wykorzystywanego w badaniach [11]

Cecha	Oznaczenie	Wartość	
		Gładki	Szorstki
Struktura powierzchni	-		
Twardość w skali Shore'a A	[°Sh A]	88°	
Zakres średnic	d [mm]	2-20*	
Średnia masa 100 m długości	m_p [kg]	0,5-40*	
Minimalna średnica rolki	D_{\min} [mm]	15-220*	
Maksymalna zalecana siła rozciągająca przenoszona przez pas	F_{\max} [N]	11,77-1131,09***	
Współczynnik tarcia w kontakcie ze stalą	μ_1 [-]	0,6	0,45
Współczynnik tarcia w kontakcie z PE	μ_2 [-]	0,35	0,3
Współczynnik tarcia w kontakcie z HDPE	μ_3 [-]	0,3	0,25

*wartości identyczne dla obu rodzajów pasa dla wszystkich dostępnych średnic, rosnące wraz ze średnicą d ,
 **przy założeniu przyspieszenia ziemskiego $a_g = 9,81 \frac{m}{s^2}$

Pas ten występuje w dwóch odmianach, a podstawowym kryterium ich rozróżnienia jest struktura powierzchni, określana w handlu ogólnikowymi sformułowaniami jako: *gładki* i *szorstki*. Dodatkową informacją na temat tego rodzaju pasa, obecną w karcie katalogowej ręcznego urządzenia do zgrzewania [88], jest zalecany zakres wartości temperatury zgrzewania, spełniający zależność:

$$285^{\circ}\text{C} < T_z < 300^{\circ}\text{C}, \quad (4.4)$$

przy czym wartość ta jest podana jako ogólna dla wszystkich pasów monolitycznych wykonanych z poliuretanu termoplastycznego TPU, bez względu na średnicę d , strukturę powierzchni oraz twardość.

Przeprowadzona analiza dostępnych w karcie katalogowej danych, umożliwia wyciągnięcie następujących wniosków:

- nie podano dokładnych danych na temat właściwości materiałowych, a także jego struktury i kompozycji chemicznej,
- podane parametry dotyczą gotowego produktu i są skupione na właściwościach użytkowych pasa,
- pasy: *gładkie* i *szorstkie* różnią się między sobą jedynie w zakresie współczynników tarcia w połączeniu z materiałami, z których często produkowane są rolki napędowe i prowadzące.

Czynniki te powodują, że celem jest przeprowadzenie szczegółowej analizy i badań materiałowych tworzywa zastosowanego do produkcji tych pasów.

Analizując literaturę naukową dotyczącą tego typu materiałów, można wysunąć wniosek, że prowadzono już wiele prac badawczych związanych z ogólnie pojętymi elastomerami, a w szczególności termoplastycznymi. Wiele opublikowanych dzieł dotyczy również poliuretanów – w formie elastomeru termoplastycznego. Wśród znanych prac, najbardziej zbliżonych tematycznie do rozważań na temat materiału, z którego wykonywane są pasy napędowe i transportujące w aspekcie zgrzewania doczołowego, na szczególną uwagę zasługują prace dotyczące:

- formułowania modelu konstytutywnego elastomeru termoplastycznego. Na podstawie wniosków z pracy [43], która dotyczyła elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu (TPU) można stwierdzić, że jest to możliwe na podstawie cyklicznych testów ściskania próbki, z wykorzystaniem

obciążenia jednostronnie zmiennego. Wykonane prace badawcze, oprócz rezultatu w formie opracowanego modelu konstytutywnego dowiodły, że odpowiedź tego materiału na zmienne obciążenie jest złożona i nie jest łatwa do przewidzenia. Przebieg krzywej naprężenie-odkształcenie znacząco zależy od prędkości odkształcenia, wykazuje histerezę sprężystą oraz zauważalne osłabienie materiału w ramach postępującej liczby cykli odkształcenia. Opracowany model konstytutywny bazuje na podstawowych modelach reologicznych: Hooke'a i Maxwella [89-91] i jest ich kombinacją. Podobne podejście zaprezentowano w pracy [92] dla termoplastycznego wulkanizatu TPV, który jest jedną z odmian elastomerów termoplastycznych. Struktura tego materiału w omawianej pracy, jest o tyle charakterystyczna, że zawiera ona w swojej strukturze cząsteczki terpolimeru EPDM (będącego typowym elastomerem) umieszczone w termoplastycznym polipropylenie. Badania zostały przeprowadzone przy różnym udziale procentowym obu frakcji. Wnioski z nich wskazują jednoznacznie, że tego typu tworzywa reprezentują właściwości z pogranicza elastomerów i termoplastów. Dodatkowo postać opracowanego modelu konstytutywnego, jest bardzo zbliżona do wyników prac nad modelem dla TPU [43], co pozwala utwierdzić w przekonaniu, że elastomer termoplastyczny na bazie poliuretanu jest skłonny do reprezentowania właściwości z pogranicza tych dwóch grup tworzyw sztucznych. Nieco inne podejście do opracowania modelu konstytutywnego dla kopolimeru reprezentującego właściwości elastomeru termoplastycznego zaprezentowano w pracy [93]. W tym przypadku autorzy opracowali model zastępczy materiału, opierający się na niejednorodnej, nieściśliwej sieci włókien, odwzorowujących łańcuchy makrocząstek. Dzięki temu udało się autorom opracować model lepko-sprężystego i lepko-plastycznego zachowania się materiału, znacząco zmniejszając liczbę stałych materiałowych potrzebnych do posługiwania się takim modelem konstytutywnym. Model konstytutywny elastomerów termoplastycznych może być również opracowany na podstawie wartości temperatury dwóch charakterystycznych punktów termodynamicznych [94], dla materiału wykazującego cechy gumo-podobne. Podobnie jak w wyżej wymienionych pracach, model ten opisuje zachowanie lepko-sprężyste materiału i jest weryfikowalny podczas cyklicznego odkształcania tego tworzywa. Bardziej nowatorskie podejście do opracowania modelu konstytutywnego tego typu materiałów zaprezentowano w pracy [95]. Autorzy opisali tam model odkształcenia lepko-sprężystego elastomerów termoplastycznych, bazując na modelach odkształceń hiper-sprężystych, podobnie jak w przypadku wyżej wymienionych publikacji. W tym przypadku jednak, wykorzystano do tego celu podział energii odkształcenia na dwie składowe funkcje, bazujące na pojedynczych niezmiennikach tensora odkształcenia. Podejście to, zdaniem autorów pozwala znacząco rozszerzyć zakres stosowalności opracowanego modelu konstytutywnego,

- modelowania wybranych właściwości elastomerów wykazujących cechy magnetoreologiczne [96, 97]. Pomimo zgoła odmiennych właściwości, które reprezentują tego typu tworzywa, należą one do grupy materiałów elastomerowych, dzięki czemu ich zachowanie w standardowej temperaturze użytkowania jest pokrewne do elastomeru termoplastycznego. W tym przypadku, autorzy

wskazali sposób modelowania odpowiedzi na wymuszenie dynamiczne za pomocą zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta, bez formułowania modelu konstytutywnego. Wnioski z tych prac, z założeniem pominięcia zmiany sztywności tworzywa pod wpływem pola magnetycznego, mogą być przydatne podczas modelowania zachowania się materiału pasa, ze względu na znacznie prostszą formę modeli, które nie wymagają obszernych badań materiałowych. Podejście takie może być wystarczające na potrzeby modelowania materiału pasa, podczas analizy procesu zgrzewania,

- opracowywania uproszczonych modeli materiałowych na przykładzie poliuretanowego elastomeru termoplastycznego, na potrzeby badań symulacyjnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Bazując na uogólnionym modelu Mooney'a-Rivlina oraz wynikach z próbkki jednoosiowego rozciągania, możliwe jest otrzymanie uproszczonego modelu konstytutywnego [87]. Jego zastosowanie pozwala na predykcję zachowania się materiału, z wykorzystaniem tylko jednego badania (jednoosiowego rozciągania), co zdaniem autorów jest szczególnie przydatne w zastosowaniach inżynierskich. Dodatkowo, opracowany model jest bardzo łatwy do implantacji w obliczeniach numerycznych. Nieco inne podejście zaprezentowano w pracy [98], gdzie opracowano model konstytutywny elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu, wykorzystując dwa podejścia: z liniową lepko-sprężystością i nieliniową lepko-plastycznością. Wykonane badania eksperymentalne w tym przypadku, polegały na penetracji TPU za pomocą stożkowego wglębniaka. Na tej podstawie opracowano dwa uproszczone modele konstytutywne dające się zaimplementować podczas symulacji numerycznych,
- prac badawczych prowadzonych z naciskiem na chemiczny aspekt towarzyszący tego typu materiałom. Przykładami reprezentującymi poszczególne popularne kierunki takich prac, wykonywanych na elastomerach termoplastycznych na bazie poliuretanu są:
 - badania nad wpływem makrostruktury polimeru na końcowe właściwości użytkowe, m.in.: na maksymalną temperaturę użytkowania [99],
 - modyfikacja struktury makrocząsteczek w aspekcie uzyskania pożądanych właściwości użytkowych. Wykonuje się to m.in. poprzez opracowywanie kompozycji substancji chemicznych tworzących łańcuchy polimerowe i następujące po tym badania wpływu tych mieszanek na wzrost wytrzymałości wiązań, co zazwyczaj przekłada się na makroskopowy wzrost wytrzymałości materiału [100],
 - modyfikacja struktury TPU za pomocą np. kopolimeru styrenu, co wpływa na poprawę wytrzymałości na rozciąganie i odporności na zużycie ścierne [101],
 - modelowanie właściwości TPU w taki sposób, aby uzyskać nanokompozytową strukturę na bazie tego materiału [102]. W tej pracy, na podstawie testu jednoosiowego rozciągania określono, że specyficzne dodatki pozwalają na znaczne zwiększenie wytrzymałości i sztywności tego materiału,
- badań nad poszczególnymi parametrami mechanicznymi elastomerów termoplastycznych, w szczególności nad lepkością i jej zależnością od parametrów odkształcenia [103].

Wyżej wymienione prace [43, 87, 92-103], dotyczą elastomerów które wykazują cechy termoplastyczne. Poszczególne pozycje literaturowe koncentrują się konkretnie na poliuretanie. Pod kątem tematycznym, mogą one zostać scharakteryzowane za pomocą następujących cech, łącznych dla wszystkich tych opracowań:

- skupiają się w większości na analizie oraz wyznaczeniu modelu materiałowego dla tego typu tworzywa, a także na badaniu właściwości użytkowych w zależności od kompozycji makrostruktury, przy czym oba te podejścia wzajemnie są wspólne dla wszystkich z nich,
- celem tych prac jest zazwyczaj wyznaczenie charakterystyki mechanicznej materiału, przy czym środkiem do osiągnięcia tego celu jest zazwyczaj analiza zjawisk związanych z energią odkształcenia sprężystego, podczas różnych badań empirycznych,
- wykorzystywana jest analiza zachowania się lepko-sprężystego lub lepko-plastycznego tego typu materiałów,
- dotyczą zachowania się tego typu materiału jedynie w normalnej temperaturze użytkowania T_o , w związku z czym nie przynoszą informacji na temat jego reakcji na warunki obejmujące zmienną wartość temperatury oraz oddziałujące wtedy obciążenia mechaniczne.

Jak wynika z dokonanego przeglądu prac badawczych znanych z literatury naukowej, w większości koncentrują się one na dokonywaniu, poprawianiu i upraszczaniu opisu matematycznego zachowania się tego typu materiałów, w warunkach niezerowego stanu obciążenia. Jednakże brak jest jednoznacznych informacji na temat zmiany właściwości tego typu tworzywa w warunkach temperatury o zmiennej wartości, co ma miejsce podczas zgrzewania doczołowego pasów. W związku z tym, wnioski z tych publikacji nie odnoszą się bezpośrednio do zgrzewania pasów. Powinny zostać jednak uwzględnione w dalszych pracach badawczych, ze względu na pokrewność tematyczną, a w szczególności na uzyskanie wytycznych dotyczących modelowania tego typu materiału i postępowania podczas prac badawczych.

Aktualny stan wiedzy dostarcza również wielu informacji na temat wyspecjalizowanych metod badawczych, które mogą być zastosowane do badań tego typu materiałów w aspekcie zmiany ich właściwości termomechanicznych. Zastosowanie spektroskopii w podczerwieni (FTIR) [39] może pozwolić na identyfikację tworzywa, poprzez rozpoznanie jego kluczowych składników z chemicznego punktu widzenia. Wykonanie Dynamicznej Analizy Termomechanicznej (DMTA) pozwala natomiast na określenie odpowiedzi materiału na zmienną wartość obciążenia w warunkach zmiennej wartości temperatury. Tego typu badanie może być wykorzystane do określenia np. temperatury zeszklenia materiału T_g oraz lepkości dynamicznej η [104, 105].

Wszystkie wyżej wymienione pozycje literaturowe [39, 43, 87, 92-105] dostarczają informacji na temat prac badawczych prowadzonych nad elastomerem termoplastycznym, bez wskazania rodzaju produktu, który jest z niego wykonany. Podejście takie co prawda pozwala na rozpoznanie zjawisk zachodzących w tego typu tworzywie, niestety nie uwzględnia wpływu technologii wykonania produktu (np. pasów ciągnowych) na finalne właściwości produktu. Niestety, w literaturze naukowej niewiele można odnaleźć informacji na temat opisu właściwości końcowego produktu – pasów ciągnowych. Co prawda prowadzono już prace badawcze na temat wpływu temperatury na materiał podobnego pasa [106, 107], jednakże dotyczą

one innego aspektu. W tym przypadku autorzy badali wpływ temperatury na rozkład termiczny poliuretanowych pasów klinowych [106] oraz płaskich pasów kompozytowych o osnowie wykonanej z materiałów termoplastycznych [107]. Prace te wskazują metodykę badawczą, która może być zastosowana w analizie chemicznej tego typu materiałów, jednakże nie dostarczają informacji na temat ich zachowania, w warunkach odkształceń mechanicznych w stanie temperatury o podwyższonej i zmiennej wartości.

Cenne źródło informacji na temat danych materiałowych dla przypadku pasa ciągnowego mogą stanowić katalogi producenta półfabrykatów tworzyw sztucznych [82, 83]. Analizując te pozycje literaturowe, można odnaleźć informacje na temat materiału o nazwie handlowej *Elastollan*[®] C85A. W kartach katalogowych tego producenta, materiał ten jest dość szeroko scharakteryzowany za pomocą przybliżonych wartości wielu właściwości fizycznych, m.in.: gęstości, modułu sprężystości, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia, temperatury zeszklenia. Na podstawie analizy tych danych oraz dostępnych informacji na temat właściwości materiału, z którego wykonany jest pas TPU C85A (będący studium przypadku w tej analizie), można domniemać, że właściwości fizyczne obu tych tworzyw są bardzo zbliżone. Jednak ze względu na tajemnicę handlową, nie jest możliwe potwierdzenie, że to tworzywo jest wykorzystywane do produkcji pasa, który podlega analizie. W związku z tym, nie jest możliwe poleganie na właściwościach fizycznych przedstawionych w tych katalogach, natomiast mogą one stanowić źródło porównawcze do zgrubnego oszacowania poprawności wykonania planowanych prac badawczych.

Wnioski wyciągnięte z aktualnego przeglądu stanu wiedzy wskazują, że celem jest wykonanie serii badań materiałowych, które będą obrazować zachowanie się materiału pasa w temperaturze o zmiennej wartości, podczas oddziaływania na niego obciążenia mechanicznego, a w szczególności ściskającego. Dodatkowo potrzebę tą warunkuje fakt, że dostępne dane na temat tworzywa, z którego wykonane są poliuretanowe pasy napędowe i transportujące, nie są wystarczające do opisu zachowania się tego materiału podczas zgrzewania. Jediną informacją, która jest podawana, jest temperatura zgrzewania tego materiału T_z , zalecana przez producenta pasów [88], przy czym jest ona ogólna dla szerokiej grupy materiałów.

Niezwykle istotnym jest również fakt, że producent termozgrzewalnego pasa o przekroju kołowym, wykonanego z TPU C85A (będący studium przypadku przeprowadzanej analizy zgrzewania) posiada w ofercie pas płaski wykonany również z tego samego materiału [11]. Charakteryzuje się on w przybliżeniu takimi samymi wybranymi właściwościami fizycznymi, tj. barwą, twardością i strukturą powierzchni. Dodatkowo, zgodnie z dostępnymi danymi katalogowymi, tworzywo to ma taki sam skład chemiczny i związane z nim właściwości, jak materiał z którego wykonywany jest pas o przekroju kołowym. Mając świadomość tego, że w przypadku niektórych badań wykorzystanie pasa o przekroju kołowym może być problematyczne, ze względu na stan naprężenia w strukturze materiału podczas jego obciążenia, należy wziąć pod uwagę możliwość użycia pasa płaskiego, jako zamiennego produktu, który może być wykorzystany do łatwego pobierania próbek materiałowych.

W wielu przykładach prac badawczych prowadzonych nad tworzywami sztucznymi, a w szczególności dotyczących połączeń zgrzewanych, oceny jakości zgrzeiny lub wyznaczania parametrów mechanicznych analizowanego materiału, dokonuje się zazwyczaj na podstawie maksymalnej siły lub naprężenia podczas rozciągania, przenoszonej przez lity materiał lub złącze [50, 108-111]. W przypadku analizy gotowych

połączeń, określane zazwyczaj jest dodatkowo współczynnik względnej wytrzymałości zgrzeiny [112]. Wynika to z faktu, że podejmowane prace badawcze dotyczą często zgrzewania względnie sztywnych tworzyw sztucznych, dla których siła zrywająca charakteryzuje się względnie dużą wartością, a maksymalne odkształcenie podczas statycznej próby rozciągania nie przekracza kilkudziesięciu procent. W związku z tym, wyniki pomiaru wytrzymałości (szczególnie podczas statycznej próby rozciągania) nie są obciążone dużym procentowym błędem pomiarowym [113-116]. W dodatku, prostopadłościennie próbki stosowane w tym badaniu, są mniej podatne na odkształcenia wywołane złożonym stanem naprężenia w miejscu mocowania (podczas chwytania ich w płaskich szczękach maszyny wytrzymałościowej) od próbek o przekroju kołowym, które odkształcają się nieregularnie [56].

W przypadku badania poliuretanowych pasów ciągnowych o przekroju kołowym, które charakteryzują się względnie niewielką sztywnością i wytrzymałością [11, 82, 83], złożony stan naprężenia w miejscu mocowania próbek, może powodować ich znaczącą deformację. Dodatkowo pasy takie charakteryzują się podatnością na samoistne wysuwanie się z uchwytów maszyny wytrzymałościowej [56]. Zjawisko to w znaczący sposób może wpływać na wyniki badania. W związku z tym, zalecanym jest przeprowadzanie statycznej próby rozciągania dla znormalizowanych próbek wiósełkowych, wyciętych z płaskiego odcinka materiału [117, 118]. Niestety pozyskanie płaskich próbek o takim kształcie, z pasa o przekroju kołowym i niewielkiej średnicy jest problematyczne. W związku z tym, należy rozważyć w badaniach (mechanicznych i termomechanicznych, w których istnieje ryzyko nadmiernego odkształcania próbki w uchwycie urządzenia) wykorzystanie próbek pobranych z pasa płaskiego. Istnieje bowiem możliwość, wykonania znormalizowanych próbek z takiego produktu, które mogłyby posłużyć zamiennie do prac badawczych nad zgrzewaniem, a w szczególności do prób wytrzymałościowych, wykorzystując gotowy produkt i operację technologiczną cięcia [59, 118].

Biorąc jednak pod uwagę niewielką ilość danych katalogowych dostępnych na temat obu rodzajów pasa [11] (pod kątem właściwości fizycznych materiału), sprawdzenie identyczności tworzywa, z którego wykonywane są oba pasy wydaje się istotnym czynnikiem. Wynika to również z faktu, że pasy płaskie i okrągłe są wytwarzane z wykorzystaniem różnej technologii, co może mieć wpływ na rzeczywiste właściwości mechaniczne gotowego produktu [4]. W związku z tym, niezbędne jest sprawdzenie, czy odmienna postać geometryczna półproduktu takiego pasa, pomimo pozornie identycznego rodzaju materiału, ma mierzalny wpływ na jego właściwości termomechaniczne.

Na podstawie danych katalogowych [11], możliwe jest więc postawienie hipotezy zakładającej, że zastosowany pas o przekroju kołowym i wybrany pas płaski, posiadają jednakowe właściwości termomechaniczne, co w konsekwencji umożliwia zamienne ich stosowanie w pracach badawczych zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych. Hipoteza ta musi zostać jednak zweryfikowana. W związku z tym, zaplanowane badania materiałowe wykonano ze zwróceniem uwagi na dwa aspekty:

- analizę porównawczą, gdzie w wybranych badaniach empirycznych (w tych, w których to jest możliwe) porównano wartości wybranych właściwości mechanicznych i termomechanicznych obu rodzajów pasa. W tym celu, przyjęto robocze oznaczenie próbek, gdzie:
 - próbka typu A – oznacza tą, która została pobrana z pasa o przekroju kołowym,

- próbka typu B – oznacza tą, która została pobrana z pasa płaskiego.
 - analizę ilościową, która służyła pozyskaniu wartości wybranych właściwości fizycznych materiału pasa do dalszych prac badawczych nad analizą zgrzewania doczołowego. Badania zaplanowano w kierunku pozyskania takich właściwości termomechanicznych jak m.in.:
 - ciepło właściwe C_p przy stałym ciśnieniu,
 - temperatura topnienia T_l lub plastycznego płynięcia T_{pp} ,
 - gęstość ρ_p ,
 - lepkość dynamiczna η ,
 - współczynnik dyfuzyjności cieplnej a_{dc} ,
 - współczynnik Poissona ν ,
- a także ogólnego rozpoznania odpowiedzi materiału na obciążenie mechaniczne (w szczególności ściskające) w warunkach zmiennej wartości temperatury, co pozwoli na wyciągnięcie wniosków odnośnie spodziewanego zachowania się tego tworzywa podczas zgrzewania.

W związku z tym, prowadzone prace badawcze, zorientowane wokół badań empirycznych związanych z właściwościami fizycznymi materiału, skutkować będą wnioskami formułowanymi z uwzględnieniem obu aspektów. Na potrzeby rozpoznania podstawowych właściwości mechanicznych i termomechanicznych materiału pasa podlegającego analizie wykonano serię badań empirycznych, w stałej (standardowej) temperaturze otoczenia, a także w warunkach jej zmiennej wartości.

Prace badawcze nie wymagały chemicznego przygotowywania próbek. Ich wymiary geometryczne dostosowano do wymagań poszczególnych badań poprzez:

- obróbkę skrawaniem – frezowanie współbieżne na obrabiarce numerycznej EMCO Concept Mill 240D, za pomocą frezów dostosowanych do obróbki tworzyw sztucznych,
- obróbkę plastyczną – cięcie nożowe z wykorzystaniem wykrojnika jednoostrzowego.

4.2. Rozpoznanie właściwości termomechanicznych zgrzewanych pasów – metodologia

4.2.1. Badania właściwości fizycznych w warunkach stałej wartości temperatury

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania gęstości materiału (Rys. 34) [57]. Wykonano je metodą waporową [119], z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej AXIS AD200 (1) wyposażonej w statyw (4) z dwiema szalkami (2 i 3).

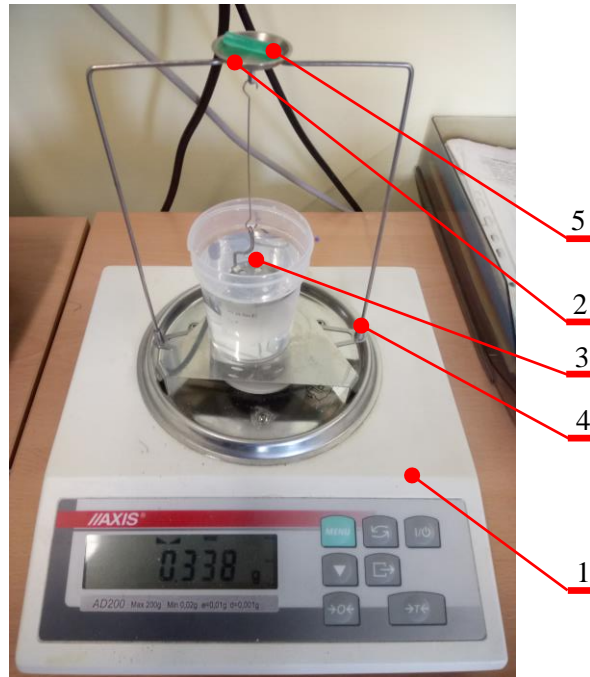
Badaniu gęstości poddano 2 rodzaje próbek:

- walcową typu A, o średnicy $d_g = 4$ mm i wysokości około $h_g = 10$ mm,
- prostopadłościenną typu B, o wymiarach nominalnych $b_g = 5$ mm oraz $g_g = 30$ mm.

Każda z próbek (5) była ważona kolejno: na szalce umieszczonej w powietrzu (2), a następnie na szalce umieszczonej w wodzie destylowanej (3). Pomiar obu mas, przy znanej ilości wody pozwolił na wyznaczenie gęstości z zależności:

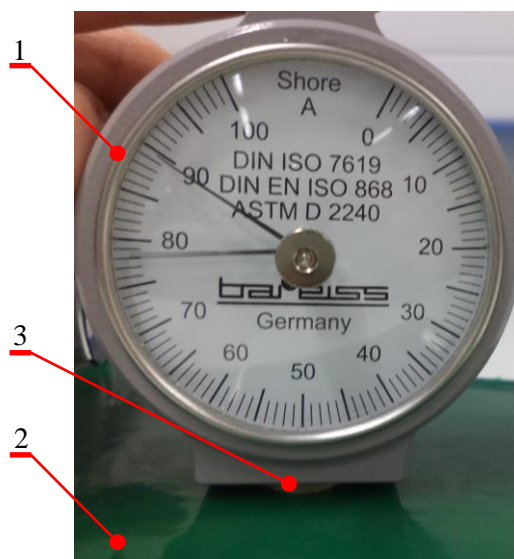
$$\rho_p = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w, \quad (4.5)$$

gdzie: ρ_p – gęstość materiału pasa, ρ_w – gęstość wody destylowanej, m_1 – masa próbki w powietrzu, m_2 – masa próbki w wodzie. W ten sposób wykonano 15 prób, w normalnych warunkach otoczenia (standardowej temperaturze pracy materiału T_0), tj.: ciśnieniu atmosferycznym o wartości około 1013 hPa oraz temperaturze pokojowej o wartości $T_0 = 22,5^\circ\text{C}$.



Rys. 34. Przykładowy pomiar gęstości materiału pasa ciągnowego, próbka na szalce umieszczonej w powietrzu: 1 – waga laboratoryjna, 2 – szalka umieszczona w powietrzu, 3 – szalka umieszczona w wodzie, 4 – statyw, 5 – próbka

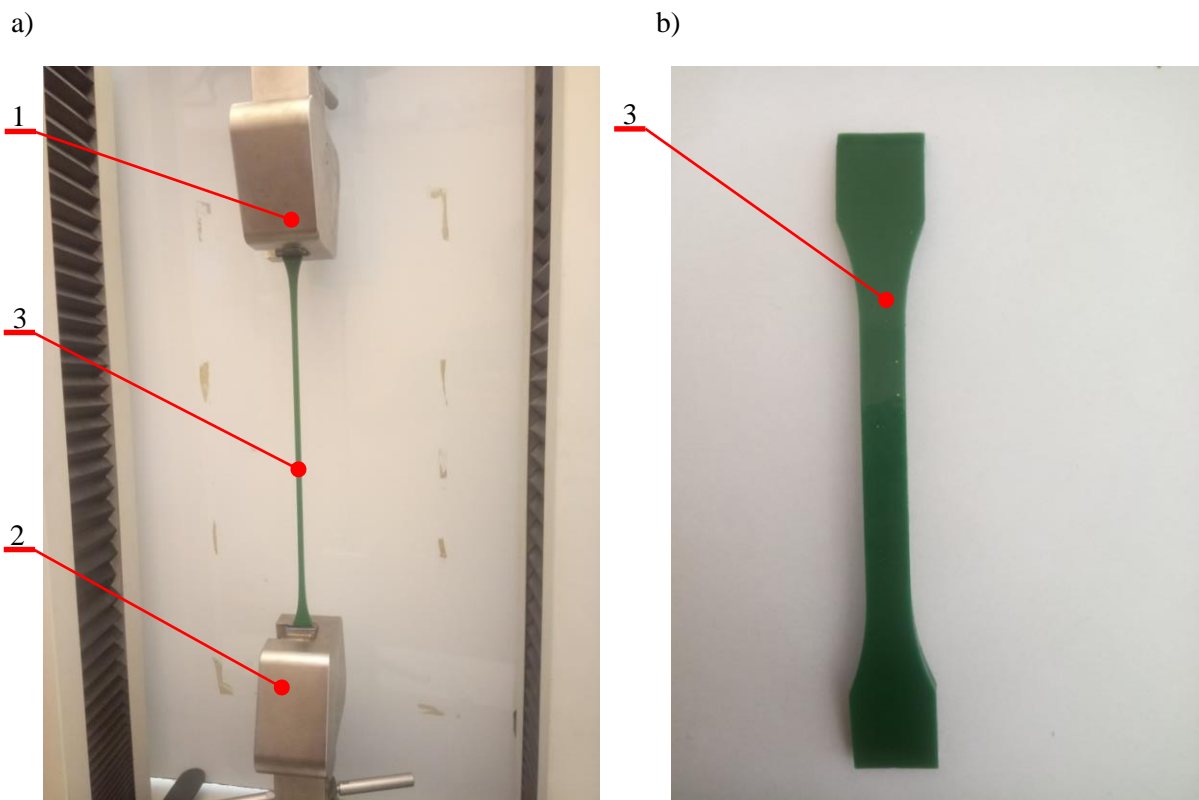
Kolejnym badaniem, był znormalizowany [120] pomiar twardości Shore'a, przy użyciu twardościomierza Bareiss HP, ze wskaźnikiem wartości maksymalnej (Rys. 35) [64]. Pomiar polegał na przyłożeniu twardościomierza (1) do próbki (2), w taki sposób aby wgłębnik umieszczony wewnątrz czopa pomiarowego (3) mógł zagłębić się w badany materiał, w kierunku normalnym do powierzchni. W tym celu, czop pomiarowy powinien opierać się na powierzchni pasa.



Rys. 35. Przykładowy pomiar twardości Shore'a za pomocą twardościomierza Bareiss HP: 1 – twardościomierz, 2 – pas poliuretanowy, 3 – czop pomiarowy

W następnej kolejności przeprowadzono badania rozciągania materiału pasa (Rys. 36) [59]. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN, z dwoma uchwytami dwuszczkowymi (1 i 2), samo-zaciskającymi się pod wpływem przykładanego obciążenia poosiowego w kierunku rozciągania. Podczas badania rejestrowano siłę na ruchomym uchwycie (1) maszyny wytrzymałościowej oraz jego przemieszczenie. Dodatkowo, przed wykonaniem próby rozciągania, wykonywano pomiary rzeczywistych wymiarów wcześniej przygotowanych próbek (3). Głównym celem tych badań, oprócz ilościowej oceny wybranych parametrów mechanicznych materiału, z którego wykonany jest pas, była analiza porównawcza pasów płaskich i okrągłych, na potrzeby dalszych prac badawczych. W związku z tym próby rozciągania materiału, wykonano dla próbek charakteryzujących się następującymi cechami:

- pełnym, monolitycznym przekrojem poprzecznym,
- brakiem dodatkowej obróbki mechanicznej powierzchni po operacji cięcia,
- zróżnicowanym kształtem i rozmiarem, przy czym badaniu podlegały próbki:
 - walcowa, cięta z pasa napędowego o przekroju kołowym i średnicy nominalnej $d_t = 4$ mm, próbki te oznaczono jako A_{1R} ,
 - walcowa, cięta z pasa napędowego o przekroju kołowym o średnicy nominalnej $d_t = 12$ mm, próbki te oznaczono jako A_{2R} ,
 - płaska, charakteryzująca się znormalizowanym kształtem – wiosłkowym typu 1B [118], wycięta wykrojnikiem z płaskiego pasa przenośnikowego wykonanego z materiału TPU C85A [11], wzdłuż dłuższej – referencyjnej krawędzi pasa płaskiego o szerokości $b_p = 140$ mm, próbki te oznaczono jako B_R ,



Rys. 36. Stanowisko badawcze podczas rozciągania próbki wiosłkowej oraz przykładowa próbka pobrana z pasa płaskiego: 1 – ruchoma szczeka maszyny MTS, 2 – nieruchoma szczeka maszyny MTS, 3 – próbka wiosłkowa

We wszystkich przypadkach, początkowa odległość pomiędzy szczękami maszyny wytrzymałościowej $l_{rsz} = 108$ mm stanowiła bazę do obliczenia wydłużenia względnego ε_{r_max} , przy czym jego graniczną wartość ustalono na $\varepsilon_{r_max} = 300\%$. Prędkość rozciągania ustalono na $v_r = 60 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Tab. 6), zgodnie z wytycznymi normatywnymi dla tego typu materiałów, uwzględniającymi prędkość przyrostu naprężenia [117].

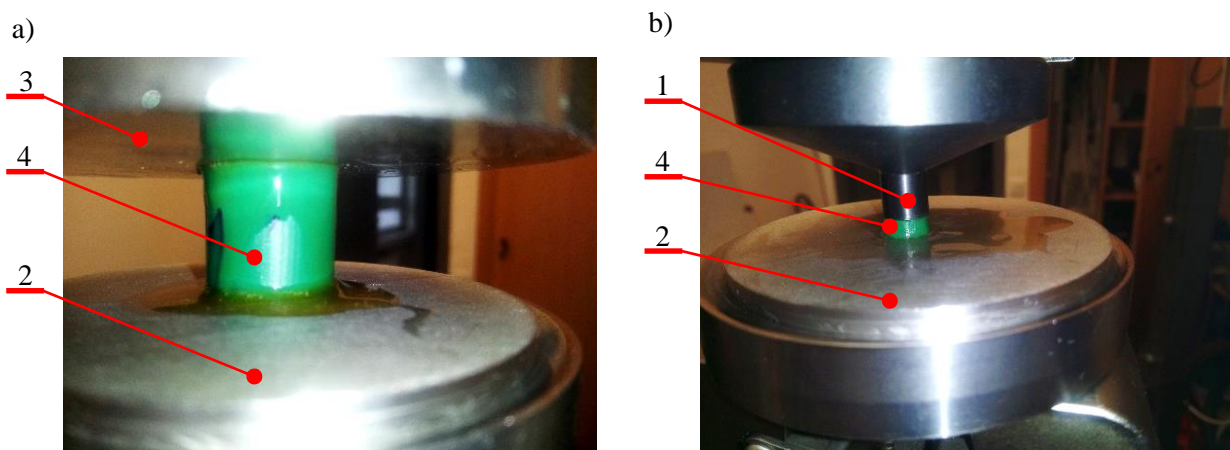
Tab. 6. Parametry badań rozciągania materiału pasa

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica próbki walcowej A_{1R}	d_r [mm]	4 mm \pm 0,02 mm
Średnica próbki walcowej A_{2R}	d_r [mm]	12 mm \pm 0,04 mm
Szerokość próbki w miejscu przewężenia (B_R)	b_r [mm]	10 mm \pm 0,04 mm
Grubość próbki w miejscu przewężenia (B_R)	g_r [mm]	4 mm \pm 0,05 mm
Prędkość badania	v_r [mm/min]	60
Całkowita długość próbek	l_{rc} [mm]	150
Początkowa odległość między szczękami maszyny wytrzymałościowej	l_{rsz} [mm]	108
Graniczne wydłużenie	ε_{r_max} [%]	300

W kolejnym etapie badań właściwości mechanicznych materiału, wykonywanych w standardowej temperaturze otoczenia (normalnej temperaturze jego pracy T_0), wykonano próby ściskania (Rys. 37) [59]. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN, z uchwytami dwuszcękowymi, do których zamontowano:

- talerz dociskający (1 i 3) próbkę (4) – w uchwycie górnym,
- wahlkową płytę podporową (2).

Ze względu na różne rozmiary ściskanych próbek (4), w celu zapewnienia poprawnego rozkładu naprężenia pomiędzy talerzem dociskającym (1 i 3), a próbkami (4), w badaniach wykorzystano dwa rodzaje talerzy dociskających, w zależności od wymiaru próbki.



Rys. 37. Stanowisko badawcze podczas ściskania pasów: a) ściskanie osiowe próbki o średnicy $d = 18$ mm b) ściskanie osiowe próbki o średnicy $d = 4$ mm; 1 – talerz dociskający do małych próbek, 2 – płyta podporowa wahlkowa, 3 – talerz dociskający do próbek o większej średnicy, 4 – próbka

Podczas badania rejestrowano wartość siły na ruchomej szczęce maszyny wytrzymałościowej oraz jej przemieszczenie, wykorzystując odczyty układu pomiarowego maszyny MTS. Dodatkowo, przed

pomiarem na maszynie, wykonywano pomiary rzeczywistych wymiarów geometrycznych wcześniej przygotowanych próbek. Przeprowadzono następujące rodzaje testów (Tab. 7):

- ściskanie osiowe (próbki A_{1C}) próbki walcowej o średnicy $d_{c1} = 4 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ i wysokości $h_{c1} = 6 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, ciętej z pasa napędowego o przekroju kołowym i takiej samej średnicy,
- ściskanie osiowe (próbki A_{2C}) próbki walcowej o średnicy $d_{c1} = 18 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ i wysokości $h_{c1} = 27 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, ciętej z pasa napędowego o przekroju kołowym i takiej samej średnicy,

a więc wybrano dwie skrajne średnice z analizowanego zakresu, przyjętego jako studium przypadku. Badanie obejmowały ściskanie quasi-statyczne z prędkością $v_{c1} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, do odkształcenia granicznego $\varepsilon_{c1_max} = 30\%$, zgodnie z ogólnymi wytycznymi dla tego typu materiałów [121].

Tab. 7. Parametry badań ściskania materiału pasa w standardowej temperaturze otoczenia

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
Średnica nominalna próbki	d_{c1} [mm]	4	18
Wysokość nominalna próbki	h_{c1} [mm]	6	27
Prędkość badania	v_{c1} [mm/min]	1	
Graniczne odkształcenie	ε_{c1_max} [%]	30	

Powierzchnie czołowe próbek po cięciu szlifowano, tak aby odchyłka prostopadłości powierzchni czołowej od osi pasa była mniejsza niż 0,1 mm. Długość próbek ciętych z pasa okrągłego, spełniała zależność:

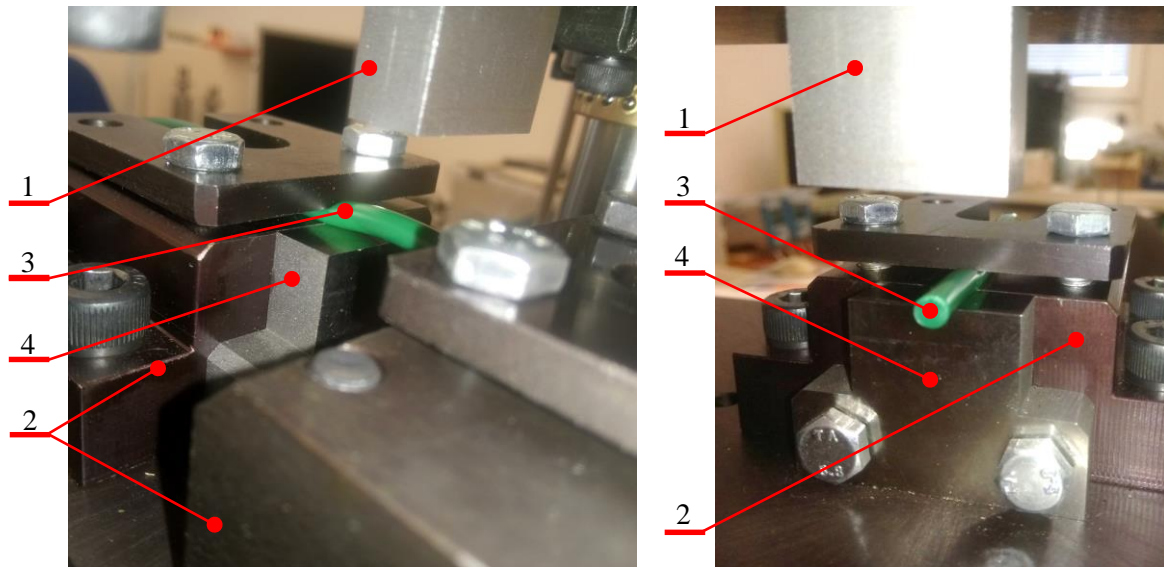
$$h_{c1} = 1,5 \cdot d_{c1}, \quad (4.6)$$

dzięki czemu rozkład naprężenia ściskającego w przekroju poprzecznym pasa jest w przybliżeniu równomierny, a także ograniczono możliwość wyboczenia [122]. Aby ograniczyć wpływ tarcia na rozkład naprężenia w próbce, na powierzchnie czołowe próbek będące w kontakcie z talerzami dociskającymi (1 i 3) oraz podporą (2), aplikowano środek smarny w celu zmniejszenia współczynnika tarcia pomiędzy tymi materiałami. Dodatkowo, dolna podpora próbek podczas ściskania była wahliwa, co ograniczyło wpływ na wyniki badań ewentualnej odchyłki prostopadłości powierzchni czołowej względem osi symetrii próbki.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono próby ścinania pasa [59]. Na stanowisku badawczym dostosowanym do tego typu badań (Rys. 38) przeprowadzono ścinanie quasi-statyczne z prędkością ostrza ruchomego (1) $v_t = 1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ i dynamiczne z prędkością $v_t = 8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Próbka była umieszczona pomiędzy dwiema podporami (2 i 3) na przeciwostrze (4). W celu zminimalizowania wpływu zginania na wyniki próby ścinania, szczelinę pomiędzy ostrzem ruchomym (1) i przeciw-ostrzem (4) ustalono na 0,05 mm. Dodatkowo obie podpory próbki (2 i 3) wyposażono w płytki dociskowe powodujące jej unieruchomienie.

Uwzględniając porównanie obu rodzajów pasa, badania wykonano dla następujących próbek Tab. 8:

- walcowej o średnicy $d_t = 4 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, pobranej z pasa napędowego o przekroju kołowym (próbki oznaczono jako A_{T-1} oraz A_{T-8}, w zależności od zastosowanej prędkości ścinania v_t),
- prostopadłościenną o szerokości $b_t = 10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ i grubości $g_t = 4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, wyciętej wykrojnikiem z płaskiego pasa przenośnikowego o tej samej grubości (próbki oznaczono jako B_{T-1} oraz B_{T-8}, w zależności od zastosowanej prędkości ścinania v_t).



Rys. 38. Stanowisko badawcze ścinania pasów: 1 – ostrze ruchome, 2 – podpory, 3 – próbka, 4 – przeciwostrze

Tab. 8. Parametry badań ścinania materiału pasa w standardowej temperaturze otoczenia

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica nominalna próbki walcowej (A_{T_1} oraz A_{T_8})	d_t [mm]	4
Szerokość nominalna próbki prostokątnej (B_{T_1} oraz B_{T_8})	b_t [mm]	10
Grubość nominalna próbki prostokątnej (B_{T_1} oraz B_{T_8})	t_t [mm]	4
Prędkość badania w zakresie quasi-statycznym (A_{T_1} oraz B_{T_1})	v_t $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	1
Prędkość badania w zakresie dynamicznym (A_{T_8} oraz B_{T_8})	v_t $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$	8

Wykonane badania pozwoliły na rozeznanie się we właściwościach pasa w standardowych warunkach otoczenia. Biorąc jednak pod uwagę specyfikę analizowanego procesu technologicznego (zgrzewanie pasów w warunkach temperatury o podwyższonej wartości) oraz niedostateczne informacje na temat właściwości materiału, koniecznym wydaje się przeprowadzenie badań koncentrujących się na zgrzewanym materiale, z uwzględnieniem temperatury o podwyższonej i zmiennej wartości.

4.2.2. Badania właściwości fizycznych w warunkach zmiennej wartości temperatury

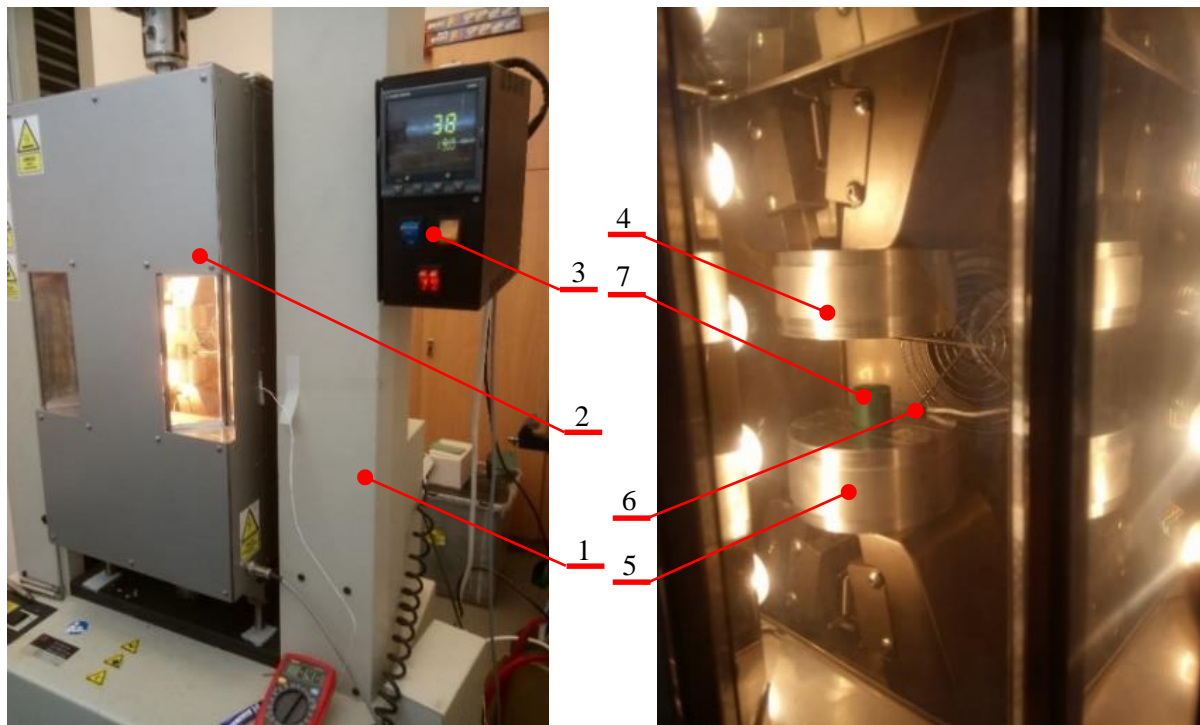
Badania dotyczące właściwości termomechanicznych materiału pasa rozpoczęto od próby ściskania w warunkach podwyższonej i zmiennej wartości temperatury (Rys. 39) [57]. Prace badawcze przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 (1), z zabudowaną komorą klimatyczną (2).

Próby ściskania były wykonywane w celu rozpoznania odpowiedzi materiału na ściskanie w warunkach podwyższonej temperatury poprzez wyznaczenie następujących właściwości mechanicznych pasa:

- modułu proporcjonalności $E_{c2}(T)$ przy ściskaniu,
- naprężenia granicznego $\sigma_{c2_max}(T)$, przy zadanym poziomie odkształcenia ϵ_{c2_max} .

Ze względu na konieczność zapewnienia jednorodności rozkładu temperatury w całej objętości materiału, w pierwszej kolejności próbki kondycjonowano w komorze klimatycznej (2), w której potem wykonywano próbę ściskania. Komora klimatyczna wyposażona była w układ pomiaru wartości temperatury z centralnie umieszczonym czujnikiem termoparowym (6). W następnej kolejności próbkę (7) ustawiano

na talerzu podpierającym (5) by potem wykonać jej ściskanie poprzez talerz dociskający (4), zamocowany do ruchomej trawersy maszyny wytrzymałościowej, przemieszczającej się z prędkością badania v_{c2} .



Rys. 39. Stanowisko do badań właściwości termomechanicznych pasów ciągnowych z maszyną wytrzymałościową MTS Insight 50 i komorą klimatyczną podczas badań: 1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – komora klimatyczna, 3 – sterownik komory klimatycznej, 4 – talerz dociskający, 5 – talerz podpierający, 6 – czujnik temperatury, 7 – próbka przed badaniem

Badania przeprowadzono dla próbek pobranych z pasa o przekroju kołowym o średnicy nominalnej $d_{c2} = 18$ mm. Próbki obrabiano mechanicznie, poprzez cięcie do długości $h_{c2} = 20$ mm i szlifowanie powierzchni czołowych, tak aby odchyłka prostokątowości powierzchni czołowej względem osi pasa była mniejsza niż 0,1 mm. Wymiary wzdłużne i poprzeczne próbek, przed kondycjonowaniem i tuż po nim każdorazowo mierzono w 3 miejscach (Rys. 42). Należy zauważyć, że w przypadku tego badania odstąpiono od standardowej korelacji pomiędzy wysokością, a średnicą próbki (zależność 4.6), ze względu na zaobserwowaną podczas wstępnych prób, wysoką skłonność do wyboczenia w wyższych wartościach temperatury badania T_{c2} , dla tak długich próbek.

Badania przeprowadzono dla dwóch grup parametrów (Tab. 9), których wartości zostały dobrane na podstawie norm [121, 123] dotyczących ściskania tworzyw termoplastycznych oraz elastomerów, z uwzględnieniem szybkości przyrostu naprężenia w próbce. Wykonano próby dla:

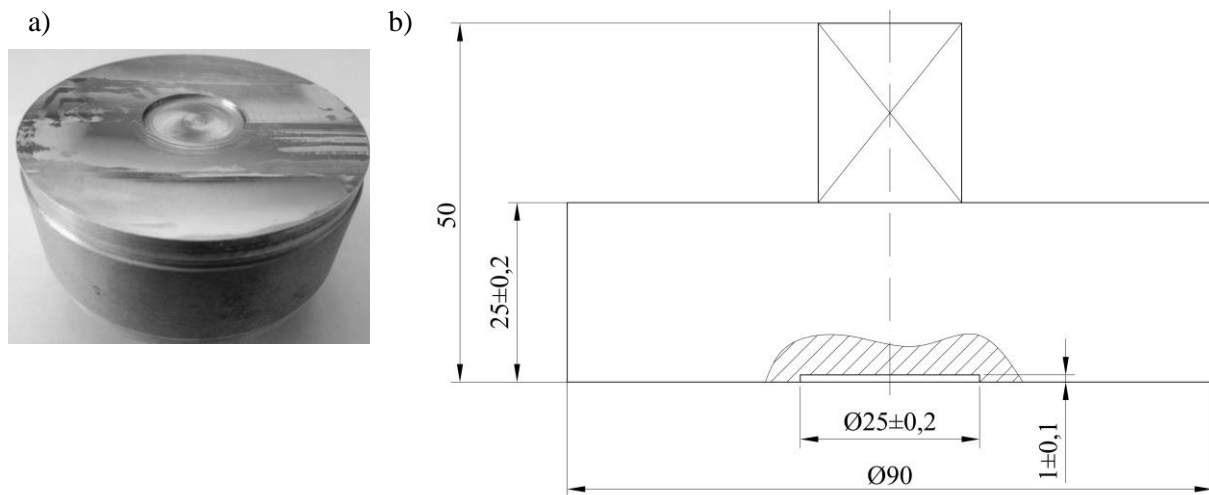
- prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ do odkształcenia maksymalnego $\varepsilon_{c2_max} = 0,3$ w celu wyznaczenia modułu sprężystości E_{c2} przy ścisaniu,
- prędkości ściskania $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ do odkształcenia maksymalnego $\varepsilon_{c2_max} = 0,6$ w celu wyznaczenia naprężenia granicznego σ_{c2_max} przy ścisaniu.

Przed rozpoczęciem pomiarów, próbki obciążano wstępnie siłą F_{ic2} , w celu równomiernego rozprzodzenia środka smarowego pomiędzy powierzchniami.

Tab. 9. Parametry badań ściskania materiału pasa w warunkach zmiennej temperatury

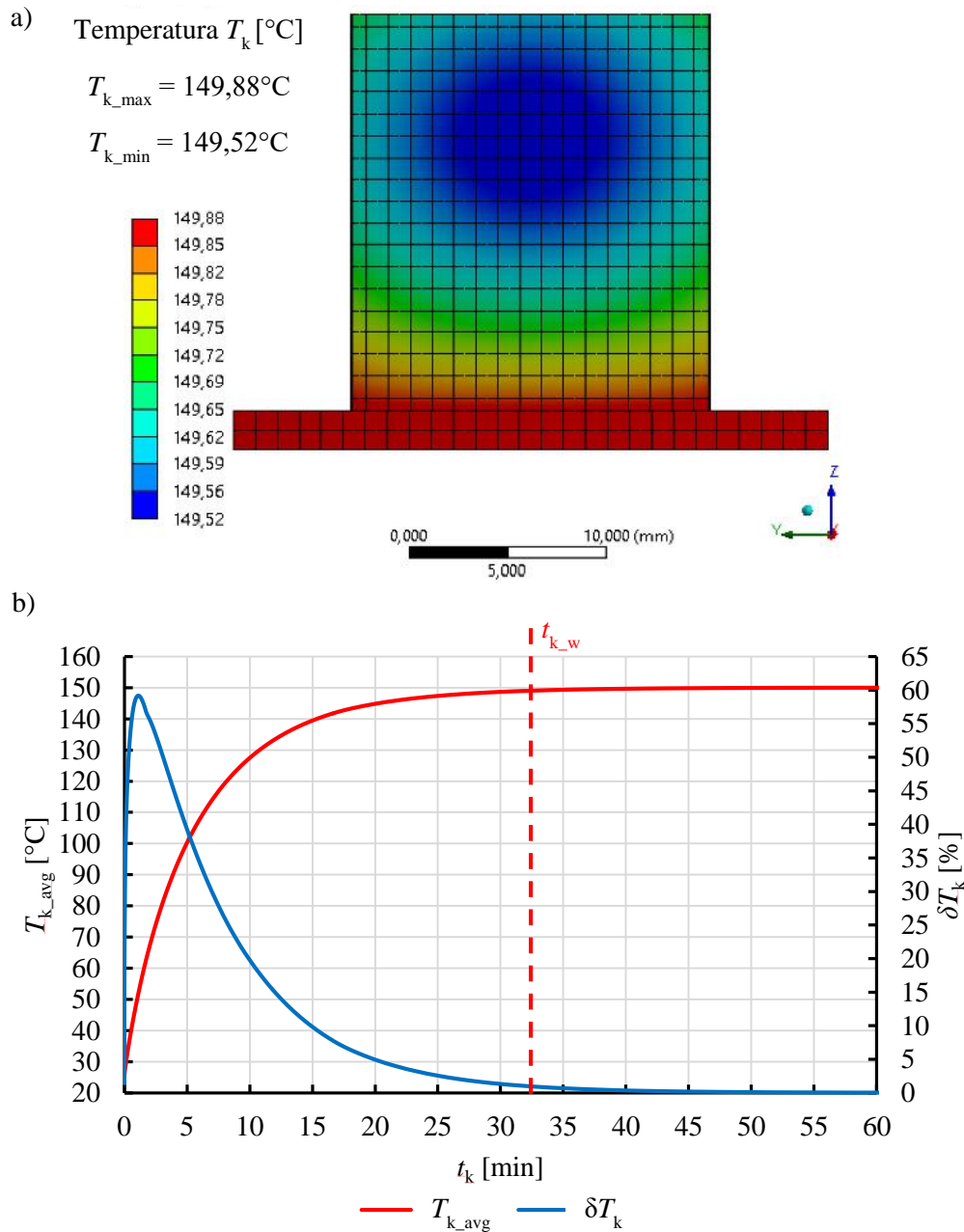
Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Wyznaczenie modułu sprężystości wzdłużnej podczas ściskania E_{c2}	Badanie naprężenia granicznego przy ściskaniu σ_{c2_max}
Średnica nominalna próbki	d_{c2} [mm]	$18 \pm 0,2$	
Wysokość nominalna próbki	h_{c2} [mm]	$20 \pm 0,5$	
Warunki temperaturowe	T_{c2} [°C]	$25 \pm 1, 40 \pm 1, 55 \pm 1, 70 \pm 1, 85 \pm 1, 100 \pm 2, 125 \pm 2, 150 \pm 2, 175 \pm 2, 200 \pm 2$	
Obciążenie wstępne	F_{ic2} [N]	100 ± 20	
Prędkość badania	v_{c2} $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	1	10
Granica zakończenia badania	ε_{c2_max} [%]	30	60

Do badań wykorzystano zaprojektowany uchwyt do ściskania próbek (Rys. 40), z podcięciem walcowym o średnicy 25 mm i głębokości 1 mm. Taka geometria miejsca osadzenia próbek podczas badania, zapobiegała ich wypadaniu z uchwytów podczas ściskania, jednocześnie umożliwiając nieskrępowane odkształcenie powierzchni bocznych. Na powierzchnie czołowe próbek, każdorazowo po kondycjonowaniu, aplikowano środek smarny na bazie silikonu, przeznaczony do pracy w temperaturze o wartości do 200°C. Dzięki temu zmniejszono współczynnik tarcia pomiędzy powierzchniami pozostającymi w kontakcie, co umożliwiło utrzymanie osiowego stanu naprężenia próbki podczas ściskania.



Rys. 40. Uchwyt do ściskania próbek z najważniejszymi wymiarami podcięcia walcowego: a) uchwyt po frezowaniu, b) postać geometryczna

Badania przeprowadzono w temperaturze T_{c2} przyjmującej wartości: 25°C, 40°C, 55°C, 70°C, 85°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C i 200°C. Próbki, były nagrzewane w komorze klimatycznej i kondycjonowane przez określony czas, co pozwoliło na osiągnięcie temperatury o właściwej wartości w całej objętości materiału. W celu oszacowania niezbędnego czasu kondycjonowania t_{k_w} , przed rozpoczęciem badań przeprowadzono analizę nagrzewania takiej próbki z wykorzystaniem metody elementów skończonych w systemie ANSYS (Rys. 41).



Rys. 41. Wyniki analizy nagrzewania próbki do kondycjonowania: a) rozkład temperatury na przekroju poprzecznym próbki po czasie kondycjonowania $t_k = 40$ minut podczas nagrzewania do 150°C , b) wykres średniej wartości temperatury T_{k_avg} oraz współczynnika δT_k

W celu dokładnego odwzorowania warunków podczas nagrzewania w komorze klimatycznej, do obliczeń założono:

- wymuszoną konwekcję, w otoczeniu powietrza o temperaturze 150°C , ze średnim współczynnikiem przejmowania ciepła $\alpha_{p-p} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ [124],
- wartość temperatury początkowej (standardowe warunki otoczenia) $T_o = 25^\circ\text{C}$,
- kontakt próbki poliuretanowej z płytą stalową (odwzorowanie położenia próbek do kondycjonowania na dolnej ścianie komory klimatycznej),
- rzeczywiste wymiary próbki.

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano informację, że zgodnie z oczekiwaniami próbka nagrzewa się w pierwszej kolejności w rejonie przypowierzchniowym, a z czasem wartość temperatury wyrównuje się w całej objętości (Rys. 41a). W związku z tym, w celu weryfikacji wyników i określenia wystarczającego czasu kondycjonowania t_{k_w} , wprowadzono współczynnik δT_k określający różnicę pomiędzy maksymalną wartością temperatury $T_{k_{max}}$ oraz minimalną $T_{k_{min}}$, zarejestrowanymi w przekroju poprzecznym próbki. Współczynnik ten opisano za pomocą zależności:

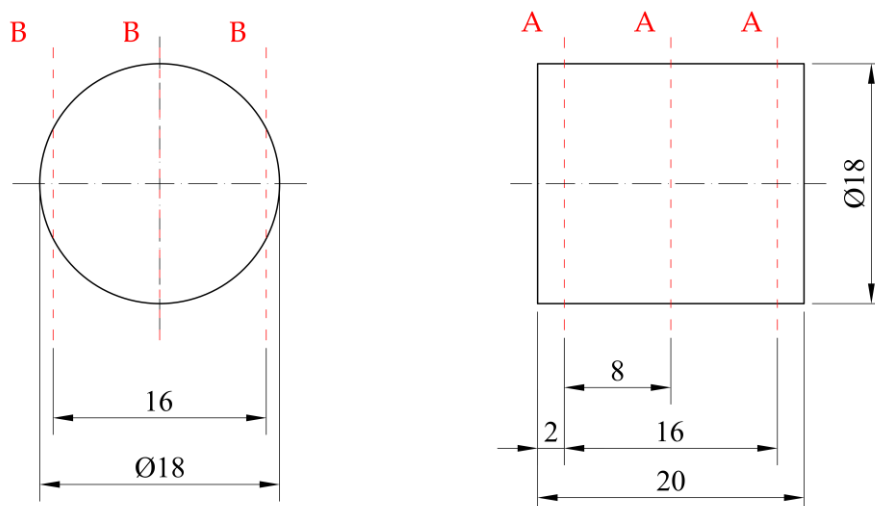
$$\delta T_k = \frac{T_{k_{max}} - T_{k_{min}}}{T_{k_{max}}} \cdot 100\%. \quad (4.7)$$

Przyjęto, że wartość tego wskaźnika nie powinna przekroczyć 1%, co zapewnia względnie równomierny rozkład temperatury w przekroju poprzecznym. Drugim wskaźnikiem, który wykorzystano przy weryfikacji stopnia rozgrzania próbki podczas jej kondycjonowania była średnia wartość temperatury w całej próbce $T_{k_{avg}}$. Przyjęto, że wartość ta nie powinna się różnić od temperatury docelowej T_{c2} o więcej niż 1%.

Przykładowo, dla nagrzewania próbki do docelowej temperatury o wartości 150°C, oczekiwaną wartość obu wskaźników uzyskano po czasie $t_{k_w} = 33$ minuty. Realny czas kondycjonowania wydłużono do wartości $t_{k_{rz}} = 60$ minut, dla pewności uzyskania równomiernego rozkładu temperatury w całej objętości dla wszystkich wartości temperatury docelowej T_{c2} , na potrzeby próby ściskania (Rys. 41b).

Przy okazji kondycjonowania próbek w temperaturze o podwyższonej wartości, a także pomiaru ich wymiarów geometrycznych na potrzeby próby ściskania, wyznaczono współczynnik rozszerzalności liniowej, w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach: promieniowym α_p i osiowym α_o . W tym celu, dokonano pomiarów dwóch charakterystycznych wymiarów (Rys. 42), po czym wyznaczono z nich wartości średnie:

- średnicy d_{c2} w trzech punktach pomiarowych A,
- wysokości h_{c2} w trzech punktach pomiarowych B.



Rys. 42. Wymiary próbki do badań ściskania i rozszerzalności termicznej; A – płaszczyzny pomiaru średnicy, B – płaszczyzny pomiaru wysokości

Badania polegały na wykonywaniu pomiarów wskazanych cech geometrycznych (Rys. 42) przed rozpoczęciem nagrzewania próbki, a także podczas jego trwania, w ściśle określonych wartościach temperatury T_α , które wynosiły: 25°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C i 175°C.

Kolejnym rodzajem przeprowadzonych badań termomechanicznych była różnicowa kalorymetria skaningowa DSC [57, 64]. Głównym celem tego badania było pozyskanie informacji na temat przemian fazowych zachodzących podczas nagrzewania i chłodzenia próbek pobranych z pasa o przekroju kołowym, wykonanego z TPU C85A. Analizę wyników tego badania ukierunkowano na rozpoznanie ewentualnej wyraźnej granicy topnienia materiału T_i , czyli przemiany ewentualnie zawartej w nim fazy krystalicznej. W związku z tym, wykonano nagrzewanie i chłodzenie materiału za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego Netzch DSC 204 F1. Urządzenie to pozwala m.in.: na określenie ciepła dostarczanego do nagrzewanej próbki w funkcji wartości jej temperatury [125]. Dzięki temu możliwe jest oszacowanie temperatury przemian fazowych oraz ich entalpii. Podczas nagrzewania i chłodzenia w różnicowym kalorymetrze skaningowym, w przypadku braku przemian fazowych, charakterystyka energii dostarczonej do ogrzewania próbki (lub odebranej podczas chłodzenia), w postaci zależności mocy, którą należy dostarczyć do próbki δQ_{DSC} od aktualnej wartości temperatury T , jest linią prostą (jej nachylenie zależy od ciepła właściwego materiału C_p). Podczas wykonywania cyklu nagrzewania z następującym po nim chłodzeniem, w przypadku ujawnienia się następujących przemian fazowych:

- endotermicznej – topnienia, należy dostarczyć pewną ilość energii cieplnej do materiału, przy stałej wartości temperatury,
- egzotermicznej – krzepnięcia, należy taką samą ilość energii cieplnej odebrać od materiału, aby utrzymać stałą wartość jego temperatury.

Na wykresie zależności mocy δQ_{DSC} dostarczonej do ogrzewania próbki (lub odebranej podczas chłodzenia), przemiany fazowe ujawniają się w postaci odchylenia (pików). W ten sposób możliwe jest odczytanie wartości temperatury przemiany oraz jej entalpii, która jest wyznaczana przez pole pod wykresem charakterystyki w obszarze odchylenia [126]. Wykonano jednokrotny cykl nagrzewania z następującym po nim chłodzeniem, dla pięciu próbek materiału pobranego z pasa o przekroju kołowym. Odważoną próbkę tworzywa nagrzewano ze stałą szybkością v_{DSC1} , a potem ochładzano w taki sam sposób, jednocześnie mierząc strumień ciepła dostarczony do próbki (lub oddany przez nią) w funkcji wartości jej temperatury (Tab. 10).

Tab. 10. Parametry badań wstępnych w kierunku rozpoznania przemian fazowych w materiale pasa, przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Nagrzewanie	Chłodzenie
Rodzaj próbki	-	pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A)	
Liczba cykli	n_{DSC2} [-]	1	1
Średnia masa próbki	m_{DSC1} [mg]	$10,3 \pm 0,2$	
Temperatura startowa	T_{DSC1_start} [°C]	20	320
Temperatura końcowa	T_{DSC1_koniec} [°C]	320	20
Szybkość zmiany temperatury	v_{DSC1} $\left[\frac{^\circ C}{min}\right]$	10	
Atmosfera ochronna	-	chemicznie czysty azot N_2 z natężeniem przepływu $20 \left[\frac{cm^3}{min}\right]$	

Po wstępnym rozpoznaniu i wyciągnięciu wniosków z badań różnicowej kalorymetrii skaningowej, w kolejnym etapie prac wykonano badania szczegółowe. Ich głównym celem było porównanie obu

rodzajów pasa (próbki A pobrane z pasa o przekroju kołowym i próbki B pobrane z pasa o przekroju płaskim), a także wyciągnięcie precyzyjnych informacji na temat ciepła właściwego C_p tego materiału [64].

Badania podzielono na dwa etapy, które przeprowadzono ponownie przy użyciu aparatu Netzch DSC 204 F1. Pierwszy etap – porównawczy, polegał na rozpoznaniu charakterystyki nagrzewania obu tworzyw i porównaniu ich ze sobą. Warunki badań, w porównaniu do wstępnych prób, obejmowały (Tab. 11):

- rozszerzony zakres temperatury T_{DSC2} , tak aby otrzymać szersze spojrzenie na właściwości tworzywa, a w szczególności aby poczynić obserwację w kierunku wartości temperatury zeszklenia T_g . Wartość temperatury T_{DSC2} była rejestrowana w sposób ciągły,
- zastosowanie tej samej – obojętnej chemicznie atmosfery ochronnej w postaci czystego azotu, aby utrzymać te same warunki podczas badania,
- wykonanie dwóch cykli nagrzewania oraz jednego cyklu chłodzenia, w konfiguracji *nagrzewanie – chłodzenie – nagrzewanie*, w celu uchwycenia ewentualnych zmian w zachowaniu się materiału po jednokrotnym nagrzewaniu.

Tab. 11. Parametry badań porównawczych pasa o przekroju kołowym (próbka typu A) oraz pasa płaskiego (próbka typu B) przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Nagrzewanie	Chłodzenie
Rodzaj próbki	-	1) pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A) 2) pas płaski o grubości $t = 4$ mm (B)	
Liczba cykli	n_{DSC2} [-]	2	1
Średnia masa próbki	m_{DSC2} [mg]	$6 \pm 0,2$	
Temperatura startowa	T_{DSC2_start} [°C]	-80	300
Temperatura końcowa	T_{DSC2_koniec} [°C]	300	-80
Szybkość zmiany wartości temperatury	v_{DSC2} $\left[\frac{^{\circ}C}{min}\right]$	20	10
Atmosfera ochronna	-	chemicznie czysty azot N_2 z natężeniem przepływu $20 \left[\frac{cm^3}{min}\right]$	

Po zakończeniu tego etapu, w następnej kolejności przeprowadzono pomiar ciepła właściwego C_p , dla obu rodzajów analizowanych próbek. Pomiar ten wykonano w sposób znormalizowany [127], na podstawie rejestrowanej zmiany entalpii polimeru, podczas nagrzewania. Informacja o wartości tego parametru jest istotna z punktu widzenia modelowania rozkładu temperatury podczas nagrzewania pasa ciągnowego, w procesie technologicznym zgrzewania doczołowego pasów.

W porównaniu do wcześniej wykonywanych badań porównawczych, warunki obejmowały (Tab. 12):

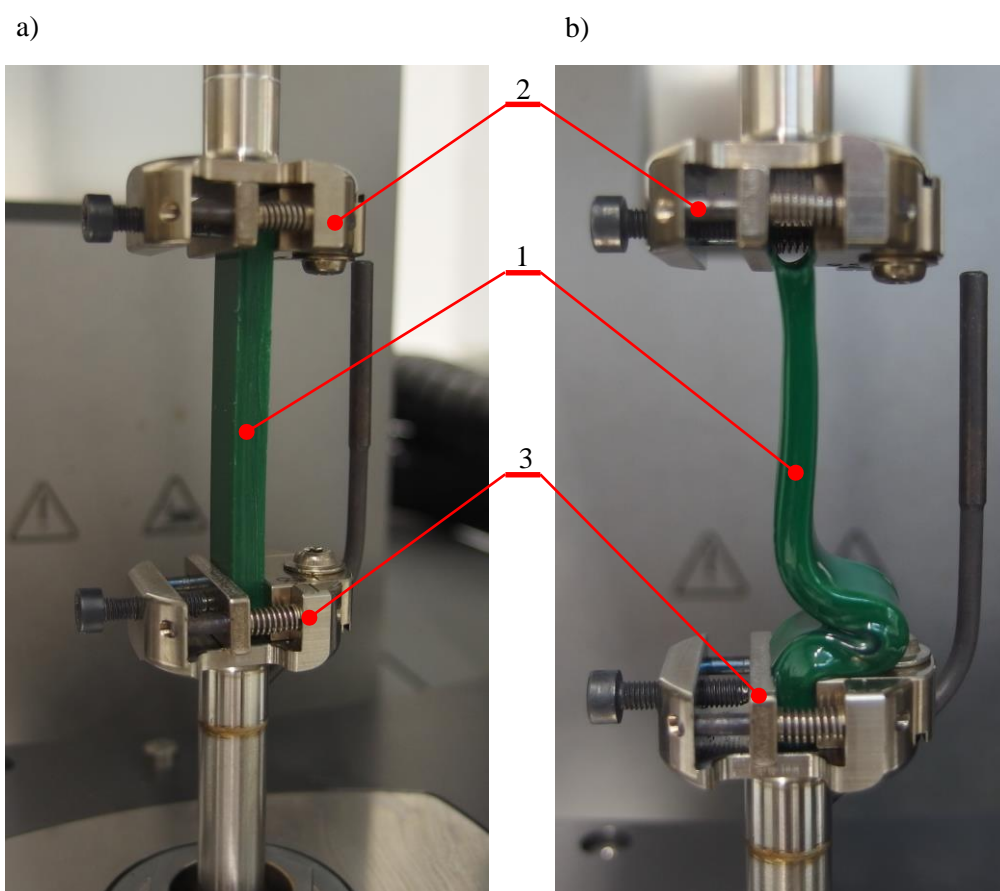
- węższy zakres temperatury badania, ze względu na konieczność zapewnienia braku przemian fazowych materiału, które zaburzałyby poprawność wyznaczania ciepła właściwego C_p . Wymóg ten wynika głównie z wymagań aparaturowych [125],
- zastosowanie tej samej – obojętnej atmosfery ochronnej, w postaci chemicznie czystego azotu, aby utrzymać te same warunki podczas badania,
- jeden cykl nagrzewania, który jest wystarczający do wyznaczenia ciepła właściwego C_p ,

- zastosowanie materiału odniesienia, o masie zbliżonej do masy analizowanych próbek.

Tab. 12. Parametry badań przeprowadzonych w celu wyznaczenia ciepła właściwego materiału C_p dla pasa o przekroju kołowym (próbka typu A) oraz pasa płaskiego (próbka typu B), przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Rodzaj próbki	-	1) pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A) 2) pas płaski o grubości $t = 4$ mm (B)
Liczba cykli	n_{DSC3} [-]	1
Średnia masa próbki	m_{DSC3} [mg]	$6 \pm 0,2$
Temperatura startowa	T_{DSC3_start} [°C]	0
Temperatura końcowa	T_{DSC3_koniec} [°C]	150
Szybkość zmiany wartości temperatury	v_{DSC3} $\left[\frac{°C}{min}\right]$	20
Atmosfera ochronna	-	chemicznie czysty azot N_2 z natężeniem przepływu $20 \left[\frac{cm^3}{min}\right]$
Materiał porównawczy	-	syntetyczny szafir ($\alpha-A_2O_3$)

Kolejnymi badaniami, przeprowadzonymi w celu pozyskania określonych wartości właściwości materiału oraz porównania obu rodzajów pasa (o przekroju kołowym i płaskim), były próby dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA (Rys. 43) [64].



Rys. 43. Próbkę pasa podczas badania dynamicznej analizy termomechanicznej: a) stan przed rozpoczęciem badania, b) stan po zakończeniu badania wykonanego w zbyt wysokiej temperaturze – próbka nadmiernie odkształcona; 1 – prostopadłościenna próbka, 2 – uchwyt górny obrotowy, 3 – uchwyt dolny stały

Badania przeprowadzono na reometrze rotacyjnym Anton Paar MCR302 [128]. Na podstawie informacji dostępnych w normach branżowych, pracach innych badaczy, a także uwzględniając wymagania aparatury (możliwość zastosowania próbki w kształcie prostopadłościennych belek), do badań przygotowano dwa typy próbek [39, 128-132] (Tab. 13):

- próbki typu A, pobrane z pasa o przekroju kołowym i średnicy $d = 18$ mm, poddane obróbce skrawaniem,
- próbki typu B, pobrane z pasa płaskiego o grubości $g = 4$ mm, poddane cięciu gilotynowemu.

Tab. 13. Wymiary próbek wykorzystywanych do badań dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Próbka typu A	Próbka typu B
Długość	l_{DMTA} [mm]	$53,50 \pm 0,31$	$49,67 \pm 0,13$
Szerokość	b_{DMTA} [mm]	$10,21 \pm 0,20$	$9,84 \pm 0,15$
Grubość	g_{DMTA} [mm]	$3,74 \pm 0,33$	$3,93 \pm 0,08$

Badania te polegały na wprawianiu prostopadłościennych beleczki (1), pobranej z gotowego produktu, w kontrolowane oscylacje, wywołujące cykliczne skręcanie próbki o stałej amplitudzie A_{DMTA} oraz niezmiennej częstotliwości f_{DMTA} . Efekt ten uzyskano poprzez zamontowanie prostopadłościennych próbek w dwóch współosiowych uchwytach samozaciskowych: obrotowym górnym (2) i stałym (nieobrotowym) dolnym (3). Obszar próbki oraz uchwytów, każdorazowo podczas badania, był zamknięty za pomocą szczelnej osłony, w celu zapewniania określonych i niezmiennych warunków termicznych. Obecne wewnątrz powietrze, było utrzymywane w temperaturze o stałej wartości T_{DMTA} lub w razie potrzeby dokonywano zmiany warunków cieplnych w kontrolowany sposób, poprzez zmianę wartości tej temperatury.

W pierwszej kolejności przeprowadzono próby w warunkach temperatury T_{DMTA1} o stałej wartości, zbliżonej do temperatury standardowych warunków pracy tego materiału T_0 . Celem tego działania było wstępne rozpoznanie wartości właściwości mechanicznych materiału i jego zachowania się w miarę kolejnych cykli obciążenia. Wykonano po pięć powtórzeń dla każdego typu próbki, z trzema pełnymi cyklami obciążenia w każdym, przy założeniu stałości parametrów badania (Tab. 14).

Tab. 14. Badania dynamicznej analizy termomechanicznej w warunkach stałej temperatury

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Rodzaj próbki	-	1) pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A) 2) pas płaski o grubości $t = 4$ mm (B)
Wartość temperatury badania	T_{DMTA1} [°C]	22,5
Amplituda drgań	A_{DMTA1} [%]	0,02
Częstotliwość drgań	f_{DMTA1} [Hz]	1

Układ pomiarowy urządzenia rejestrował w sposób ciągły następujące dane, w postaci wartości:

- składowej zachowawczej modułu sprężystości poprzecznej G'_{DMTA1} ,
- składowej stratności modułu sprężystości poprzecznej G''_{DMTA1} ,
- aktualnej temperatury atmosfery otaczającej próbkę T_{DMTA1} .

Po wyciągnięciu wniosków z pierwszego etapu badań, związanych m.in. zakresem pomiarowym rejestracji składowych modułu sprężystości poprzecznej G , przystąpiono do analizy DMTA w zmiennych warunkach temperaturowych. W tym celu, podobnie jak w pierwszym etapie prostopadłościennie próbki wprawiano w oscylacje wywołujące cykliczne skręcanie próbki w trzech następujących po sobie cyklach, określonych przez naprzemienne nagrzewanie i chłodzenie próbki. Zadano więc ponownie stałą amplitudę odkształcenia A_{DMTA2} oraz niezmienną częstotliwość f_{DMTA2} . Podobnie jak w poprzednim etapie układ pomiarowy rejestrował odpowiedź materiału na wymuszone oscylacje, w postaci wartości:

- składowej zachowawczej modułu sprężystości poprzecznej G'_{DMTA2} ,
- składowej stratności modułu sprężystości poprzecznej G''_{DMTA2} ,
- aktualnej temperatury atmosfery otaczającej próbkę T_{DMTA2} .

Na podstawie:

- wniosków z poprzedniego etapu badań (w temperaturze o stałej wartości),
- rozpoznania zakresu wartości temperatury, w którym materiał nie odkształcił się nadmiernie (rozpoczęcie plastycznego płynięcia, po którym dalsze badanie było niemożliwe – Rys. 43b),
- przeglądu stanu wiedzy na temat tego typu badań [39, 105, 129],

przyjęto założenia o zachowaniu takich samych parametrów mechanicznych odkształceń, doborze zakresu temperatury badania (określonej przez wartość maksymalną T_{DMTA2_koniec} oraz minimalną T_{DMTA2_start}), a także szybkości zmiany wartości temperatury podczas nagrzewania i chłodzenia v_{DMTA2} (Tab. 15).

Tab. 15. Badania dynamicznej analizy termomechanicznej w warunkach zmiennej temperatury

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Nagrzewanie	Chłodzenie
Rodzaj próbki	-	1) pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A) 2) pas płaski o grubości $t = 4$ mm (B)	
Liczba następujących po sobie cykli	n_{DMTA2} [-]	3	3
Temperatura startowa	T_{DMTA2_start} [°C]	-100	180
Temperatura końcowa	T_{DMTA2_koniec} [°C]	180	-100
Szybkość zmiany wartości temperatury	v_{DMTA2} $\left[\frac{^{\circ}C}{min}\right]$	5	5
Amplituda drgań	A_{DMTA2} [%]	0,02	
Częstotliwość drgań	f_{DMTA2} [Hz]	1	

W dalszej kolejności wykonano analizę termograwimetryczną próbek pobranych z obu pasów, w celu porównania ich składu chemicznego [64]. Polegała ona na wprowadzeniu badanego materiału w stan podwyższonej temperatury T_{TGA} , osiągającej wartość wywołującą chemiczny rozkład tworzywa. Zjawisko to następuje po osiągnięciu przez materiał temperatury T_d rozpadu chemicznego tworzywa, co skutkuje następującymi zjawiskami fizycznymi [41, 77]:

- rozpadem wiązań kowalencyjnych łączących atomy w łańcuchach monomerów, wywołującym dekompozycję podstawowych makrocząsteczek materiału,

- rozkładem chemicznym lub roztopieniem dodatków funkcyjnych zawartych w strukturze materiału (ewentualnie ich uwolnieniem, jeżeli wartość temperatury ich rozkładu jest wyższa, co powoduje ich segregację przestrzenną).

Analizę przeprowadzono przy użyciu aparatu Netzsch TG Libra 209 [133]. Realizacja badań polegała na nagrzewaniu próbki o ściśle określonej masie początkowej m_{TGA} i precyzyjnym rejestrowaniu zmiany masy materiału δm_{TGA} . Nagrzewanie materiału do temperatury o wysokiej wartości (znacząco przekraczającej wartość temperatury topnienia lub plastycznego płynięcia) powoduje chemiczny rozkład materiału, a kontrola zmiany masy (masa zmniejsza swoją wartość w wyniku spalania się kolejnych substancji) umożliwia określenie składu materiału, na podstawie porównania ze zbiorem parametrów wzorcowych. Badania tego typu są często stosowane do porównywania ze sobą materiałów polimerowych [122, 126].

Warunki tych badań obejmowały m.in. (Tab. 16):

- nagrzewanie materiału ze stałą szybkością v_{TGA} w całym zakresie wartości temperatury i ciągłą rejestracją wartości temperatury T_{TGA} ,
- zastosowanie dwóch rodzajów atmosfery ochronnej: chemicznie obojętnej oraz reaktywnej, ze stałym natężeniem przepływu gazu,
- ściśle określoną masę początkową próbek,
- zastosowanie chemicznie obojętnej tygla (w stosunku do badanego materiału), przeznaczonego do nagrzewania próbek.

Tab. 16. Parametry porównawczych badań termogravimetrycznych

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Rodzaj próbki	-	1) pas okrągły o średnicy $d = 18$ mm (A) 2) pas płaski o grubości $t = 4$ mm (B)
Temperatura startowa	T_{TGA_start} [°C]	30
Temperatura końcowa	T_{TGA_koniec} [°C]	950
Atmosfera ochronna	-	1) atmosfera reaktywna – powietrze atmosferyczne (1) 2) atmosfera obojętna – chemicznie czysty azot N_2 (2)
Natężenia przepływu gazu stanowiącego atmosferę ochronną	\dot{q}_{TGA} $\left[\frac{cm^3}{min}\right]$	20
Masa początkowa próbki	m_{TGA} [mg]	$5 \pm 0,2$
Materiał tygla	-	Al_2O_3

W kolejnym etapie badań porównawczych, dla obu typów próbek (typu A pobranej z pasa o przekroju kołowym oraz próbki typu B z pasa płaskiego), przeprowadzono porównawczą analizę spektrofotometryczną FT-IR [64]. Polegała ona na oświetleniu próbek pasa promieniowaniem podczerwonym z jednoczesnym rejestrowaniem widma promieniowania przepuszczonego przez materiał. Tego typu postępowanie, na podstawie porównania uzyskanego widma promieniowania z danymi wzorcowymi, pozwala na określenie związków chemicznych i grup funkcyjnych obecnych w analizowanych materiałach [122, 126]. Głównym celem tego badania, było rozpoznanie struktury cząsteczkowej termoplastycznego poliuretanu,

a także porównanie grup funkcyjnych występujących w próbce A i B. Analizę wykonano za pomocą spektrofotometru Nicolet iS50 [134].

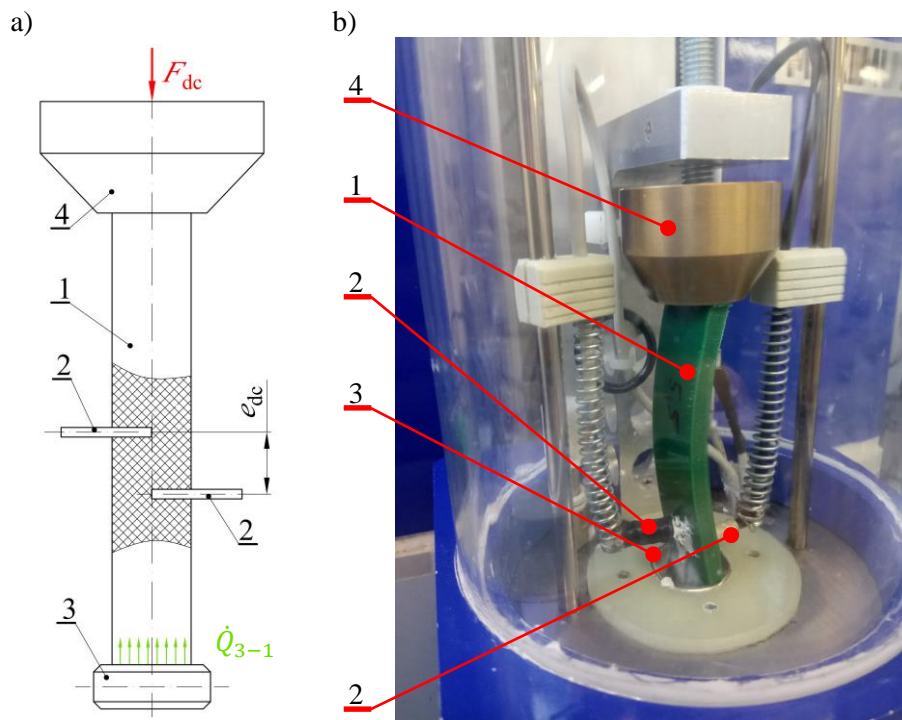
Po wykonaniu dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA, powtórzono badanie spektrofotometryczne FT-IR, dla próbek pasa wykorzystanych w badaniu DMTA. Na tej podstawie wykonano analizę porównawczą składu i struktury chemicznej materiału, przed i po zadaniu cyklu obciążeń mechanicznych, zadawanych w warunkach temperatury o zmiennej wartości. Postępowanie to pozwoliło na ewentualne rozpoznanie zmian strukturalnych w materiale po przyłożeniu cyklicznych obciążeń termo-mechanicznych. Wnioski z tego badania mogą być wykorzystane do prognozowania ewentualnego zachowania się tego tworzywa po wykonaniu złącza zgrzewanego.

Ostatnim rodzajem badań wykonanych w celu wyznaczenia właściwości termicznych materiału był pomiar współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} (Rys. 44) [64]. Badania te polegały na nagrzewaniu prostopadłościennej próbki pasa (1) od strony jednego z jej końców, poprzez przyłożenie płaskiego elementu grzejnego, rozgrzewanego podczas badania (3), do jednej z powierzchni próbki. Jednocześnie aby utrzymać korzystne warunki kontaktowego przewodzenia ciepła pomiędzy elementem grzejnym (3), a próbką (1), jest ona dociskana za pomocą dociskacza (4) z siłą F_{dc} . Istotą badania jest pomiar wartości temperatury materiału T_{dc} w stałym interwale czasowym, realizowany za pomocą dwóch termoelementów (2) umieszczonych w znanej odległości od siebie (e_{dc}) i jednoczesna rejestracja czasu t_{dc} zapisu obu wartości temperatury. Założenia oraz parametry do badania dyfuzyjności cieplnej a_{dc} były następujące (Tab. 17):

- izotropowy charakter przepływu ciepła wewnątrz próbki,
- ogrzewanie próbki w atmosferze obniżonego ciśnienia, tak aby zmniejszyć wpływ konwekcji na nagrzewanie się próbki,
- ogniwa termoelektryczne wprowadzone do połowy głębokości próbki, tak aby zarejestrować wartość temperatury jej rdzenia,
- powierzchnie kontaktu pomiędzy grzałką i próbką, a także ogniwami termoelektrycznymi i próbką, połączone poprzez pastę termoprzewodzącą,
- próbki obrabiane mechanicznie w celu uzyskania pożądanego kształtu (prostopadłościennego) poprzez obróbkę skrawaniem (typu A – pobrane z pasa o przekroju kołowym) oraz cięcie nożowe (typu B – pobrane z pasa płaskiego).

Tab. 17. Parametry badania współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc}

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Długość nominalna	l_{dc} [mm]	50
Szerokość nominalna	t_{dc} [mm]	10
Grubość nominalna	g_{dc} [mm]	4
Temperatura startowa grzałki	$T_{dc_g_start}$ [°C]	22,5
Temperatura końcowa grzałki	$T_{dc_g_koniec}$ [°C]	100
Maksymalny czas nagrzewania	t_{dc_max} [s]	100
Odległość pomiędzy ogniwoy termoelektrycznymi	e_{dc} [mm]	5±0,1
Ciśnienie w komorze badawczej	p_{dc} [hPa]	200
Współczynnik przewodzenia pasy termoprzewodzącej	λ_{dc} $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0,88



Rys. 44. Badania współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} dla próbki typu B pobranej z pasa płaskiego: 1 – próbka, 2 – ogniwa termoelektryczne, 3 – płytowy element grzewczy, 4 – dociskacz; e_{dc} – znana odległość pomiędzy ogniwami termoelektrycznymi, \dot{Q}_{3-1} – strumień ciepły przekazywany w wyniku kontaktowego przewodzenia ciepła pomiędzy elementem grzewczym, a próbką

4.3. Właściwości termomechaniczne pasa termozgrzewalnego – dyskusja rezultatów

4.3.1. Wyniki badań właściwości fizycznych w warunkach stałej wartości temperatury

Wyniki pomiarów gęstości oraz twardości Shore’a wskazują na to, że oba pasy ciągnowe (pas o przekroju kołowym i płaski) są do siebie bardzo podobne (Tab. 18). Różnica procentowa w wartościach tych właściwości wynosi około 0,1% dla obu rodzajów próbek, co jest wartością pomijalną. Podobnie jest w przypadku wyników badań gęstości materiału, które dodatkowo wskazują, że jest ona stosunkowo niska, w porównaniu do innych tworzyw konstrukcyjnych polimerowych np. poliamidu, poliacetalu oraz gumy [77, 78, 84]. Ten rodzaj poliuretanu pochodzący z badanych pasów, ma twardość wyższą o rząd wielkości około 10°Sh A, w porównaniu ze standardowo stosowanymi materiałami gumowymi [84, 135, 136].

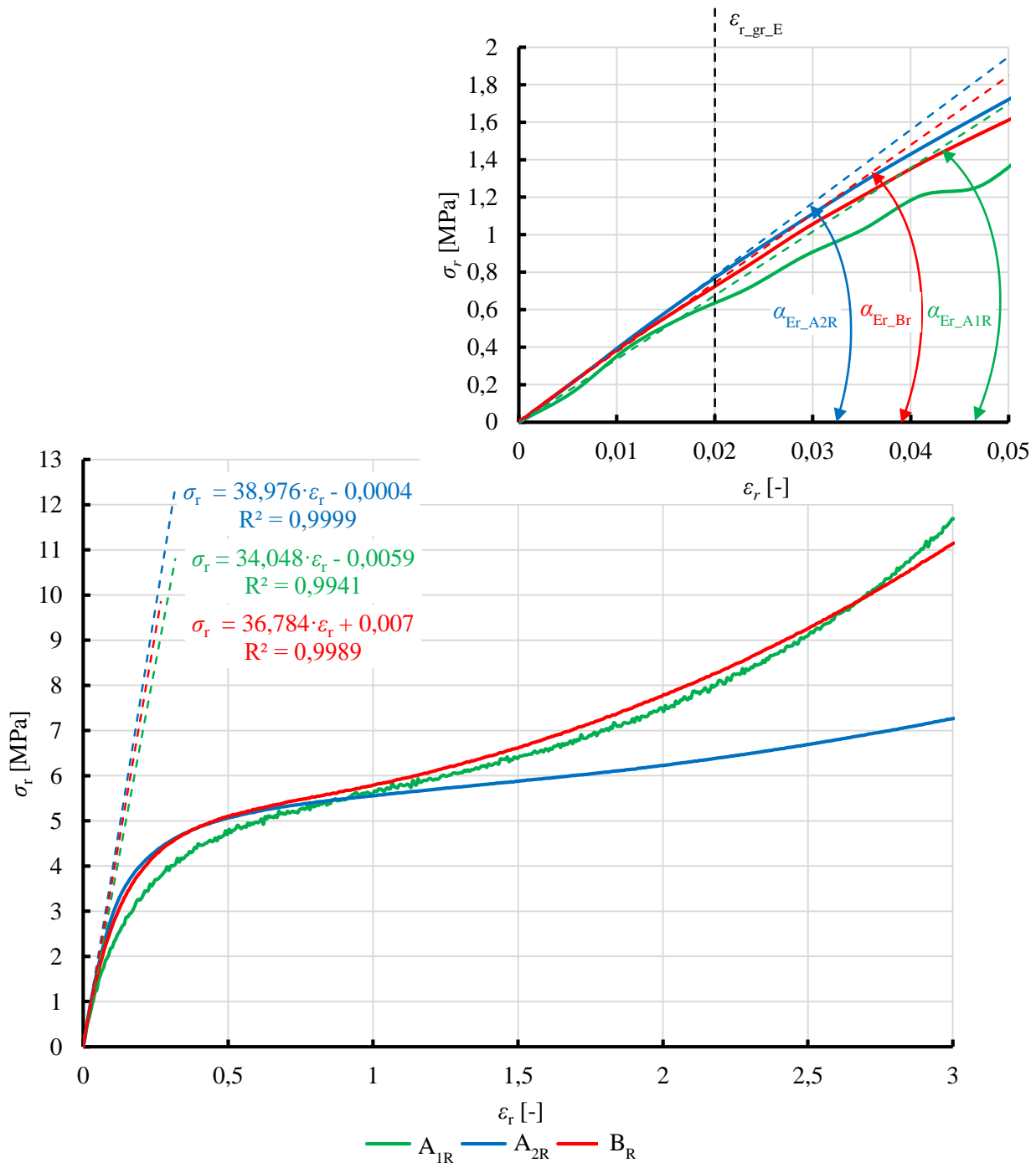
Tab. 18. Wyniki badań gęstości oraz twardości materiału pasów

Parametr	Oznaczenie	Wartość	
		Próbka typu A	Próbka typu B
Gęstość	$\rho_p \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	$1,1901 \pm 0,0008$	$1,1914 \pm 0,0009$
Różnica procentowa gęstości	[%]	0,11	
Twardość Shore’a	[°Sh A]	$90,45 \pm 0,52$	$90,36 \pm 0,67$
Różnica procentowa twardości Shore’a	[%]	0,10	

Analiza charakterystyki rozciągania pasa, czyli wykresu przedstawiającego zależność pomiędzy wartością naprężenia rozciągającego σ_r (inżynierskiego, odniesionego do pierwotnego pola przekroju poprzecznego próbki), a odkształceniem względnym przy rozciąganiu ε_r (wyznaczone na bazie wstępnej odległości

pomiędzy szczękami maszyny wytrzymałościowej l_{rsz}) dla wszystkich rodzajów badanych próbek (Rys. 45), pozwala poczynić pewne obserwacje, m.in.:

- charakterystyki te różnią się między sobą w pewnym zakresie, w szczególności w zakresie wyższych wartości odkształcenia ε_r przy rozciąganiu, dotyczy to w szczególności porównania pomiędzy próbkami pobranymi z pasa o przekroju kołowym (A_{1R} i A_{2R}),
- uzyskane zależności charakteryzują się znaczną nieliniowością, z dwoma punktami przegięcia.



Rys. 45. Uśrednione charakterystyki rozciągania badanych próbek pasów poliuretanowych: A_{1R} – próbka pasa o przekroju kołowym i średnicy $d_t = 4$ mm, A_{2R} – próbka pasa o przekroju kołowym i średnicy $d_t = 12$ mm, B_R – próbka pasa płaskiego

Podczas wykonywania tych badań, poczyniono natomiast następujące obserwacje:

- żadnej z badanych próbek nie udało się zerwać, ze względu na ograniczenie dopuszczalnego zakresu przemieszczenia trawersy ruchomej maszyny MTS,
- w przypadku próbki wiosełkowej nie zaobserwowano utworzenia się wyraźnego przewężenia, próbka odkształcała się w przybliżeniu równomiernie w całym zakresie odcinka pomiarowego,
- w przypadku próbek pobranych z pasa o przekroju kołowym, istotne przewężenie zaobserwowano w obszarze uchwycenia w szczęce maszyn wytrzymałościowej MTS, co jest spowodowane wprowadzeniem dodatkowego naprężenia do struktury materiału w wyniku odkształcenia go przez uchwyt samozaciskowy.

Oczywistym więc jest, że w szerokim zakresie odkształcenia, materiał ten nie może być opisany klasyczną charakterystyką materiału sprężysto-plastycznego. Jest to cecha charakterystyczna dla elastomerów termoplastycznych, obciążanych w temperaturze pokojowej. Analizując uzyskaną charakterystykę, można potwierdzić to, że materiał ten powinien być opisany bardziej złożonym modelem materiałowym hipersprężystym np. Neo-Hookean'a, Mooney'a-Rivlin lub Ogden'a [89, 90, 92]. Jednakże w zakresie początkowym charakterystyki możliwe jest podjęcie próby opisanie jego właściwości mechanicznych przy rozciąganiu, z wykorzystaniem klasycznego podejścia. Na podstawie otrzymanych charakterystyk rozciągania, wyznaczono moduł sprężystości wzdłużnej przy rozciąganiu, dla wszystkich rodzajów badanych próbek (Tab. 19). Wzięto pod uwagę zakres początkowy rozciągania dla $\varepsilon_{r_gr_E} < 0,02$, który jest w przybliżeniu liniowy. W tym przypadku moduł sprężystości E_r jest równy współczynnikowi proporcjonalności równania prostej opisującej ten odcinek (Rys. 45), co można wyrazić za pomocą zależności:

$$E_r = \tan \alpha_{Er} = \frac{\sum[(\varepsilon_{ri} - \bar{\varepsilon}_r) \cdot (\sigma_{ri} - \bar{\sigma}_r)]}{\sum(\varepsilon_{ri} - \bar{\varepsilon}_r)^2}, \quad (4.8)$$

przy założeniu, że dopasowanie funkcji do rozpatrywanego zakresu danych, opisane jest współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,99$. Biorąc pod uwagę fakt, że różnica pomiędzy poszczególnymi wyznaczonymi wartościami modułu proporcjonalności E_r nie przekracza 15% (maksymalna zarejestrowana różnica wynosi około 12%) wyznaczono wartość średnią dla wszystkich próbek, a także osobno dla próbek walcowych (typu A_{1R} i A_{2R}). Wartości te, na tym etapie prac badawczych są wystarczające jako orientacyjny punkt odniesienia, do określenia parametrów mechanicznych przy rozciąganiu pasów napędowych i transportujących wykonanych z tego materiału.

Tab. 19. Wyznaczone wartości modułu sprężystości wzdłużnej przy rozciąganiu

Próbka	Oznaczenie	Wartość
Walcowa o średnicy $d_r = 4$ mm (A _{1R})	E_{r_A1R} [MPa]	34,048
Walcowa o średnicy $d_r = 12$ mm (A _{2R})	E_{r_A2R} [MPa]	38,976
Wartość średnia dla próbek walcowych	E_{rA} [MPa]	36,512
Wiosełkowa o przekroju prostokątnym (B _R)	E_{rB} [MPa]	36,784
Wartość średnia całkowita	E_r [MPa]	36,648

Interesującym jest to, że uzyskane charakterystyki podczas rozciągania różnią się w zależności od postaci geometrycznej rozciąganej próbki, co w przypadku materiałów metalowych nie jest zazwyczaj obserwowane. Na to zjawisko mają wpływ następujące czynniki:

- odmienna technologia wykonania pasa płaskiego i o przekroju kołowym. Inny kształt przekroju poprzecznego końcowego produktu, uzyskany w wyniku profilowania lub ciągłego wytłaczania ma wpływ na orientację łańcuchów makrocząsteczek. Biorąc pod uwagę fakt ich dużo wyższej wytrzymałości w kierunku podłużnym niż poprzecznym (co wynika głównie z wytrzymałości wiązań kowalencyjnych [79, 85]), różnice w wytrzymałości na rozciąganie, obserwowane w skali makroskopowej są efektem spodziewanym,
- zastosowanie próbek walcowych bez przewężenia, ze względu na złożony stan naprężenia obecny w strukturze materiału w wyniku jego ściśnięcia w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Pas o mniejszej średnicy (próbka A_{1R} o średnicy $d_r = 4$ mm) jest mniej wytrzymały, ze względu na mniejszy przekrój poprzeczny, co powoduje, że wpływ tego zjawiska jest większy. Obserwowalnym efektem tego jest niższa wartość modułu sprężystości wzdłużnej (o około 12%). Dodatkowym efektem wpływającym na różnicę pomiędzy tymi próbkami, może być szybkość chłodzenia półproduktu pasa podczas jego produkcji, co ma wpływ na segregację łańcuchów polimerowych i wiązań między nimi. W wyniku tego makroskopowe właściwości mechaniczne takich produktów mogą się nieco różnić.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na skalę wartości uzyskanego naprężenia i zastosowaną metodykę badawczą. W przypadku względnie małych wartości sił (powodujących naprężenie o wartości mniejszej niż 10 MPa) dokładność np.: układu pomiarowego siły maszyny wytrzymałościowej, długości lub średnicy próbek, ma znaczący wpływ na uzyskane wyniki, w porównaniu do badań właściwości metali, gdzie uzyskiwane wyniki są co najmniej o rząd wyższe.

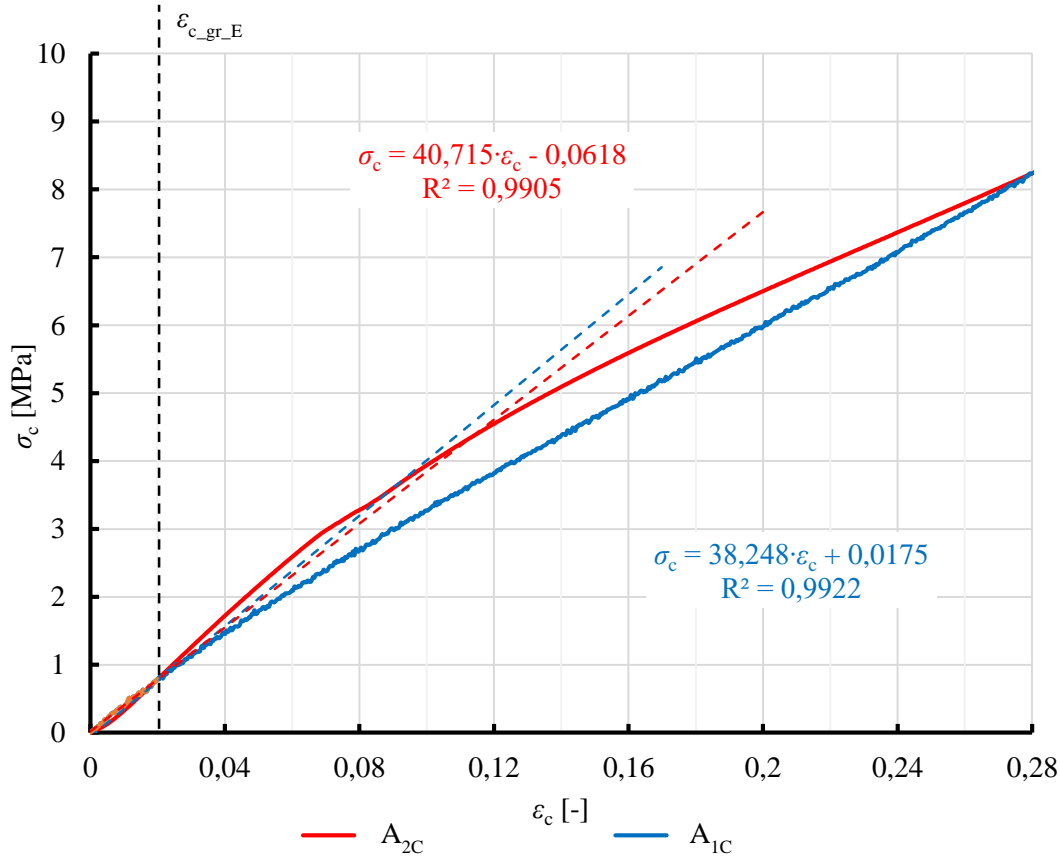
Na podstawie wyników próby ściskania (charakterystyki zależności naprężeń ściskających σ_c odniesionych do pierwotnego pola przekroju poprzecznego, od odkształcenia względnego ε_c , wyznaczonego na podstawie przemieszczenia trawersy ruchomej maszyny wytrzymałościowej) materiału, z którego wykonany jest pas o przekroju kołowym (Rys. 46) można wysunąć następujące wnioski na temat tej operacji:

- podczas ściskania próbek walcowych o średnicy $d_{c1} = 4$ mm (Rys. 46, próbka A_{1C}), w początkowym zakresie charakterystyka opisująca zależność naprężenia ściskającego σ_c od odkształcenia ε_c jest niemal liniowa, przy czym dla odkształcenia przekraczającego 5% ($\varepsilon_c > 0,05$), wykazuje ona pewną nieliniowość,
- niemal taka sama sytuacja obserwowalna jest w przypadku ściskania próbki o średnicy $d_{c1} = 18$ mm (Rys. 46, próbka A_{2C}). W tym przypadku jednak, granica rozpoczęcia wyraźnej nieliniowości charakterystyki ściskania osiowego przesunięta jest w granice odkształcenia przekraczającego 10% ($\varepsilon_c > 0,1$).

Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono moduł proporcjonalności tego materiału przy ściskaniu (Tab. 20). Przyjęto, że parametr ten będzie reprezentowany przez liniowy zakres charakterystyki ściskania (Rys. 46), dla granicznego odkształcenia przy ściskaniu $\varepsilon_{c_gr_E} < 0,02$. W związku z tym, wartość modułu proporcjonalności przy ściskaniu w standardowej temperaturze otoczenia T_0 , jest opisana współczynnikiem kierunkowym prostej aproksymującej ten zakres:

$$E_c = \tan \alpha_{E_c} = \frac{\sum[(\varepsilon_{ci} - \bar{\varepsilon}_c) \cdot (\sigma_{ci} - \bar{\sigma}_c)]}{\sum(\varepsilon_{ci} - \bar{\varepsilon}_c)^2}, \quad (4.9)$$

przy założeniu, że dopasowanie prostej aproksymującej określone jest za pomocą współczynnika determinacji $R^2 > 0,99$.



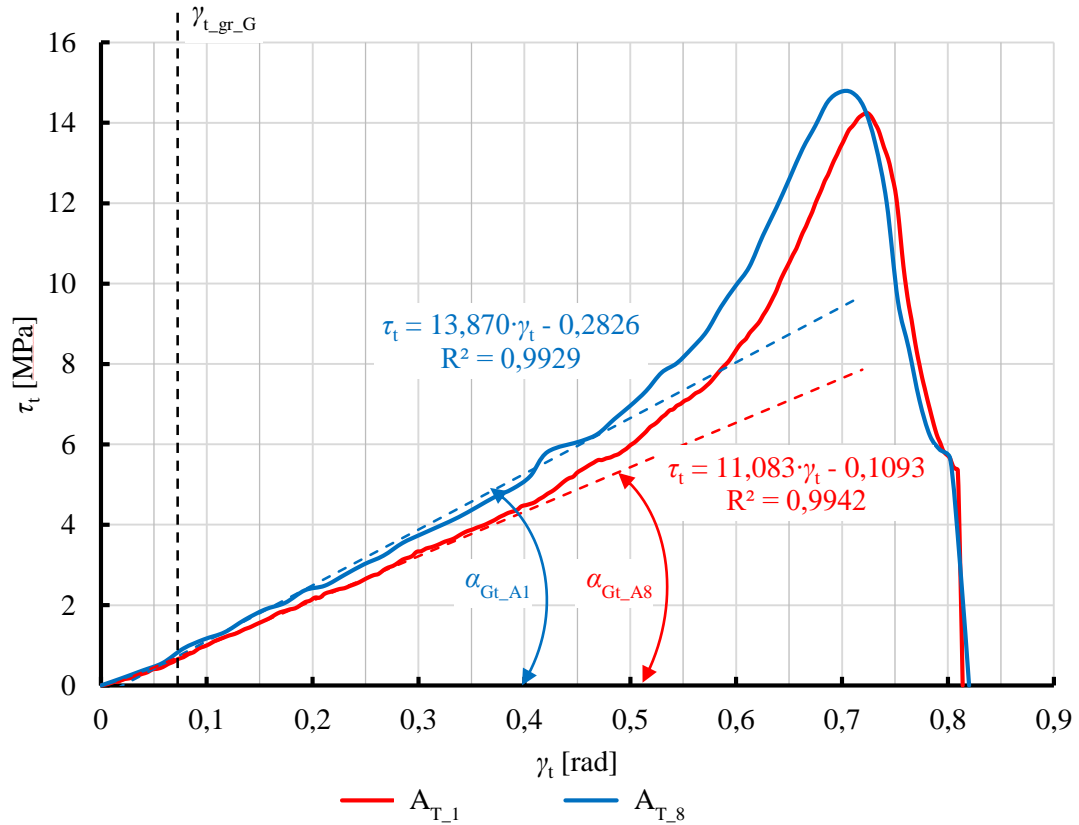
Rys. 46. Uśrednione charakterystyki ściskania badanych próbek walcowych o średnicy $d_{c1} = 4$ mm (A_{1C}) oraz $d_{c1} = 18$ mm (A_{2C})

Tab. 20. Wyznaczone wartości modułu proporcjonalności przy ścisnaniu

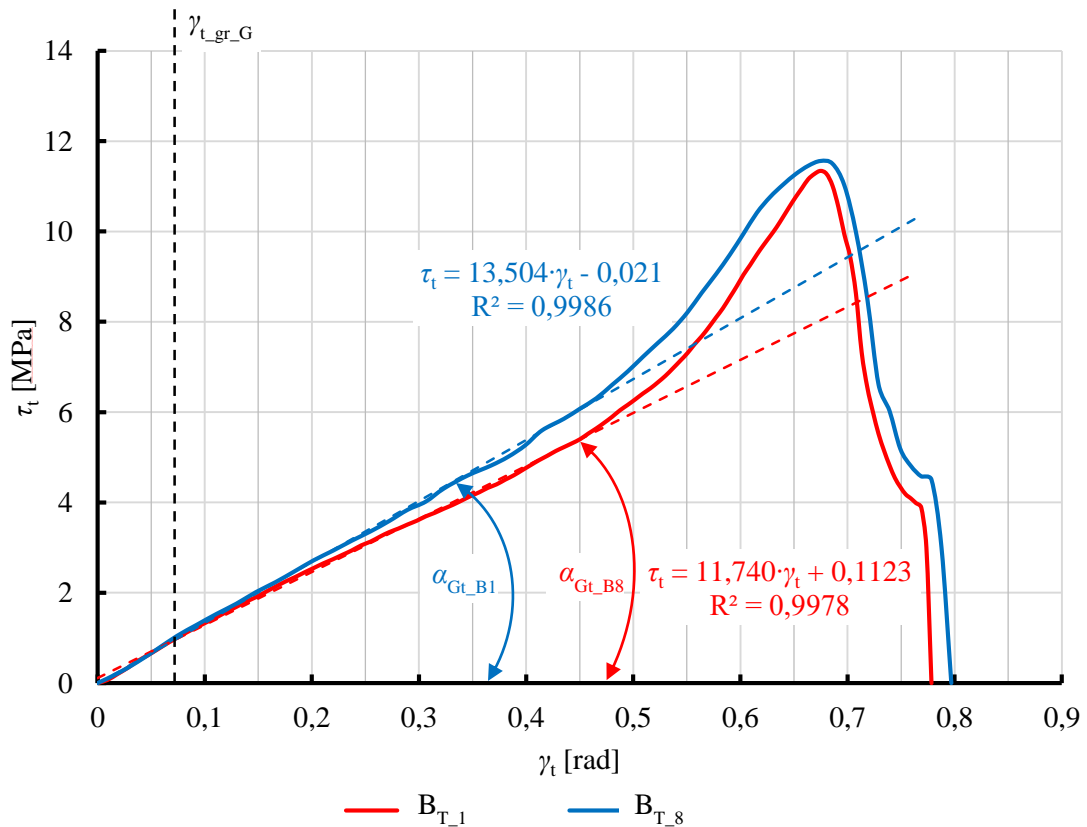
Próbka	Oznaczenie	Wartość
Średnica $d_{c1} = 4$ mm	E_{cA1C} [MPa]	38,248
Średnica $d_{c1} = 18$ mm	E_{cA2C} [MPa]	40,715
Wartość średnia	E_{cAC} [MPa]	39,481

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, różnica wartości modułu proporcjonalności E_c przy ścisnaniu, pomiędzy obiema próbkami walcowymi nie przekracza 6%, w wyniku czego można uznać, że te wielkości są zbliżone. Jest to bardzo ważny wniosek z punktu widzenia dalszych prac badawczych, mianowicie odpowiedź tego pasa na wymuszenie ścisające jest w tym zakresie niezależna od wartości średnicy pasa, w rozpatrywanych warunkach.

Analizując wyniki próby ścinania, w postaci charakterystyki przedstawiającej zależność naprężenia ścinającego τ_1 (inżynierskiego, odniesionego do pierwotnego pola przekroju poprzecznego) od kąta odkształcenia poprzecznego γ_1 , dla pasa o przekroju kołowym (Rys. 47) i prostokątnym (Rys. 48), z uwzględnieniem dwóch prędkości ścinania v_1 (Tab. 8), można wysunąć wniosek, że są one do siebie bardzo zbliżone.



Rys. 47. Uśredniona zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym τ_t , a kątem ścinania γ_t dla pasa o przekroju kołowym i dwóch prędkości ścinania v_t



Rys. 48. Uśredniona zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym τ_t , a kątem ścinania γ_t dla pasa płaskiego o przekroju prostokątnym i dwóch prędkości ścinania v_t

Wyznaczone wartości naprężenia ścinającego τ_t podczas ścinania dynamicznego (z prędkością $v_t = 8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ – próbki A_{T_8} oraz B_{T_8}), w obu przypadkach przyjmują nieco wyższą wartość niż podczas ścinania quasi-statycznego (z prędkością $v_t = 1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ – próbki A_{T_1} oraz B_{T_1}). Najwyższa wartość różnicy pomiędzy wartościami maksymalnymi naprężenia ścinającego $\tau_{t_{\max}}$, biorąc pod uwagę różną prędkość ścinania v_t , dla tego samego rodzaju próbek nie przekracza jednak 5%. Od prędkości ścinania v_t , uzależniony jest jednak przebieg samej charakterystyki ścinania. W związku z tym, aby porównać obie próbki, wyznaczono moduł sprężystości poprzecznej przy ścinaniu G w standardowej temperaturze otoczenia T_o , dla obu rodzajów badanych próbek przy dwóch prędkościach ścinania v_t . Przyjęto, że jego wartość jest opisana współczynnikiem kierunkowym prostej, aproksymującej liniowy zakres zależności naprężenia przy ścinaniu τ_t od kąta odkształcenia γ_t (Rys. 47 i Rys. 48), przy założeniu granicznej wartości tego parametru $\gamma_{t_{gr_G}} < 4^\circ (\approx 0,07 \text{ rad})$. Wartość tę można wyznaczyć z zależności (Tab. 21):

$$G = \tan \alpha_{Gt} = \frac{\sum[(\gamma_{ti} - \bar{\gamma}_t) \cdot (\tau_{ti} - \bar{\tau}_t)]}{\sum(\gamma_{ti} - \bar{\gamma}_t)^2}, \quad (4.10)$$

przy założeniu, że dopasowanie prostej do charakterystyki w rozpatrywanym zakresie kąta odkształcenia γ_t , opisane jest współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,99$.

Tab. 21. Wyznaczone wartości modułu sprężystości poprzecznej przy ścinaniu

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Oznaczenie	Wartość
Prędkość ścinania	$v_t \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$	1	$v_t \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$	8
Moduł dla próbki walcowej o średnicy $d_t = 4 \text{ mm}$ (A_{T_1} oraz A_{T_8})	G_{A_1} [MPa]	11,083	G_{A_8} [MPa]	13,870
Moduł dla próbki prostokątnej, o wymiarach $g_t = 4 \text{ mm}$ i $b_t = 10 \text{ mm}$ (B_{T_1} oraz B_{T_8})	G_{B_1} [MPa]	11,740	G_{B_8} [MPa]	13,504

Analizując otrzymane rezultaty (Tab. 21), można wywnioskować, że różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami modułu sprężystości poprzecznej dla obu próbek jest względnie niewielka (nie przekracza 5% dla obu prędkości ścinania v_t), co potwierdza, że przy tym rodzaju obciążenia odpowiedź materiału obu próbek na stan obciążenia jest podobna.

Różnica pomiędzy wartościami modułu sprężystości poprzecznej G dla obu prędkości ścinania v_t (wynosząca około 20%) potwierdza tezę, że materiał ten już w standardowej temperaturze otoczenia ujawnia właściwości lepko-sprężyste. Obserwowalnym efektem tego jest zależność właściwości mechanicznych tworzywa od prędkości odkształcenia – co jest charakterystyczne dla większości tworzyw sztucznych.

Wykorzystując wyniki statycznej próby rozciągania (Tab. 19) oraz próby ścinania w zakresie statycznym (Tab. 21), możliwe jest wyznaczenie współczynnika Poissona materiału w zakresie sprężystym. Uwzględniając to, że do badań użyto dwóch różnych rodzajów pasa, obliczono go oddzielnie dla próbek prostokątnych i walcowych, a także wartość uśrednioną (Tab. 22). Jego wartości obliczono z następujących zależności:

$$\nu_A = \frac{E_{TA}}{2 \cdot G_{A_1}} - 1, \quad (4.11)$$

a dla próbki płaskiej:

$$\nu_B = \frac{E_{rB}}{2 \cdot G_{B,1}} - 1. \quad (4.12)$$

Tab. 22. Wyznaczone wartości współczynnika Poissona

Rodzaj pasa	Oznaczenie	Wartość
Pas o przekroju kołowym (próbki typu A)	ν_A [-]	0,463
Pas płaski (próbki typu B)	ν_B [-]	0,461
Wartość uśredniona	ν_{avg} [-]	0,462

Różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami współczynnika Poissona nie przekracza 1%, można więc uznać, że w tym zakresie materiały z których wykonane są oba rodzaje pasa są tożsame. Dzięki temu, na potrzeby dalszych prac możliwe będzie przyjmowanie uśrednionego współczynnika Poissona ν_{avg} . Wartość ta, jest wielkością oczekiwaną dla tego materiału, który w standardowej temperaturze użytkowania wykazuje właściwości pokrewne tworzywom elastomerowym – zachowanie gumopodobne.

Analizując wyniki badań przeprowadzonych w standardowej temperaturze otoczenia, należy zwrócić uwagę na to, że nie dostarczają one w pełni jednoznacznych, precyzyjnych informacji na temat stałych materiałowych dla badanych pasów, ponieważ wyniki uzyskiwane w tych różnych badaniach nie zawsze są ze sobą porównywalne. Zgodnie z powszechną wiedzą, moduł proporcjonalności przy rozciąganiu lub ściskaniu, moduł sprężystości poprzecznej oraz współczynnik Poissona przyjmują stałą wartość, niezależnie od kształtu i rozmiarów badanej próbki, co dotyczy w szczególności klasycznych materiałów sprężysto-plastycznych, np. dużej grupy stopów metali.

W przedstawionym przypadku natomiast, dla pasów poliuretanowych właściwość ta nie zachodzi w pełnym zakresie. Przyczyny tego zjawiska mogą być następujące:

- badano tworzywo sztuczne o nieliniowo zmieniających się właściwościach mechanicznych, w związku z czym jego zachowanie pod wpływem zadawanych w próbie obciążeń, może znacząco odbiegać od ogólnie przyjętych standardów dla materiałów sprężysto-plastycznych, co szczególnie wykazano na przykładzie prób rozciągania i ściskania tego materiału (Rys. 45 i 46),
- badano próbki pobrane z różnych produktów, dostępnych w ofercie handlowej producenta pasów. Różnice w własnościach mechanicznych pomiędzy próbkami walcowymi i prostopadłociennymi, można więc tłumaczyć różną technologią produkcji tych pasów, uwarunkowaną cechami geometrycznymi, w związku z czym obserwowalne są różnice właściwości mechanicznych próbek pochodzących z różnych pasów,
- w przypadku prób rozciągania, różnicę w wynikach może powodować zastosowanie nieznormalizowanych próbek walcowych bez przewężenia. W takim przypadku odkształcenie pasa w szczękach uchwytów maszyny wytrzymałościowej, może powodować zmniejszenie rejestrowanych wartości sił, szczególnie przy małych odkształceniach.

Otrzymane wyniki badań, dostarczyły informacji na temat zachowania się tworzywa pod wpływem obciążeń oraz orientacyjnych wartości właściwości materiału pasa, w standardowej temperaturze otoczenia T_0 . Uzyskane wyniki wskazują również, że oba rodzaje pasów w takich warunkach wykazują niemal prawie

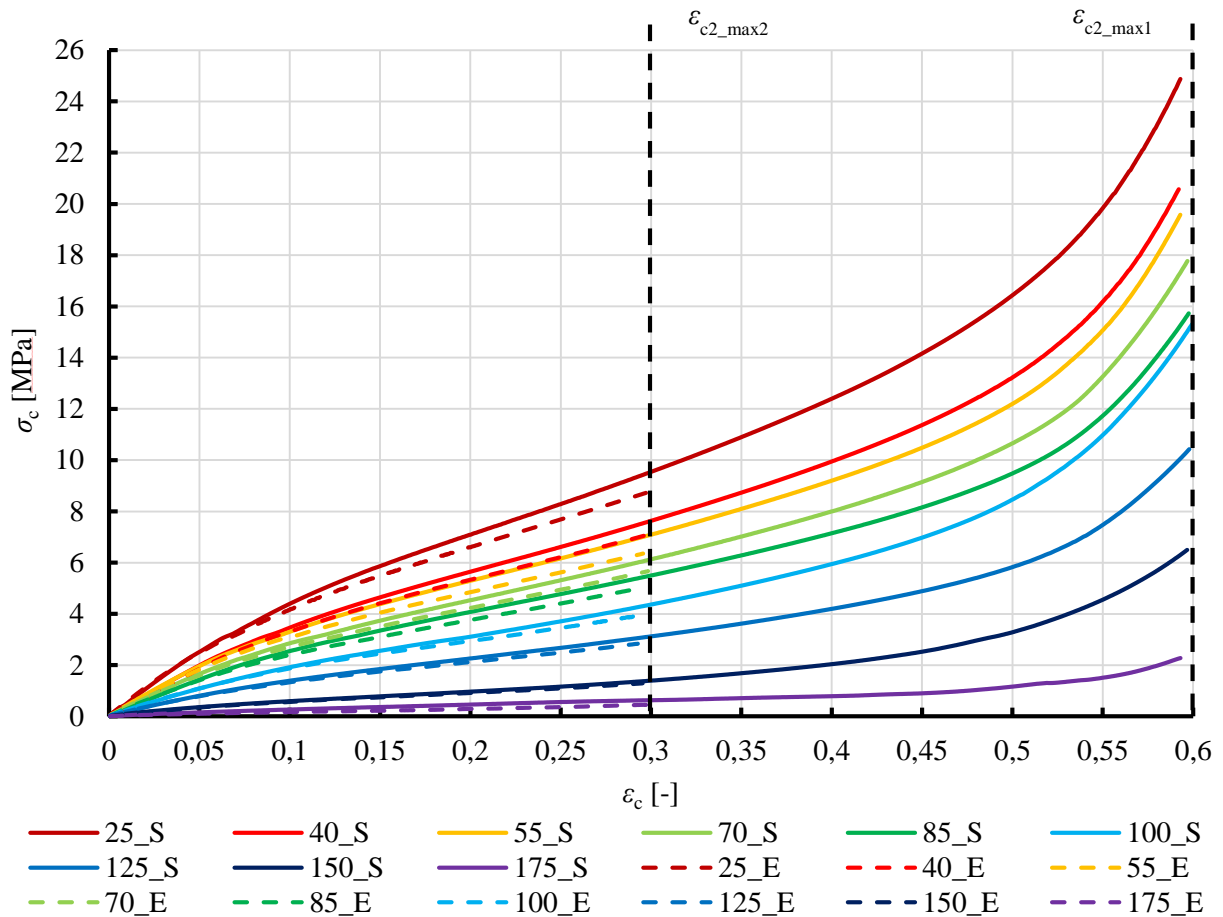
takie same właściwości mechaniczne, choć w przypadku niektórych wykonanych badań, można zaobserwować niewielkie różnice (z reguły nieprzekraczające 5% z wyjątkiem próby rozciągania, dla której różnica pomiędzy pasami wynosi 12%). Wynika to głównie z przyjętej metodyki badawczej, uwarunkowanej możliwością pozyskania odpowiednich próbek. W związku z tym, w szczególności wyniki badań statycznej próby rozciągania oraz ściskania w aspekcie porównania obu rodzajów są obarczone pewnym błędem wynikającym z przyjętej metodyki. Pozostałe wyniki (badania twardości, gęstości, ścinania) wskazują jednoznacznie na identyczne właściwości obu materiałów w tych warunkach.

Należy jednak zauważyć, że z punktu widzenia zgrzewania doczołowego pasów bardziej istotnym będzie analiza wyników badań właściwości termomechanicznych w warunkach temperatury o zmiennej wartości, ze względu na to, że ich warunki pozwolą zdecydowanie lepiej odwzorować stan fizyczny materiału obecny podczas zgrzewania.

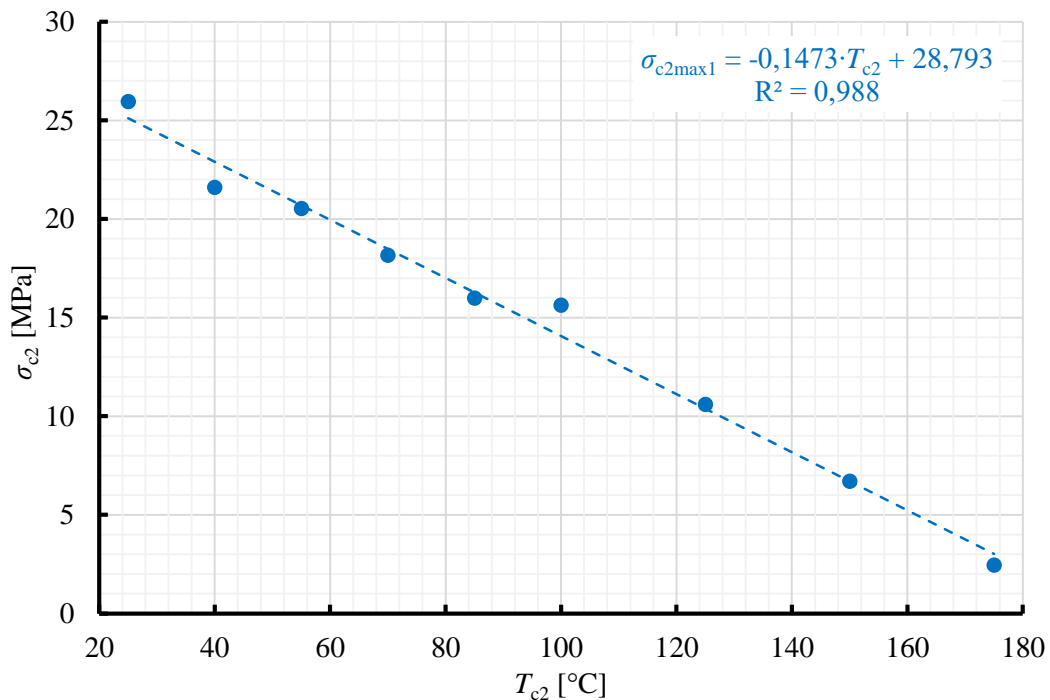
4.3.2. Wyniki badań właściwości fizycznych w zmiennej temperaturze otoczenia

Analizując uśrednione przebiegi charakterystyki ściskania (Rys. 49), przedstawiającej zależność pomiędzy naprężeniem ściskającym σ_c , a odkształceniem podczas ściskania ε_c , w warunkach temperatury T_{c2} o zmiennej wartości (Tab. 9), dla obu wariantów tej operacji (ściskanie w celu wyznaczenia maksymalnej wartości naprężenia σ_{c2_max} oraz w celu wyznaczenia modułu proporcjonalności E_{c2}), a także obserwując faktyczny przebieg tej operacji, można wywnioskować że:

- materiał w ogólnym ujęciu wykazuje nieliniową charakterystykę $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$ podczas ściskania, co w przypadku tworzyw sztucznych jest efektem spodziewanym, przy czym przebieg tej zależności można podzielić na cztery charakterystyczne obszary:
 - liniowy o proporcjonalnej zależności pomiędzy wartością naprężenia σ_c a odkształceniem ε_c , w zakresie odkształcenia $\varepsilon_c < 0,05$, dla obu badanych prędkości ściskania ($v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ wykorzystywanej na potrzeby wyznaczenia modułu E_{c2} oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ wykorzystanej celu wyznaczenia naprężenia σ_{c2_max}) oraz wszystkich zastosowanych wartości temperatury T_{c2} . Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie modułu proporcjonalności E_{c2} przy ściskaniu, w warunkach zmiennej wartości temperatury T_{c2} ,
 - nieliniowy, degresywny w zakresie odkształcenia $0,05 \leq \varepsilon_c < 0,15$ z łagodnym punktem przegięcia, niezależnie od wartości temperatury T_{c2} oraz prędkości ściskania v_{c2} ,
 - liniowy w zakresie odkształcenia $0,15 \leq \varepsilon_c < 0,40$, przy czym zjawisko to obserwowalne jest niezależnie od wartości temperatury T_{c2} oraz prędkości ściskania v_{c2} ,
 - progresywny przy odkształceniu względnym spełniającym warunek $\varepsilon_c \geq 0,40$, niezależnie od wartości temperatury T_{c2} , co wskazuje na umacnianie się materiału podczas dalszego, postępującego odkształcenia w wyniku ściskania,
- niemożliwe było zarejestrowanie przebiegu charakterystyki ściskania materiału dla temperatury o wartości $T_{c2} = 200^\circ\text{C}$, ze względu na to, że próbka w tych warunkach samoistnie nie utrzymywała swoich wymiarów geometrycznych,



Rys. 49. Uśrednione charakterystyki ściskania osiowego materiału pasa w warunkach zmiennej temperatury T_{c2} o wartościach: 25°C, 40°C, 55°C, 70°C, 85°C, 100°C, 125°C, 150°C oraz 175°C, dla ściskania do odkształcenia granicznego $\epsilon_{c_{max2}} = 0,3$ z prędkością $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (oznaczenie próbki E) oraz do odkształcenia granicznego $\epsilon_{c_{max1}} = 0,6$ z prędkością $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (oznaczenie próbki S)

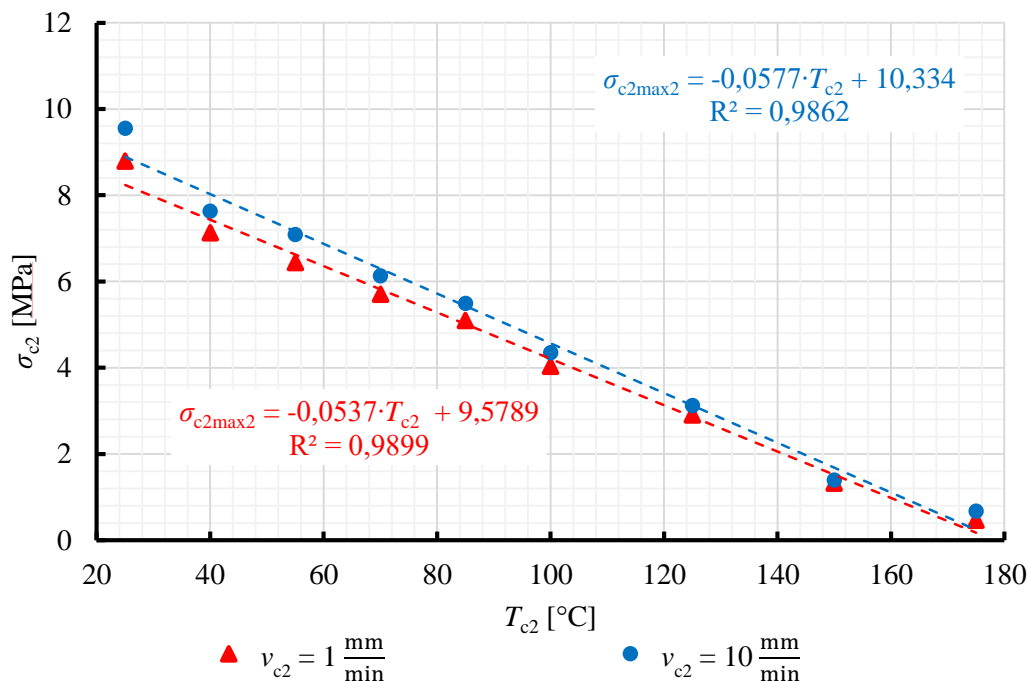


Rys. 50. Uśrednione wartości naprężenia maksymalnego $\sigma_{c2_{max1}}$ w zależności od wartości temperatury ściskania T_{c2} przy ścisnaniu do odkształcenia $\epsilon_{c2_{max1}} = 0,6$

- występuje oczekiwany spadek maksymalnego naprężenia σ_{c2max1} wraz ze wzrostem wartości temperatury T_{c2} (Rys. 50), dla próbki ściskanej do odkształcenia maksymalnego $\varepsilon_{c2_max} = 0,6$. Należy jednak zauważyć, że spadek ten jest praktycznie liniowy w całym zakresie wartości temperatury T_{c2} , o czym świadczy możliwość dopasowania do uzyskanych wartości funkcji liniowej, przy współczynniku determinacji $R^2 > 0,988$. Zjawisko to świadczy o tym, że zwiększenie wartości temperatury wpływa na właściwości wytrzymałościowe tego materiału przy ściskaniu w dość przewidywalny sposób, przy tej prędkości odkształcenia ($v_{c2} = 10 \frac{mm}{min}$).

Większość z tych obserwacji, jest spodziewanym efektem próby ściskania materiału należącego do grupy tworzyw sztucznych. Wyraźny przyrost wartości naprężenia ściskającego σ_c , podczas ściskania do odkształcenia o wartości $\varepsilon_c \geq 0,50$, niezależny od wartości temperatury T_{c2} (Rys. 49), jest spowodowany znacznym zmniejszeniem się wysokości próbki i wyraźnym zwiększeniem się wartości jej średnicy, przy tak dużej wartości odkształcenia. Powoduje to znaczny wzrost wartości siły ściskającej, co po odniesieniu jej do początkowego pola przekroju poprzecznego skutkuje progresywnym przebiegiem charakterystyki ściskania. Z tego powodu, celową wydaje się szczegółowa analiza zachowania się materiału w zakresie niższej wartości odkształcenia ε_{c2} , szczególnie w aspekcie porównania odpowiedzi materiału na obciążenie ściskające przy różnych wartościach prędkości ściskania v_{c2} .

W pierwszej kolejności analizie poddać można maksymalne naprężenia przy ściskaniu σ_{c2max2} , uzyskane przy granicznym odkształceniu $\varepsilon_{c2_max2} = 0,3$ dla obu prędkości ściskania v_{c2} (Rys. 51).



Rys. 51. Uśrednione wartości maksymalnego naprężenia ściskającego σ_{c2max2} przy wartości odkształcenia ε_{c2max2} dla dwóch wartości prędkości ściskania

Jak wynika z przedstawionej charakterystyki (Rys. 51), wartość maksymalnego naprężenia ściskającego σ_{c2max2} , podobnie jak w przypadku wyższej wartości odkształcenia ε_c (Rys. 50), zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości temperatury T_{c2} w sposób liniowy, przy założeniu dopasowania danych do funkcji liniowej,

określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,986$. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem wartości temperatury, słabną i pękają wiązania sieciujące pomiędzy łańcuchami makrocząsteczek, co w przypadku polimeru zawierającego obszary amorficzne w swojej strukturze, zachodzi zazwyczaj stopniowo. Niezwykle istotnym jest fakt, że dla obu prędkości ściskania v_{c2} , korelacja pomiędzy maksymalną wartością naprężenia $\sigma_{c2 \max 2}$ i wartością temperatury T_{c2} jest bardzo zbliżona. Należy jednakże zauważyć wyraźnie nieco niższe wartości naprężenia $\sigma_{c2 \max 2}$ dla niższej prędkości v_{c2} . Efekt ten jest spodziewanym skutkiem ściskania tworzywa sztucznego z różnymi prędkościami, ze względu na właściwości lepko-sprężyste tego materiału. W temperaturze T_{c2} o niższych wartościach ($T_{c2} < 175^\circ\text{C}$) względna różnica wartości w poszczególnych punktach referencyjnych nie przekracza 10%.

Rozpatrując początkowy odcinek charakterystyki ściskania materiału pasa ($\varepsilon_c < 0,30$), uzyskaną zależność pomiędzy naprężeniem σ_c , a odkształceniem ε_c (Rys. 49), niezależnie od wartości temperatury T_{c2} oraz prędkości v_{c2} , można aproksymować za pomocą funkcji wielomianowej 4 stopnia, przy założeniu dopasowania danych do modelu określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,98$, do postaci:

$$\sigma_c(T_{c2}, v_{c2}) = a_1 \cdot \varepsilon_c^4 + a_2 \cdot \varepsilon_c^3 + a_3 \cdot \varepsilon_c^2 + a_4 \cdot \varepsilon_c + a_5, \quad (4.13)$$

gdzie: $a_1 \dots a_5$ są współczynnikami stałymi, wyznaczonymi empirycznie.

Przyjmując założenie, że $a_5 = 0$ (punkt początkowy $\sigma_c = 0$ MPa oraz $\varepsilon_c = 0$) możliwe jest wyznaczenie charakterystyk aproksymowanych, przy założeniu dopasowania danych określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,999$. Mogą one posłużyć do porównania wartości naprężenia ściskającego σ_c przy takim samym odkształceniu ε_c w całym zakresie analizowanego odkształcenia ($\varepsilon_c < 0,3$), pokrywającym się dla obu rodzajów prób (dwie prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$). Analiza porównawcza tych wielkości, może dostarczyć informacji o względnej różnicy naprężeń ściskających $\delta\sigma_c$ pomiędzy wartościami uzyskanymi dla obu prędkości ściskania v_{c2} w całym zakresie odkształcenia ε_c . Wartość tego współczynnika obliczono z zależności:

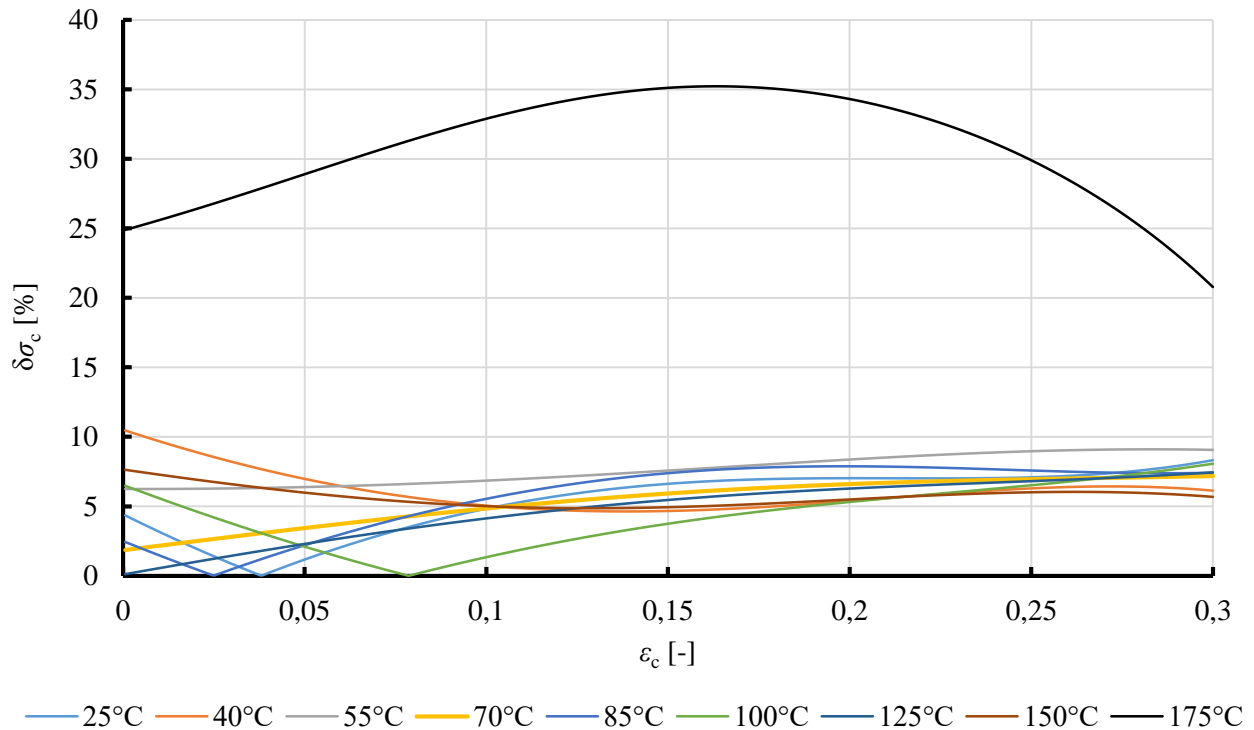
$$\delta\sigma_c(T_{c2}, \varepsilon_c) = \frac{|\sigma_{c10} - \sigma_{c1}|}{\sigma_{c10}} \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

gdzie: σ_{c1} – naprężenie ściskające przy prędkości $v_{c1} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, σ_{c10} – naprężenie ściskające przy prędkości $v_{c10} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Wartość tego parametru, można przedstawić graficznie (Rys. 52), w postaci zależności różnicy naprężeń ściskających $\delta\sigma_c$ od odkształcenia ε_c , dla różnych wartości temperatury próbki T_{c2} .

Analizując otrzymaną korelację (Rys. 52) można wywnioskować, że zmiana prędkości ściskania v_{c2} powoduje różnicę w wartości naprężenia ściskającego $\delta\sigma_c$, nieprzekraczającą 10% w zakresie temperatury próbki $T_{c2} < 175^\circ\text{C}$, przy czym naprężenia ściskające σ_c przyjmują wyższe wartości dla prędkości ściskania $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Rys. 49). Można więc uznać, że różnica ta jest pomijalna i w tym zakresie temperatury, ogólnie określana wytrzymałość materiału na ściskanie, nie zależy od prędkości odkształcenia v_c .

Nieco inaczej kształtuje się ta charakterystyka (Rys. 52) dla maksymalnej wartości temperatury próbki ($T_{c2} = 175^\circ\text{C}$), dla której naprężenie ściskające σ_c przy wyższej prędkości ściskania v_{c2} przyjmuje wartość wyższą o około 30%. Świadczy to o tym, że w wyższych wartościach temperatury, właściwości lepkie tworzywa zaczynają przeważać nad sprężystymi. Skutkuje to uzależnieniem makroskopowo

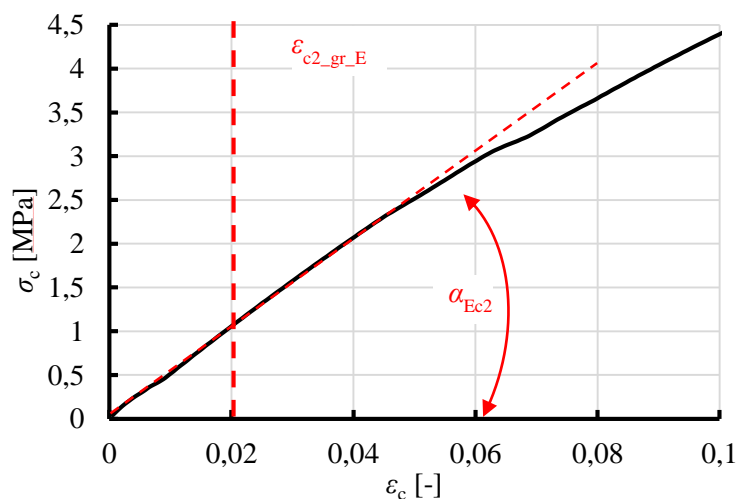
obserwowalnych właściwości mechanicznych materiału od prędkości odkształcenia. Skutkiem, który można zarejestrować podczas tego typu badania, jest wyraźna zależność otrzymanych naprężeń ściskających σ_c od wartości prędkości ściskania v_{c2} [89, 90].



Rys. 52. Zależność średniej różnicy procentowej $\delta\sigma_c$ pomiędzy naprężeniami ściskającymi σ_c dla dwóch prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ od odkształcenia ε_c , przy różnych wartościach temperatury T_{c2} ściskanej próbki

Przeprowadzając aproksymację początkowej części charakterystyki ściskania ($0 < \varepsilon_{c2_gr_E} < 0,02$) za pomocą funkcji liniowej z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, możliwe jest wyznaczenie modułu proporcjonalności przy ściskaniu E_c , przy założeniu dopasowania krzywej określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,994$ (Rys. 53) z zależności:

$$E_c = \tan \alpha_{Ec2} = \frac{\sum[(\varepsilon_{ci} - \bar{\varepsilon}_c) \cdot (\sigma_{ci} - \bar{\sigma}_c)]}{\sum(\varepsilon_{ci} - \bar{\varepsilon}_c)^2} \quad (4.15)$$



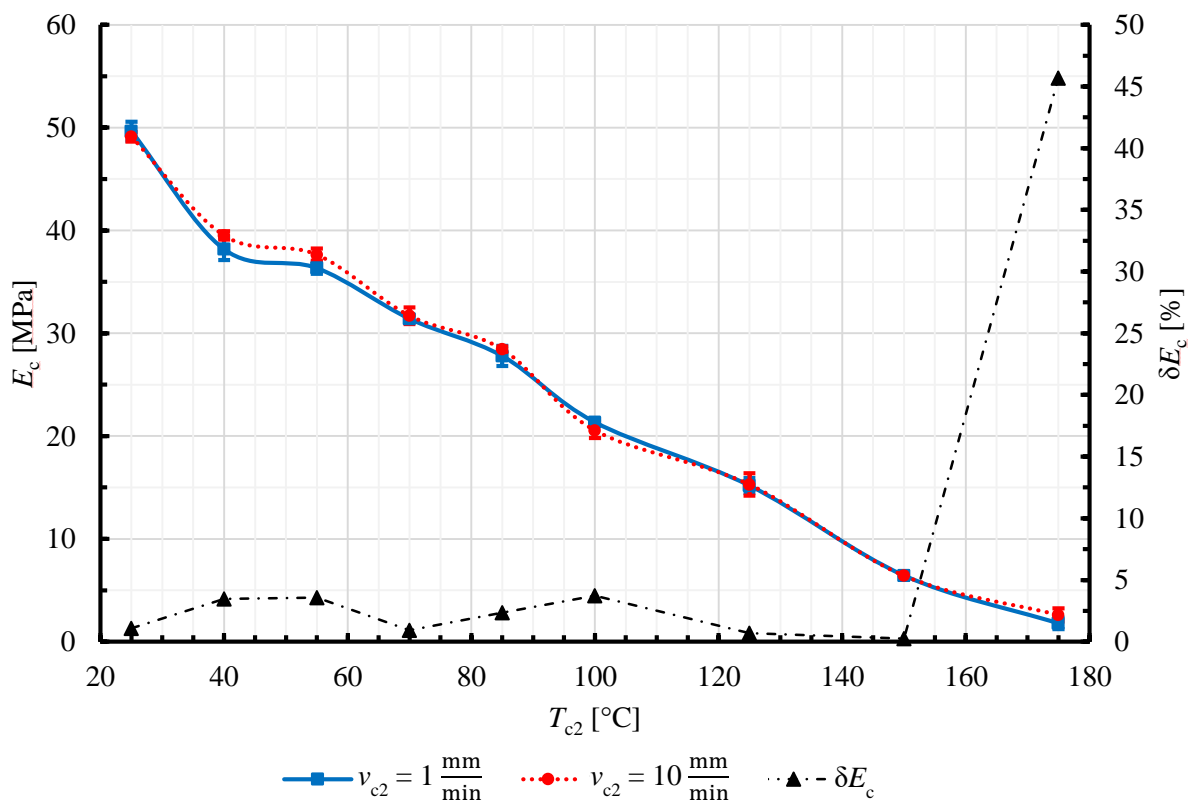
Rys. 53. Metodyka wyznaczania modułu proporcjonalności E_c przy ściskaniu

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono zależność wartości modułu sprężystości E_c od temperatury T_{c2} przy ściskaniu (Rys. 54), dla dwóch prędkości ściskania v_{c2} .

Analizując przedstawioną charakterystykę, można wywnioskować, że wyznaczona wartość modułu E_c zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości temperatury T_{c2} , niezależnie od prędkości ściskania v_{c2} , co jest efektem spodziewanym. Względną różnicę pomiędzy wartościami modułu sprężystości przy δE_c , dla obu prędkości ściskania v_{c2} można wyznaczyć z zależności:

$$\delta E_c(T_{c2}) = \frac{|E_{c10} - E_{c1}|}{E_{c10}} \cdot 100\%, \quad (4.16)$$

przy czym: E_{c1} – moduł przy prędkości $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, E_{c10} – moduł przy prędkości $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Podobnie jak w przypadku wartości naprężeń ściskających σ_c (Rys. 52), dla temperatury o wartości $T_{c2} < 175^\circ\text{C}$, różnice pomiędzy wyznaczonymi wartościami modułu proporcjonalności przy ściskaniu δE_c są niewielkie i nie przekraczają 5%. Podwyższenie wartości temperatury próbki T_{c2} powoduje wzrost znaczenia właściwości lepkich materiału, co obrazuje zwiększenie różnicy w wartości modułu proporcjonalności δE_c do około 45%, przy zmianie prędkości odkształcenia v_{c2} . Podobnie jak w przypadku wartości naprężenia ściskającego σ_c , wyższą wartość modułu można wykazać dla wyższej wartości prędkości ściskania v_{c2} .



Rys. 54. Zależność modułu sprężystości wzdłużnej E_c oraz różnicy pomiędzy wyznaczonymi modułami δE_c od wartości temperatury próbki T dla dwóch prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

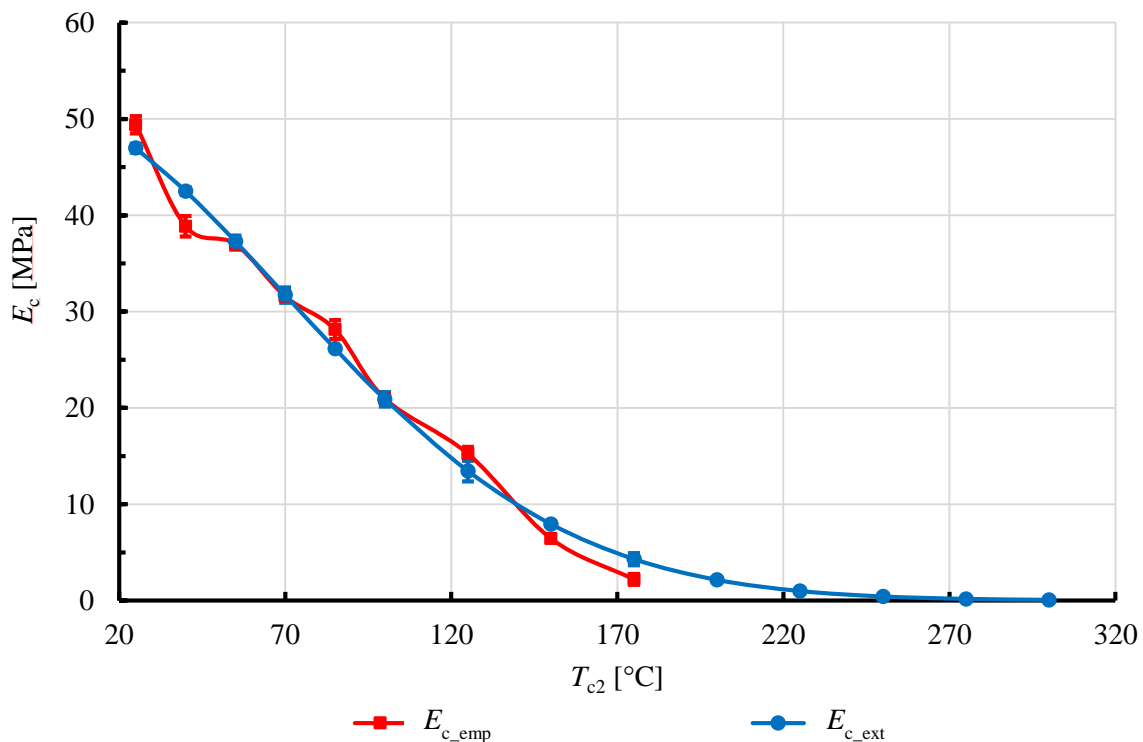
Uśrednioną, dla dwóch badanych prędkości ściskania v_{c2} , zależność modułu proporcjonalności E_c od wartości temperatury próbki T_{c2} można aproksymować wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, przy założeniu dopasowania danych do modelu określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,979$, do zależności postaci:

$$E_{c_emp}(T_{c2}) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{T-a_2}{a_3}\right)^2}, \quad (4.17)$$

gdzie: $a_1 \dots a_3$ są współczynnikami stałymi. Dzięki temu uzyskuje się zależność uśrednionego modułu proporcjonalności przy ściskaniu wyznaczonego empirycznie E_{c_emp} od wartości temperatury T_{c2} (Rys. 55).

Badania materiału pasa na ściskanie zostały wykonane w maksymalnej temperaturze o wartości $T_{c2} = 175^\circ\text{C}$. Powyżej tej granicy próbki pasa ulegały samoczynnemu niszczeniu, w wyniku wyraźnego płynięcia materiału, bez udziału siły ściskającej. Biorąc pod uwagę fakt, że proces zgrzewania doczołowego zachodzi w temperaturze o wyższej wartości, konieczna jest znajomość modułu proporcjonalności przy ściskaniu E_c w szerszym zakresie wartości temperatury T .

W związku z tym, że przy założonej metodyce badawczej nie jest możliwym wyznaczenie modułu proporcjonalności E_c oraz naprężeń ściskających σ_c w sposób empiryczny, w temperaturze o wartości przekraczającej 175°C , przeprowadzono ekstrapolację otrzymanej funkcji zmienności modułu E_c w zależności od temperatury próbki T_{c2} , dla rozszerzonego do 300°C zakresu wartości temperatury T . Wykonując to działanie, dla uśrednionego modułu proporcjonalności przy ściskaniu E_{c_emp} , wyznaczonego empirycznie, uzyskano przewidywaną wartość modułu proporcjonalności przy ściskaniu E_{c_ext} w zakresie temperatury T od 25 do 300°C (Rys. 55).



Rys. 55. Zależność uśrednionego modułu proporcjonalności przy ściskaniu wyznaczonego w sposób empiryczny E_{c_emp} oraz modułu ekstrapolowanego E_{c_ext}

Przeprowadzona analiza właściwości mechanicznych podczas ściskania materiału pasa w zmiennej temperaturze T_{c2} , przy dwóch prędkościach ściskania v_{c2} pozwala sformułować zatem następujące wnioski:

- wartości podstawowych właściwości mechanicznych nie zależą od prędkości ściskania v_{c2} w temperaturze T o wartości nie przekraczającej w przybliżeniu 175°C . Obserwacja ta pozwala wysunąć

wniosek, że dla tego materiału o charakterystyce lepko-sprężystej, w tym zakresie temperatury, dominującym skutkiem jego obciążania jest odkształcenie w głównej mierze o charakterze sprężystym. Lepkie zachowanie się materiału, ujawnia się w temperaturze o wyższej wartości,

- spadek kluczowych właściwości mechanicznych przy ściskaniu w warunkach zmiennej temperatury (modułu proporcjonalności przy ściskaniu E_c oraz naprężenia ściskającego σ_c) wraz ze wzrostem wartości temperatury jest w przybliżeniu liniowy, dla temperatury o wartości nieprzekraczającej około 175°C . W temperaturze o wartości wyższej, z racji dominacji lepkich właściwości oraz rozpoczęcia się plastycznego płynięcia (samoczynne odkształcanie się próbek), sztywność tworzywa zmienia się w sposób nieliniowy.

W związku z tym, celowym wydaje się przeprowadzenie dalszej analizy właściwości tego materiału pod kątem jego lepkości dynamicznej i jej zmian wraz z wartością temperatury, tak aby możliwe było zastosowanie otrzymanych wyników na potrzeby analizy procesu zgrzewania zachodzącego w temperaturze T_z o wartości dochodzącej do 300°C .

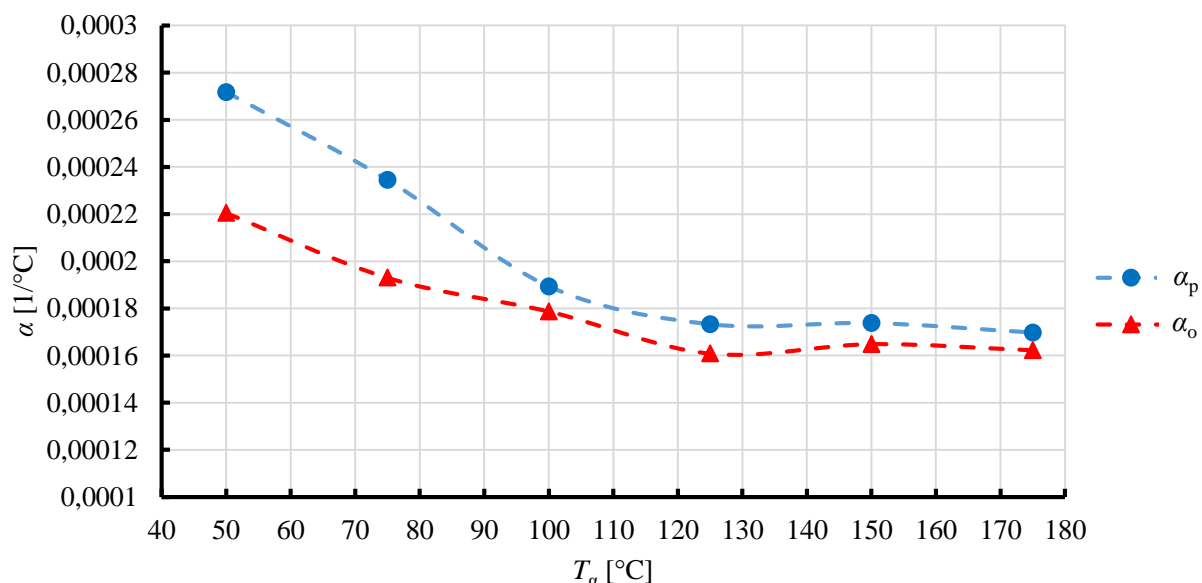
Podczas kondycjonowania próbek do wykonania prób ściskania w temperaturze o zmiennej wartości, współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej w kierunku promieniowym i osiowym (Rys. 42), wyznaczono z następujących zależności:

$$\alpha_p = \frac{d_\alpha - d_o}{d_o \cdot (T_\alpha - T_o)} \quad (4.18)$$

$$\alpha_o = \frac{h_\alpha - h_o}{h_o \cdot (T_\alpha - T_o)} \quad (4.19)$$

gdzie: h_α [mm] – wysokość próbki w docelowej temperaturze badania T_α , h_o [mm] – wysokość próbki w standardowej temperaturze otoczenia $T_o = 25^\circ\text{C}$, d_α [mm] – średnica próbki w docelowej temperaturze badania T_α , d_o [mm] – średnica próbki w standardowej temperaturze otoczenia $T_o = 25^\circ\text{C}$.

Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono zależność współczynnika termicznej rozszerzalności liniowej w kierunku promieniowym α_p i osiowym α_o w funkcji temperatury T_α (Rys. 56).



Rys. 56. Zależność współczynnika rozszerzalności termicznej α od temperatury: w kierunku promieniowym α_p oraz osiowym α_o

Wartość współczynnika rozszerzalności termicznej, zarówno dla średnicy jak i dla długości, zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury pasa aż do 125°C, po czym pozostaje na względnie stałym poziomie. Niejednostajność tego spadku wynika ze zmiennej szybkości rozpadu wiązań chemicznych sieciujących pomiędzy łańcuchami polimeru. Można z tego wywnioskować, że do temperatury około 125°C, następuje wzmożony rozpad wiązań sieciujących, co powoduje rozprężanie się struktury polimeru. Z tego powodu, w niższych temperaturach próbka wyraźnie szybciej zwiększa swoje wymiary. Istotna jest również zależność pomiędzy wyznaczonymi współczynnikami. Rozszerzalność termiczna w kierunku promieniowym (dla średnicy próbki d_{c2}) jest wyraźnie większa niż w kierunku osiowym (dla długości h_{c2}), co może oznaczać, że tworzywo to nie jest w pełni izotropowe.

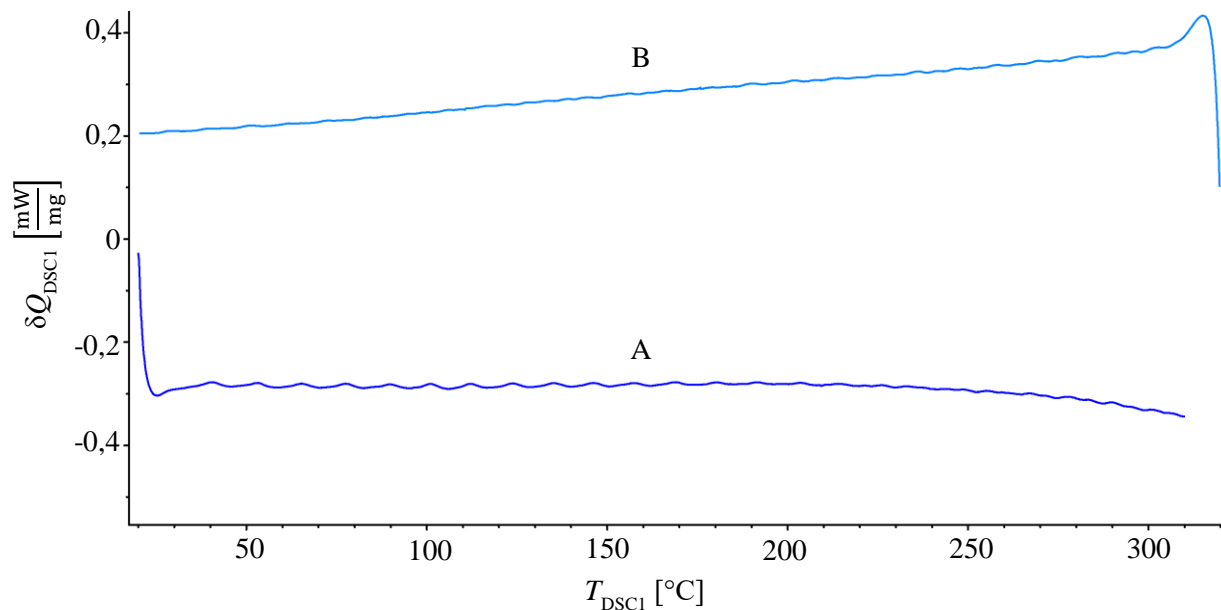
Źródła tego zjawiska należy poszukiwać w ogólnej budowie strukturalnej materiałów polimerowych oraz technice wytwarzania takiego produktu. Ciągłe wytłaczanie lub profilowanie tego wyrobu [4], o względnie dużej długości w porównaniu do wymiaru przekroju poprzecznego, dodatkowo częściowo usieciowanego, powoduje specyficzną orientację łańcuchów polimerowych, które mają tendencję do układania się równoległe do kierunku jego odkształcania podczas produkcji [79, 85], czyli do osi pasa.

Dodatkowym czynnikiem powodującym taki stan może być gradient temperatury obecny w przekroju poprzecznym pasa podczas jego ochładzania w procesie produkcyjnym, związany z szybkością chłodzenia półproduktu. W przypadku długiego cięgna o przekroju kołowym, gradient temperatury o najwyższej wartości występuje w kierunku normalnym do osi pasa. W wyniku tego, chłodzenie postępuje głównie od powierzchni tworzącej w kierunku rdzenia, natomiast w kierunku równoległym do osi symetrii wartość temperatury wyrównuje się przez dłuższy czas. Zjawisko to, może powodować segregację wiązań chemicznych i kierunkowe uporządkowanie łańcuchów makrocząsteczek oraz zmiany w uporządkowaniu, cząsteczek substancji dodatkowych i wiązań pomiędzy nimi.

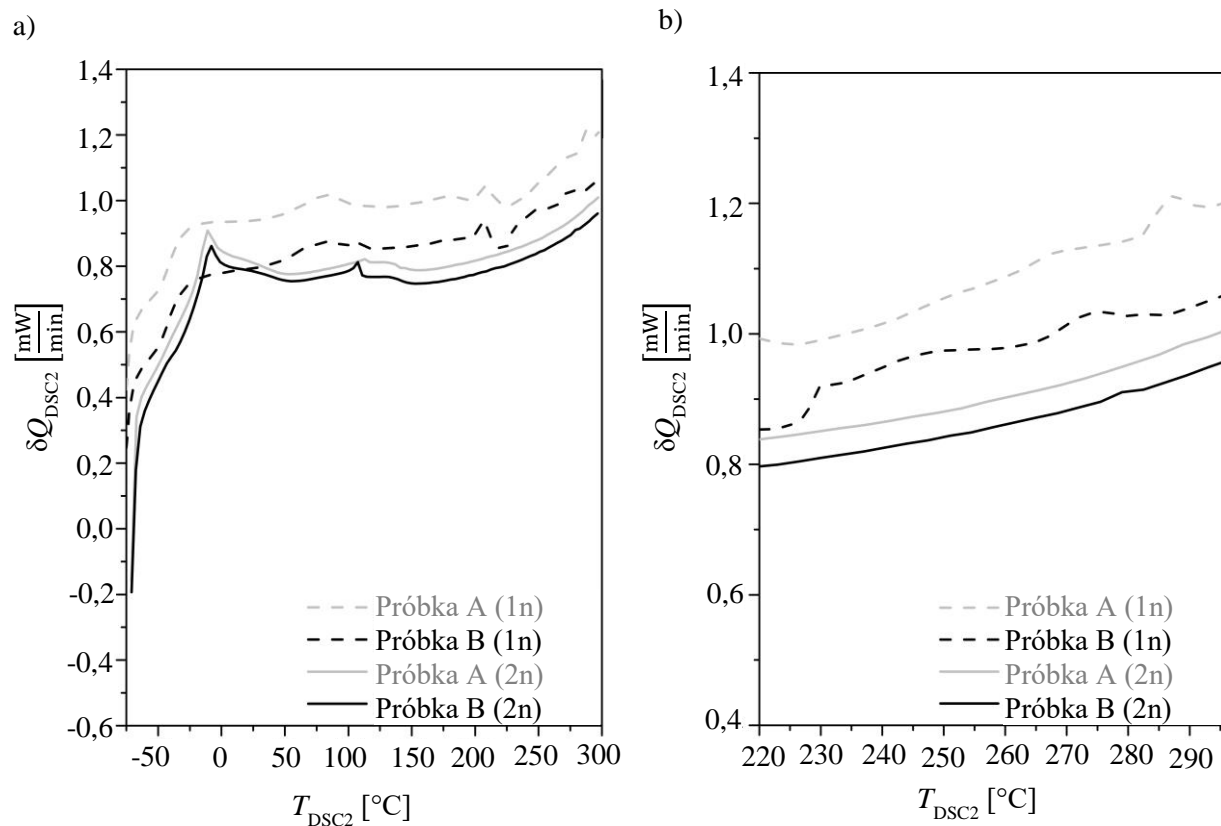
Badanie wstępne zachowania się materiału pasa w warunkach zmiennej wartości temperatury, wykonane z wykorzystaniem różnicowej kalorymetrii skaningowej, pozwoliło uzyskać charakterystykę zależności mocy dostarczonej podczas nagrzewania próbki i oddawanej podczas chłodzenia δQ_{DSC1} , w zależności od wartości jej temperatury T_{DSC1} , w odniesieniu do masy (Rys. 57). Jak wynika z otrzymanej charakterystyki, podczas nagrzewania (A) moc dostarczona do próbki w zakresie wartości temperatury od około 30°C do około 300°C ma w przybliżeniu stałą wartość. Nie zaobserwowano żadnych znaczących odchyłeń w postaci zmian wartości dostarczonej mocy – które świadczyłyby o przemianie fazowej (endotermicznej lub egzotermicznej). W przypadku chłodzenia (B) natomiast, odebrana od próbki moc zmienia swoją wartość liniowo, bez wyraźnych odchyłeń. Z tego wynika, że nie możliwe jest wyznaczenie wyraźnej granicy topnienia tego materiału, a także nie można również wyznaczyć entalpii zmiany stanu skupienia.

W drugim, bardziej precyzyjnym etapie badań różnicowej kalorymetrii skaningowej, obejmującym już analizę porównawczą obu pasów (próbek typu A pobranych z pasa o przekroju kołowym oraz próbek typu B pobranych z pasa płaskiego), po rozszerzeniu zakresu wartości temperatury i ponownym przeprowadzeniu tego badania w atmosferze gazu obojętnego, zaobserwowano obecność wyraźnych efektów endotermicznych dla obu materiałów. Wykorzystując analizę czasową (odniesienie mocy dostarczonej do próbki δQ_{DSC2} względem czasu zamiast masy), wykazano istnienie przemian endotermicznych w temperaturze

o wartości poniżej oraz powyżej 0°C, a także dodatkowego zjawiska zachodzącego w temperaturze o wartości wyższej niż 200°C (Rys. 58).



Rys. 57. Przykładowy przebieg nagrzewania (A) i ochładzania (B) próbki podczas wstępnego badania materiału pasa metodą kalorymetrii różnicowej DSC



Rys. 58. Charakterystyki uzyskane z drugiego etapu badań różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC w pełnym zakresie wartości temperatury badania (a) oraz w przybliżeniu na przedział odpowiadający wartościom temperatury zgrzewania T_z (b); 1n – pierwszy cykl nagrzewania, 2n – drugi cykl nagrzewania

Obserwacje te wskazują na obecność zjawiska zeszklenia oraz topnienia pewnego składnika polimeru. Podczas analizy tych charakterystyk, należy pamiętać o tym, że tego typu materiał (poliuretan

termoplastyczny) ma strukturę segmentową, złożoną z dwóch rodzajów domen o wyraźnie odmiennych właściwościach. Dodatkowo, ten polimer ma skład chemiczny uzupełniony o różne dodatki funkcjonalne, w związku z czym podczas analizy należy uwzględnić ich obecność.

Biorąc pod uwagę przebieg pierwszego nagrzewania próbki A, pobranej z pasa o przekroju kołowym, na charakterystyce DSC możemy wyróżnić następujące efekty endotermiczne (Tab. 23):

- zeszklenie miękkich segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gA1}^{SS} ,
- zeszklenie twardych segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gA1}^{HS} ,
- dodatkowy efekt endotermiczny w temperaturze T_{mpA1} .

Podczas drugiego nagrzewania tej samej próbki zaobserwowano:

- ponowne zeszklenie miękkich segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gA2}^{SS} ,
- ponowne zeszklenie twardych segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gA2}^{HS} ,
- brak dodatkowego efektu endotermicznego w wyższej temperaturze.

W przypadku próbki pobranej z pasa płaskiego B dla takiego samego cyklu badawczego, podczas pierwszego nagrzewania zaobserwowano następujące efekty endotermiczne:

- zeszklenie miękkich segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gB1}^{SS} ,
- zeszklenie twardych segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gB1}^{HS} ,
- dodatkowy efekt endotermiczny w temperaturze T_{mpB1} .

Podczas drugiego cyklu nagrzewania natomiast, odnotowano:

- ponowne zeszklenie miękkich segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gB2}^{SS} ,
- ponowne zeszklenie twardych segmentów poliuretanu w temperaturze T_{gB2}^{HS} ,
- brak dodatkowego efektu endotermicznego w wyższej temperaturze.

Tab. 23. Wartości temperatury zeszklenia T_g segmentów miękkich i twardych poliuretanu, a także temperatury występowania dodatkowego efektu endotermicznego T_{mp} dla badanych próbek

Temperatura	Wartość [°C]	Temperatura	Wartość [°C]
T_{gA1}^{SS}	-38,1	T_{gB1}^{SS}	-37,4
T_{gA1}^{HS}	63,2	T_{gB1}^{HS}	72,1
T_{mpA1}	211,5	T_{mpB1}	208,3
T_{gA2}^{SS}	-30,2	T_{gB2}^{SS}	-33,9
T_{gA2}^{HS}	112,2	T_{gB2}^{HS}	108,1

Należy zauważyć, że przebieg pierwszej odpowiedzi próbki na wymuszenie termiczne podczas nagrzewania obu próbek, jest nieco inny niż w kolejnym cyklu. Na zarejestrowanych przebiegach krzywej DSC podczas drugiego nagrzewania, zaobserwowano wygładzenie przebiegu dostarczanej energii cieplnej w funkcji temperatury, dla obu badanych próbek. Dodatkowo podczas drugiego nagrzewania, zanika efekt endotermiczny zachodzący w temperaturze przekraczającej 200°C. W przypadku wyższych wartości temperatury, przekraczających 220°C, przy których zazwyczaj następuje uplastycznianie tworzywa w procesie zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych (Rys. 58b), nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy tymi próbkami pasa, jak i nie zaobserwowano również żadnego efektu endotermicznego. Celowym jest zatem omówienie poszczególnych efektów obserwowanych podczas nagrzewania w kalorymetrze.

Degradacja termiczna termoplastycznego poliuretanu jest procesem, w którym miękkie i twarde segmenty mogą zachowywać się inaczej podczas ogrzewania. Przeprowadzona analiza DSC wykazała obecność zjawiska zeszklenia dla obu analizowanych próbek, zarówno w odniesieniu do segmentów miękkich T_g^{SS} jak i twardych T_g^{HS} , przy czym rozpoznanie tych efektów w odniesieniu do elastomerów termoplastycznych jest działaniem powszechnie stosowanym [137-139].

Podczas pierwszego cyklu nagrzewania dla obu rodzajów próbek, oprócz wyraźnych wartości temperatury zeszklenia segmentów miękkich (T_{gA1}^{SS} i T_{gB1}^{SS}) i twardych (T_{gA1}^{HS} i T_{gB1}^{HS}), zaobserwowano efekt endotermiczny w temperaturze o wartości T_{mpA1} oraz T_{mpB1} . Jest on spowodowany zjawiskiem rozkładu oraz migracji dodatku plastyfikującego zawartego w strukturze badanych próbek. Zjawisko to jest nieodwracalne, ze względu na to, że nie jest obserwowane podczas drugiego cyklu nagrzewania. Powoduje ono podwyższenie wartości temperatury zeszklenia (T_{gA2}^{SS} , T_{gB2}^{SS} , T_{gA2}^{HS} i T_{gB2}^{HS}) w drugim cyklu nagrzewania. Obecność dodatku plastyfikującego jest uzasadniona, ponieważ poprawia on podatność na przetwarzanie plastyczne polimeru, przez obniżenie temperatury przejścia drugiego rzędu (T_g). Dodatek ten jest dodawany do materiału na potrzeby procesów wytwarzania – ciągłego wyłaczania. Należy jednak zauważyć, że oddziaływanie podwyższonej temperatury powoduje zanik jego oddziaływania, przez co nie zmienia on właściwości docelowego produktu [140, 141].

Podczas drugiego cyklu nagrzewania, dla obu rodzajów próbek, zaobserwowano jedynie efekty termiczne zachodzące w temperaturze zeszklenia segmentów miękkich (T_{gA2}^{SS} i T_{gB2}^{SS}) i twardych (T_{gA2}^{HS} i T_{gB2}^{HS}). Mniejsza intensywność efektu endotermicznego pochodzącego od zeszklenia miękkich segmentów w próbce B pobranej z pasa płaskiego, spowodowana jest mniejszą koncentracją tej fazy [142-144].

Niemal identyczne rezultaty badań DSC, dla obu rodzajów pasa i dla temperatury przekraczającej 220°C, świadczą o takim samym wpływie podwyższonej temperatury na zachowanie się obu rodzajów pasa w tym zakresie. Dodatkowo należy zauważyć, że w przypadku obu próbek nie można zaobserwować efektu endotermicznego, świadczącego o występowaniu wyraźnej granicy topnienia materiału, który spodziewany jest w temperaturze o wartości przekraczającej 220°C. Świadczy to o tym, że materiał ten w wyniku sieciowania i charakterystyki struktury makrocząsteczek zachowuje się pokrewnie do ciała amorficznego – w którym nie wyróżniamy wyraźnej granicy topnienia [20, 99, 100, 145]. W wyniku tego niemożliwym jest precyzyjne określenie temperatury topnienia, której wartość należy przekroczyć w celu rozpoczęcia procesu zgrzewania doczołowego pasów, co potwierdzono m.in. w pracach [57, 64].

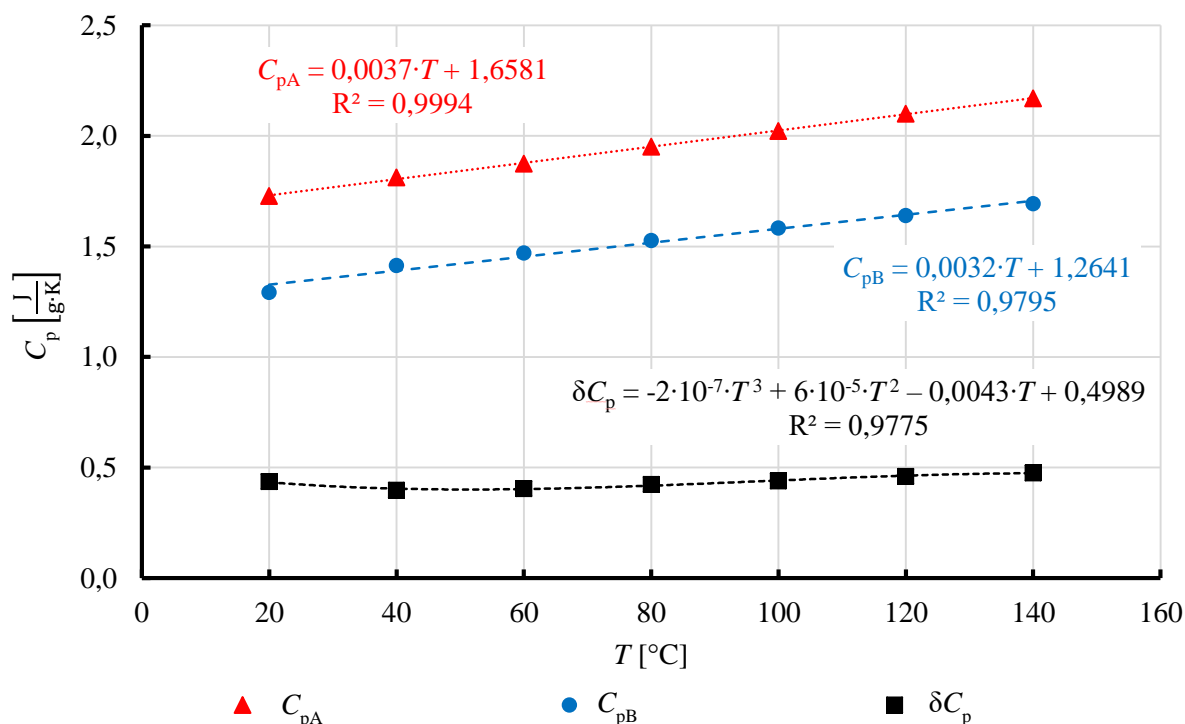
Podczas trzeciego etapu badań metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej DSC, które zostały wykonane z uwzględnieniem porównania obu rodzajów pasa, wyznaczono wartość ciepła właściwego C_p w zależności od wartości temperatury materiału T_{DSC3} (Rys. 59 i Tab. 24). Próbka A wykazuje wyższe wartości ciepła właściwego C_p w całym zakresie temperatury T_{DSC3} , w porównaniu z próbką B. Na podstawie analizy zmiany ciepła właściwego badanych próbek w funkcji wartości temperatury, można wywnioskować że:

- ciepło właściwe C_p w obu przypadkach rośnie w przybliżeniu liniowo, wraz ze wzrostem wartości temperatury, przy dopasowaniu funkcji liniowej do uzyskanych wyników określonym współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,979$,

- różnica ciepła właściwego δC_p dla obu próbek jest niemal stała w całym zakresie temperatury badania. Wartość ta, w ujęciu procentowym (Tab. 24), jest wyższa w temperaturze otoczenia (około 20°C) dla próbki A o około 25%, względem próbki typu B. Jednakże w ramach dalszego zwiększania wartości temperatury materiału, różnica ta zmniejsza się do wartości około 22% i jest w przybliżeniu stała aż do samego końca zakresu pomiarowego temperatury T_{DSC3} . Świadczy to o tym, że pod kątem termodynamicznym materiał wykazuje stabilne zachowanie w temperaturach o wyższej wartości.

Tab. 24. Wyniki analizy ciepła właściwego: ciepło właściwe próbki A (C_{pA}), ciepło właściwe próbki B (C_{pB}) oraz różnice w wartościach pomiędzy obiema próbkami δC_p

Parametr	Oznaczenie	Wartość						
		20	40	60	80	100	120	140
Temperatura	T_{DSC3} [°C]							
Ciepło właściwe próbki A	C_{pA} [$\frac{J}{g \cdot K}$]	1,728	1,812	1,874	1,951	2,022	2,100	2,170
Ciepło właściwe próbki B	C_{pB} [$\frac{J}{g \cdot K}$]	1,292	1,414	1,470	1,527	1,583	1,640	1,694
Różnica	δC_p [$\frac{J}{g \cdot K}$]	0,436	0,398	0,404	0,424	0,439	0,460	0,476
Różnica	δC_p [%]	25,2	22,0	21,6	21,7	21,7	21,9	21,9



Rys. 59. Zależność ciepła właściwego C_p od wartości temperatury T wyznaczona na podstawie badania DSC

Różnica w wartości ciepła właściwego δC_p dla obu badanych próbek, wynika z różnego stopnia uporządkowania łańcuchów polimerowych w obu rodzajach pasa, co jest ściśle związane ze sposobem wytwarzania i postacią geometryczną. Ciągnięcie pasa o przekroju kołowym i względnie mniejszych wymiarach gabarytowych powoduje, że łańcuchy polimerowe są uporządkowane w większym stopniu niż w przypadku płaskiej taśmy. W związku z tym, materiał pasa o przekroju kołowym, po uformowaniu osiąga niższy

poziom energetyczny [43, 145-147]. Stąd do podgrzania go do określonej temperatury i wprowadzenia na inny poziom energetyczny, wymagane jest zużycie większej ilości energii, co przejawia się większym ciepłem, które należy dostarczyć do jednostki masy. Różnica wyznaczonego ciepła właściwego, musi być uwzględniona podczas modelowania przepływu ciepła w procesie zgrzewania, w związku z tym podczas opracowywania modelu matematycznego, zmieniając rodzaj analizowanego pasa, należy przyjąć odpowiedni współczynnik poprawkowy dla ciepła właściwego δC_p .

Celem badań dynamicznej analizy termomechanicznej jest porównanie dynamicznych właściwości mechanicznych obu pasów (próbki A i B), zarejestrowanych pod wpływem cyklicznego oddziaływania obciążeń mechanicznych i termicznych, co pozwoli na porównanie obu rodzajów pasa pod kątem możliwości ich zamiennego stosowania w badaniach nad zgrzewaniem doczołowym. Dodatkowym, niezwykle ważnym rezultatem badań DMTA, jest ustalenie najważniejszych parametrów charakteryzujących właściwości lepkie tego materiału i ich zależności od wartości temperatury. Dotyczy to przede wszystkim najważniejszego z nich – lepkości dynamicznej materiału η .

Z tych względów, celowym wydaje się szczegółowa analiza wyników tych badań. Aby to wykonać należy najpierw wyjaśnić sposób ich interpretacji, ponieważ nie jest to trywialne zagadnienie. Podstawowym rezultatem, który jest uzyskiwany podczas badań DMTA wykonywanych na reometrze rotacyjnym, zarówno w warunkach stałej temperatury (T_{DMTA1}) jak i jej zmiennej wartości (T_{DMTA2}), jest odpowiedź materiału na cykliczne wymuszenie skręcające próbkę materiału. Wymuszenie to ma określoną amplitudę (A_{DMTA1} i A_{DMTA2}) i częstotliwość (f_{DMTA1} i f_{DMTA2}), a odpowiedzią na nie są składowe moduły sprężystości poprzecznej materiału, w postaci [148]:

- składowej zachowawczej G' modułu sprężystości poprzecznej G , będącej miarą energii zachowanej i oddawanej w każdym cyklu podczas cyklicznego obciążania materiału,
- składowej stratności G'' modułu sprężystości poprzecznej G , będącej miarą energii rozproszonej wewnątrz struktury materiału (najczęściej w postaci ciepła).

Na podstawie tych parametrów możliwe jest wyznaczenie dwóch, bardzo istotnych cech charakteryzujących materiał podlegający badaniu [89, 90, 122]:

- współczynnika stratności mechanicznej (tarcia wewnętrznego) $\tan \delta$ z zależności:

$$\tan \delta = \frac{G'}{G''}, \quad (4.20)$$

- lepkości dynamicznej η , z zależności:

$$\eta = \frac{|G|}{\omega} = \frac{\sqrt{G'^2 + G''^2}}{\omega}, \quad (4.21)$$

gdzie ω oznacza częstość wymuszenia.

Parametry te mogą być analizowane zarówno samoistnie, jak i w korelacji z aktualną wartością temperatury tworzywa. Charakterystyki uzyskane przy ich użyciu, w następstwie badań na reometrze rotacyjnym, w ogólnym ujęciu dotyczą modułu sprężystości poprzecznej G pasa, co wynika z charakterystyki zadawanych obciążeń. Z tego względu mogą wydawać się one nieprzydatne w analizie dotyczącej zgrzewania doczołowego materiału, ze względu na odmienny stan obciążenia. Jednakże analiza składowych tego

parametru mechanicznego, pozwala na rozpoznanie zachowań lepkich i lepko-sprężystych w tym materiale polimerowym. Wyniki takich badań są również często wykorzystywane do określenia zdolności tłumiących elastomerów i termoplastów. W ogólnym ujęciu, omawiane metody stosowane są w przypadku badań podatnych materiałów konstrukcyjnych lub tworzyw narażonych na użytkowanie w warunkach okresowych i ciągłych drgań, a także oddziaływania obciążeń mechanicznych w warunkach podwyższonej lub obniżonej temperatury [149]. W związku z tym, ta metoda z powodzeniem może być wykorzystana do analiz zachowania się elastomeru termoplastycznego w warunkach temperatury o zmiennej wartości.

Próby dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA przeprowadzone w temperaturze pokojowej (pierwszy etap tych badań), wykazały zróżnicowanie wartości składowej zachowawczej G'_{DMTA1} modułu sprężystości poprzecznej G , między próbkami A i B. Próbką pobrana z pasa o przekroju kołowym (A) charakteryzuje się wartościami poszczególnych parametrów mechanicznych wyższymi o około 50% w pierwszym cyklu obciążenia, a w drugim i trzecim różnica ta sięga 70% (Tab. 25).

Tab. 25. Wartości składowych modułu sprężystości poprzecznej: zachowawczej G' , stratności G'' , a także lepkości dynamicznej η oraz współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$ oznaczone w temperaturze pokojowej T_{DMTA1}

Próbka	Cykl	T_{DMTA1} [°C]	G'_{DMTA1} [MPa]	G''_{DMTA1} [MPa]	$\tan \delta_{DMTA1}$ [-]	η_{DMTA1} [MPa·s]
A	1	22,47 ± 0,02	29,40 ± 1,55	2,03 ± 0,23	0,0669 ± 0,0041	4,69 ± 0,25
	2	22,43 ± 0,02	24,87 ± 3,75	1,90 ± 0,31	0,0763 ± 0,0009	3,97 ± 0,60
	3	22,43 ± 0,02	26,00 ± 3,59	2,02 ± 0,31	0,0776 ± 0,0011	4,15 ± 0,58
B	1	22,47 ± 0,02	18,90 ± 0,62	1,58 ± 0,056	0,0840 ± 0,0004	3,02 ± 0,10
	2	22,43 ± 0,02	13,60 ± 0,89	1,17 ± 0,093	0,0862 ± 0,0014	2,17 ± 0,14
	3	22,47 ± 0,02	13,90 ± 0,95	1,22 ± 0,095	0,0874 ± 0,0016	2,22 ± 0,15

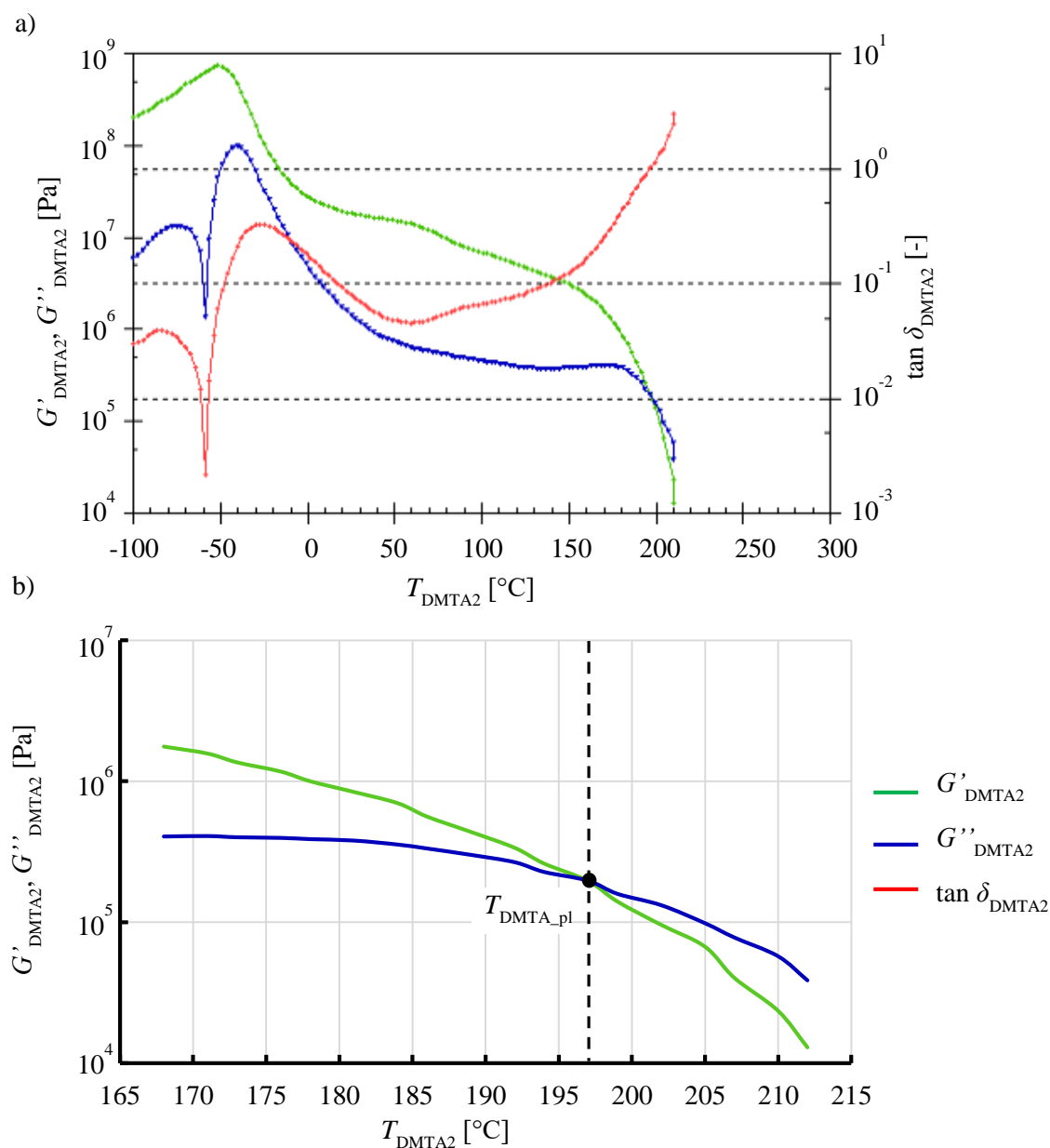
Dla obydwu rodzajów próbek, po pierwszym cyklu obciążenia następuje spadek wartości składowej zachowawczej G'_{DMTA1} modułu sprężystości poprzecznej G , natomiast kolejne dwa następujące po sobie cykle obciążenia charakteryzują się zbliżonymi do siebie wartościami. Analizując wyniki dla próbki pobranej z pasa o przekroju kołowym (A), wartość składowej zachowawczej G'_{DMTA1} modułu sprężystości poprzecznej G zmniejsza swoją wartość o około 18% po pierwszym cyklu obciążenia, co stanowi wyraźną różnicę. Natomiast różnica pomiędzy 2 i 3 cyklem obciążenia wynosi niecałe 5%.

W przypadku próbek pobranych z pasa płaskiego (B), przebieg składowej zachowawczej G'_{DMTA1} modułu sprężystości poprzecznej G w miarę upływu kolejnych cykli zadawanych obciążeń, charakteryzuje się podobną zależnością jak dla pasa o przekroju kołowym (A). Dla obu rodzajów badanych próbek, charakter zmienności: składowej stratności G''_{DMTA1} oraz lepkości dynamicznej η_{DMTA1} w zależności od aktualnego cyklu obciążenia oraz rodzaju próbki, jest niemal identyczny jak dla składowej zachowawczej G'_{DMTA1} . Jedyną zauważalną różnicą, jest nieco inny przebieg współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{DMTA1}$.

Analizując powyżej opisane zależności, można wyciągnąć wniosek, że badania porównawcze dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA, wykonane w stałej, standardowej temperaturze użytkowania materiału, wskazują różnicę pomiędzy właściwościami dynamicznymi obu rodzajów badanego pasa ciągnowego. Wartości składowych modułu sprężystości poprzecznej G oraz lepkości dynamicznej η , wskazują na większą sztywność pasa o przekroju kołowym, co wynika z większego uporządkowania i osiowego

zorientowania łańcuchów polimerowych podczas jego wytłaczania, ze względu na mniejsze wymiary geometryczne finalnego produktu [43, 146, 147].

Spadek wartości modułu sprężystości poprzecznej G oraz lepkości dynamicznej η dla obu pasów w miarę postępowania kolejnych cykli obciążenia, wynika z procesów relaksacji struktury materiału, które zachodzą po pierwszym cyklu. Pod wpływem cyklicznie przykładanych naprężeń mechanicznych, następuje uporządkowanie łańcuchów i zmniejszenie entropii układu. W wyniku tego, materiał uzyskuje stabilną strukturę, która charakteryzuje się tym, że wraz z upływem kolejnych cykli obciążeń, nie zmieniają się wartości właściwości mechanicznych [39, 43, 147, 150].



Rys. 60. Wyznaczanie zakresu temperatury dla testu DMTA w warunkach zmiennej jej wartości: a) wynik analizy w zakresie wartości temperatury od -100°C do 210°C , b) wyznaczenie punktu przecięcia wartości składowej zachowawczej G'_{DMTA2} i stratności G''_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej materiału G

Podobnie jak w przypadku większości materiałów polimerowych, w temperaturze o wartości niższej niż temperatura zeszklenia T_g , tworzywo wykazuje zdolność do kruchego pęknięcia, natomiast powyżej tej

temperatury materiał ulega znacznej deformacji, przy malejącej sile wywołującej odkształcenie. W przypadku przekroczenia temperatury zeszklenia zachodzi zasadnicza zmiana we właściwościach makroskopowych polimeru, ze stanu ciała stałego szklistego staje się on tworzywem wysokoelastycznym, przy czym dalsze zwiększanie wartości temperatury powoduje efekt plastycznego płynięcia [20, 151].

Zakres temperatury wykonywania dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA w drugim etapie badań (w warunkach temperatury o zmiennej wartości), określono podczas pierwszego testu próbnego dla próbki typu A, który wykonano w zakresie wartości temperatury od -100°C do 210°C (Rys. 60a). W rezultacie tej próby, uzyskano informację, że badany materiał ulega przemianom ze stanu stałego w ciało uplastycznione, w temperaturze $T_{\text{DMTA_pl}} \approx 197^{\circ}\text{C}$ (Rys. 60b). Obserwowalnym efektem tego zjawiska jest rozpoczęcie stanu, w którym składowa stratności G''_{DMTA2} , przyjmuje wartość wyższą niż składowa zachowawcza G'_{DMTA2} . Wiąże się to z tym, że wartość kąta przesunięcia fazowego δ_{DMTA2} przekracza 45° , co oznacza, że właściwości lepkie tworzywa zaczynają dominować nad właściwościami sprężystymi. Z punktu widzenia technologii przetwórstwa (obróbki) takiego materiału można powiedzieć, że w tym czasie rozpoczyna się zjawisko plastycznego płynięcia, co jest charakterystyczne dla ciał częściowo krystalicznych (z obszarami amorficznymi), a jednocześnie częściowo usieciowanych. Jest to minimalna wartość temperatury, przy której możliwe jest uplastycznienie (T_{u_min}) – a zatem również zgrzewanie (T_{z_min}).

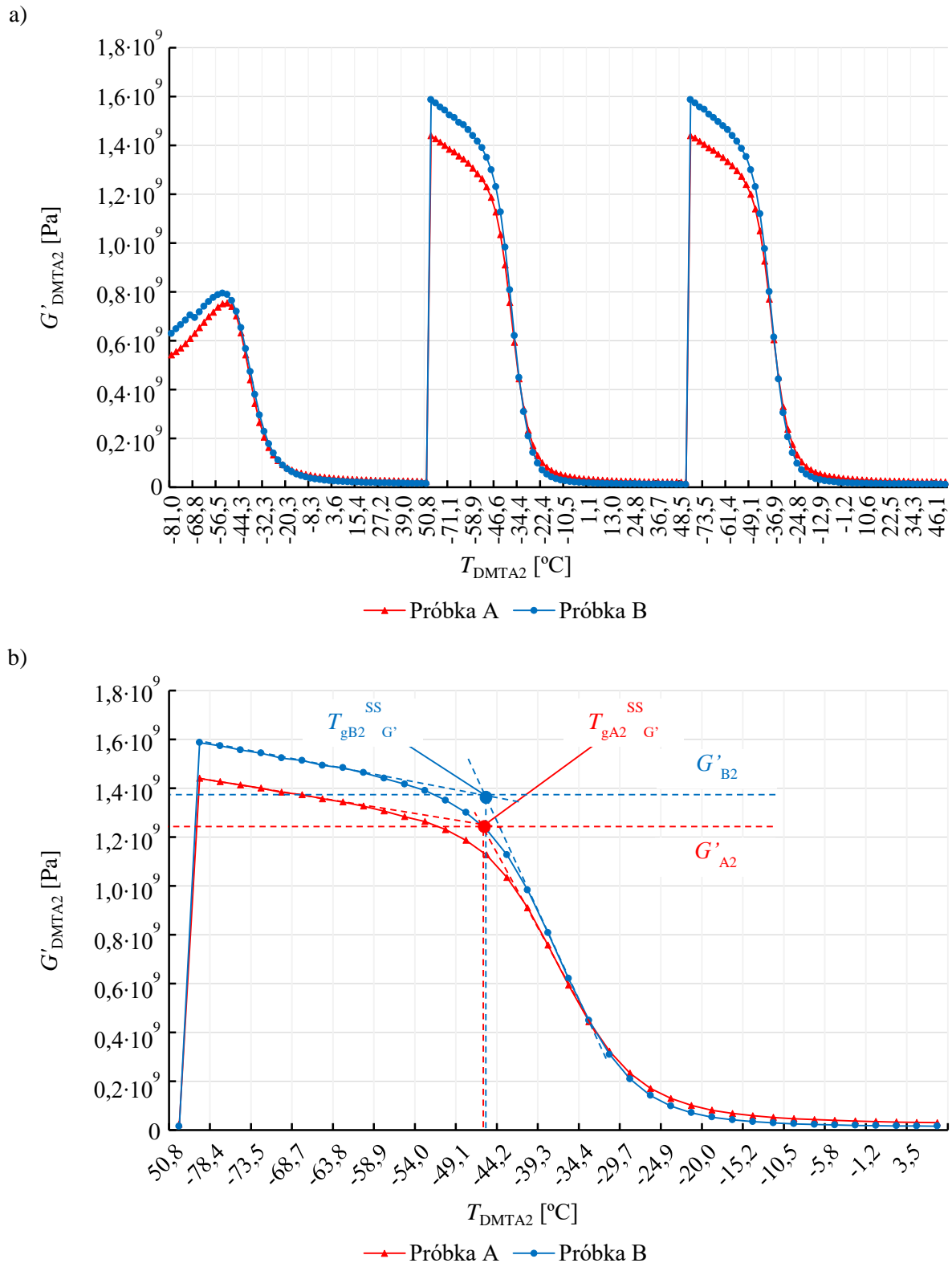
W następnej kolejności, na podstawie właściwych prób DMTA drugiego etapu badań (wykonanych w temperaturze o zmiennej wartości), uzyskano następujące charakterystyki, przedstawiające odpowiedź materiału na cykliczne wymuszenie termiczne i mechaniczne:

- zależność składowej zachowawczej G'_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej G od wartości temperatury T_{DMTA2} (Rys. 61),
- zależność składowej stratności G''_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej G od wartości temperatury T_{DMTA2} (Rys. 62),
- zależność współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{\text{DMTA2}}$ od temperatury T_{DMTA2} (Rys. 63).

Otrzymane charakterystyki wskazują, że zależności tych parametrów od wartości temperatury, dla obu próbek charakteryzują się znaczącym podobieństwem, w całym zakresie przyjmowanych wartości wyznaczonych parametrów.

W pierwszej kolejności zgodnie z założeniami dokonano porównania właściwości termomechanicznych obu rodzajów próbek. Istotnym zabiegiem umożliwiającym tego typu działanie, jest analiza zmienności temperatury zeszklenia T_g , wyznaczonej z analizy DMTA na podstawie składowych modułu sprężystości poprzecznej G . Jej wartość otrzymywana jest na podstawie przebiegu odpowiedzi próbki na cykliczne wymuszenie mechaniczne i termiczne w obszarze: części zachowawczej G' i stratności G'' oraz współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$.

Podobnie jak w przypadku analizy z wykorzystaniem skaningowej kalorymetrii różnicowej, z racji specyficznych cech badanego materiału, którego struktura makrocząsteczkowa charakteryzuje się obecnością rozróżnialnych segmentów twardych i miękkich [20, 100], możliwa jest również oddzielna analiza temperatury zeszklenia T_g^{SS} segmentów miękkich oraz twardych T_g^{HS} , co pozwala wykonać analizę porównawczą materiałów [39, 151, 152].

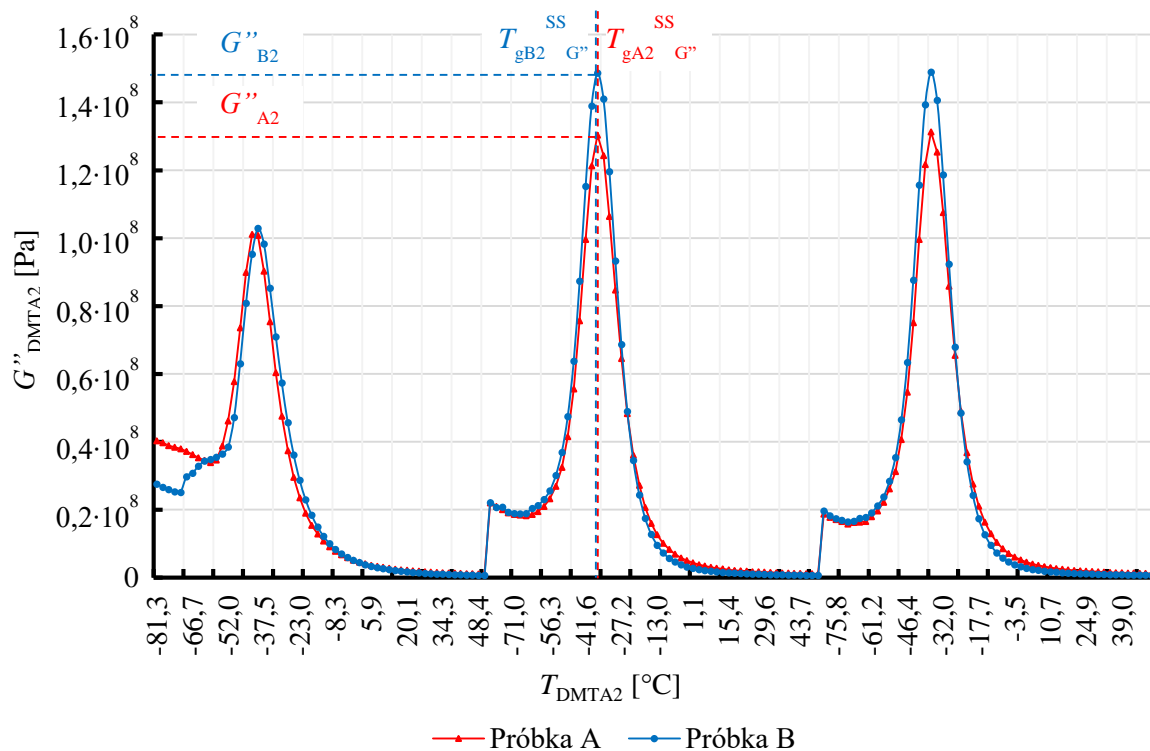


Rys. 61. Charakterystyki modułu zachowawczego G'_{DMTA2} w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury (a) i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_{G'}}$ (b)

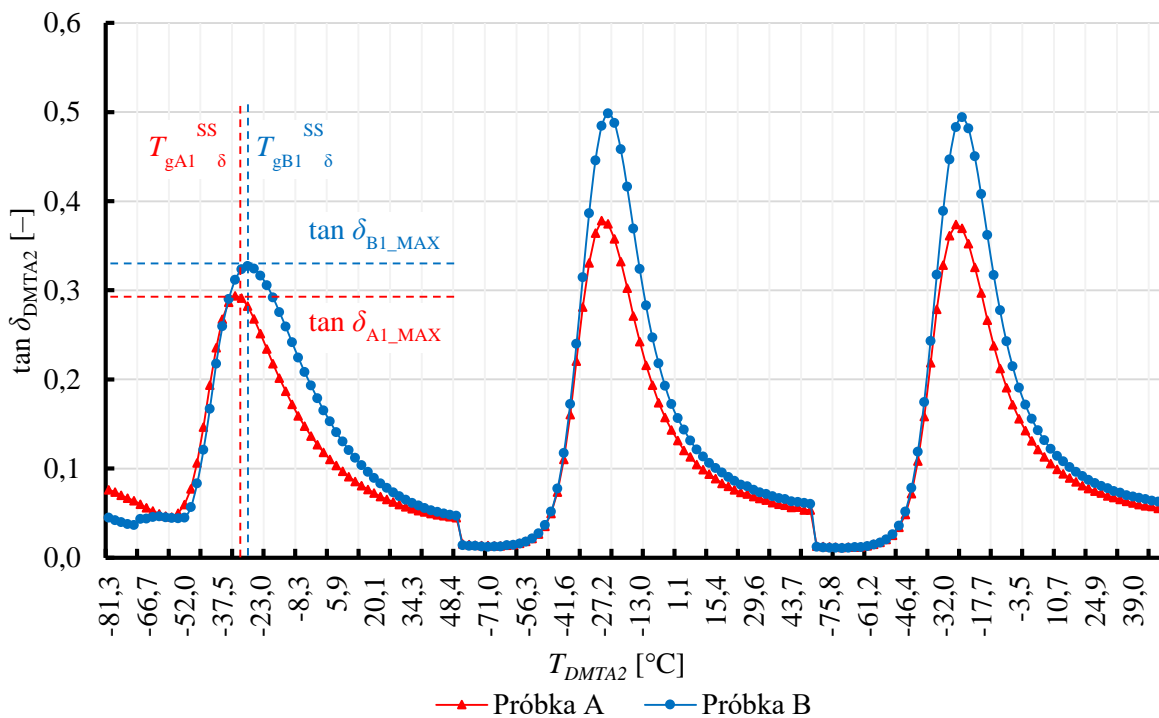
Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów T_g^{SS} wyznaczono na podstawie punktów charakterystycznych przebiegu odpowiedzi na wymuszenie cykliczne [129, 149, 151-154]:

- przecięcia stycznych zależności składowej zachowawczej G'_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej G od temperatury T_{DMTA2} (Rys. 61),

- maksymalnej wartości składowej strat G''_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej G (Rys. 62),
- maksymalnego współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{DMTA2}$ (Rys. 63).



Rys. 62. Charakterystyki składowej stratności G''_{DMTA2} w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} dla obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_G}$



Rys. 63. Charakterystyki współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{DMTA2}$ w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} dla obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_\delta}$

Wartości temperatury zeszklenia twardych segmentów poliuretanu T_g^{HS} , wyznaczono natomiast na podstawie minimalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$.

W ogólnym ujęciu wartość temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu T_g^{SS} , według badania DMTA zawiera się w przedziale od około -25°C do około -50°C (Tab. 26-28). Po pierwszym cyklu nagrzewania i chłodzenia wartość temperatury $T_g^{SS_{G'}}$ oznaczona względem składowej zachowawczej G' jest nieco wyższa dla próbki A, niż dla próbki B (Rys. 61, Tab. 26), przy czym różnica ta nie przekracza 8%. Odwrotne zjawisko zaobserwowano przy wartości $T_g^{SS_{G''}}$ oznaczonej według składowej stratności G'' (Rys. 62, Tab. 27), przy czym dla próbki A jej wartość jest niższa o około 2%. W przypadku oznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{\delta}}$ według współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$ (Rys. 63, Tab. 28), wartość temperatury zeszklenia $T_g^{SS_{\delta}}$ dla próbki A jest niższa o około 10%, niż dla próbki B. Jednocześnie, należy zauważyć, że jest to maksymalna różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu T_g^{SS} w całym badaniu.

Tab. 26. Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{G'}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie składowej zachowawczej G' z wartościami tej składowej odczytanymi przy $T_g^{SS_{G'}}$

Próbka	Cykl	Oznaczenie	$T_g^{SS_{G'}}$	Oznaczenie	G' przy $T_g^{SS_{G'}}$
A	1	$T_{gA1}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-48,10 \pm 4,31$	G'_{A1} [MPa]	$848,80 \pm 115,68$
	2	$T_{gA2}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-47,24 \pm 0,56$	G'_{A2} [MPa]	$1233,28 \pm 114,83$
	3	$T_{gA3}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-47,23 \pm 0,56$	G'_{A3} [MPa]	$1248,15 \pm 110,62$
B	1	$T_{gB1}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-51,84 \pm 3,84$	G'_{B1} [MPa]	$861,81 \pm 146,01$
	2	$T_{gB2}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-47,28 \pm 0,20$	G'_{B2} [MPa]	$1369,58 \pm 29,11$
	3	$T_{gB3}^{SS_{G'}} [^{\circ}\text{C}]$	$-47,40 \pm 0,04$	G'_{B3} [MPa]	$1374,80 \pm 33,89$

Tab. 27. Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{G''}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie składowej stratności G'' z wartościami tej składowej odczytanymi przy $T_g^{SS_{G''}}$

Próbka	Cykl	Oznaczenie	$T_g^{SS_{G''}}$	Oznaczenie	G'' przy $T_g^{SS_{G''}}$
A	1	$T_{gA1}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-40,70 \pm 2,77$	G''_{A1} [MPa]	$108,33 \pm 1,53$
	2	$T_{gA2}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-36,97 \pm 0,25$	G''_{A2} [MPa]	$130,33 \pm 10,41$
	3	$T_{gA3}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-36,93 \pm 0,21$	G''_{A3} [MPa]	$131,33 \pm 10,21$
B	1	$T_{gB1}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-39,90 \pm 2,77$	G''_{B1} [MPa]	$103,87 \pm 12,71$
	2	$T_{gB2}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-36,73 \pm 0,13$	G''_{B2} [MPa]	$148,67 \pm 3,51$
	3	$T_{gB3}^{SS_{G''}} [^{\circ}\text{C}]$	$-36,77 \pm 0,06$	G''_{B3} [MPa]	$149,00 \pm 3,00$

Tab. 28. Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{\delta}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie maksymalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{MAX}$ z wartościami tego współczynnika odczytanymi przy $T_g^{SS_{\delta}}$

Próbka	Cykl	Oznaczenie	$T_g^{SS_{\delta}}$	Oznaczenie	$\tan \delta$ przy $T_g^{SS_{\delta}}$
A	1	$T_{gA1}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-31,93 \pm 2,30$	$\tan \delta_{A1_MAX}$ [-]	$0,2963 \pm 0,0057$
	2	$T_{gA2}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-27,23 \pm 0,12$	$\tan \delta_{A2_MAX}$ [-]	$0,3783 \pm 0,0090$
	3	$T_{gA3}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-27,23 \pm 0,12$	$\tan \delta_{A3_MAX}$ [-]	$0,3740 \pm 0,0079$
B	1	$T_{gB1}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-27,83 \pm 1,10$	$\tan \delta_{B1_MAX}$ [-]	$0,3273 \pm 0,0051$
	2	$T_{gB2}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-24,87 \pm 0,06$	$\tan \delta_{B2_MAX}$ [-]	$0,4987 \pm 0,0064$
	3	$T_{gB3}^{SS_{\delta}} [^{\circ}\text{C}]$	$-24,80 \pm 0,01$	$\tan \delta_{B3_MAX}$ [-]	$0,4943 \pm 0,0067$

Istotnym jest fakt, że przy oznaczonych wartościach temperatury zeszklenia $T_g^{SS_{G'}}$, $T_g^{SS_{G''}}$ oraz $T_g^{SS_{\delta}}$, zachodzi zjawisko analogiczne jak w przypadku składowych modułów sprężystości G' i G'' oraz współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$ (Tab. 26-28). Polega ono na zmianie wartości każdego z tych parametrów, po przeprowadzeniu pierwszego cyklu nagrzewania i chłodzenia, połączonego z cyklicznymi oscylacjami próbki. Po pierwszym cyklu badania, temperatura zeszklenia T_g wyznaczana według każdej rozpatrywanej metody, dla obu próbek, zwiększa swoją wartość. W podobny sposób zmieniają się wartości składowych: zachowawczej G' i stratności G'' modułu sprężystości poprzecznej G , a także współczynnik stratności mechanicznej $\tan \delta$. Z drugiej strony, po drugim cyklu nagrzewania w porównaniu do trzeciego, wartości utrzymują się w przybliżeniu na stałym poziomie.

Wartość temperatury zeszklenia twardych segmentów poliuretanu $T_g^{HS_{\delta}}$, wyznaczona na podstawie minimalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$, charakteryzuje się wzrostem wartości pomiędzy 1 a 2 cyklem nagrzewania i chłodzenia (Tab. 29), podobnie jak temperatura zeszklenia segmentów miękkich $T_g^{SS_{G'}}$, $T_g^{SS_{G''}}$ oraz $T_g^{SS_{\delta}}$. Analogicznie jak w przypadku wcześniej wykonanych prób DMTA, temperatura zeszklenia $T_g^{HS_{\delta}}$ podczas pierwszego cyklu przyjmuje wartość wyższą dla pasa o przekroju kołowym (próbka A) niż dla pasa płaskiego (próbka B) o około 12%, przy czym różnica ta znacząco się zmniejsza, w miarę upływu kolejnych cykli nagrzewania i chłodzenia próbki.

Tab. 29. Wartości temperatury zeszklenia twardych segmentów $T_g^{HS_{\delta}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie minimalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{MIN}$ z wartościami tego współczynnika odczytanymi przy $T_g^{HS_{\delta}}$

Próbka	Cykl	Oznaczenie	$T_g^{HS_{\delta}}$	Oznaczenie	$\tan \delta$ przy $T_g^{HS_{\delta}}$
A	1	$T_{gA1}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$65,37 \pm 5,84$	$\tan \delta_{A1_MIN}$ [-]	$0,0425 \pm 0,0013$
	2	$T_{gA2}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$74,67 \pm 3,55$	$\tan \delta_{A2_MIN}$ [-]	$0,0476 \pm 0,0004$
	3	$T_{gA3}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$74,70 \pm 2,69$	$\tan \delta_{A3_MIN}$ [-]	$0,0487 \pm 0,0003$
B	1	$T_{gB1}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$57,76 \pm 0,06$	$\tan \delta_{B1_MIN}$ [-]	$0,0452 \pm 0,0012$
	2	$T_{gB2}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$73,03 \pm 3,61$	$\tan \delta_{B2_MIN}$ [-]	$0,0555 \pm 0,0004$
	3	$T_{gB3}^{HS_{\delta}}$ [°C]	$70,03 \pm 1,27$	$\tan \delta_{B3_MIN}$ [-]	$0,0571 \pm 0,0004$

W przypadku badań dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA przeprowadzonej dla temperatury o zmiennej wartości, materiały wykazały porównywalne wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów T_g^{SS} , a względnie niewielkie różnice odnotowane w czasie pierwszego cyklu nagrzewania, zanikają w cyklach następnych. Biorąc pod uwagę fakt, że wynik taki uzyskano dla trzech metod jej wyznaczenia, należy przyjąć że temperatura zeszklenia jest w przybliżeniu taka sama dla obu badanych pasów. Świadczy to o tym, że materiały te charakteryzują się zbliżoną odpowiedzią na wymuszenie dynamiczne w warunkach zmieniającej się temperatury, co dowodzi jednakowej ich mikrostruktury oraz składu chemicznego. Zjawisko to zachodzi niezależnie od liczby cykli obciążeń termicznych, którym poddany został pas.

Zaobserwowany wzrost składowej zachowawczej G' oraz stratności G'' modułu sprężystości poprzecznej G , a także współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$ i powiązanych z nimi wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów T_g^{SS} , zachodzący w porównywalnym stopniu dla obu rodzajów pasa w funkcji kolejnych cykli zmiany obciążenia termicznego, wynika z:

- migracji dodatku plastyfikującego lub dodatkowych związków dodawanych chemicznych do poliuretanu (diizocyjaniany, poliole, przedłużacze łańcucha), która ma miejsce po wygrzaniu próbki w pierwszym cyklu [140, 141],
- procesów relaksacji struktury materiału, które zachodzą po pierwszym cyklu. Podobnie jak w przypadku badań w standardowej temperaturze użytkowania materiału, pod wpływem cyklicznie przykładanych naprężeń mechanicznych i termicznych, następuje uporządkowanie łańcuchów i zmniejszenie entropii układu [39, 100, 141, 146, 150].

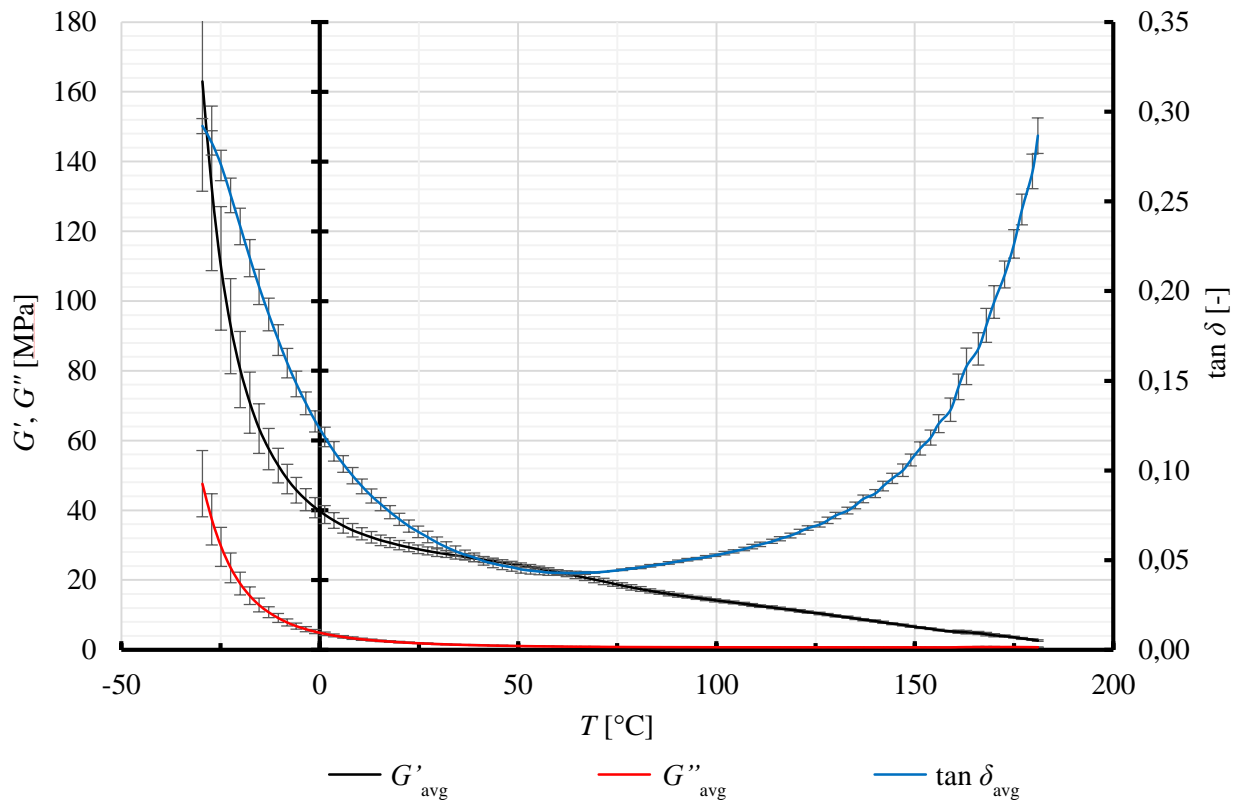
Należy zauważyć, że zmiana wartości mierzonych parametrów mechanicznych oraz temperatury zeszklenia T_g^{SS} , zachodzi w takim samym stopniu dla wszystkich przedstawionych metod analizy (analiza składowej zachowawczej G' oraz stratności G'' modułu sprężystości poprzecznej G , a także współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$), co świadczy o poprawnym doborze metodyki badawczej.

W przypadku analizy wartości temperatury zeszklenia twardych segmentów T_g^{HS} , podobnie jak w przypadku segmentów miękkich, zaobserwowano wzrost jej wartości po wykonaniu pierwszego cyklu obciążenia i następującą po tym stabilizację, dla obu pasów. Przyczyny tego zjawiska są takie same jak w przypadku segmentów miękkich [149]. Pierwotna różnica w wartości temperatury zeszklenia twardych segmentów T_g^{HS} materiału obu pasów, świadczy o większej sztywności wstępnej pasa o przekroju kołowym. Różnica ta jest jednak niewielka i zanika w miarę upływu kolejnych cykli zadawania obciążeń termicznych i mechanicznych.

W związku z tym należy uznać, że pod kątem właściwości mechanicznych, w warunkach dynamicznych obciążeń i zmiennej wartości temperatury, pasy te są w przybliżeniu jednakowe. Założenie to, jest szczególnie słuszne ze względu na specyfikę procesu zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, w którym do materiału pasa dostarczane jest ciepło, powodujące wywiązanie się wyższej temperatury zgrzewania T_z od wartości temperatury T_{DMTA2} osiąganey w badaniu DMTA. W związku z tym, procesy migracji dodatku plastyfikującego oraz relaksacji naprężeń, zachodzące podczas zgrzewania będą powodować, że różnica pomiędzy obiema próbkami pasa w praktyce będzie niezauważalna.

Oznaczenie temperatury zeszklenia badanych polimerów T_g poprzez badanie DMTA wskazuje wartości tego parametru nieco wyższe niż w przypadku różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC, co wynika ze specyfiki aparatury. Porównanie wyników otrzymanych z analiz DSC i DMTA potwierdza różnice w oznaczonych temperaturach zeszklenia rzędu 10°C. Dodatkowo należy zauważyć, że oba przeprowadzone badania (DMTA i DSC) potwierdzają obecność tych samych zjawisk, zachodzących pod wpływem obciążeń termicznych i mechanicznych [155, 156]. Termiczne oddziaływanie na materiał pasa, powoduje nieodwracalne zmiany polegające na migracji lub rozpadzie dodatków, powodujących poprawę właściwości plastycznych tworzywa. Cykliczne obciążenia mechaniczne natomiast, inicjują zjawisko relaksacji naprężeń [39]. Zjawiska te mają wpływ na zmianę właściwości termomechanicznych materiału obu badanych rodzajów pasa, zachodzącą po pierwszym cyklu obciążenia termicznego bądź mechanicznego. Podczas dalszego zadawania obciążeń mechanicznych lub termicznych, w obu przypadkach materiał nie zmienia swoich właściwości – wartości jego wybranych parametrów termomechanicznych ulegają stabilizacji. Dodatkowo, ze względu na to zjawisko, zacierają się różnice pomiędzy obydwoma analizowanymi pasami.

Biorąc pod uwagę względnie niewielką różnicę we właściwościach obu pasów, na podstawie przeprowadzonej analizy DMTA dla pasa o przekroju kołowym, wyznaczono wartości uśrednione poszczególnych składowych modułu sprężystości poprzecznej G : zachowawczej G'_{avg} oraz stratności G''_{avg} , a także współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{avg}$ w zależności od wartości temperatury T (Rys. 64).



Rys. 64. Charakterystyka uśrednionych składowych modułu sprężystości poprzecznej G : zachowawczej G'_{avg} oraz stratności G''_{avg} , a także uśrednionego współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{avg}$ w zależności od temperatury materiału T

Przeprowadzone badanie dynamicznej analizy termomechanicznej, polegało w istocie na oscylacyjnym skręcaniu próbki, przy stałej maksymalnej amplitudzie oscylacji A_{DMTA2} i niezmienniej częstotliwości f_{DMTA2} . Uzyskane rezultaty (Rys. 64) nie są jednak satysfakcjonujące z punktu widzenia analizy operacji uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie. Wynika to z tego, że charakterystyka składowych modułu sprężystości poprzecznej G oraz współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$, wprost nie przynoszą użytecznych informacji w aspekcie ściskania materiału w temperaturze o podwyższonej wartości, które jest obecne podczas uplastyczniania materiału podczas zgrzewania pasów. Koniecznym jest zatem przeprowadzenie analizy lepkości materiału η , której wartość będzie użyteczna w dalszych badaniach.

Analizując warunki badania dynamicznej analizy termomechanicznej, jako maksymalną amplitudę bezwymiarowego odkształcenia poprzecznego γ_0 można przyjąć [89, 91, 157]:

$$\gamma_0 = A_{DMTA2}. \quad (4.22)$$

W związku z tym, zmiana odkształcenia $\gamma(t)$ w czasie opisana jest zależnością:

$$\gamma_{DMTA2}(t) = \gamma_0 \cdot \sin(\omega_{DMTA2} \cdot t_{DMTA2}), \quad (4.23)$$

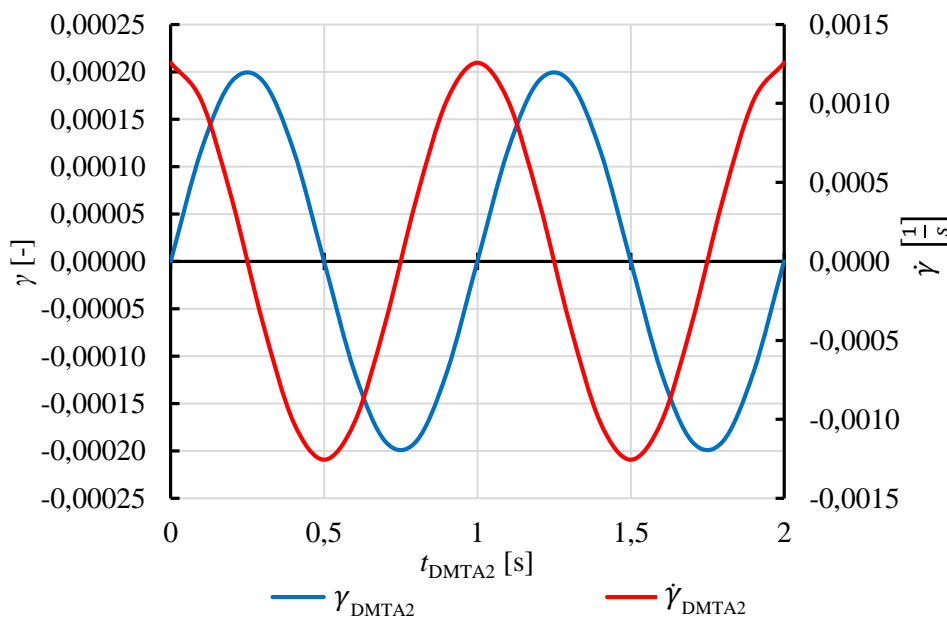
a zmiana prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}(t)$:

$$\dot{\gamma}_{DMTA2}(t) = \gamma_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega_{DMTA2} \cdot t_{DMTA2}), \quad (4.24)$$

gdzie: t_{DMTA2} – czas badania, ω_{DMTA2} – częstość kołowa oscylacji, opisana zależnością:

$$\omega_{DMTA2} = 2 \cdot \pi \cdot f_{DMTA2}. \quad (4.25)$$

Uwzględniając wyznaczone parametry oscylacji, możliwe jest określenie przebiegu odkształcenia γ i prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}$ w zależności od czasu t_{DMTA2} . Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie maksymalnej prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}_{DMTA2}(t)$, uzyskiwanej podczas badania DMTA, której maksymalna wartość bezwzględna wynosi w przybliżeniu $1,25 \cdot 10^{-3} \frac{1}{s}$ (Rys. 65).



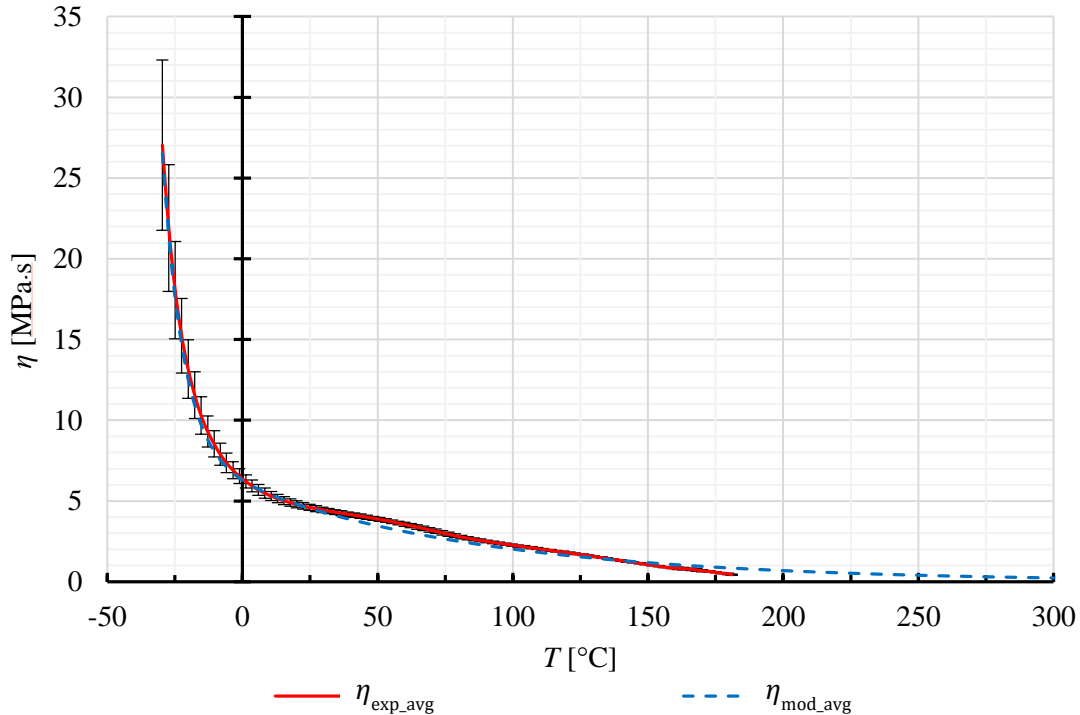
Rys. 65. Charakterystyka zmienności kąta odkształcenia poprzecznego γ i prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}$ w zależności od czasu trwania badania DMTA t_{DMTA2}

Analiza prędkości odkształcenia jest często wykorzystywana w modelowaniu procesu przetwórstwa polimerów stopionych [89]. Biorąc pod uwagę standardowe, charakterystyki plastycznego płynięcia polimerów, można wywnioskować, że rozpatrywany zakres prędkości odkształcania $\dot{\gamma}_{DMTA2}$ leży w pierwszym obszarze newtonowskiego płynięcia materiału polimerowego, dla którego wartość tej prędkości nie przekracza zazwyczaj $10 \frac{1}{s}$ [40, 89, 90]. Oznacza to, że w tym zakresie prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}$, podczas analizy plastycznego płynięcia materiału, możliwe jest uwzględnianie praw dotyczących płynu newtonowskiego. Cechy te dotyczą takiego zachowania się lepkiego materiału polimerowego, że dowolna wartość naprężenia stycznego lub normalnego $\tau(\sigma)$ jest w korelacji liniowej z szybkością odkształcenia $\dot{\gamma}(\dot{\epsilon})$. Determinuje to wniosek, że w przypadku wyników uzyskanych z przeprowadzonej analizy DMTA, całkowity moduł sprężystości G podczas odkształceń cyklicznych, nie zależy od amplitudy odkształceń γ_0 dla ciała lepko-sprężystego, którym niewątpliwie jest ten polimer [90]. W związku z tym, badany materiał może być traktowany jako ciało lepko-sprężyste spełniające prawo newtonowskiego płynięcia, w badanym zakresie prędkości odkształcenia $\dot{\gamma}$.

W związku z tym, celowa jest dalsza analiza otrzymanych rezultatów (Rys. 64) w aspekcie wyznaczenia lepkości dynamicznej materiału η , na podstawie składowych modułu sprężystości poprzecznej G [91].

Możliwe jest zatem wyznaczenie uśrednionej, wyznaczonej eksperymentalnie wartości lepkości dynamicznej $\eta_{\text{exp_avg}}$ w funkcji wartości temperatury T (Rys. 66), wykorzystując zależność [89-91]:

$$\eta_{\text{exp_avg}}(T) = \frac{|G_{\text{DMTA2}}|}{\omega_{\text{DMTA2}}} = \frac{\sqrt{G'_{\text{avg}}{}^2 + G''_{\text{avg}}{}^2}}{\omega_{\text{DMTA2}}} \quad (4.26)$$



Rys. 66. Charakterystyka zmiany uśrednionej lepkości dynamicznej materiału pasa η : $\eta_{\text{exp_avg}}$ – wartość wyznaczona eksperymentalnie, $\eta_{\text{mod_avg}}$ – wartość modelowa będąca ekstrapolowaną krzywą lepkości wyznaczonej na podstawie eksperymentu

Biorąc pod uwagę to, że maksymalna wartość temperatury T podczas badania DMTA była ograniczona do 180°C, a proces zgrzewania odbywa się w temperaturze o wartości dochodzącej do 300°C [55], istnieje potrzeba rozszerzenia zakresu wartości temperatury T , dla której lepkość dynamiczna η będzie oznaczona.

Zazwyczaj w takim przypadku, dla materiałów o ściśle określonej mikrostrukturze (ciało krystaliczne, amorficzne lub częściowo krystaliczne), wykonuje się ekstrapolację zakresu zmienności dowolnego parametru mechanicznego (np. lepkości η) za pomocą znanych modeli opracowanych na podstawie danych empirycznych [89, 158-160]. W przypadku tworzyw krystalicznych jest to prawo Williamsa-Landela-Ferry'ego (WLF) w postaci:

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot e^{\left[\frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}\right]}, \quad (4.27)$$

gdzie: η_0 – stanowi lepkość w temperaturze odniesienia T_0 , C_1 i C_2 – stałe materiałowe. W przypadku tworzyw sztucznych amorficznych, zazwyczaj wykorzystywane jest prawo Arrheniusa w postaci:

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot e^{\left[\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]}, \quad (4.28)$$

gdzie: R – stała gazowa, E – energia aktywacji tworzywa. Niestety, w tym przypadku zarówno stałe materiałowe równania WLF (4.27) jak i energia aktywacji tworzywa (4.28) w modelu Arrheniusa są parametrami nieznanymi i trudnymi do wyznaczenia, w przypadku praktycznej aplikacji wyników badań nad tego

typu materiałami i wyrobami z nich powstałymi (pasy). Dodatkowo, nieznaną w pełni jest faktyczna struktura materiału (m. in. stopień krystaliczności). W związku z tym, w celu rozszerzenia zakresu znanej lepkości dynamicznej η , dokonano aproksymacji danych empirycznych, za pomocą funkcji wykładniczej, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, przy założeniu dopasowania danych do modelu określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,9975$. W następnej kolejności przeprowadzono ekstrapolację otrzymanej charakterystyki w celu wyznaczenia modelu opisującego zależność uśrednionej lepkości dynamicznej od wartości temperatury, w rozszerzonym jej zakresie (Rys. 66). W związku z tym, zależność tego parametru $\eta_{\text{mod_avg}}$ od wartości temperatury T , przyjmuje postać:

$$\eta_{\text{mod_avg}}(T) = a_1 \cdot e^{(b_1 \cdot T)} + a_2 \cdot e^{(b_2 \cdot T)}, \quad (4.29)$$

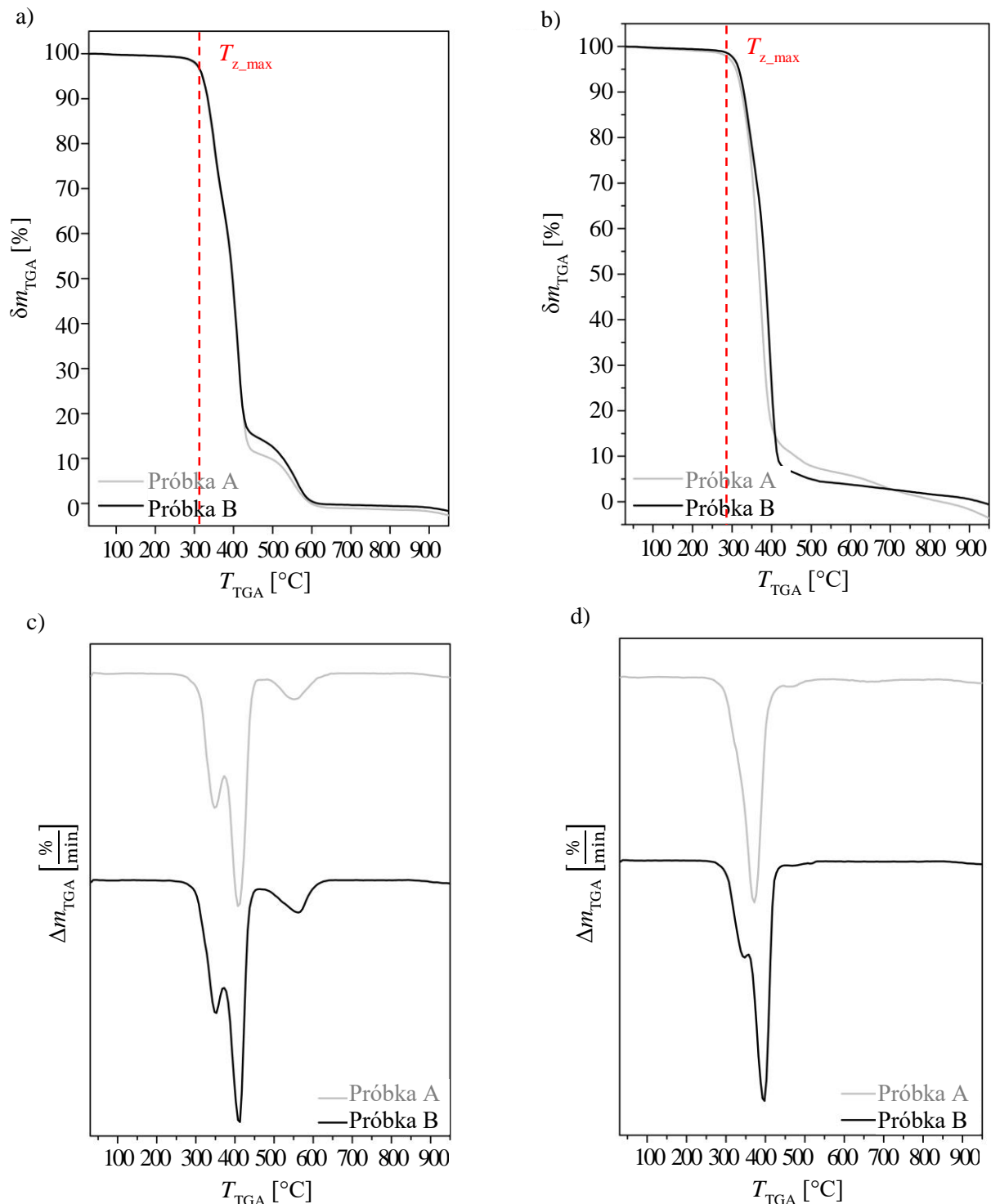
gdzie: a_1, a_2, b_1, b_2 są współczynnikami o stałej wartości, wyznaczonymi empirycznie.

Analiza termogravimetryczna wykonana w otoczeniu powietrza atmosferycznego wykazała, że ubytek masy próbki B wynoszący 5%, zachodzi w temperaturze $T_{\text{mr}5\%}$ o wyższej wartości niż dla próbki A (Rys. 67a, Tab. 30), przy czym różnica ta nie przekracza 1%. Proces dekompozycji materiału, w otoczeniu powietrza atmosferycznego przebiegał w trzech etapach, dla obu analizowanych próbek (Rys. 67c). Początek pierwszego oraz drugiego etapu rozpadu struktury polimeru, dla próbki B pobranej z pasa płaskiego, zachodzi przy wyższej wartości temperatury T_{vnr} , niż dla próbki A. Należy jednak zauważyć, że różnica pomiędzy tymi wartościami, dla poszczególnych etapów rozkładu jest względnie niewielka i nie przekracza 1%. Trzeci etap dekompozycji, dla obu próbek charakteryzuje się niższym poziomem energetycznym, przy czym ponownie zachodzi w temperaturze o wyższej wartości dla próbki typu B. Należy jednakże zauważyć, że ponownie różnica ta jest niewielka i wynosi około 2%. W związku z tym, że wartość temperatury T_{vnr} , przy której zmniejszanie wartości masy materiału jest najbardziej dynamiczne, dla próbki B we wszystkich trzech etapach rozkładu jest wyższa niż dla próbki A, ale jedynie o około 1-2%, można uznać że różnica ta jest pomijalnie mała.

Analiza termogravimetryczna wykonana w atmosferze ochronnej chemicznie czystego azotu, również wykazała większą stabilność chemiczną próbki B (Rys. 67b i d, Tab. 30). W tym przypadku jednak różnica wartości temperatury $T_{\text{mr}5\%}$ przy 5% ubytku masy dla obu analizowanych próbek jest wyższa i wynosi około 8%. Proces dekompozycji próbki A przebiega jednoetapowo, natomiast próbki B – dwuetapowo, co stanowi znaczącą różnicę względem otoczenia powietrza atmosferycznego. Wartość temperatury T_{vnr} , w której występuje maksymalna dynamika zmniejszenia się masy próbek, dla próbki B jest również wyższa w porównaniu do próbki A. W tym przypadku różnica wynosi około 7%. Należy jednak zauważyć, że dla próbki A całkowita zmiana masy próbki zachodzi w pierwszym i jedynym etapie jej rozkładu termicznego.

W ogólnym ujęciu analiza termogravimetryczna wykonana w otoczeniu powietrza atmosferycznego wykazała większą stabilność termiczną próbki B, czyli pobranej z pasa płaskiego. W związku z tym, podczas nagrzewania tworzywa pierwsza faza rozkładu materiału następuje nieco później. Dekompozycja materiału w przypadkach obu próbek zachodzi w trzech etapach, przy czym pierwszy z nich związany jest z dekompozycją miękkich segmentów poliuretanu termoplastycznego, drugi z rozpadem twardych segmentów, a w trzecim zachodzi degradacja pozostałości nieorganicznych w materiale. Różnice w wartości temperatury dekompozycji obu badanych próbek, są względnie niewielkie i mogą być niezauważalne podczas

przemysłowego zgrzewania pasów cięgnowych. Należy również zauważyć, że dekompozycja materiału następuje przy temperaturze o wartości znacznie przekraczającej temperaturę zgrzewania T_z . Jest to uzasadnione, ponieważ podczas zgrzewania dekompozycja chemiczna materiału nie może nastąpić [161, 162].



Rys. 67. Charakterystyki termograwimetryczne wykonane w atmosferze przepływającego gazu: powietrza (a) i azotu (b) oraz derywograficzne w dziedzinie wartości temperatury podczas badania T_{TGA} w atmosferze przepływającego gazu: powietrza (c) i azotu (d)

Analiza termograwimetryczna wykonana w atmosferze obojętnej również wykazała większą stabilność chemiczną próbki B. W tym przypadku jednak proces dekompozycji dla próbki A przebiega jednoetapowo,

natomiast dla próbki B dwuetapowo, co jest znaczącą różnicą w stosunku do rozkładu w otoczeniu powietrza atmosferycznego. Należy również zauważyć, że wartości temperatury, przy których zachodzą poszczególne kluczowe etapy dekompozycji obu polimerów, są niższe niż w otoczeniu powietrza atmosferycznego. W związku z tym, w atmosferze obojętnej badany materiał przejawia odmienne zachowanie podczas nagrzewania, niż w środowisku powietrza atmosferycznego.

Tab. 30. Wyniki analizy termogravimetrycznej dla obu badanych próbek

Atmosfera	Próbka	Temperatura przy 5% ubytku masy $T_{mr5\%}$ [°C]	Wartość temperatury przy maksymalnej szybkości zmiany masy T_{vmr} [°C]		
			1 etap	2 etap	3 etap
Powietrze atmosferyczne	A	305,2	349,2	409,5	549,8
	B	309,4	350,1	410,7	563,5
Azot (N ₂)	A	275,5	371,2	–	–
	B	298,3	346,6	395,8	–

Niezwykle istotnym jest, że różnice pomiędzy analizowanymi materiałami, w oczekiwanym przedziale wartości temperatury zgrzewania T_z od 250°C do około 300°C, są na tyle niewielkie, że mogą zostać zanedbane. Znaczące rozbieżności pomiędzy tymi materiałami przejawiają się w temperaturze o wyższej wartości, w okolicy pierwszego etapu rozkładu materiału oraz wyższej. Z punktu widzenia procesu technologicznego zgrzewania doczołowego pasów, rozbieżności te nie mają znaczenia.

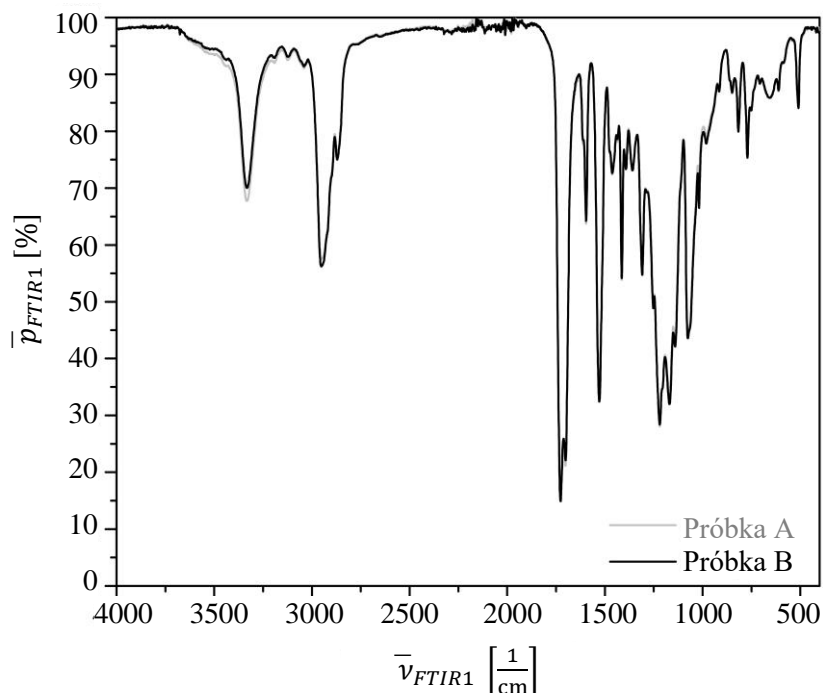
Należy również zauważyć, że otoczenie gazowe materiału również ma znaczący wpływ na jego zachowanie podczas nagrzewania. W atmosferze obojętnej chemicznie (azot) uwydatniają się pewne różnice strukturalne w obu rodzajach pasa, w związku z czym fakt ten należy uwzględnić podczas ewentualnego projektowania technologii zgrzewania w atmosferze ochronnej tego typu. Prace takie były już prowadzone, gdzie udowodniono, że technologia ta wymaga specjalnego podejścia [163]. W pewnym sensie podobna sytuacja zachodzi w przypadku wymuszenia przepływu powietrza ochładzającego spoinę co powoduje, że zmieniają się warunki wymiany ciepła podczas zgrzewania. Zjawisko to należy uwzględnić podczas projektowania takiej technologii [164]. Jednakże, w przypadku klasycznego procesu zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, przeprowadzanego w otoczeniu powietrza atmosferycznego, odpowiedź materiału na wymuszoną zmianę wartości temperatury, jest bardziej przewidywalna i powtarzalna. W związku z tym wynikowa zmiana właściwości tworzywa w przypadku obu rodzajów pasa, charakteryzuje się mniejszą różnicą.

Jednocześnie można na tej podstawie ustalić dopuszczalną wartość temperatury zgrzewania tego materiału, nie powodującą jego nadmiernej degradacji. Przyjmując jako wytyczną wartość temperatury przy 5% ubytku masy, możemy ustalić że dla zgrzewania w otoczeniu powietrza atmosferycznego, maksymalna temperatura zgrzewania $T_{z,max}$ nie powinna przekraczać około 305°C. Wyższa wartość jest możliwa, jednakże spowoduje znaczące ubytki masy materiału. Taka degradacja termiczna prowadzić będzie również do postawiania węgleń w strukturze materiału, zaburzających ciągłość złącza zgrzewanego. Wnioski te są zgodne z instrukcjami ręcznego zgrzewania dla tego typu materiału [88].

Przeprowadzona analiza, oparta na rezultatach badania termogravimetrycznego, z punktu widzenia rozpatrywanego procesu zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, zachodzącego w temperaturze T_z , bez

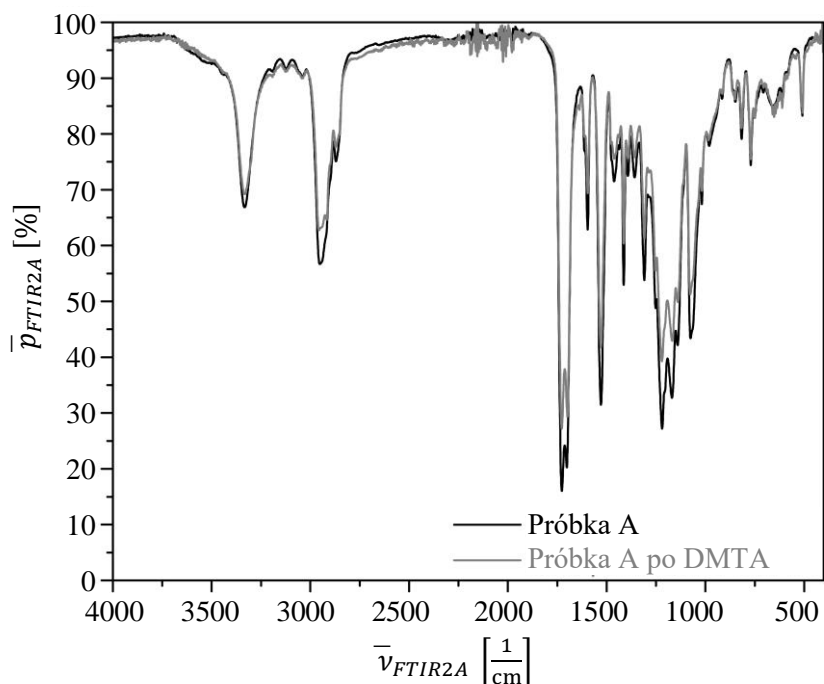
zastosowania dodatkowej atmosfery ochronnej dowodzi, że na potrzeby analizy tego procesu można uznać, że obydwa badane pasy wykazują jednakowe właściwości i nie jest wymagane ich rozróżnianie.

Wyniki analizy spektrofotometrycznej FT-IR dla obu rodzajów pasa są bardzo podobne, o czym świadczą pokrywające się niemal widma promieniowania podczerwonego po przejściu przez materiał (Rys. 68). Dla obu próbek zaobserwowano wyraźne widma promieniowania pochodzące od drgań wiązań azotowo-wodorowych. Przy długości fali $\bar{\nu}_{FTIR1} = 3325 \frac{1}{cm}$ obecne są efekty pochodzące od drgań grupy azotowo-wodorowej związanej z wodorem, natomiast efekt świetlny przy $\bar{\nu}_{FTIR1} = 3450 \frac{1}{cm}$ (dla wolnych grup azotowo-wodorowych) jest znikomy. Zjawisko to wskazuje, że prawie wszystkie grupy azotowo-wodorowe są związane. W zakresie długości fali $\bar{\nu}_{FTIR1} = 3000-2800 \frac{1}{cm}$, występują efekty oznaczające pasma rozciągające węglowodory alifatyczne. Przy długości fali $\bar{\nu}_{FTIR1} = 1750-1600 \frac{1}{cm}$, obserwowane są widma pochodzące od oddziaływań rozciągających grupy CO [39]. W ogólnym ujęciu więc, analiza spektrofotometryczna FT-IR dostarczyła informacji o tym, że widma absorpcji dla obu rodzajów próbek są niemal identyczne. W związku z tym, skład i struktura chemiczna obu pasów są takie same.

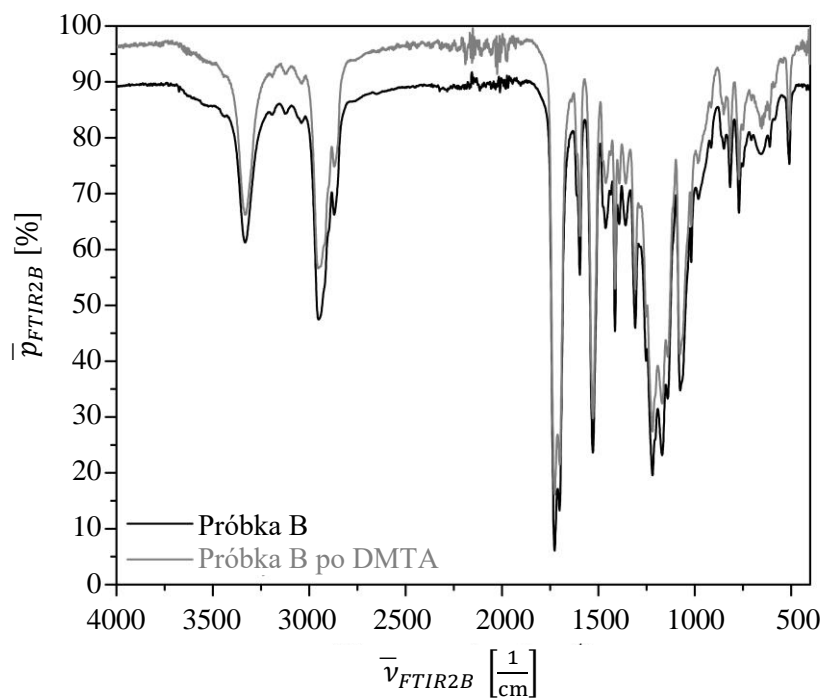


Rys. 68. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z obu rodzajów pasa, wykonane podczas badania spektrofotometrycznego

Po wykonaniu dynamicznej analizy mechanicznej DMTA, przeprowadzono ponowne badanie spektrofotometryczne FT-IR. Na tej podstawie sporządzono widma porównawcze dla próbek pasa przed i po ich poddaniu cyklom obciążeń termomechanicznych. Porównując widma FT-IR próbek A i B sprzed oraz po badaniu DMTA nie dostrzega się znaczących różnic w kształcie widma (Rys. 69 i 70). Zauważalna jest jedynie nieznaczna zmiana wartości przepuszczalności \bar{p}_{FTIR} , szczególnie w przypadku próbki pobranej z pasa płaskiego (B), co nie świadczy jednak o wyraźnych zmianach w zakresie składu chemicznego i struktury makrocząstek tego materiału.



Rys. 69. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z pasa o przekroju kołowym (próbka typu A), przed i po badaniu DMTA



Rys. 70. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z pasa płaskiego (próbka typu B), przed i po badaniu DMTA

Podsumowując wyniki uzyskane na drodze analizy termogravimetrycznej oraz spektrofotometrycznej należy zauważyć, że oba materiały z punktu widzenia składu chemicznego i struktury cząsteczkowej są identyczne. Jak wynika z porównawczej analizy spektrofotometrycznej FT-IR, zarówno w przypadku próbki pasa płaskiego (B), jak i pasa o przekroju kołowym (A) nie następuje zmiana składu ani struktury wiązań chemicznych, po cyklicznym obciążaniu próbek w warunkach zmiennej temperatury. W związku

z tym, należy się spodziewać, że po zgrzewaniu doczołowym, materiał zachowa większość właściwości, wynikających ze struktury i składu chemicznego.

Zarejestrowany na podstawie pięciu prób, współczynnik dyfuzyjności cieplnej materiału, dla próbki pobranej z pasa o przekroju kołowym (A) wynosi: $a_{dc} = 5,76 \cdot 10^{-8} \pm 1,29 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$. Wynik ten jest bardzo istotny z punktu widzenia ewentualnej analizy nagrzewania materiału podczas tego procesu technologicznego.

4.4. Podsumowanie rozdziału

Materiał pasa podlegający zgrzewaniu, jest tworzywem sztucznym o właściwościach z pogranicza termoplastów i elastomerów. Skutkuje to tym, że w warunkach standardowej wartości temperatury otoczenia, pas wykazuje cechy pokrewne elastomerom (m.in. odkształcenia sprężyste o wartościach przekraczających kilkaset procent oraz nieliniową charakterystykę), a w warunkach podwyższonej temperatury możliwe jest uzyskanie efektu plastycznego płynięcia tego tworzywa. Dzięki temu, możliwe jest wykorzystanie takiego materiału do produkcji pasów, które podczas pracy muszą być elastyczne, z jednoczesnym umożliwieniem ich obróbki (np. spajania) metodami termicznymi.

Na podstawie wyników badań materiałowych, przeprowadzonych w stałej temperaturze otoczenia gazowego próbki, można wysunąć następujące wnioski na temat zachowania się materiału pasa w warunkach zmiennych obciążeń mechanicznych:

- na podstawie próby rozciągania w temperaturze o stałej wartości można stwierdzić, że tworzywo to wykazuje nieliniową charakterystykę, a dodatkowo możliwe odkształcenia sprężyste próbki przyjmują duże wartości, przez co rozciąganie na klasycznej maszynie wytrzymałościowej nie pozwala uzyskać charakterystyki przy zerwaniu,
- na podstawie próby ściskania w stałej temperaturze, można wywnioskować, że średnica pasa nie wpływa w tym zakresie na odpowiedź materiału na odkształcenie ściskające,
- na podstawie próby ścinania z dwiema prędkościami, można wywnioskować że materiał ten już w stałej temperaturze (w warunkach standardowych) wykazuje wrażliwość na prędkość odkształcenia przy tego typu obciążeniu, co może wskazywać lepko-sprężystą naturę tego tworzywa.

Wyniki badań w stałej temperaturze otoczenia, pozwoliły na wyznaczenie m.in. współczynnika Poissona, wykorzystanego w dalszych pracach badawczych.

Badania termomechaniczne wykonane w zmiennej temperaturze otoczenia, pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- podczas ściskania w warunkach temperatury o zmiennej wartości, materiał pasa wykazuje znaczącą wrażliwość na prędkość ściskania, dopiero w temperaturze powyżej 150°C. Do tej wartości temperatury, jego sztywność pozostaje niemal niezależna od wartości prędkości, co oznacza, że dominują w tym zakresie właściwości sprężyste. Zachowanie pokrewne do plastycznego płynięcia, ujawnia się dopiero w wyższej wartości temperatury,
- badania z wykorzystaniem cyklicznych obciążeń mechanicznych w warunkach stałej i zmiennej wartości temperatury, pozwoliły na doprecyzowanie granicy temperatury, powyżej której materiał

pasa rozpoczyna plastyczne płynięcie. Pozwoliło to oszacować wartość minimalnej temperatury przy której może zachodzić zgrzewanie jako 197°C,

- badania polegające na spalaniu próbki pasa i obserwacji zjawisk podczas niego zachodzących (próby termograwimetryczne) pozwoliły na wyznaczenie maksymalnej temperatury użytkowania (oraz także zgrzewania) materiału pasa, ze względu na degradację termiczną, której wartość wynosi 305°C. Badania te wykazały również, że zastosowanie specjalnej obojętnej chemicznej atmosfery ochronnej do zgrzewania, może nieść za sobą ryzyko mniej przewidywalnego zachowania się tego tworzywa pod wpływem podwyższonej temperatury,
- badania różnicowej kalorymetrii skaningowej wykazały jasno, że w przypadku tego materiału niemożliwe jest wyznaczenie jednoznacznej wartości temperatury topnienia, co ma znaczny wpływ na dalsze prace badawcze związane z szacowaniem wartości parametrów technologicznych podczas zgrzewania. Taki zachowanie się materiału uniemożliwia jednoznaczne określenie parametrów, przy których zachodzi zgrzewanie,
- badania współczynnika dyfuzyjności cieplnej oraz ciepła właściwego pozwoliły na wyznaczenie wartości tych parametrów termodynamicznych na potrzeby analiz termicznych.

Wyniki analizy porównawczej, służącej weryfikacji hipotezy o możliwości zamiennego stosowania próbek pobranych z pasa o przekroju kołowym i płaskiego wykonanych z podobnego materiału, do prac badawczych dotyczących procesu doczołowego zgrzewania pasów ciągnowych metodą gorącej płyty, pozwoliły poczynić następujące obserwacje:

- w zakresie maksymalnej temperatury zgrzewania, której wartość zazwyczaj sięga 300°C, podczas zgrzewania doczołowego przeprowadzanego w otoczeniu powietrza atmosferycznego, zmiana masy próbek podczas nagrzewania prowadzącego do rozkładu tworzywa jest identyczna dla obu pasów, a niewielkie różnice w temperaturze wyższej, przekraczającej granicę termiczną dekompozycji materiału, nie mają znaczącego wpływu na analizę i realizację procesu zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty, ponieważ w tym procesie technologicznym te wartości temperatury nie są osiągane,
- spektrofotometryczne widmo promieniowania generowane przez oba rodzaje pasów, jest niemal identyczne, co świadczy o identyczności struktury i składu chemicznego pasa o przekroju kołowym i płaskiego, wykonanych z analizowanego materiału,
- moduł sprężystości poprzecznej oraz lepkość dynamiczna w warunkach temperatury pokojowej, przyjmują wyższe wartości dla pasa o przekroju kołowym. Jednakże w przypadku obu rodzajów pasa, parametry te zmieniają swoje wartości w wyniku relaksacji naprężeń po pierwszym zadanym obciążeniu, przy czym w miarę dalszego ich obciążania ich wartości pozostają stałe. Dodatkowe oddziaływanie temperatury o zmiennej wartości, powoduje zmianę i ujednoczenie wartości modułu sprężystości poprzecznej i temperatury zeszklenia obu pasów, już po jednym cyklu nagrzewania próbki, poddawanej równocześnie obciążeniom mechanicznym, co następuje w wyniku relaksacji naprężeń i migracji dodatków uplastyczniających materiał. W związku z tym, w aspekcie

procesu zgrzewania doczołowego, polegającego na ściskaniu pasa w warunkach podwyższonej temperatury, różnica pomiędzy pasem o przekroju kołowym a płaskim, jest pomijalna,

- w wyniku zadawania cyklicznych obciążeń mechanicznych i termicznych, podstawowa struktura chemiczna materiału obu pasów nie ulega zmianie, co można wywnioskować na podstawie wyników analizy spektrofotometrycznej,
- oba pasy już po jednokrotnym zwiększeniu temperatury do wartości bliskich zgrzewaniu, ujednolicają swoje właściwości w odniesieniu do wartości temperatury zeszklenia oraz zapotrzebowania energetycznego procesu nagrzewania, który staje się bardziej przewidywalny (na podstawie wyników różnicowej kalymetrii skaningowej DSC). Czynniki te, z punktu widzenia procesu technologicznego zgrzewania powodują, że odpowiedź materiału na wzrost wartości temperatury jest taka sama. Obie próbki różnią się natomiast ciepłem właściwym, przy czym różnica ta jest stała i musi być uwzględniona podczas modelowania procesu zgrzewania.
- zarówno pas o przekroju kołowym jak i płaski charakteryzują się w przybliżeniu jednakową gęstością i twardością.

Badane próbki pobrane z pasa o przekroju kołowym i płaskiego, z chemicznego punktu widzenia są tożsame. W związku z tym, hipoteza o możliwości zamiennego stosowania próbek obu pasów do prac badawczych związanych ze zgrzewaniem doczołowym metodą gorącej płyty, może zostać potwierdzona, przy założeniu:

- zgrzewania bez zastosowania obojętnych atmosfer ochronnych,
- zastosowania współczynnika korekcyjnego podczas przyjmowania wartości ciepła właściwego, na potrzeby modelowania przepływu ciepła w procesie.

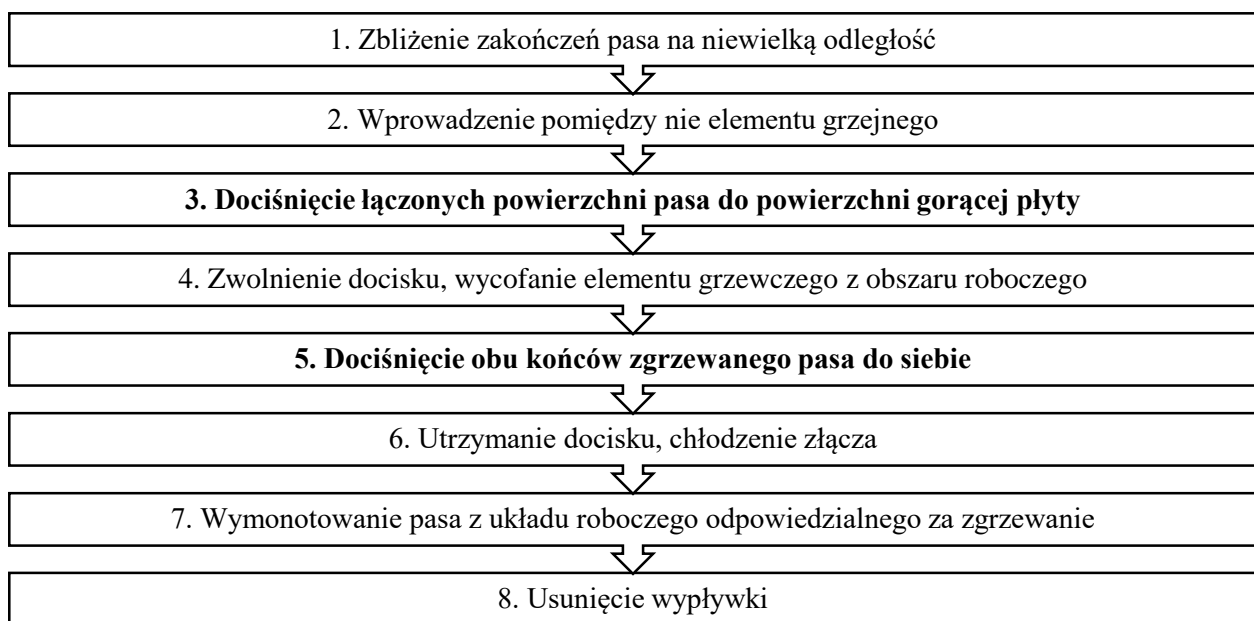
Ta potwierdzona hipoteza została wykorzystana między innymi przy wyznaczeniu współczynnika Poissona materiału pasa.

Niezwykle istotnym jest również fakt, że zmiana temperatury materiału z równoczesnym zadawaniem obciążeń mechanicznych nie powoduje zmian chemicznych i strukturalnych materiału. W związku z tym, wywnioskować można, że w skali makroskopowej proces zgrzewania tego materiału nie skutkuje powstaniem zgrzeiny o znacząco odmiennych właściwościach w stosunku do rodzimego materiału pasa dla przypadku obu rodzajów ciągnia.

5. Proces technologiczny zgrzewania doczołowego pasów

5.1. Aktualny stan wiedzy na temat doczołowego zgrzewania pasów

Po przygotowaniu do wykonania połączenia (Rys. 16a i b) termozgrzewalnego pasa napędowego lub transportującego, w szczególności o przekroju kołowym, następuje kluczowy etap jego procesu produkcyjnego, czyli wykonanie doczołowego złącza zgrzewanego (6 na Rys. 15). W celu scharakteryzowania sposobu przeprowadzania tej operacji należy wziąć pod uwagę ogólny przebieg wykonywania złącz doczołowych takich pasów (Rys. 16), a także ogólną metodologię wykonywania takiego połączenia (Rys. 24). W związku z tym, wykonanie trwałego połączenia końcówek pasa, poprzez ich doczołowe zgrzanie metodą gorącej płyty, wiąże się z zastosowaniem ściśle określonej sekwencji czynności (Rys. 71).



Rys. 71. Ogólny przebieg operacji zgrzewania doczołowego pasa metodą gorącej płyty

W ogólnym ujęciu, w odniesieniu do wytycznych związanych w kontrolą jakości zgrzewanego złącza doczołowego (rozdział 1.2), przebieg tej operacji można scharakteryzować za pomocą wymagań operacyjnych, stanowiących jednocześnie wytyczne technologiczne do przeprowadzenia zgrzewania doczołowego pasów metodą gorącej płyty (Rys. 71) [29, 38]:

- końcówki pasa przed wykonaniem operacji muszą zostać zorientowane względem siebie w taki sposób, aby były współosiowe, a ich powierzchnie czołowe były równoległe, po czym powinny zostać zbliżone do siebie na niewielką odległość, której wartość umożliwia wsunięcie pomiędzy nie płyty grzewczej, rozgrzanej do temperatury T_p (1),
- płyta grzewcza musi być zorientowana względem końcówek pasa w taki sposób, aby był możliwy kontakt pomiędzy całą powierzchnią czołową pasa, a płytą. Dodatkowo, powierzchnia grzewcza musi być równoległa do powierzchni czołowych końcówek pasa, co zapewnia dobrą efektywność nagrzewania oraz równomierny przyrost wartości temperatury materiału (2),
- końcówki pasa muszą zostać dociśnięte do gorącej płyty ze ściśle określoną wartością poosiowej siły technologicznej F_{tl} (Rys. 24). W tym momencie rozpoczyna się proces wymiany ciepła.

Oddziaływanie termiczne płyty grzewczej na materiał, połączone z jednoczesnym dociskiem końcówek pasa do jej powierzchni, skutkuje zmianą stanu fizycznego tworzywa, czego obserwowalnym efektem jest uplastycznienie i nadtopienie materiału (3),

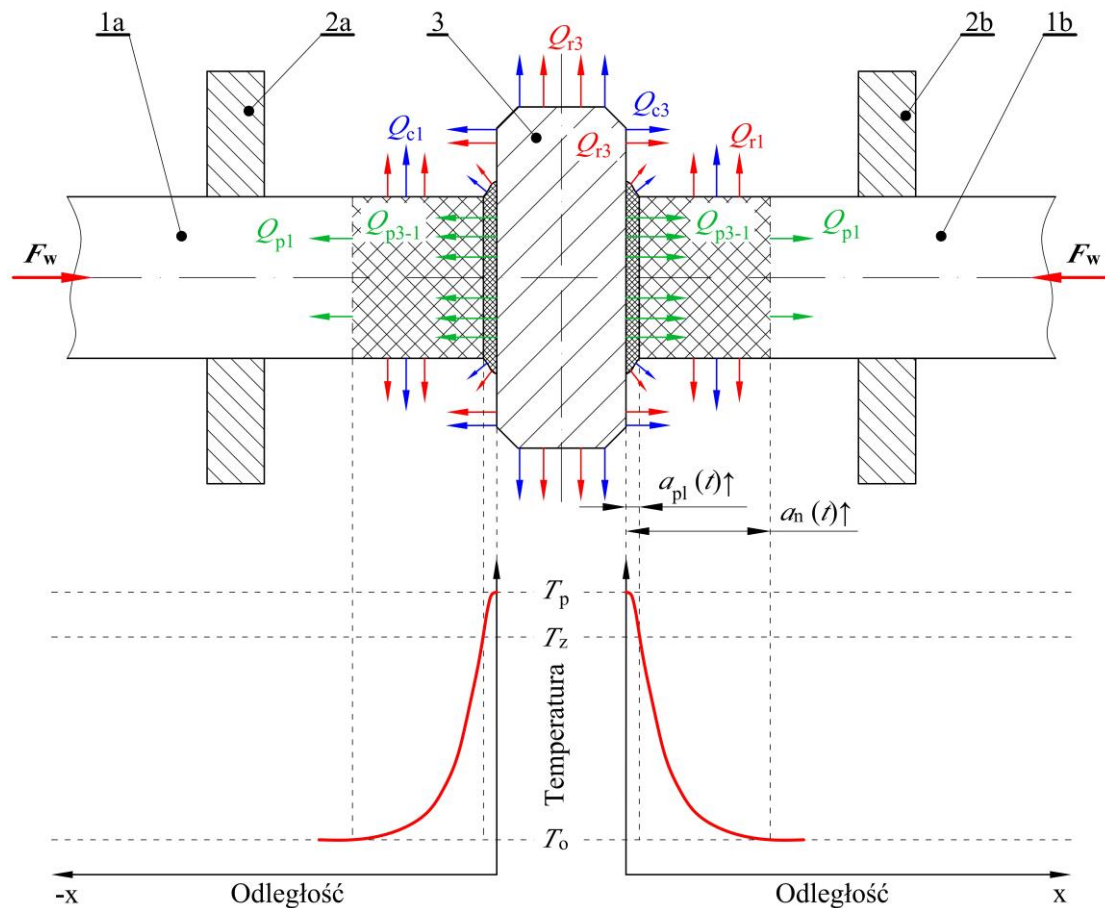
- po uzyskaniu wymaganego stopnia uplastycznienia i nadtopienia materiału pasa, możliwe jest zwolnienie poosiowej siły technologicznej F_{tl} i odsunięcie pasa od płyty grzewczej, co umożliwia jej wycofanie z obszaru roboczego zlokalizowanego pomiędzy końcówkami pasa (4), poprzez ruch w płaszczyźnie prostopadłej do osi pasa,
- niezwłocznie po tym, powinien nastąpić wzajemny docisk łączonych elementów do siebie, wywołany zadaniem poosiowej siły technologicznej F_{tl} o określonej wartości (5),
- po określonym czasie i uzyskaniu docelowej siły docisku końcówek pasa, rozpoczyna się etap ochładzania, a w konsekwencji umacniania się złącza w wyniku wzrostu sztywności łańcuchów polimerowych wraz ze spadkiem wartości temperatury (6),
- po ochłodzeniu złącza musi nastąpić usunięcie wypływkę, czyli pierścieniowego nadmiaru materiału w otoczeniu złącza. Jego objętość jest proporcjonalna do skrócenia pasa, przewidzianego podczas opracowywania wytycznych technologicznych – jest to wymiar n – naddatek na wykonanie połączenia (Rys. 16). Usunięcie wypływkę może odbywać się bezpośrednio w układzie roboczym odpowiedzialnym za zgrzewanie (bezpośrednie przejście z punktu 6 do 8 na rysunku 71) jeżeli jest taka możliwość techniczna, lub może być wykonane po nim (przejście z punktu 6 do 7 i potem do 8 na rysunku 71).

Biorąc pod uwagę niezbędne do wykonania operacje technologiczne, klasyczny proces doczołowego zgrzewania pasów ciągnowych może być podzielony na pięć głównych faz (Rys. 72-75 oraz 77), ze względu na odmienne zjawiska natury termomechanicznej, które zachodzą w każdej z nich [32, 34, 76].

Podczas wyrównywania powierzchni końcówek pasa na gorącej płycie (Rys. 72), zakończenia pasa (1a i 1b) przytrzymywane za pomocą kształtowych szczęk (2a i 2b) są dosuwane do gorącej płyty (3) i dociskane do niej z siłą F_w . W wyniku jej oddziaływania oraz kontaktu materiału pasa z gorącą płytą (o sztywności znacznie większej niż materiał pasa), rozgrzaną do temperatury o wartości T_p , zachodzi zjawisko ściskania w warunkach temperatury o zmiennej wartości. Biorąc pod uwagę fakt, że temperatura gorącej płyty T_p jest wyższa od wartości temperatury uplastycznienia tworzywa T_u (Rys. 31), w tym czasie rozpoczyna się formowanie wypływkę, w wyniku wstępnego nadtopienia pasa (1a i 1b) na gorącej płycie (3).

Częściowe nadtopienie powierzchni powoduje kształtowe dopasowanie się zakończeń pasa (1a i 1b) do płaskiej powierzchni gorącej płyty (3). Zjawisko to jest celowe i wywołuje następujące skutki:

- usunięcie nierówności powierzchni, które mogą być pozostałościami po wcześniejszych etapach przygotowania materiału do zgrzewania (np. po cięciu). Dzięki temu powierzchnie czołowe pasa (1a i 1b) stają się płaskie, gładkie i równoległe do siebie. Wpływa to pozytywnie na ich wzajemne pozycjonowanie w dalszych fazach procesu, co pozwala uzyskać właściwą jakość złącza,
- punktowe przewodzenie ciepła, pomiędzy gorącą płytą, a wierzchołkami mikronierówności powierzchni pasa (1a i 1b), zamieniane jest na przewodzenie kontaktowe obecne na całej powierzchni w kolejnych fazach procesu, co poprawia efektywność nagrzewania przez gorącą płytę (3).



Rys. 72. Wyrównywanie powierzchni czołowej pasa na gorącej płycie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta; F_w – siła docisku podczas wyrównywania powierzchni pasa na gorącej płycie, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia materiału pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane od pasa na drodze radiacji, Q_{r3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane od pasa na drodze konwekcji, Q_{c3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze konwekcji

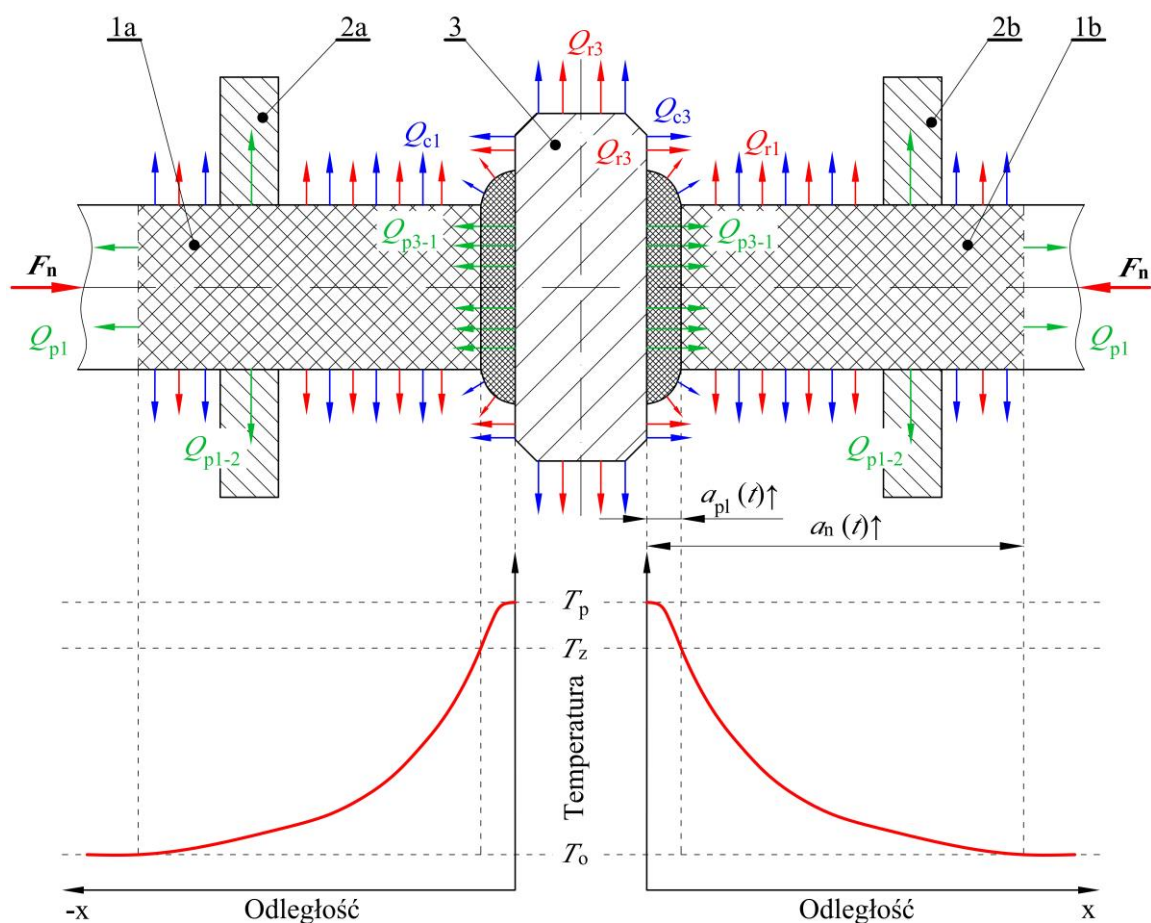
Podczas wyrównywania końcówki pasa (1a i 1b) na gorącej płycie (3), można zaobserwować zjawiska fizyczne związane z wymianą ciepła: przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. Biorąc pod uwagę poszczególne strumienie ciepła, można wyróżnić [34, 76, 163, 165, 166]:

- ciepło Q_{p3-1} przenoszone z gorącej płyty (3) do powierzchni pasa (1a i 1b) poprzez przewodnictwo kontaktowe,
- ciepło Q_{p1} przewodzone wewnątrz materiału pasa (1a i 1b),
- ciepło Q_{c3} oddawane od gorącej płyty (3) do pasa (1a i 1b) i do otoczenia poprzez konwekcję,
- ciepło Q_{r3} oddawane od gorącej płyty (3) do pasa (1a i 1b) i do otoczenia poprzez promieniowanie,
- ciepło Q_{c1} oddawane przez zewnętrzną powierzchnię walcową pasa (1a i 1b) do otoczenia poprzez konwekcję,
- ciepło Q_{r1} oddawane przez zewnętrzną powierzchnię walcową pasa (1a i 1b) do otoczenia poprzez promieniowanie.

Przyłożenie płaskiej powierzchni czołowej pasa do gorącej płyty powoduje nieliniowy wzrost jego temperatury wzdłuż osi, której wartość jest zmienna w czasie [58]. W związku z tym, podczas nagrzewania możliwe jest wyróżnienie dwóch charakterystycznych wymiarów geometrycznych:

- długości a_{pl} , na której temperatura materiału $T(x)$ w jego osi centralnej przekracza wartość temperatury zgrzewania T_z (wartość temperatury w której materiał jest uplastyczniony i gotowy do utworzenia trwałego złącza),
- długości a_n , na której temperatura materiału $T(x)$ w osi centralnej pasa przekracza wartość temperatury otoczenia T_o .

Podczas fazy właściwego nagrzewania (Rys. 73) zakończenia pasa (1a i 1b) są dociskane do gorącej płyty (3) przy użyciu szczęk (2a i 2b) z siłą F_n . Głównym założeniem fazy właściwego nagrzewania jest zwiększenie długości pasa rozgrzanej do temperatury uplastycznienia a_{pl} , do wartości zapewniającej najlepsze warunki do wykonania złącza w kolejnych fazach procesu. Skutkiem ubocznym tego działania, związanym z niezerowym przewodnictwem cieplnym materiału, jest zwiększenie długości odcinka a_n .

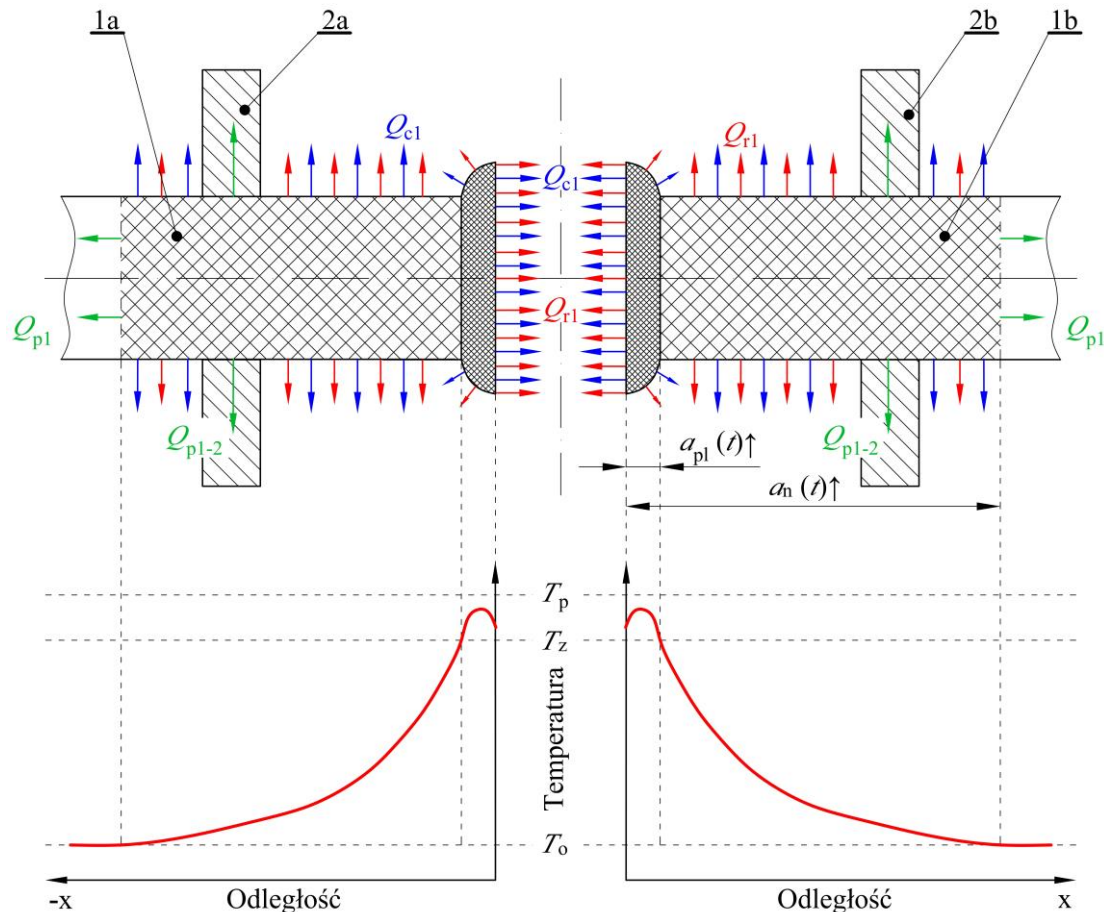


Rys. 73. Nagrzewanie pasa na gorącej płycie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta; F_n – siła docisku materiału do gorącej płyty podczas nagrzewania, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane od pasa na drodze konwekcji, Q_{r3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze konwekcji

W tej fazie zjawiska fizyczne związane z wymianą ciepła podczas zgrzewania są analogiczne jak w przypadku wyrównywania powierzchni pasa (Rys. 72), z tym że obszar konwekcji Q_{c1} oraz promienienia ciepłego Q_{r1} związany z zewnętrzną powierzchnią tworzącą pasa, jest rozszerzony w wyniku zwiększenia odległości a_{pl} oraz a_n . W zależności od wzajemnego położenia uchwytów pasa (2a i 2b) i gorącej

plyty (3) oraz szybkości przewodzenia ciepła w materiale, w tej fazie możliwe jest również występowanie kolejnego mechanizmu przenoszenia ciepła Q_{p1-2} , polegającego na kontaktowym przewodzeniu od powierzchni tworzącej pasa (1a i 1b) do odpowiednich szczęk (2a i 2b).

W fazie wycofywania urządzenia grzewczego z obszaru roboczego (Rys. 74), pas (1a i 1b) jest oddalany od płyty grzewczej (3) na niewielką odległość, po czym następuje jej wysunięcie w wyniku wykonania ruchu w płaszczyźnie prostopadłej do osi ciągu (1a i 1b). W wyniku tego działania, w tym etapie proces nagrzewania końcówek pasa jest zakończony.

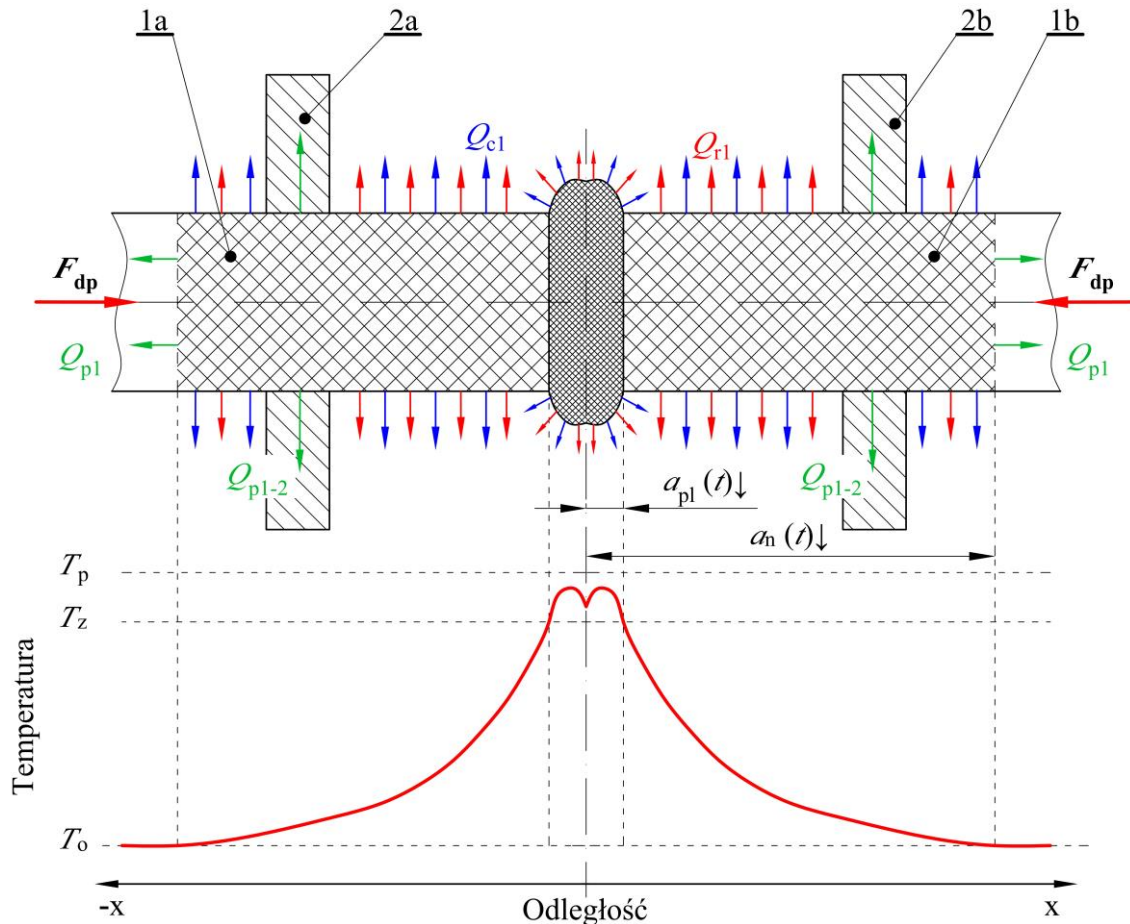


Rys. 74. Wycofanie gorącej płyty z obszaru roboczego: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem, a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

W związku z oddziaływaniem konwekcyjnym gazu znajdującego się w otoczeniu rozgrzanego materiału (oraz w pewnym zakresie radiacyjnym samego materiału pasa), zauważalnym jest spadek wartości temperatury zakończeń pasa (1a i 1b), szczególnie na płaskiej powierzchni czołowej. Należy pamiętać o tym, że z punktu widzenia prawidłowego przebiegu dalszych faz procesu, istotnym jest aby wartość temperatury zakończeń pasa (1a i 1b) nie obniżyła się do poziomu niższego niż temperatura zgrzewania T_z . Aby zapobiec temu zjawisku, zazwyczaj przyjmuje się, że wartość temperatury gorącej płyty T_p , powinna być wyższa o kilka lub kilkadziesiąt stopni [32, 33] od temperatury zgrzewania T_z , tak, aby uzyskać niezbędny zapas energii cieplnej, pozwalającej na utrzymanie końcówek pasa (1a i 1b) w temperaturze o wartości większej

od T_z . Biorąc pod uwagę również to, że takie ochładzanie materiału powoduje niepotrzebne straty energii cieplnej, czas technologiczny tej fazy procesu zgrzewania powinien być najkrótszy jak to tylko możliwe.

W fazie właściwego łączenia (Rys. 75), inaczej nazywanej fazą doprasowania, końcówki pasa (1a i 1b) są dosuwane do siebie, by następnie zostać dociśnięte do siebie z siłą F_{dp} . Ogólne zjawiska fizyczne związane z wymianą ciepła są bardzo podobne jak w poprzedniej fazie.

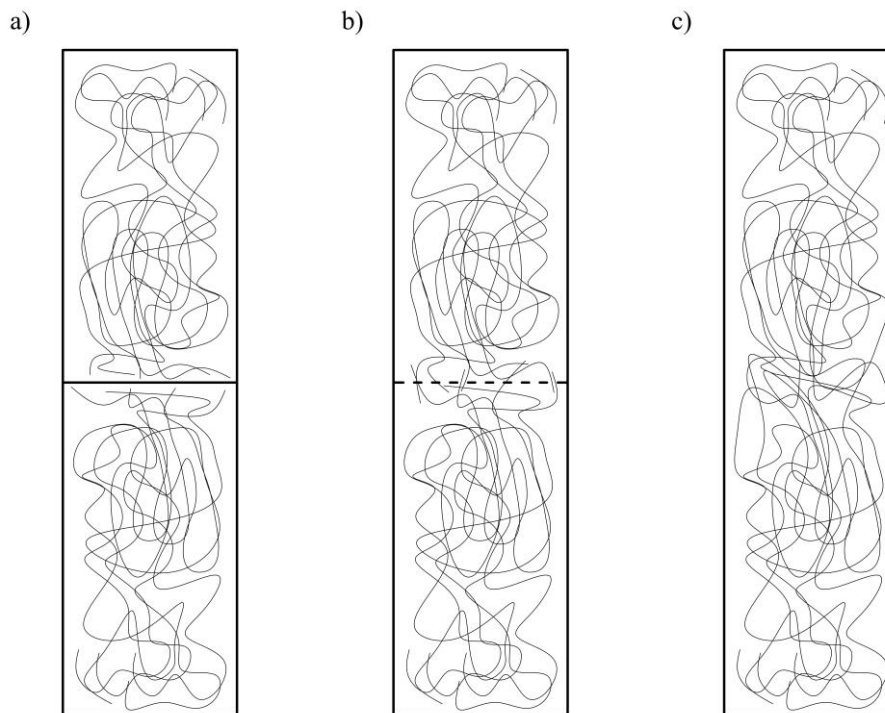


Rys. 75. Docisnięcie (doprasowanie) końcówek pasa do siebie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; F_{dp} – siła doprasowania końcówek pasa, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury powyżej temperatury otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem, a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

Przebieg tej fazy jest niezwykle istotny dla poprawności całego procesu zgrzewania, ponieważ rozpoczynają się w niej oddziaływania fizyczne i chemiczne pomiędzy uplastycznionymi końcówkami pasa (Rys. 76). Makrocząsteczki uplastycznionego oraz nadtopionego polimeru łączą się wskutek:

- reakcji chemicznych pomiędzy cząsteczkami składowymi tworzywa,
- oddziaływań fizycznych pomiędzy łańcuchami makrocząsteczek.

Zjawiska te związane są z dyfuzją cząsteczek pomiędzy obiema uplastycznionymi końcówkami pasa. Proces ten jest możliwy dzięki aktywacji termicznej łańcuchów makrocząsteczek, co stymuluje zachodzenie reakcji chemicznych. Dodatkowo łańcuchy polimerowe oddziałują mechanicznie ze sobą, splatając się. Układ dąży do uzyskania stanu stabilnego, w którym makrocząsteczki zachowują się podobnie jak w temperaturze pokojowej w litym materiale [34-36]. Dzięki temu rozpoczyna się trwałe łączenie tworzywa.



Rys. 76. Schematyczny przebieg relacji pomiędzy łańcuchami makrocząstek podczas zgrzewania doczołowego w fazie doprasowania materiału (opracowano na podstawie [35]): a) początek operacji z widoczną płaszczyzną podziału pomiędzy zgrzewanymi elementami, b) początek reakcji chemicznych i interakcji fizycznych między makrocząstkami, c) całkowite połączenie elementów, makrocząsteczki są ze sobą splecione oraz połączone chemicznie, płaszczyzna podziału zanika

W fazie chłodzenia złącza (Rys. 77) końcówki pasa (1a i 1b) są w dalszym ciągu dociskane do siebie, z siłą o wartości F_{ch} . Podczas niej następuje ochładzanie złącza, w wyniku wymiany ciepła z otoczeniem, czego obserwowalnym skutkiem jest obniżanie się temperatury materiału, aż do wartości temperatury otoczenia T_0 . W idealnym przypadku, złącze powinno być utrzymywane pod oddziaływaniem siły ściskającej F_{ch} przez cały czas chłodzenia. Główne założenia tej fazy brzmią:

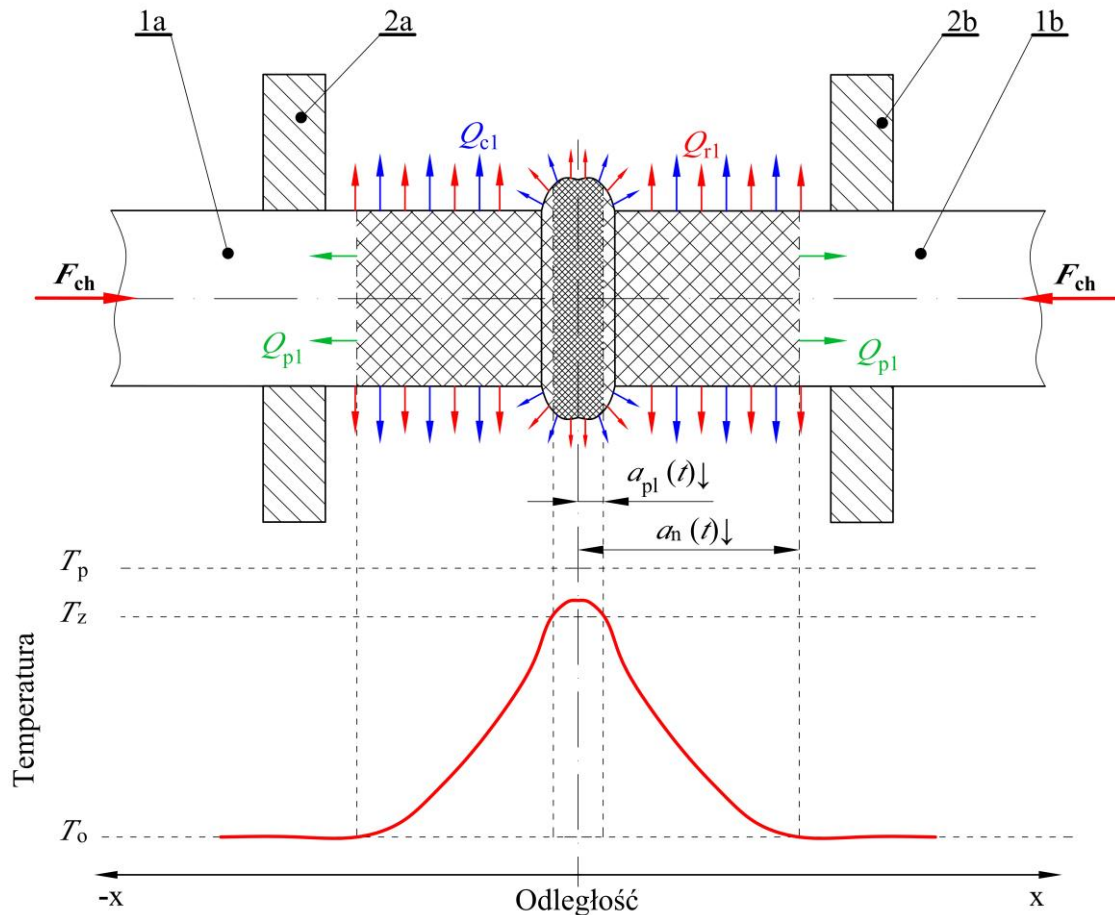
- temperatura pasa i złącza jest wyrównywana głównie w wyniku przewodnictwa cieplnego w strukturze materiału (ciepło Q_{p1}),
- reakcje chemiczne i interakcje mechaniczne pomiędzy makrocząstkami są kontynuowane,
- ochładzanie złącza następuje w wyniku wymiany ciepła z otoczeniem drogą konwekcji (Q_{c1}) i promieniowania (Q_{r1}).

Po zakończeniu chłodzenia złącza, pas może być poddawany dalszej obróbce polegającej m.in. na kontroli jakości złącza (rozdział 1.2) i usunięciu wypłytki.

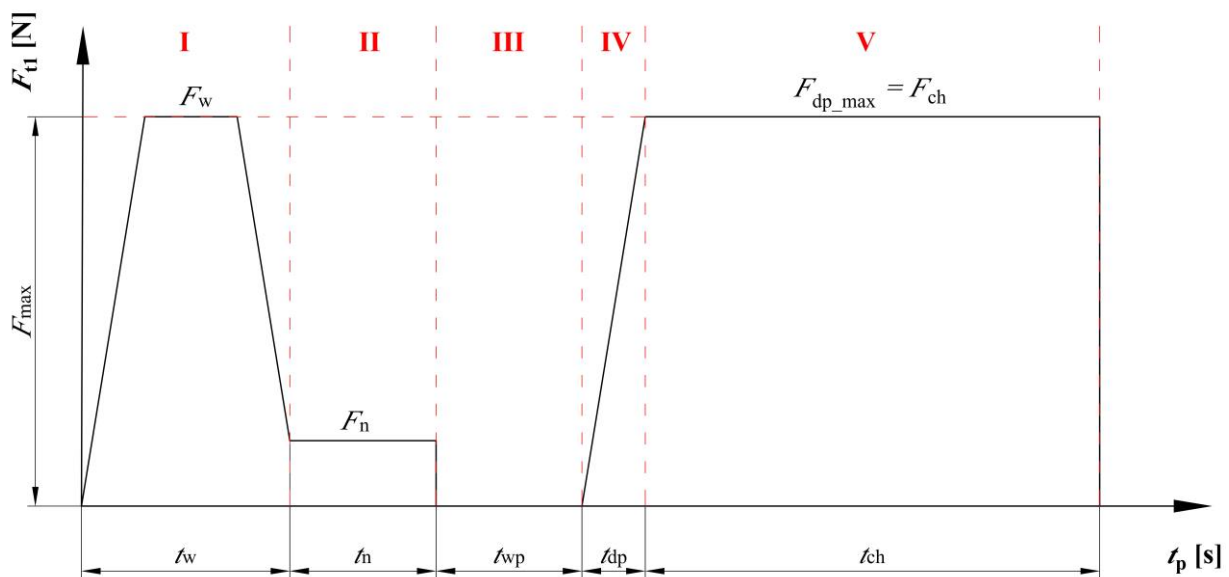
Przedstawiony klasyczny cykl zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty charakteryzuje się tym, że kontrola przebiegu tego procesu następuje na podstawie trzech niezależnie zmiennych parametrów:

- siły technologicznej F_{t1} o różnych wartościach w poszczególnych fazach (F_w , F_n , F_{dp} i F_{ch}),
- czasu trwania poszczególnych faz oraz ogólnego czasu trwania całego procesu,
- temperatury gorącej płyty T_p .

O ile wartość temperatury gorącej płyty T_p jest związana w zasadzie tylko z właściwościami zgrzewanego tworzywa i w związku z tym możliwości jej zmiany są dość ograniczone, o tyle wartości parametrów z pozostałych dwóch grup mogą być dowolnie kształtowane w zależności od konkretnego zastosowania.



Rys. 77. Chłodzenie złącza: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; F_{ch} – siła docisku podczas chłodzenia złącza, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury powyżej temperatury otoczenia; Q_{pl} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji



Rys. 78. Zależność poosiowej siły technologicznej F_{t1} od czasu trwania procesu t_p podczas zgrzewania doczołowego (opracowano na podstawie [33]): Etapy: I – wyrównanie powierzchni czołowej pasa, II – nagrzewanie, III – wycofywanie urządzenia grzewczego, IV – doprasowanie, V – właściwe łączenie i chłodzenie złącza; F_{t1} – poosiowa siła technologiczna (Rys. 24) przyjmująca wartości: F_w – podczas wyrównania, F_n – podczas nagrzewania, F_{dp} – w czasie łączenia (doprasowania); t_p – czas trwania całego procesu, składowe: t_w – wyrównania, t_n – nagrzewania, t_{wp} – wycofywania urządzenia grzewczego, t_{dp} – ponownego wzrostu siły docisku, t_{ch} – właściwego łączenia i chłodzenia złącza

Wzajemne zależności tych parametrów można prześledzić na podstawie standardowego cyklogramu procesu zgrzewania doczołowego (Rys. 78), przedstawiającego zależność wartości poosiowej siły technologicznej F_{t1} od czasu trwania procesu, podzielonego na pięć rozróżnialnych faz.

Poosiowa siła technologiczna F_{t1} , odpowiedzialna za docisk części zgrzewanej (do gorącej płyty lub wzajemny docisk uplastycznionych końcówek do siebie), charakteryzuje się tym, że przyjmuje wartość maksymalną w dwóch fazach procesu zgrzewania. W pierwszej kolejności jest to siła F_w we wstępnym etapie wyrównania powierzchni czołowej pasa, poprzez nadtopienie na rozgrzanej płycie. Drugim momentem, kiedy poosiowa siła technologiczna F_{t1} osiąga porównywalne, wysokie wartości, jest moment działania siły $F_{dp_max} = F_{ch}$ na koniec etapu doprasowania złącza i w konsekwencji podczas chłodzenia złącza. W fazie doprasowania, wyznacznikiem przebiegu procesu jest maksymalna osiągnięta wartość siły F_{dp} , ze względu na to, że w tej fazie nie jest ona stała, tylko narasta.

Zmniejszenie wartości poosiowej siły technologicznej F_{t1} do poziomu F_n , w drugiej części nagrzewania, wynika z dużego spadku sztywności tworzyw termoplastycznych, wraz ze wzrostem wartości temperatury. Tworzywo rozgrzane do temperatury o wartości przekraczającej granicę uplastycznienia, charakteryzuje się niską lepkością (i sztywnością), która znacznie spada z dalszym wzrostem wartości temperatury. Czynniki te powodują dużą wrażliwość rozgrzanego materiału na obciążenia zewnętrzne. W przypadku przyłożenia zbyt dużej siły docisku podczas nagrzewania, następuje nadmierne formowanie wypłytki. Powoduje to nieuzasadnioną stratę materiału oraz wypływanie uplastycznego tworzywa z obszaru zgrzewania, co może powodować powstawanie ubytków i pustek po połączeniu końcówek pasa. Z drugiej strony jednak, pewna niezerowa wartość siły F_n jest wymagana, aby uzyskać pewne warunki przewodzenia ciepła. Zazwyczaj, dla najbardziej charakterystycznego zastosowania zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty – czyli zgrzewania rur wykonanych z polietylenu lub polipropylenu, wartość siły F_n jest równa około 10% – 20% wartości siły F_w w pierwszej fazie operacji [34].

Wartości liczbowe tych sił, podawane w jednostkach bezwzględnych (np. w N), pomimo że są najbardziej intuicyjne, nie są jednak obiektywnym wyznacznikiem do jakościowego opisu procesu i porównywania jego przebiegu np. dla różnych materiałów. Wynika to z faktu, że właściwym wskaźnikiem jest naprężenie kontaktowe (ściskające) wywoływane przez poosiową siłę technologiczną F_{t1} , co zależy od pola przekroju poprzecznego zgrzewanego elementu. Ten parametr może być odnoszony do różnych materiałów. Przykładowo przyjmuje się, że ta wartość siły docisku podczas wyrównywania powierzchni F_w powinna powodować powstanie naprężeń kontaktowych o wartości od 0,05 MPa do 0,1 MPa, w przypadku zgrzewania rur wykonanych z polipropylenu [34].

Sumaryczny czas trwania procesu t_p zgrzewania opisaną metodą wynosi od kilku sekund do kilkunastu minut, w zależności od materiału oraz wymiarów gabarytowych zgrzewanych elementów [165]. Czas wyrównania powierzchni t_w jest zazwyczaj względnie krótki i trwa maksymalnie kilka sekund. Czas nagrzewania t_n zależy od masy nagrzewanego materiału oraz jego właściwości takich jak: współczynnik przewodzenia ciepła λ , ciepło właściwe C_p oraz gęstość ρ . Przyjmuje on zazwyczaj dużo większą wartość od czasu t_w i wynosi nawet kilkadziesiąt minut. Czas wysunięcia elementu grzejnego t_{wp} , określane również jako czas przerwy, wynosi maksymalnie kilka sekund i powinien być możliwie najkrótszy, aby zmniejszyć straty

energii. Dobór wartości czasu docisku uplastycznionych zakończeń do siebie t_{dp} nie jest zagadnieniem trywialnym. Z jednej strony nadmiernie długi czas doprasowania złącza t_{dp} powoduje niepotrzebne straty energii cieplnej. Z drugiej jednak strony, niska wartość tego parametru, wiąże się z wysoką wartością prędkości liniowej końcówek pasa, co może powodować nadmierne odkształcanie się uplastycznionego materiału, w wyniku dynamicznego oddziaływania zakończeń pasa na siebie. W związku z tym, dobór jego wartości powinien uwzględniać kompromis pomiędzy tymi dwoma zjawiskami. Czas chłodzenia złącza t_{ch} jest często najdłuższy, a jego wartość zależy od warunków chłodzenia i właściwości termicznych materiału. Parametr ten przyjmuje zazwyczaj wartość od kilkudziesięciu sekund do kilkunastu minut [33].

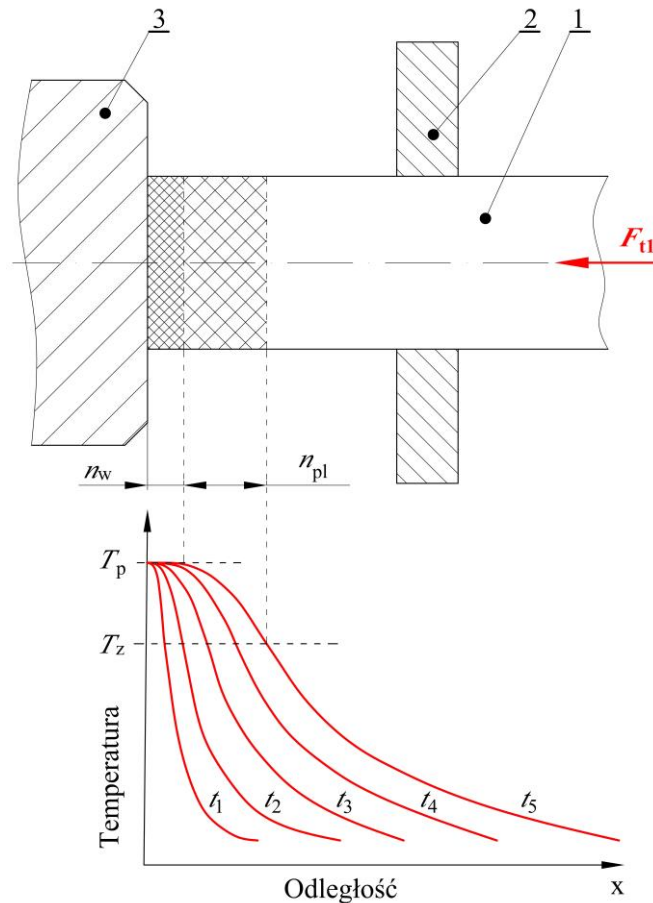
Temperatura zgrzewania T_z , to jeden z najważniejszych parametrów procesu zgrzewania, którego wartość jest ściśle związana z właściwościami materiału, który podlega tej operacji. Maksymalną wartość temperatury T_z ustala się na poziomie od 80°C do 90°C powyżej temperatury topnienia materiału T_t , dla polimerów częściowo skryształizowanych. W przypadku polimerów amorficznych, często przyjmuje się wartości z przedziału od 150°C do 160°C powyżej wartości temperatury zeszklenia T_g [28, 32, 33, 36, 89].

Postępowanie takie, zapewnia przekroczenie wartości temperatury uplastyczniania materiału T_u (Rys. 31), co pozwala na poprawne przeprowadzenie operacji zgrzewania, dzięki odpowiedniemu uaktywnieniu termicznemu łańcuchów polimerowych. Wartość temperatury zgrzewania T_z powinna umożliwić przejście polimeru w stan wysokoplastyczny. Należy jednak pamiętać o tym, aby nie przekroczyć wartości temperatury degradacji T_d tworzywa sztucznego [161].

Przepływ ciepła podczas nagrzewania materiału na gorącej płycie jest nieustalony, w związku z czym wartość temperatury tworzywa (którą można poddać analizie np. w osi symetrii pasa) zmienia się w czasie (Rys. 79). Ze względu na ten fakt, odległości rozgrzane do temperatury zgrzewania T_z (a_{pl}) oraz powyżej wartości temperatury otoczenia T_o (a_n) zwiększają swoją wartość wraz z upływem czasu, w fazie wyrównywania powierzchni, nagrzewania, a także częściowo w chwili bezpośrednio po wycofaniu urządzenia grzewczego. Na tej podstawie, podczas klasycznego zgrzewania doczołowego można również wyróżnić pewne wielkości geometryczne, które wynikają z przyjętych parametrów procesu, są to m.in.:

- naddatek n_w na wyrównanie, czyli długość pasa, która ulega nadtopieniu w początkowym etapie nagrzewania przy zwiększonej sile docisku, w celu wyrównania powierzchni czołowej,
- finalna grubość warstwy uplastycznionej n_{pl} , która opisuje ilość materiału rozgrzanej do temperatury wyższej od wartości temperatury uplastycznienia dla danego typu tworzywa.

Niezbędne wartości tych parametrów szacuje się najczęściej w sposób doświadczalny, co często jest związane z uwarunkowaniami technologicznymi w zakresie przygotowania materiału (np. wartość naddatku na wyrównanie powierzchni n_w uwzględnia możliwości technologiczne przygotowania powierzchni czołowej materiału do zgrzewania). W przypadku określania niezbędnej grubości warstwy uplastycznionej n_{pl} , dla tworzyw względnie sztywnych, zazwyczaj przyjmuje się: w przypadku polimerów częściowo kryształicznych wartość tego parametru powinna wynosić co najmniej 30% grubości łączonego materiału, a dla tworzyw amorficznych co najmniej 15% grubości zgrzewanego elementu [32]. Wytyczne dotyczące zgrzewania doczołowego pasów wykonanych z elastomerów termoplastycznych, dostępne w literaturze, wskazują na grubość warstwy uplastycznionej równej nawet 50% średnicy zgrzewanego pasa [88].

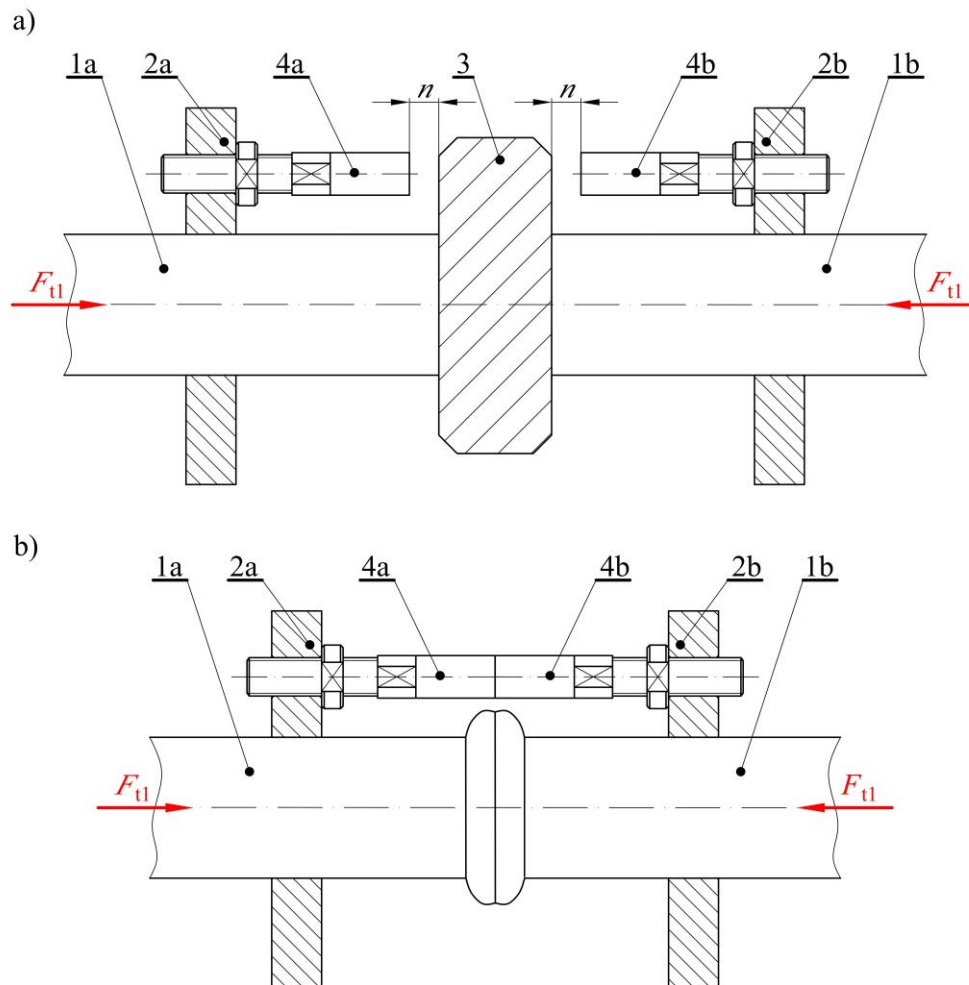


Rys. 79. Nadtapianie materiału wraz z oczekiwanym rozkładem temperatury w czasie (opracowano na podstawie [34]): 1 – element zgrzewany (np. pas), 2 – uchwyt, 3 – gorąca płyta; T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, n_w – naddatek materiału przeznaczony na wyrównywanie powierzchni elementu zgrzewanego, n_{pl} – naddatek materiału przewidziany na uplastycznienie (nadtapienie) na gorącej płycie, F_{t1} – poosiowa siła technologiczna, t – wartość czasu technologicznego nagrzewania z wyrównaniem: $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$

Niezwykle istotnym jest zagadnienie dotyczące sposobu kontroli procesu zgrzewania, w aspekcie zadania określonych parametrów technologicznych. Studiując doniesienia literaturowe można zauważyć, że znane są trzy metody kontroli tego procesu, wyróżniające się nieco odmiennymi zasadami dotyczącymi uplastyczniania i doprasowywania tworzywa:

- sterowanie z wykorzystaniem kontroli wartości poosiowej siły technologicznej F_{t1} w poszczególnych fazach procesu (Rys. 72-75 oraz 77) [23, 28, 32, 33, 37, 45, 52, 69, 76, 165-168], które jest zdecydowanie najczęściej przytaczaną metodą kontroli tego procesu,
- sterowanie przemieszczeniowe podczas którego kontrolowane parametry procesu to przemieszczenie zgrzewanych elementów oraz prędkości tych przemieszczeń. Metoda ta jest znacznie rzadziej spotykana i opisywana w literaturze, w szczególności naukowej. Informacje na temat jej zastosowania można znaleźć głównie w zakresie patentów [169, 170],
- sterowanie hybrydowe, w którym podstawowym kontrolowanym parametrem jest poosiowa siła technologiczna F_{t1} , ale uzyskiwane przemieszczenie podczas wyrównywania powierzchni, nagrzewania i doprasowywania jest ograniczone za pomocą mechanicznych elementów dystansujących (Rys. 80) [48, 49, 114, 115, 171, 172]. Zastosowanie regulowanych ograniczników (4a i 4b),

pozwała na utrzymanie określonego wcześniej nadatku na wyrównanie i uplastycznienie materiału (n na rusunku 16), poprzez regulację ich długości. Stanowi to wyraźną zaletę w stosunku do zgrzewania z regulacją siły jedynie poosiowej siły technologicznej F_{tl} . Wadą tego rozwiązania jest możliwość przzerwania kontaktu nagrzewanego materiału z gorącą płytą, gdy ruch uchwytów (2a i 2b) będzie ograniczony ogranicznikami (4a i 4b), a roztopione tworzywo wypłynie ze strefy, w której materiał jest już rozgrzany do temperatury zgrzewania T_z .



Rys. 80. Schemat przebiegu nagrzewania przedmiotu gorącą płytą z wykorzystaniem regulowanych ograniczników ruchu: n – naddatek na wykonanie połączenia, F_{tl} – poosiowa siła technologiczna; 1a i 1b – końcówki zgrzewanego elementu, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta, 4a i 4b – regulowane ograniczniki

Nowoczesne urządzenia do zgrzewania tworzyw polimerowych, wyposażone mogą być w takie układy napędowe przesunięć uchwytów pasa, które pozwalają na kontrolę i precyzyjne sterowanie przemieszczeniem zgrzewanych elementów, a także wywieraną poosiową siłą technologiczną F_{tl} , niezależnie od siebie w poszczególnych fazach procesu (Rys. 72-75 oraz 77). Dzięki temu sterowanie np. naddatkami na wykonanie złącza (n_w i n_{pl}) oraz poosiową siłą technologiczną F_{tl} może być realizowane w sposób ciągły, bez konieczności ręcznego przestawiania elementów dystansujących [173-175]. Niestety informacje na temat takiej realizacji procesu zgrzewania, dostępne są jedynie w zakresie opisu zastosowań praktycznych. Trudnym jest odnalezienie informacji naukowych na temat modelowania tego rodzaju zgrzewania.

Rozpatrując zgrzewanie doczołowe za pomocą rozgrzanej płyty, należy brać pod uwagę również możliwości nagrzewania bezkontaktowego. Stanowią je: nagrzewanie za pomocą promieniowania podczerwonego, światła białego lub strumienia gorącego gazu. W tym przypadku energia cieplna przenoszona jest nie poprzez przewodzenie kontaktowe pomiędzy gorącą płytą, a elementem zgrzewanym, ale dzięki promieniowaniu i konwekcji [163, 176]. Spośród nich najbardziej rozpowszechnione jest nagrzewanie energią promieniowania podczerwonego. Proces ten odbywa się dzięki wprowadzeniu pomiędzy zbliżone do siebie powierzchnie łączonych elementów, płyty rozgrzanej do temperatury o wartości znacznie przekraczającej granicę topnienia tworzywa, w taki sposób aby nie wchodziła ona w kontakt z nagrzewanymi powierzchniami. W przypadku zgrzewania polipropylenu (PP), temperatura nagrzewanej płyty osiąga wartość około 500°C, natomiast odległość pomiędzy rozgrzaną płytą, a tworzywem wynosi od 1 mm do 2 mm [176]. Rozgrzana do takiej temperatury płyta, emituje promieniowanie podczerwone o długości fali od 800 nm do 40 μ m, czyli światło niewidzialne dla oka. Powoduje to nagrzewanie sąsiadującej powierzchni czołowej pod wpływem promieniowania oraz konwekcji. Dodatkowo następuje zwiększanie temperatury w dalszych częściach objętości tworzywa, w wyniku absorpcji promieniowania podczerwonego, co powoduje aktywację makrocząsteczek polimeru. Dzięki temu występuje dodatkowy mechanizm nagrzewania materiału, przy czym należy pamiętać, że jedynie zaabsorbowane fale elektromagnetyczne powodują zwiększanie jego temperatury, natomiast odbite oraz przepuszczone stanowią o stratach energii w procesie [177]. Rozwiązanie takie ma wiele zalet w porównaniu do kontaktowego sposobu zwiększania temperatury, m.in.:

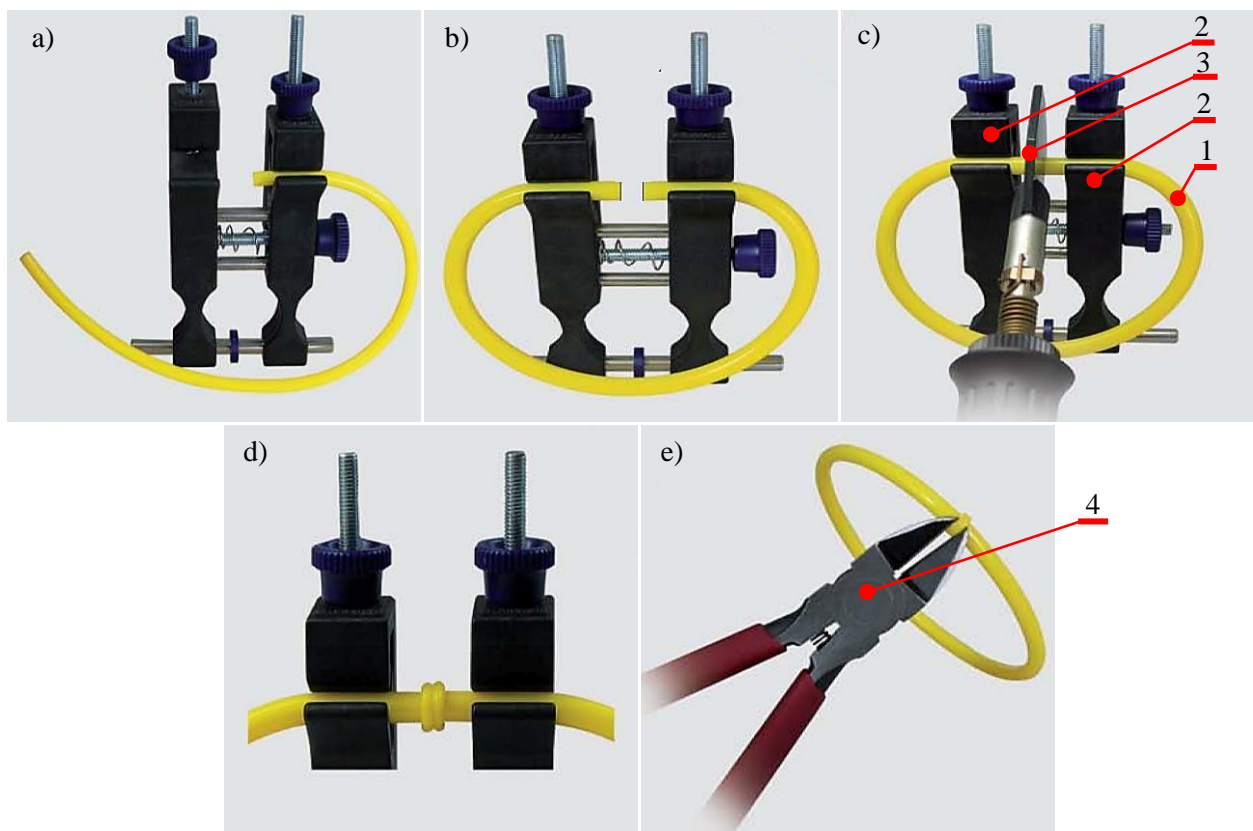
- wyeliminowanie konieczności wymuszenia siły docisku i sterowania jej wartością podczas nagrzewania, co wpływa na uproszczenie procesu. Jednocześnie w tym przypadku, można praktycznie całkowicie wyeliminować problem wypływania nadtopionego materiału z obszaru zgrzeiny,
- ograniczenie zjawiska nierównomiernego nagrzewania w przekroju poprzecznym, co jest wadą kontaktowego procesu zwiększania temperatury. W przypadku nagrzewania bezkontaktowego, temperatura w obszarze materiału zwiększa swoją wartość w sposób bardziej równomierny, głównie dzięki absorpcji promieniowania. W związku z tym, rozkład temperatury jest bardziej regularny, a jej wartość na powierzchni czołowej wzrasta nieco wolniej. Dzięki temu uzyskiwany jest efekt równomiernego uplastycznienia tworzywa, bez nadmiernego nadtopienia,
- brak kontaktu tworzywa z elementem grzewczym, co przekłada się na wyeliminowanie problemów przywierania cząstek materiału do niego. Skutkuje to brakiem konieczności stosowania specjalnych pokryć antyadhezyjnych na powierzchni nagrzewanej płyty,
- zmniejszenie sumarycznej ilości wypływki, z powodu braku konieczności mechanicznego oddziaływania na uplastycznione tworzywo podczas nagrzewania.

Ta metoda nagrzewania tworzyw posiada również pewne wady, w stosunku do klasycznego zwiększania wartości temperatury materiału, m.in.:

- uzależnienie przebiegu wzrostu temperatury od właściwości fizycznych nagrzewanego tworzywa. W tym przypadku na przewodzenie ciepła, wpływa nie tylko współczynnik przewodności cieplnej, ale również stopień absorpcji promieniowania. Parametr ten zależy nie tylko od jego składu chemicznego i struktury makrocząsteczek, ale także faktury i barwy powierzchni,

- brak etapu wyrównania powierzchni, poprzez wstępne nadtopienie na rozgrzanej płycie w związku z czym niedokładności powstałe w wyniku np. nieprostokątnego cięcia pasa, wpływają na przebieg etapu łączenia, przez co możliwe jest uzyskanie wadliwej zgrzeiny.

Zgrzewanie z wykorzystaniem nagrzewania bezkontaktowego jest istotną alternatywą dla klasycznego, kontaktowego zwiększania wartości temperatury końcówek pasa. Jednakże na etapie wstępnego wyboru technologii zgrzewania doczołowego pasów wstępnie zdecydowano o wykorzystaniu tradycyjnej, kontaktowej metody nagrzewania, głównie ze względu na większą przewidywalność zachowania się materiału łączonych pasów. Należy jednak zauważyć, że wymagania dotyczące mocowania oraz mechanizmów przemieszczania urządzeń grzejnych dla obu metod są podobne. Dzięki temu, przewidywana jest możliwość zmiany technologii nagrzewania, bez istotnych zmian konstrukcyjnych urządzenia.



Rys. 81. Doczołowe, ręczne łączenie pasa cięgnowego (opracowano na podstawie [88]): a) montaż pasa w uchwytach, b) ustalenie odległości pomiędzy powierzchniami czołowymi pasa, c) umieszczenie gorącej płyty urządzenia grzewczego pomiędzy zakończeniami pasa, d) dociśnięcie końcówek pasa do siebie w celu wykonania ich połączenia, e) usunięcie wypłytki powstałej po procesie; 1 – pas, 2 – uchwyt końcówek pasa, 3 – urządzenie grzewcze, 4 – szczypce do usuwania wypłytki

W odniesieniu do zgrzewania doczołowego pasów cięgnowych wykonanych z elastomerów termoplastycznych, metodą gorącej płyty, przy obecnym stanie techniki, producenci tych elementów rekomendują w zasadzie tylko jedno rozwiązanie – zgrzewanie ręczne, z kontrolą procesu za pomocą poosiowej siły technologicznej F_{tl} [6, 10-12, 18]. Nie znane są w praktycznym zastosowaniu zautomatyzowane urządzenia zgrzewające ten typ pasów, korzystające z innej metody kontroli przebiegu operacji.

Podstawowe oprzyrządowania ręczne do zgrzewania tego typu pasów (Rys. 81) stanowią: uchwyt do mocowania końcówek pasa (2) na czas zgrzewania, płytowe urządzenie grzewcze (3) oraz szczypce tnące

boczne (4) do usuwania wyływki. Konstrukcja uchwytu (2) jest taka, że zapewnia on pewne chwycenie obu końcówek pasa (1) i ich współosiową orientację, dzięki zastosowaniu prostej prowadnicy liniowej części roboczych tego uchwytu. Poosiowa siła technologiczna F_{tl} zadawana jest w takim przypadku ręcznie przez operatora, poprzez ściskanie rękojeści uchwytu (2).

Prace badawcze dotyczące zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych prowadzono już wielokrotnie, w różnorodnych aspektach. W literaturze naukowej, możliwe jest pozyskanie informacji zarówno na temat prac badawczych skupionych głównie na inżynierii materiałowej, ale także dotyczących zgrzewania konkretnych produktów, czy wdrożenia tej technologii w przemyśle.

Stokes prowadził wiele zaawansowanych prac badawczych w dziedzinie zgrzewania tworzyw sztucznych. Dotyczą one głównie wyznaczania korelacji pomiędzy względną wytrzymałością spoiny, a parametrami procesu zgrzewania. W przypadku badań dotyczących poliwęglanu [113], opracowano zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem przy zerwaniu spoiny, w zależności od podstawowych parametrów procesu: wartości temperatury gorącej płyty T_p , czasu nagrzewania t_n i chłodzenia spoiny t_{ch} oraz sposobu przygotowywania próbek do zgrzewania. Badania te były wykonywane przy zastosowaniu hybrydowej metody sterowania zgrzewaniem (Rys. 80). Obszerne wyniki tych badań stanowią niejako bazę danych dotyczących zgrzewania tego materiału. W innych, aczkolwiek bliźniaczych pracach badacz ten uzyskał podobne zbiory danych dla poli(tereftalanu butylenu) [114] oraz polieteroimidu [115]. Kolejne jego prace dostarczają informacji na temat porównania właściwości wytrzymałościowych spoin zgrzewanych wykonanych z innych materiałów [171, 172], przy zastosowaniu tej samej metody kontroli procesu.

Potente prowadził prace badawcze nad zgrzewaniem doczołowym metodą gorącej płyty. Jego badania związane były głównie z modelowaniem i optymalizacją tego procesu, z wykorzystaniem zagadnień związanych z wymianą ciepła i modelami reologicznymi. W pracach [166] i [76] wskazano jeden ze sposobów modelowania tego procesu, dla jednoosiowego zgrzewania względnie sztywnego tworzywa termoplastycznego, przy czym otrzymane wyniki zostały zweryfikowane empirycznie. Wnioski z tej pracy wskazują na szerokie spektrum zjawisk fizycznych zachodzących podczas tego procesu, w kontekście wymiany ciepła pomiędzy gorącą płytą, zgrzewanym materiałem i otoczeniem. W pracy tej udowodniono, że zjawiska powodujące straty energii (w szczególności konwekcja, promieniowanie oraz przewodzenie ciepła do uchwytów), choć mają wpływ na przebieg operacji (głównie ze względu na rozkład temperatury), to przy zapewnieniu odpowiednich warunków zgrzewania (lub uwzględnieniu poprawek ze względu na straty energii), nie powodują znaczących trudności w przebiegu tej operacji. Prace te były kontynuowane i zostały uzupełnione o analizę pęknięć złącz zgrzewanych w zależności od parametrów procesu [178] (co również, w podobnym zakresie jest przedstawione w pracach innych autorów m.in. [179]). Potente prowadził również badania związane z wpływem kształtowania geometrii kontaktu przed wykonaniem złącza, na jego wytrzymałość [180]. W badaniach tych testowano różny kształt końcówek zgrzewanych elementów (nadawano im taką geometrię, aby nie były płaskie, tylko tworzyły dopasowany do siebie wzór pozwalający na powiększenie powierzchni kontaktu). Udowodniono, że działanie to nie jest konieczne, ponieważ nie wpływa zauważalnie na finalną wytrzymałość połączenia (takie same wyniki w tym aspekcie zostały również uzyskane przez inny zespół badawczy, w pracy [168]), a jedynie stanowi dodatkową trudność

technologiczną. Potente prowadził również prace nad uniwersalnym opisywaniem praw dotyczących wymiany ciepła w procesie i właściwości reologicznych na potrzeby uproszczenia modelu [181], dla różnych przypadków zgrzewania. W rezultacie, uzyskano model zgrzewania dla sztywnych tworzyw termoplastycznych, opisywany za pomocą współczynników bezwymiarowych. Badania nad optymalizacją procesu zgrzewania, prowadzone były przez niego z wykorzystaniem narzędzi wspomagania komputerowego [182], w celu urzeczywistnienia takiej możliwości oraz na potrzeby wdrożenia konkretnego urządzenia zgrzewającego [183, 184]. Wszystkie prace jego zespołu badawczego, związane z tą tematyką charakteryzują się czterema wspólnymi czynnikami:

- autorzy posługują się w nich opisem procesu zgrzewania z uwzględnieniem wszystkich zjawisk wymiany ciepła, stosując jednak przybliżone i szacowane wartości poszczególnych współczynników dotyczących tych zjawisk. Wynika to z faktu, że określenie niektórych parametrów fizycznych, dotyczących w szczególności konwekcji czy promieniowania jest problematyczne,
- stosowane jest zgrzewanie z kontrolą procesu za pomocą poosiowej siły technologicznej F_{tl} w poszczególnych fazach procesu, bez kontroli przemieszczenia,
- analizowane są procesy zgrzewania doczołowego względnie sztywnych tworzyw sztucznych (poliwęglanu, kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren, polimetakrylanu akrylu czy polietylenu o wysokiej gęstości), które charakteryzują się tym, że ich właściwości termomechaniczne są dość dobrze rozpoznane, a zachowanie podczas ściskania w takich warunkach przewidywalne,
- klasyfikacja poszczególnych faz procesu zgrzewania dokonywana jest na podstawie rzeczywistych zjawisk fizycznych podczas nich zachodzących.

Prace nad optymalizacją procesu zgrzewania prowadzili również Nonhof [185], Cocard [165] i Poopat [186], dla zgrzewania klasycznego z wykorzystaniem kontaktowej metody nagrzewania powierzchni. Prace te, podobnie jak publikacje Potente [182-184], w zakresie szeroko pojętej optymalizacji procesu zgrzewania wyróżniają się na tle innych, tym że przedstawione w nich wnioski odniesione są bezpośrednio do przemysłowych zastosowań tej metody łączenia, w celu praktycznego zastosowania.

Prace Poopat'a zarówno w zakresie zgrzewania z wykorzystaniem kontaktowej metody nagrzewania powierzchni [186] jak i bezkontaktowej [163], charakteryzują się tym, że w sposób eksperymentalny wykazane zostały zależności pomiędzy podstawowymi parametrami procesu technologicznego takimi jak: grubość warstwy uplastycznionej, czas nagrzewania oraz temperatura gorącej płyty, a wytrzymałością złącza, dla polietylenu wysokiej gęstości. W związku z tym, publikacje te mogą stanowić swego rodzaju bazę danych eksperymentalnych dla zgrzewania tego materiału, z kontrolą procesu za pomocą siły technologicznej. Z autorem tym, współpracowali często Benatar i Mokhtarzadeh, którzy prowadzili szereg prac badawczych w dziedzinie zgrzewania tworzyw sztucznych. Ich obszar tematyczny obejmuje jednak głównie porównanie różnych metod zgrzewania w aspekcie wytrzymałości złącza dla zgrzewania takiego samego materiału [45] oraz łączenia różnych tworzyw sztucznych ze sobą [46, 47]. Dodatkowo badacze ci, prowadzili również prace nad analizą naprężeń termicznych powstałych po zgrzewaniu [52, 187], a także badania nad kontaktowym [109] i bezkontaktowym [163, 176] sposobem zwiększania temperatury zgrzewanego tworzywa. Prace tych trzech autorów i ich współpracowników, podobnie jak w przypadku prac Potente,

wyróżniają się tym, że analizowana jest kontrola procesu zgrzewania za pomocą regulacji poosiowej siły technologicznej F_{t1} tam gdzie to możliwe (np. w przypadku zgrzewania bezkontaktowego, dotyczy to jedynie doprasowania złącza).

Oprócz wyżej wymienionych badaczy, którzy opracowali dużą liczbę prac dotyczących zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych (co świadczy o tym, że ośrodki badawcze z których pochodzą zajmowały się tym procesem w szerszym zakresie), w literaturze znaleźć można prace naukowców, którzy popełnili mniejszą ilość publikacji co świadczy o mniejszej skali prac prowadzonych w tym temacie.

Watson [69] badał proces zgrzewania względnie sztywnych tworzyw sztucznych, na przykładzie łączenia elementów składowych zbiorników wykonanych z polipropylenu (PP) oraz poliestru fenylowego (PPE). Na podstawie wykonanych prac, w sposób eksperymentalny wykazał zależność wytrzymałości złącza od parametrów technologicznych procesu łączenia, m.in.: czasu nagrzewania, siły docisku zgrzewanych elementów do gorącej płyty (podczas uplastyczniania) lub siły przyłożonej podczas doprasowania złącza. Wyniki jego badań, wskazują na znaczącą pozytywną korelację pomiędzy wartością wytrzymałości spoiny (opisywaną jako maksymalne naprężenie towarzyszące pęknięciu przy rozciąganiu), a czasem nagrzewania materiału, szczególnie dla polipropylenu. Dodatkowo, wykazano takie parametry jak: siła docisku podczas uplastyczniania i doprasowania złącza czy przemieszczenie w poszczególnych fazach operacji, niejednoznacznie wpływają na wytrzymałość złącza. Znacznie większy wpływ na jego końcowe parametry ma rodzaj zgrzewanego tworzywa oraz jego przygotowanie do procesu.

Gehde [167] prowadził prace badawcze nad zgrzewaniem różnych odmian polipropylenu, w kontekście analizy wad złącza powstałych podczas zgrzewania z różnymi parametrami oraz wytrzymałości spoiny. Prace te skupione były na analizie mikrostruktury spoiny i wpływie jej niedoskonałości na wytrzymałość złącza. Jakość spoiny określaną wymiernymi współczynnikami uzależniono od parametrów technologicznych procesu zgrzewania, m.in. od siły docisku podczas uplastyczniania materiału oraz doprasowania złącza. We wnioskach tej pracy wskazano, że mechanizm uszkodzenia złącza zależy nie tylko od typu zgrzewanego materiału, ale także od parametrów technologicznych procesu. Dodatkowo wykazano, że dla tego materiału zwiększanie siły doprasowania złącza wpływa pozytywnie na jego wytrzymałość, ale tylko do pewnego stopnia. Nadmierna wartość tego parametru technologicznego może skutkować powstawaniem pęknięć w obszarze spoiny, po jej ostygnięciu.

Riahi prowadził prace badawcze analityczne i numeryczne nad zgrzewaniem polietylenu [111]. Głównym celem ich działań było opracowanie zależności wiążącej wytrzymałość złącza zgrzewanego z parametrami procesu: wartością temperatury gorącej płyty oraz czasem trwania poszczególnych faz. Oliveira natomiast badał uplastycznienie polipropylenu w celu oszacowania wielkości i struktury wypłytki, dla monolitycznej [188] i kompozytowej struktury [108], powstałej na bazie tego materiału. Zgrzewanie struktur kompozytowych przeprowadzono już również w odniesieniu do łączenia różnych polimerów ze sobą [189], a także polimerów z materiałami należącymi do innych grup – np. metalami [190].

Wielu badaczy prowadziło również prace naukowe nad jedną z najbardziej istotnych operacji zachodzących podczas zgrzewania – uplastycznianiem materiału. Wood [191] w swojej pracy zaprezentował podejście do uplastyczniania sztywnego materiału polimerowego z wykorzystaniem równań ciągłości przepływu

i klasycznego podejścia termodynamicznego. Yoo [192] zamodelował operację uplastyczniania tworzywa z wykorzystaniem metody elementów skończonych używając rozwiązania Galerkina. Ezekoye i Nieh wykorzystali w tym samym celu teorie dyfuzji łańcuchów polimerowych [158] i termodynamiczne liczby podobieństwa [193], otrzymując w ten sposób niezależnie od siebie uproszczone modele uplastyczniania z możliwością prognozowania wytrzymałości spoiny. Lee [194], w sposób eksperymentalny z wykorzystaniem m.in. różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) oraz analizy termogravimetrycznej (TG), wykazał korelację pomiędzy stopniem uplastyczniania materiału podczas zgrzewania, a parametrami tej operacji technologicznej.

Wielu badaczy zajmowało się również termodynamicznym procesem wymiany ciepła, pomiędzy nagrzewanym materiałem a gorącą płytą, m. in.: Savija [195] oraz Kim [196], głównie w aspekcie kontaktowego oporu termicznego podczas nagrzewania materiału w zgrzewaniu metodą gorącej płyty. Myers [197] i Poslinski [159] prowadzili badania nad wymianą ciepła pomiędzy gorącą płytą, a nagrzewanym tworzywem. Opis zjawisk wtedy zachodzących, oparli na klasycznych prawach wymiany ciepła.

Analiza obecnego stanu wiedzy na temat procesu technologicznego zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty wskazuje, że podejmowane dotychczas prace badawcze dotyczą zgrzewania tworzyw sztucznych o właściwościach termoplastycznych i względnie dużej sztywności w standardowej temperaturze otoczenia (głównie takich materiałów jak: poliamid, poliwęglan, polietylen, polipropylen czy kopolimer akrylonitryl-butadien-styren). Przytaczane w literaturze przypadki, w większości skupione są na łączeniu elementów o względnie złożonym kształcie przekroju poprzecznego (np. zbiorniki, butelki, obudowy urządzeń elektrycznych). Elementy takie charakteryzują się tym, że ich podatność na wyboczenie jest niewielka, w porównaniu np. do pasów ciągnowych o przekroju kołowym, stałych wymiarach i średnicy zaledwie kilku milimetrów.

Biorąc pod uwagę zjawiska fizyczne zachodzące podczas takiego zgrzewania, powszechnym jest modelowanie przebiegu tego procesu jako zbioru operacji ściskania materiału, w warunkach zmiennej temperatury, której wartość powoduje plastyczne płynięcie tworzywa. Zjawiska te zachodzą podczas wstępnego nadtapiania i nagrzewania elementu zgrzewanego, a także w trakcie fazy dociskania nadtopionych powierzchni do siebie. Naturalnym skutkiem takiego podejścia do opisu procesu, jest analizowanie zmian wartości poosiowej siły technologicznej F_{tl} (lub wywołanego jej działaniem naprężenia) w poszczególnych fazach procesu (F_w , F_n , F_{dp} oraz F_{ch}), zamiast przemieszczenia lub prędkości elementu zgrzewanego. Metodyka ta jest powszechna w pracach wielu autorów, niezależnie od odstępstw w finalnej, praktycznej realizacji procesu, które polegają np. na stosowaniu ograniczników przemieszczenia uplastycznianego elementu. Przekłada się to bezpośrednio na aplikacje przemysłowe, w których powszechnym jest stosowanie regulacji siły lub ciśnienia docisku, w celu utrzymania stałych, ściśle określonych wartości tych parametrów w poszczególnych fazach procesu.

Przegląd stanu wiedzy na temat procesu zgrzewania dostarcza również informacji o braku jednoznacznego, kompleksowego podejścia do modelowania procesu zgrzewania doczołowego, a w szczególności operacji uplastyczniania materiału, w aspekcie stałej prędkości przemieszczenia elementu zgrzewanego z uwzględnieniem wartości wszystkich parametrów technologicznych, czyli:

- poosiowej siły technologicznej,
- prędkości w poszczególnych fazach,
- temperatury,
- czasu.

Dostępne wyniki prac badawczych skupiają się raczej na wybranych aspektach tego typu zgrzewania (np. rozkład temperatury, pęknięcia spawalnicze, optymalizacja), w ściśle określonych, ograniczonych warunkach procesu. W związku z tym, w przypadku potrzeby zastosowania tej metody, celowe jest podjęcie prac badawczych w kierunku wyznaczenia parametrów technologicznych w warunkach regulowanej prędkości i przemieszczenia.

5.2. Proponowana technologia zgrzewania pasów napędowych i transportujących

W odniesieniu do opracowywanej technologii zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących z wykorzystaniem metody gorącej płyty, które ma stanowić usprawnienie procesu produkcyjnego oraz zastąpić dotychczas stosowaną ręczną metodę wykonywania złączy (Rys. 81), należy przeanalizować kilka czynników natury technologicznej, w celu zaproponowania rozwiązania, które w tym przypadku jest możliwe do przemysłowego wdrożenia.

Proces zgrzewania ze sterowaniem za pomocą poosiowej siły technologicznej F_{tl} charakteryzuje się tym, że końcowa wartość parametrów geometrycznych zgrzewanych przedmiotów jest dość trudna do ustalenia. Wynika to z faktu, że przemieszczenia uzyskiwane w kluczowych fazach procesu (wyrównywanie powierzchni, nagrzewanie oraz doprasowanie), które wpływają bezpośrednio na wymiary geometryczne gotowego produktu, zależą w dużym stopniu od wartości poosiowej siły technologicznej F_{tl} , a także od właściwości fizycznych materiału, zarówno mechanicznych jak i termicznych. Wartości poszczególnych przemieszczeń uzyskiwanych w tych fazach wynikają z wzajemnego bilansu prędkości odkształcenia i szybkości nagrzewania się materiału. W skrajnym przypadku, przy założeniu względnie wysokiej wartości poosiowej siły technologicznej, zależność pomiędzy przewidywanym naddatkiem na wykonanie połączenia (n na rysunku 16), długością obszaru rozgrzanego do temperatury zgrzewania T_z (a_{pl} na rysunkach 72-75 oraz 77), a nadatkami technologicznymi (n_w oraz n_{pl} na rysunku 79) przyjmuje postać:

$$n = \max a_{pl} = n_w + n_{pl}. \quad (5.1)$$

Należy jednak zauważyć, że jest to wartość szacowana, maksymalna do osiągnięcia. Fakt ten powoduje, że końcowa długość obwodu pasa L_o może być trudna do przewidzenia w precyzyjnym zakresie.

Elastomery termoplastyczne, z których wykonywane są pasy napędowe, charakteryzują się niewielką sztywnością, a także dużym jej spadkiem wraz ze wzrostem wartości temperatury. Cechy te w szczególności dotyczą materiału przyjętego do prac badawczych – poliuretanowego elastomeru termoplastycznego TPU C85A (Rys. 54), który jest jednym z częściej stosowanych do produkcji przemysłowych pasów ciągnowych [11].

W analizowanym przypadku zgrzewaniu zazwyczaj podlegają kształtki o przekroju kołowym i niewielkiej średnicy d . Niewielka sztywność materiału podlegającego plastycznemu płynięciu w obszarze gorącej płyty, a także podatność na wyboczenie (ze względu na prosty kształt przekroju poprzecznego i niewielkie

wymiary geometryczne) mogą powodować, że wymagane wartości poosiowej siły technologicznej F_{t1} w poszczególnych fazach procesu będą niewielkie. W realiach przemysłowego zastosowania takiej metody kontroli procesu, precyzyjne sterowanie wartością siły może być w tym przypadku utrudnione. Wynika to z możliwości uzyskiwania potencjalnie dużych procentowych odchyłek siły F_{t1} (wobec spodziewanych niewielkich wartości liczbowych tego parametru). Przekazywanie takiej informacji do układu sterowania zautomatyzowanego urządzenia, może powodować niejednorodne warunki podczas zgrzewania różnych pasów, co z kolei zaburzy ideę automatyzacji procesu zgrzewania, której głównym celem jest poprawa jakości i powtarzalności wykonywanych zgrzein.

Znacznie lepszym rozwiązaniem w tym przypadku, wydaje się być sterowanie przemieszczeniem i prędkością przemieszczenia zakończenia pasa w poszczególnych fazach procesu zgrzewania. Należy przez to rozumieć, utrzymywanie stałej wartości prędkości przemieszczenia końcówek pasa w poszczególnych fazach procesu oraz realizowanie przez człony robocze urządzenia zadanych wartości przemieszczeń, co w obecnym stanie techniki jest znacznie łatwiejsze do zrealizowania. Podejście takie ułatwi utrzymanie precyzyjnie określonej długości cięgna po zgrzewaniu L_0 .

Z punktu widzenia konstrukcyjnego, rozważając budowę zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, taki sposób sterowania tym procesem wymaga raczej zastosowania elektromechanicznego układu napędowego odpowiedzialnego za wywoływanie przemieszczeń roboczych (w celu uplastyczniania i doprasowania materiału), zamiast pneumatycznego, którego zastosowanie miałyby uzasadnienie w przypadku sterownia poosiową siłą technologiczną F_{t1} . Takie podejście umożliwia uzyskanie następujących korzyści w aspekcie konstrukcji i technologiczności urządzenia:

- pozwoli na poprawę precyzji zadawania i kontroli parametrów technologicznych związanych z ruchem elementów roboczych w poszczególnych fazach procesu. W ten sposób wykluczone również zostanie zjawisko stick-slip, które może zachodzić w siłownikach pneumatycznych przy niskiej wartości ciśnienia zasilającego (w przypadku niewielkich sił roboczych). Zjawisko to mogłoby w znaczący sposób wpłynąć na przebieg uplastyczniania i doprasowania końcówek pasa,
- uproszczenie konstrukcji urządzenia, ze względu na to że układ napędowy odpowiedzialny za przemieszczeniowe sterowanie jego zespołami roboczymi, może być zintegrowany z aparaturą odpowiedzialną za dokonywanie odpowiednich pomiarów (przemieszczenia i prędkości przemieszczenia). W takim przypadku nie ma konieczności instalowania w urządzeniu dodatkowej aparatury pomiarowej, odpowiadającej za rejestrację wartości siły lub ciśnienia. Należy również zauważyć, że powszechnie stosowane w przemyśle rozwiązania układów pomiarowych przemieszczeń (np. enkodery cyfrowe) są łatwe do zaimplementowania w logicznych układach sterujących urządzeń przemysłowych, w przeciwieństwie do np. sensorów siły lub ciśnienia.

Podczas projektowania technologii i urządzenia do zgrzewania doczołowego, niezwykle istotnym jest również zagadnienie efektywności energetycznej. Dostarczanie energii cieplnej do zgrzewanego materiału następuje podczas dwóch pierwszych faz (Rys. 72 i 73). Po uwzględnieniu faktu, że w tym czasie występują również straty energii, wynikające z interakcji gorącej płyty (3) oraz pasa (1a i 1b) z otoczeniem, należałoby maksymalnie skrócić czas ich trwania. Stan taki można osiągnąć m.in. poprzez zmniejszenie wymaganej

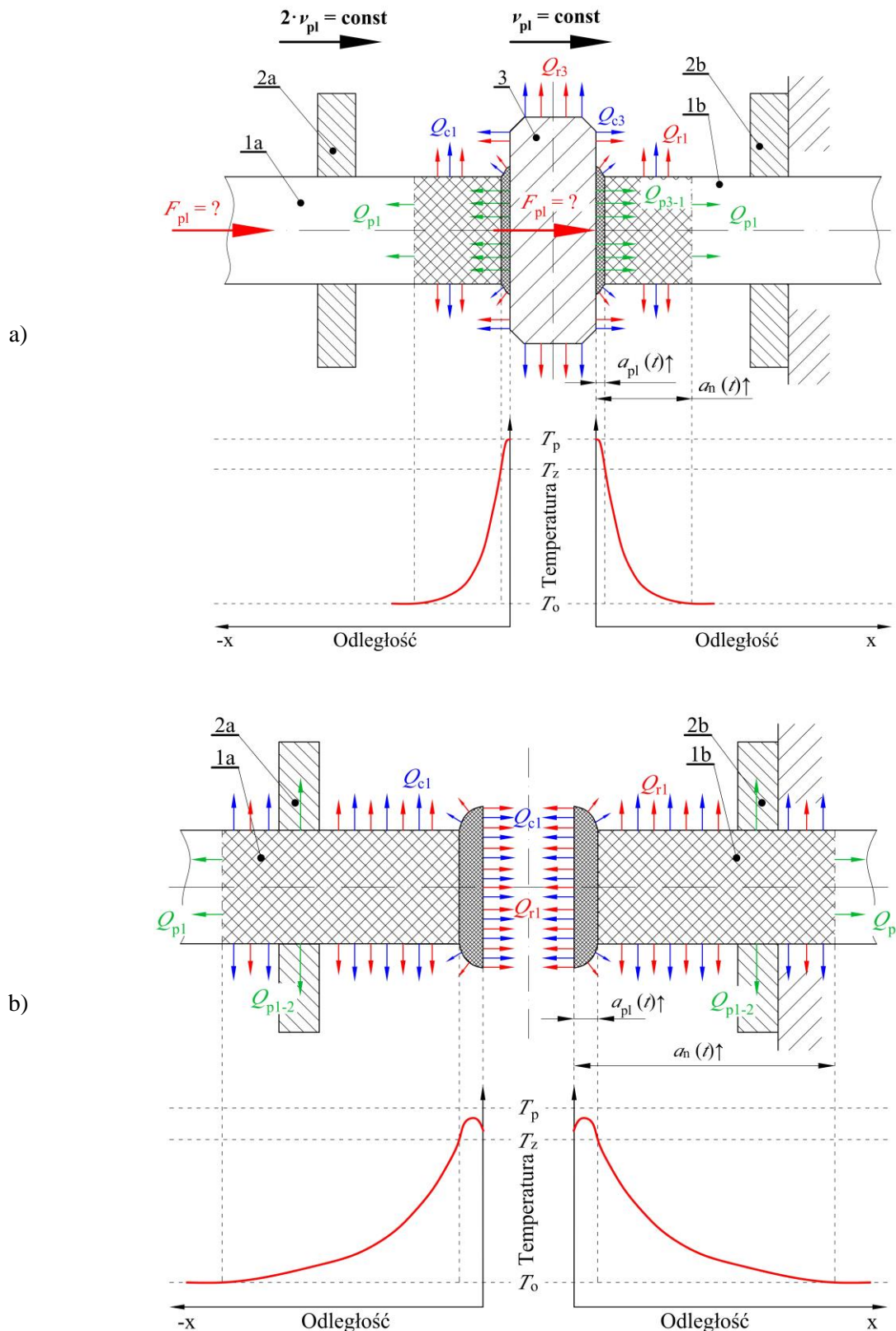
odległości uplastycznienia n_{pl} do najmniejszej możliwej wartości, zapewniającej wykonanie poprawnej zgrzeiny. Drugim potencjalnym sposobem skrócenia czasu nagrzewania tego materiału, jest zwiększenie wartości temperatury gorącej płyty T_p , jednakże możliwości te są ograniczone, ze względu na możliwość degradacji termicznej polimeru po przekroczeniu temperatury o wartości T_d .

Efektywność energetyczną procesu można również poprawić skracając czas wysuwania gorącej płyty (3) z obszaru pomiędzy zakończeniami pasa (1) w trzeciej fazie procesu (Rys. 74). W odróżnieniu od klasycznego przeprowadzania procesu zgrzewania, w projektowanym urządzeniu zautomatyzowanym, gorąca płyta może być wysuwana bez odsuwania zakończeń pasa od niej. W celu ograniczenia efektu odkształcania uplastycznionego tworzywa, jej powierzchnia może być pokryta tworzywem, zapewniającym niewielki współczynnik tarcia we współpracy z powierzchnią czołową uplastycznianego pasa, np. teflonem.

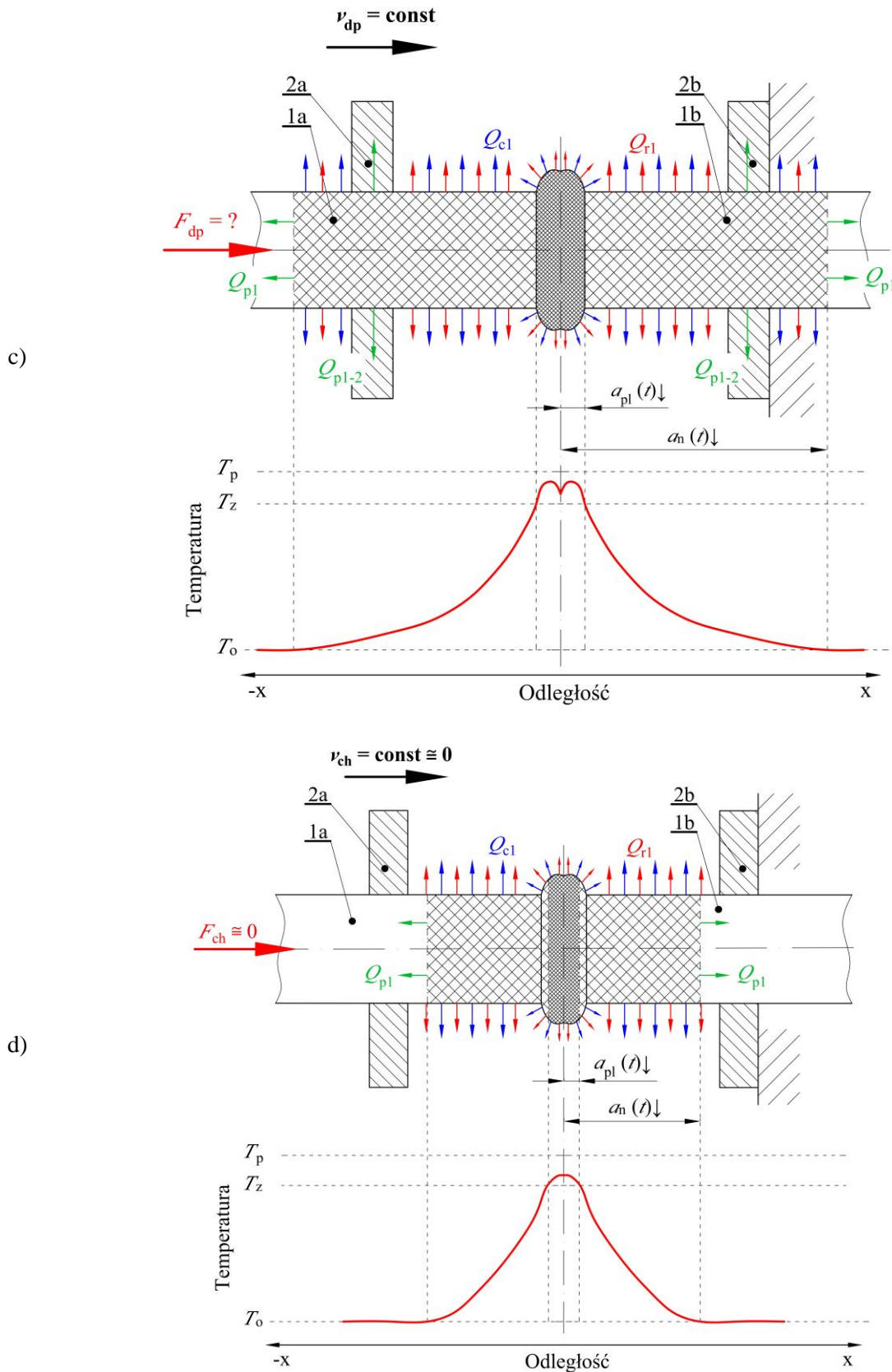
W przypadku fazy łączenia (Rys. 75), efektywność energetyczna procesu mogłaby być poprawiona poprzez skrócenie czasu łączenia końcówek pasa ze sobą. Należy jednak zauważyć, że podczas fazy łączenia należy dążyć do uzyskania kompromisu pomiędzy krótkim czasem trwania tej operacji (z tego powodu pożądana jest wysoka prędkość zbliżania się końcówek pasa do siebie), co zapewnia niewielkie straty energii w procesie, a problemem nadmiernego odkształcania uplastycznionego tworzywa. Dynamiczne oddziaływanie końcówek pasa na siebie, może powodować efekt wypychania materiału z obszaru zgrzewania (w przypadku utrzymywania wysokiej wartości prędkości dociskania końcówek pasa do siebie).

Podczas chłodzenia złącza (Rys. 77), efektywność energetyczna procesu nie może zostać w znaczący sposób poprawiona. Możliwym jest zastosowanie przyspieszonego studzenia złącza, wymuszonym przepływem otaczającego je gazu. Jednakże, jak wykazano podczas badań materiałowych (rozdział 4.3.2), nawet dla zastosowania powietrza atmosferycznego, działanie to powoduje mniej przewidywalne zachowanie się tego tworzywa. Postępowanie takie, wpływa jedynie na czas trwania procesu i dodatkowo będzie wymagało dostarczenia dodatkowej energii w celu wymuszenia przepływu medium ochładzającego złącze, co może nie poprawić całkowitego bilansu energetycznego.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyżej wymienione czynniki, w odróżnieniu od klasycznego podejścia [34, 76], gdzie proces zgrzewania jest podzielony na pięć faz charakteryzujących się tym, że poszczególne operacje sterowane są poosiową siłą technologiczną F_{tl} , do wykonania doczołowego złącza zgrzewanego pasów ciągnowych, zaproponowano cykl operacji składających się na proces zgrzewania oparty na kontroli prędkości i przemieszczenia (Rys. 82). Przebieg procesu zgrzewania został uproszczony i ograniczony do czterech faz, w wyniku połączenia fazy wyrównywania powierzchni pasa (Rys. 72) oraz właściwego nagrzewania (Rys. 73) w jedną operację technologiczną – uplastyczniania pasa (Rys. 82a). Podczas tej operacji gorąca płyta (3) dociskana jest do końcówki pasa (1b) zamocowanej w nieruchomej szczęce (2b), z prędkością v_{pl} . Jednocześnie druga końcówka pasa (1a), zamocowana w ruchomej szczęce (2a), dociskana jest do gorącej płyty (3) z drugiej strony. Prędkość ruchomej końcówki pasa (1a) względem końcówki nieruchomej (1a) wynosi $2 \cdot v_{pl}$, w wyniku czego jej względna prędkość w odniesieniu do gorącej płyty (3) wynosi v_{pl} . W związku z tym uzyskiwany jest w przybliżeniu równomierny docisk obu końcówek pasa do gorącej płyty podczas uplastyczniania. Wartość siły docisku podczas uplastyczniania F_{pi} nie jest kontrolowana i jednocześnie nie jest parametrem sterującym tym procesem.



Rys. 82. Proces zgrzewania doczołowego pasa realizowany z wykorzystaniem zmodyfikowanego, 4-fazowego cyklu: a) uplastycznianie materiału, b) wycofanie gorącej płyty: 1a – ruchoma końcówka pasa, 1b – nieruchoma końcówka pasa, 2a – ruchomy uchwyt pasa, 2b – nieruchomy uchwyt pasa, 3 – gorąca płyta; ν_{pl} – prędkość przemieszczania się pasa podczas uplastyczniania, F_{pl} – siła uplastyczniająca, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{r3} – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji, Q_{c3} – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze konwekcji



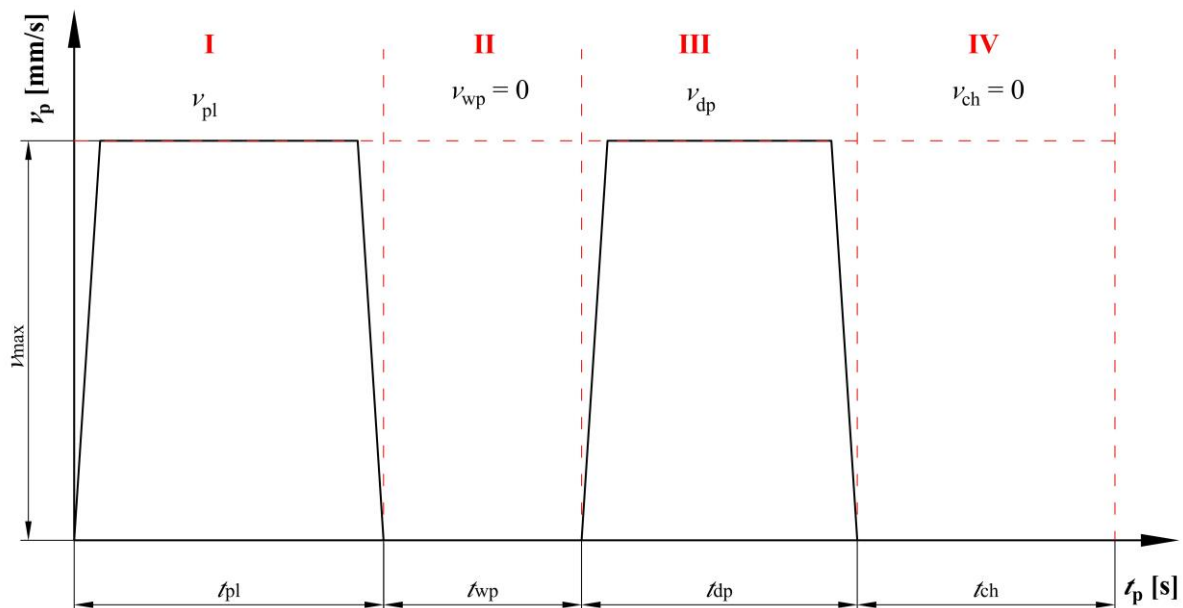
Rys. 82. c.d. Proces zgrzewania doczołowego pasa realizowany z wykorzystaniem zmodyfikowanego, 4-fazowego cyklu: c) doprasowanie końcówek, d) chłodzenie złącza: 1a – ruchoma końcówka pasa, 1b – nieruchoma końcówka pasa, 2a – ruchomy uchwyt pasa, 2b – nieruchomy uchwyt pasa; v_{dp} – prędkość przemieszczania się pasa podczas doprasowania, F_{dp} – siła doprasowania, v_{ch} – prędkość przemieszczania się pasa podczas chłodzenia, F_{ch} – siła docisku podczas chłodzenia, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

W fazie wycofywania urządzenia grzewczego (Rys. 82b), końcówki pasa (1a i 1b) nie są oddalane od gorącej płyty (3). Jest ona wysuwana podczas przebywania w kontakcie z materiałem pasa, co zapewnia poprawę efektywności energetycznej. Aby zapewnić możliwość przeprowadzenia takiej operacji (wysunięcie gorącej płyty w płaszczyźnie prostopadłej do osi pasa), płyta grzewcza musi być pokryta tworzywem zapewniającym niski współczynnik tarcia ślizgowego.

Doprasowanie końcówek pasa (Rys. 82c), polega na ich zbliżaniu do siebie, w wyniku przemieszczania się szczęki ruchomej (2a) ze stałą prędkością v_{dp} , w kierunku szczęki nieruchomej (2b). W tej fazie, rozpoczyna się proces łączenia materiału, podobnie jak w klasycznym przebiegu procesu (Rys. 75). Zjawiska fizyczne i reakcje chemiczne zachodzące w polimerze i towarzyszące tej operacji są z założenia takie same.

W następnej kolejności następuje chłodzenie złącza (Rys. 82d), podczas którego prędkość przemieszczania się ruchomej końcówki pasa (1a) $v_{ch} = 0$. W związku z tym siła zewnętrzna wywołująca docisk podczas chłodzenia (F_{ch} na rysunku 82d) z założenia jest również w przybliżeniu równa zero. Działanie to jest celowe, ze względu na dużą podatność pasa na wyboczenie – w wyniku którego, nie do końca wystudzone złącze może ulegać uszkodzeniu. Należy jednak pamiętać o tym, że w tym etapie możliwe jest występowanie pewnej niezerowej wartości siły ze względu na resztkowe naprężenie po operacji doprasowania złącza i rozszerzalność termiczną materiału.

Zjawiska fizyczne związane z wymianą ciepła, dla zaproponowanego cyklu zgrzewania (Rys. 82), z założenia są dokładnie takie same jak dla klasycznego sposobu przeprowadzania tej operacji (Rys. 72-75 oraz 77). W podobny sposób przebieg procesu można przedstawić za pomocą cyklogramu (Rys. 83), uwzględniającego tym razem jednak zmianę prędkości technologicznej v_p podczas poszczególnych operacji i zaproponowany podział na 4 fazy.



Rys. 83. Cyklogram procesu technologicznego zgrzewania pasów, wg opracowanej metodyki: I – uplastycznianie materiału, II – wycofywanie urządzenia grzewczego, III – doprasowanie, IV – właściwe łączenie i chłodzenie złącza; v_p – prędkość technologiczna, przyjmująca wartości: v_{pl} – podczas uplastyczniania, v_{wp} – podczas wycofywania urządzenia grzewczego, v_{dp} – podczas doprasowania, v_c – podczas chłodzenia złącza; t_p – czas trwania całego procesu, składowe: t_{pl} – uplastyczniania, t_{wp} – wysuwania elementu grzejnego, t_{dp} – doprasowania złącza, t_{ch} – właściwego łączenia i chłodzenia złącza

5.3. Badania empiryczne procesu uplastyczniania pasa

5.3.1. Metodyka badań

Analiza procesu zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty wskazuje na to, że z punktu widzenia mechaniki ciała stałego, głównym zjawiskiem fizycznym zachodzącym podczas procesu jest ściskanie materiału w warunkach temperatury o podwyższonej, ale zmiennej wartości. Dodatkowo należy zauważyć, że jedną z najważniejszych faz procesu jest uplastycznianie pasa na gorącej płycie. Przebieg tego etapu warunkuje przebieg pozostałej części procesu zgrzewania. W związku z tym, biorąc pod uwagę opracowany sposób przeprowadzania procesu zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących (Rys. 82 i 83) wykonano badania eksperymentalne uplastyczniania materiału na gorącej płycie [60, 65]. Ich wyniki pozwolą na dokładne rozpoznanie przebiegu tej operacji, a także będą użyteczne do projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, w szczególności do oszacowania zapotrzebowania na moc układu napędowego maszyny.

W ogólnym ujęciu przeprowadzone badania (Rys. 84-86) polegały na poosiowym dociskaniu zamocowanej w uchwycie (2) walcowej próbki pasa (1) o średnicy d i wysokości całkowitej h_{upl} (pobranej z gotowego produktu – pasa ciągnowego wykonanego z TPU C85A) do gorącej płyty (3), rozgrzanej do temperatury T_p . Aby zapewnić możliwość nieskrępowanego uplastyczniania próbki, końcówka próbki (1) była wysunięta z uchwytu (2) na wstępną odległość a_{upl} , podobnie jak to ma miejsce podczas rzeczywistego zgrzewania. Aby we właściwy sposób odwzorować założenia opracowanego cyklu zgrzewania, dociskanie do gorącej płyty powodujące uplastycznienie materiału wykonano przy określonej stałej prędkości v_{pl} przesuwu próbki pasa (2) względem gorącej płyty (3), w całym zakresie czasu uplastyczniania t_{pl} . Jako granicę zakończenia badania, przyjęto określoną wartość przemieszczenia s_{pl_max} .

Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN z zabudowanym dodatkowym czujnikiem siły HBM U9C o zakresie pomiarowym 1 kN (6), umieszczonym pomiędzy szczęką maszyny wytrzymałościowej (7), a uchwytem próbki (2). Zastosowanie dodatkowego czujnika siły (6) wpłynęło pozytywnie na dokładność pomiaru, która wynosiła ± 2 N. Maszyna wytrzymałościowa pełniła w tym przypadku rolę elementu wymuszającego i rejestrującego przemieszczenie próbki. Aby uzyskać odpowiednią synchronizację odczytów położenia trawersy ruchomej i aktualnej siły, wartości sygnałów analogowych: reprezentującego odczyt przemieszczenia z maszyny wytrzymałościowej MTS oraz z czujnika siły HBM, gromadzono za pomocą dodatkowej karty pomiarowej μ DAQ Lite.

Gorąca płyta (3) była rozgrzewana za pomocą elektrycznego urządzenia przeznaczonego do zgrzewania pasów ciągnowych – Multi-TC firmy BEHAbelt, o mocy 70W, które wchodzi w skład ręcznych zestawów do zgrzewania [88]. Gorąca płyta (3) została podparta od dołu za pomocą podkładki termoizolacyjnej (4), wykonanej z płyty ceramicznej. Element ten spełniał dwie funkcje: zapobiegał ugięciu gorącej płyty pod wpływem siły działającej prostopadle do jej powierzchni, a także izolował termicznie stanowisko od wpływu temperatury o wysokiej wartości.

Wykonane próby uplastyczniania materiału, za każdym razem przeprowadzane były w dwóch fazach. W pierwszej kolejności zbliżano próbkę do gorącej płyty na niewielką odległość z prędkością v_{i_upl} (Rys. 84 i Rys. 85), której wartość jest znacznie wyższa od prędkości uplastyczniania v_{pl} , a następnie po

tym rozpoczynano właściwe uplastycznianie materiału z prędkością v_{pl} . Postępowanie to miało na celu ograniczenie wcześniejszego nagrzewania się próbki od gorącej płyty i otaczającego ją powietrza w wyniku promieniowania cieplnego i oddziaływania konwekcyjnego.

Podczas rzeczywistego procesu zgrzewania, przeprowadzanego zgodnie z zaproponowanym cyklogramem (Rys. 83), w stanie ustalonym ruchu przemieszczenie osiągnięte podczas uplastyczniania s_{pl} jest w oczywisty sposób odwrotnie proporcjonalne do czasu trwania tej operacji t_{pl} , ze względu na stałą prędkość uplastyczniania v_{pl} :

$$v_{pl} = \frac{s_{pl}}{t_{pl}} = \text{const} > 0. \quad (5.2)$$

Taka sama zależność osiągnięta była podczas badań uplastyczniania na maszynie wytrzymałościowej MTS. Oczywistym jest, że prędkość uplastyczniania v_{pl} , w ujęciu całkowitego czasu trwania tej operacji t_{pl} nie jest stała, ze względu na niezerowy czas przyspieszania i hamowania mechanizmów (zjawisko to występuje zarówno w projektowanym urządzeniu, jak i podczas badań na maszynie MTS). Jest to widoczne na cyklogramie procesu (Rys. 83), w postaci trapezowego kształtu zależności prędkości v_{pl} oraz czasu t_{pl} . Zjawisko to może być jednak pominięte podczas analizy wyników badań, ze względu na to, że:

- przyspieszanie następuje podczas likwidacji wstępnego luzu pomiędzy gorącą płytą, a próbką, w związku z czym nie ma wpływu na rejestrowaną wartość siły F_{pl} ,
- hamowanie jest realizowane w końcowej fazie uplastyczniania, którego zakres (s_{pl_max}) i tak przekracza znacznie oczekiwane przemieszczenie podczas uplastycznienia w rzeczywistym procesie realizowanym w przemyśle, w związku z tym można uznać, że to zjawisko nie będzie miało wpływu na kluczową analizę.

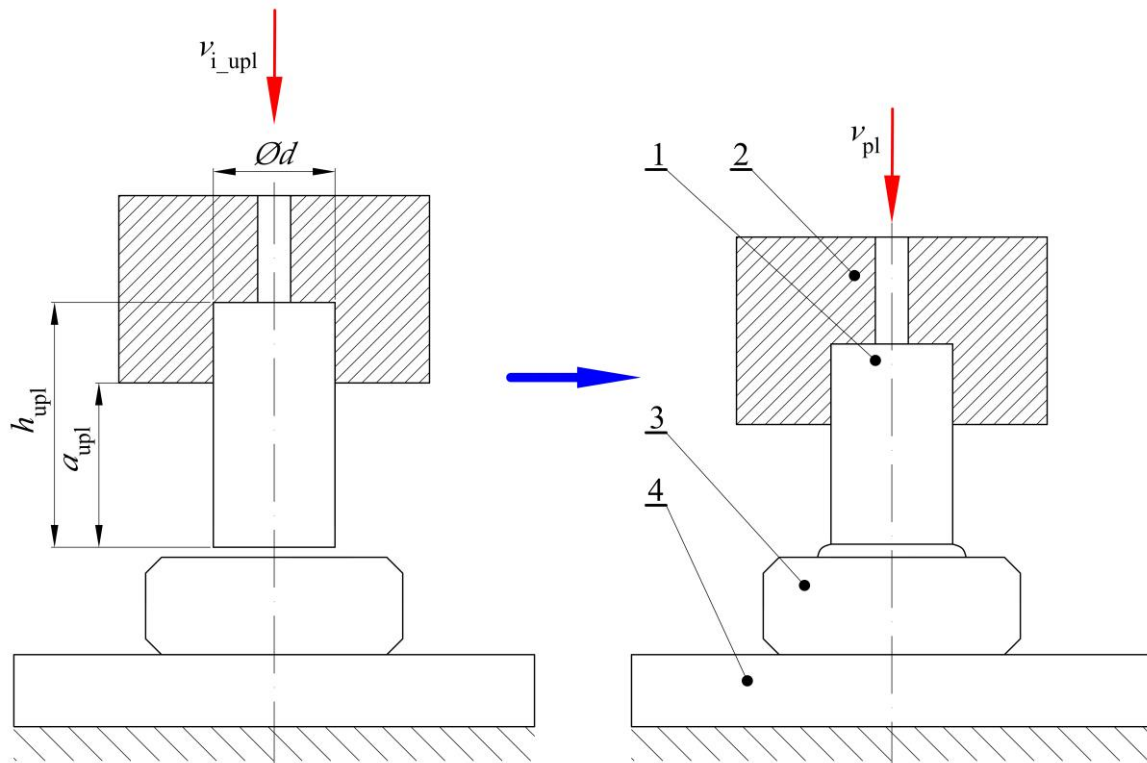
Badania uplastyczniania wykonano dwuetapowo. W pierwszej kolejności w celu rozpoznania odpowiedzi materiału pasa na ten typ obciążenia, wykonano próby dla:

- dwóch wartości średnicy pasa d ,
- jednej wartości temperatury gorącej płyty T_p ,
- pięciu prędkości uplastyczniania v_{pl} ,

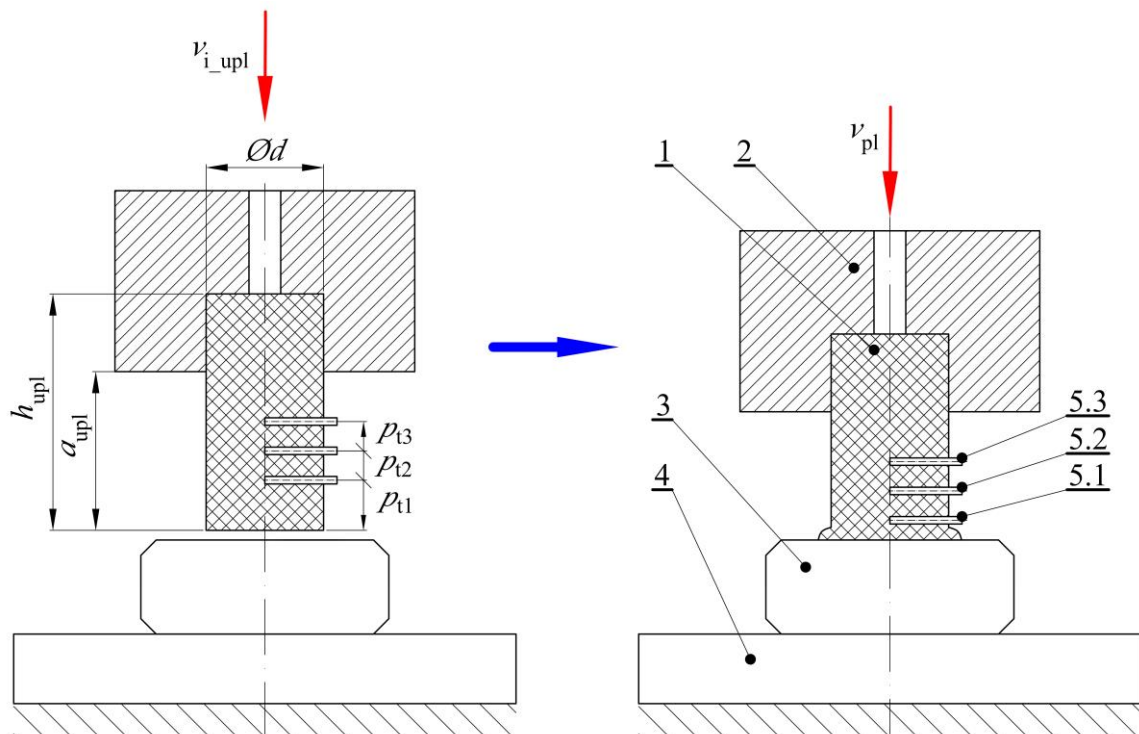
wykonując po 5 powtórzeń dla każdego zestawu parametrów (Rys. 84 i Tab. 31). Podczas tych prób rejestrowano przemieszczenie ruchomej trawersy maszyny wytrzymałościowej s_{pl} , wartość siły uplastyczniającej materiał F_{pl} oraz aktualną wartość temperatury gorącej płyty T_p . Uplastycznianie materiału wykonywano do przemieszczenia s_{pl_max} o wartości przekraczającej 30% średnicy próbki d , czyli w zakresie wartości uplastycznienia przewidywanej podczas zgrzewania ręcznego.

Tab. 31. Parametry wstępnych badań eksperymentalnych uplastyczniania materiału pasa

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica pasa	d [mm]	12, 18
Prędkość uplastyczniania	v_{pl} $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	2, 4, 8, 12, 16
Temperatura gorącej płyty	T_p [°C]	300±1
Wysokość próbki	h_{upl} [mm]	25±0,1
Wysunięcie próbki z gorącej płyty	a_{upl} [mm]	15±0,1
Maksymalne przemieszczenie	s_{pl_max} [mm]	5,5±0,01



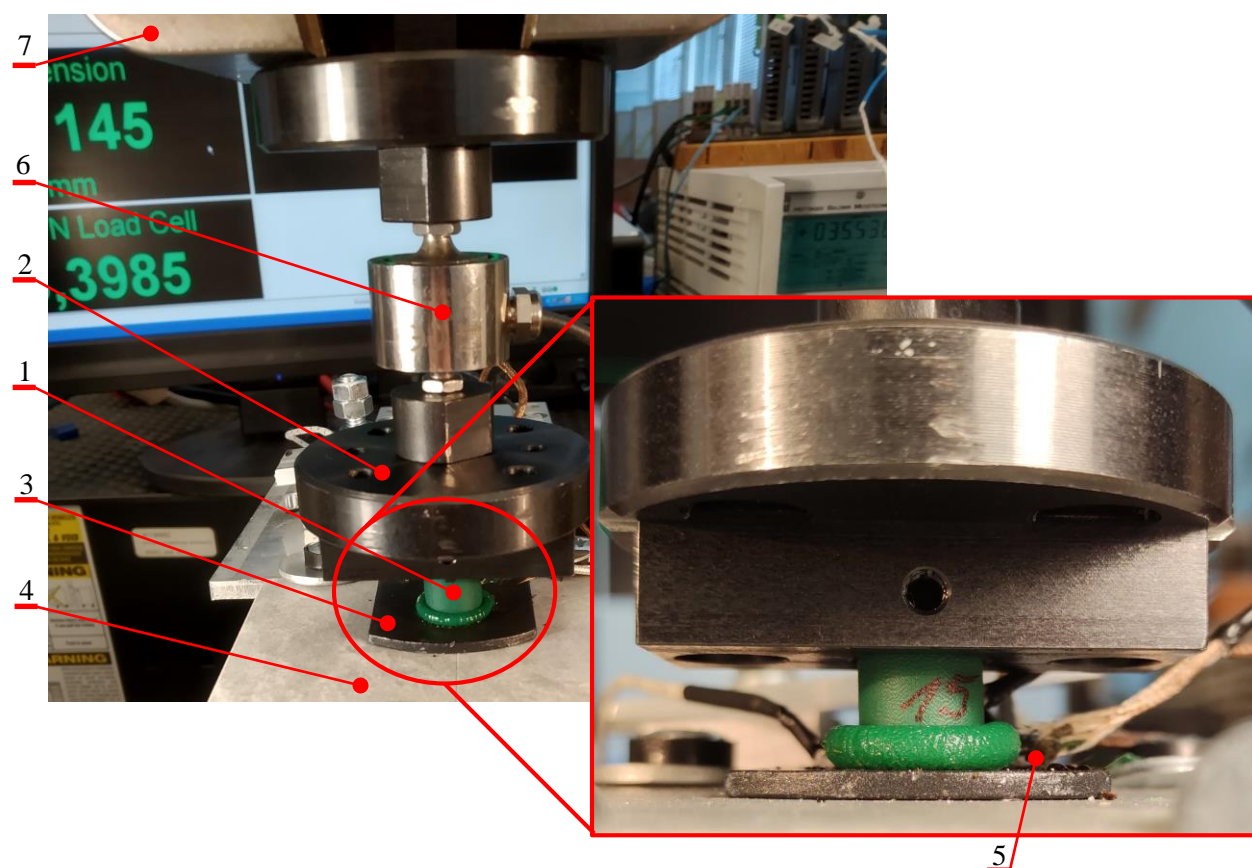
Rys. 84. Schemat wstępnych badań empirycznych uplastyczniania pasa na gorącej płycie: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – gorąca płyta, 4 – podkładka termoizolacyjna; d – średnica pasa, h_{upl} – długość próbki, a_{upl} – wysunięcie próbki z uchwytu, v_{i_upl} – prędkość wstępna, v_{pl} – prędkość uplastyczniania



Rys. 85. Schemat uszczegółowionych badań empirycznych uplastyczniania pasa na gorącej płycie: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – gorąca płyta, 4 – podkładka termoizolacyjna, 5.1...5.2...5.3 – kolejne czujniki temperatury (termopary); d – średnica pasa, h_{upl} – długość próbki, a_{upl} – wysunięcie próbki z uchwytu, p_{t1} – odległość pomiędzy gorącą płytą, a pierwszym czujnikiem temperatury, p_{t2} – odległość pomiędzy pierwszym, a drugim czujnikiem temperatury, p_{t3} – odległość pomiędzy drugim, a trzecim czujnikiem temperatury, v_{i_upl} – prędkość wstępna, v_{pl} – prędkość uplastyczniania

Tab. 32. Parametry badań eksperymentalnych uplastyczniania materiału pasa z pomiarem wartości temperatury

Parametr	Oznaczenie	Wartość								
		12			15			18		
Średnica pasa	d [mm]	12			15			18		
Temperatura płyty	T_p [°C]	270±1	285±1	300±1	270±1	285±1	300±1	270±1	285±1	300±1
Prędkość uplastyczniania	v_{pl} $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	6, 8, 10	6, 8, 10	6, 8, 10	4, 6, 8	6, 8, 10	6, 8, 10	4, 6, 8	6, 8, 10	6, 8, 10
Wysokość próbki	h_{upl} [mm]	25±0,1								
Wysunięcie próbki	a_{upl} [mm]	15±0,1								
Odległości pomiędzy termoparami	p_{t1} [mm]	3±0,1								
	p_{t2} [mm]	7±0,1								
	p_{t3} [mm]	11±0,1								
Przemieszczenie graniczne	s_{pl_max} [mm]	6±0,01								



Rys. 86. Stanowisko badawcze podczas uplastyczniania materiału pasa: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – urządzenie grzewcze z gorącą płytą, 4 – podkładka termoizolacyjna, 5 – jeden z czujników temperatury (termopara), 6 – dodatkowy czujnik siły, 7 – szczeka maszyny wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN

Po dokonaniu wstępnej analizy wyników, a w szczególności wpływu prędkości uplastyczniania v_{pl} na przebieg siły F_{pl} niezbędnej do wykonania tej operacji, doprecyzowano założenia dotyczące parametrów

badania. Na bazie tych wniosków, przeprowadzono drugi etap badań empirycznych (Rys. 85 i Tab. 32). Podczas tego etapu prac badawczych zastosowano zmienne parametry operacji uplastyczniania:

- trzy wartości średnicy pasa d ,
- trzy wartości temperatury gorącej płyty T_p ,
- trzy wartości prędkości uplastyczniania v_{pl} ,

przy czym wartości średnic pasa d i temperatury gorącej płyty T_p , podobnie jak w poprzednim etapie dobrano do założeń projektu oraz ogólnych wytycznych dotyczących zgrzewania tego materiału. Selekcji wartości prędkości uplastyczniania v_{pl} dokonano natomiast na podstawie wniosków z poprzedniego etapu badań, dlatego nie są one jednakowe dla wszystkich wartości średnicy pasa d (Tab. 32). Działanie to miało na celu rozszerzenie zakresu otrzymanych charakterystyk w zakresie zmiany średnicy pasa d oraz wartości temperatury gorącej płyty T_p , z jednoczesnym doprecyzowaniem ich w zakresie zmienności prędkości uplastyczniania v_{pl} . Rozszerzono również nieco zakres maksymalnego odkształcenia s_{pl_max} , w celu zebrania większej ilości danych w aspekcie rozkładu temperatury w osi próbki. Dla wszystkich kombinacji wymienionych parametrów wykonano po pięć powtórzeń. Podczas prób realizowanych w tym etapie, rejestrowano następujące grupy parametrów:

- przemieszczenie podczas uplastyczniania s_{pl} oraz wartość siły niezbędnej do przeprowadzania tej operacji F_{pl} , przy czym podobnie jak w poprzednim etapie, wartość przemieszczenia rejestrowana była przez maszynę wytrzymałościową, a siła przez dodatkowy czujnik siły, sygnały analogowe z tych pomiarów odbierane były przez kartę pomiarową μ DAQ Lite,
- wartość temperatury gorącej płyty T_p ,
- wartość temperatury T_{pl_1} , T_{pl_2} i T_{pl_3} w trzech punktach pomiarowych (Rys. 85) zlokalizowanych w uplastycznianej próbce. W tym celu, do nawierconych w kierunku pomienionym otworów o średnicy około 2 mm, wykonanych na głębokość równą połowie średnicy d próbki (przez co skrajny punkt otworu znajdował się w osi centralnej pasa) wprowadzono czujniki temperatury – termopary typu K (5.1, 5.2 i 5.3). Czujniki te rozmieszczono w ustalonych odległościach p_{t1} , p_{t2} i p_{t3} (Rys. 85 i Tab. 32), których wartość była dobrana w taki sposób aby maksymalnie jak to możliwe zbliżyć je do gorącej płyty podczas uplastyczniania zakładając, że nawet mogą być one wypychane przez uplastyczniający się materiał na zewnątrz, pod koniec operacji.

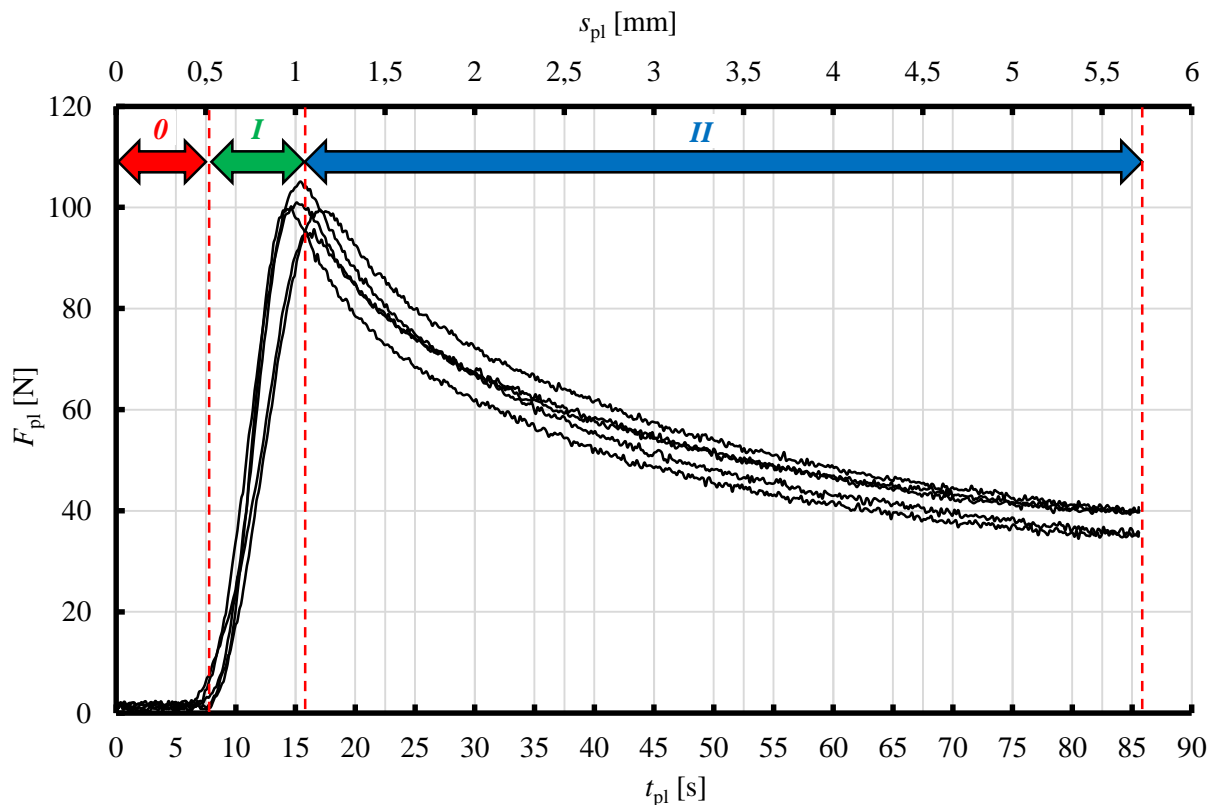
Aby zsynchronizować pomiary poszczególnych wartości temperatury (T_p , T_{pl_1} , T_{pl_2} i T_{pl_3}), z rejestracją przemieszczenia s_{pl} i wartości siły F_{pl} , wszystkie czujniki temperatury podłączono do tej samej karty pomiarowej μ DAQ Lite, poprzez indywidualne przetworniki temperatury AR593. Dzięki temu osiągnięto efekty synchronizacji wszystkich pomiarów.

Dodatkowo podczas tego etapu badań, rejestrowano odkształcanie się materiału pasa. Ze względu na trudności techniczne związane ze stykowym pomiarem takich parametrów podczas uplastyczniania (np. pomiar średnicy próbki za pomocą ekstensometru mechanicznego byłby niemożliwy do zrealizowania), na wzór działania ekstensometrów optycznych, przebieg uplastyczniania rejestrowano za pomocą kamery wysokiej rozdzielczości. Późniejsza analiza obrazu daje możliwości wyciągnięcia odpowiednich wniosków na temat np. postaci odkształcania się próbki. Ogniskową obiektywu umieszczono

w płaszczyźnie powierzchni grzewczej gorącej płyty. Do oceny parametrów geometrycznych kształtującej się wyplwki wykorzystano fakt, że średnica próbki walcowej jest taka sama niezależnie od kąta patrzenia. Próbkę do badań pobierano z pasa o przekroju kołowym i ustalonej średnicy d . Za każdym razem płaskie powierzchnie były szlifowane, w celu uzyskania odchyłki prostopadłości powierzchni płaskiej pasa względem jego osi, nie większej niż 0,1 mm.

5.3.2. Badania wstępne uplastyczniania pasa – dyskusja rezultatów

Rezultatem wstępnych badań uplastyczniania pasa na gorącej płycie są charakterystyki siły uplastyczniania F_{pl} , w zależności od przemieszczenia próbki pasa s_{pl} oraz czasu uplastyczniania t_{pl} (Rys. 87), oddzielnie dla wszystkich kombinacji parametrów badań (Tab. 31). Poddając analizie otrzymane rezultaty można zaobserwować, że charakterystyka wartości siły uplastyczniania F_{pl} w zależności od przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} lub czasu t_{pl} (parametry te można stosować zamiennie), dla zadanej grupy parametrów technologicznych wykazuje powtarzalny przebieg. Otrzymane wyniki dla wszystkich prób badawczych były powtarzalne, maksymalne odchylenie standardowe od średniej nie przekracza 15%.

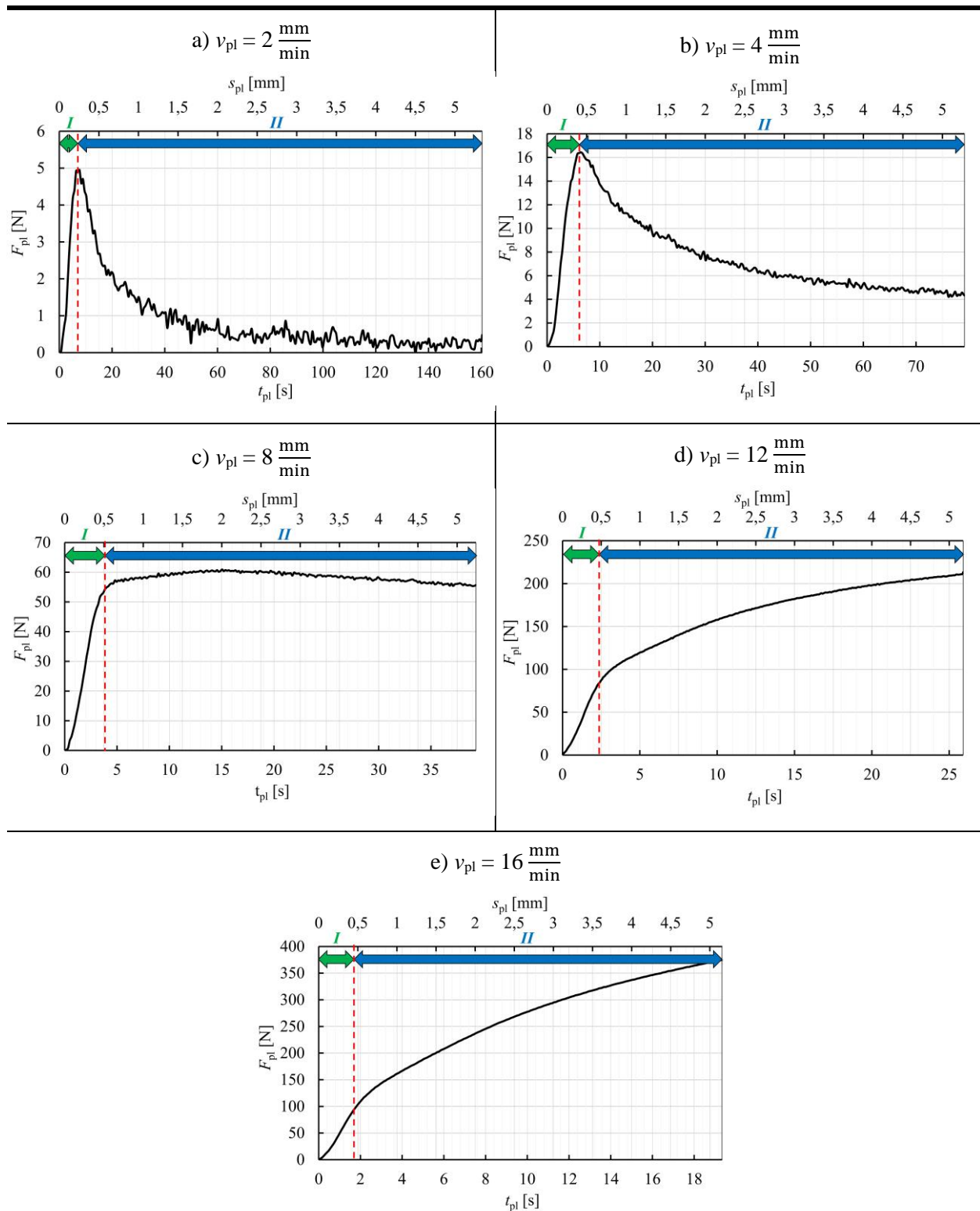


Rys. 87. Przykładowa charakterystyka przedstawiająca zależność siły uplastyczniającej materiał pasa F_{pl} w zależności od przemieszczenia podczas uplastyczniania s_{pl} oraz czasu trwania tej operacji t_{pl} dla pasa o średnicy $d = 18$ mm i prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; fazy: *O* – eliminacja wstępnej odległości pomiędzy gorącą płytą, a próbką, *I* – faza powtarzalnego, liniowego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – faza powtarzalnego, nieliniowego spadku wartości siły uplastyczniającej

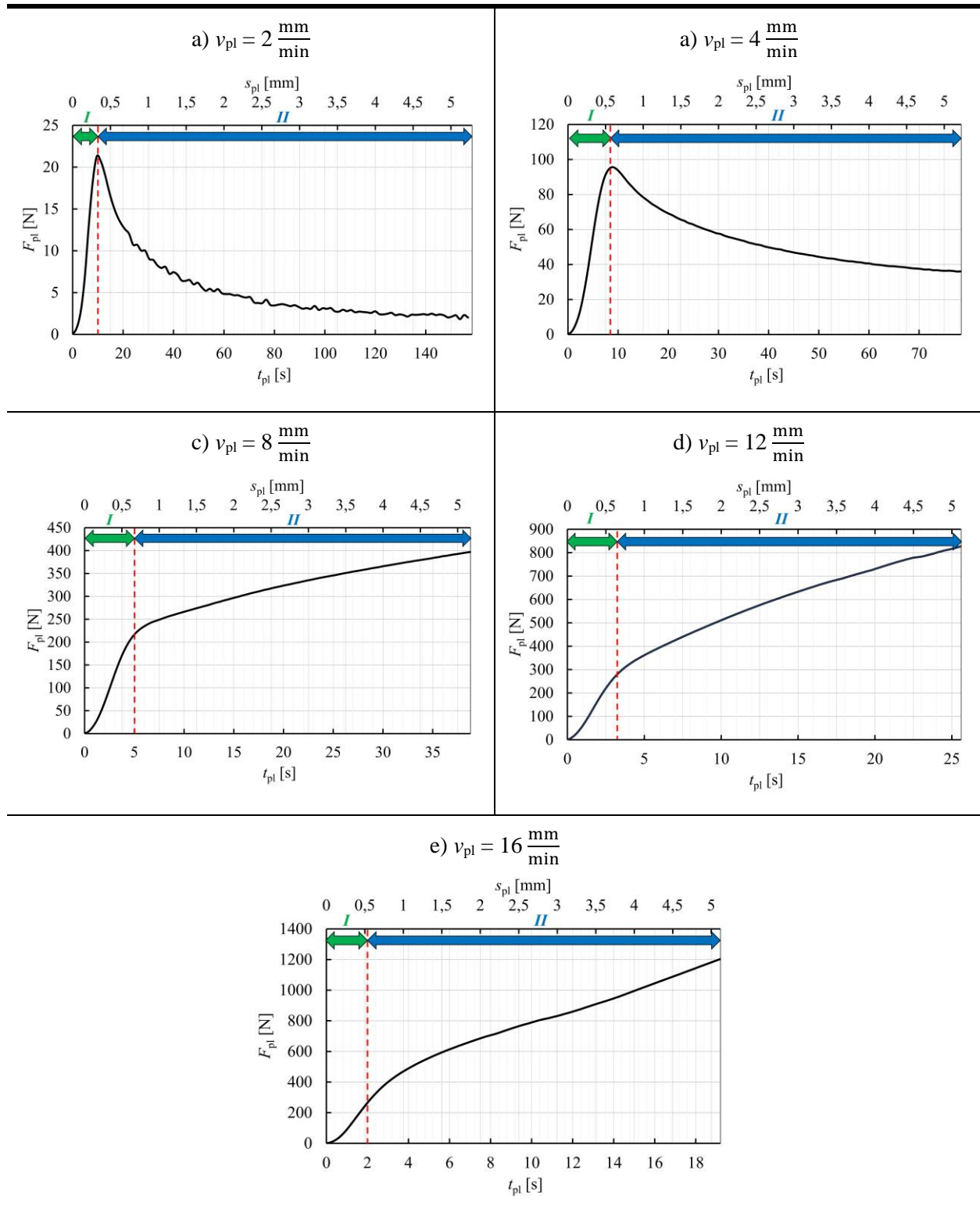
Analizując monotoniczność otrzymanej funkcji $F_{pl}(t_{pl})$ dla przykładowego zestawu parametrów technologicznych (Rys. 87), można zauważyć, że wykazuje ona zmienny przebieg, przy czym charakter zmienności jest powtarzalny dla wszystkich prób. W pierwszej części charakterystyki (*O*) przebieg siły

uplastyczniania F_{pl} jest niemal stały, przy czym jej wartość jest bliska zero, w porównaniu do wartości uzyskiwanej w dalszej części procesu. Zjawisko to jest związane z kasowaniem luzu pomiędzy uplastycznianą próbką (1 na rysunku 84), a gorącą płytą (3 na rysunku 84).

Tab. 33. Charakterystyki uśrednionej siły uplastyczniania F_{pl} pasa o średnicy $d = 12$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 2, 4, 8, 12 i 16 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$, w zależności od czasu t_{pl} uplastyczniania oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – etap wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – etap zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastyczniania v_{pl}



Tab. 34. Charakterystyki uśrednionej siły uplastycznienia F_{pl} pasa o średnicy $d = 18$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 2, 4, 8, 12 i 16 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$, w zależności od czasu t_{pl} uplastycznienia oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – faza wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – faza zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastycznienia v_{pl}



W związku z tym, należy przyjąć, że ta faza operacji uplastycznienia materiału (*O*) nie jest istotna w analizie procesu, przez co może być pominięta w dalszych rozważaniach, w przeciwieństwie do dwóch pozostałych (powtarzalnych w aspekcie kolejnych prób), rozróżnialnych faz (*I* i *II*). Zasadnym jest zatem podjęcie analizy porównawczej otrzymanych charakterystyk dla różnych parametrów tej operacji.

Biorąc pod uwagę wysoką powtarzalność wyników w ramach poszczególnych grup parametrów, możliwe jest wyznaczenie charakterystyk uśrednionych dla obu średnic próbek: $d = 12$ mm (Tab. 33) oraz $d = 18$ mm (Tab. 34). Poddając analizie otrzymany zbiór charakterystyk, można we wszystkich z nich wyszczególnić dwie rozróżnialne fazy procesu uplastyczniania (*I* i *II*).

Pierwsza faza tej operacji (*I*), niezależnie od prędkości uplastyczniania v_{pl} oraz średnicy pasa d , charakteryzuje się proporcjonalnym, w przybliżeniu prostoliniowym i przede wszystkim powtarzalnym wzrostem wartości siły uplastyczniania materiału F_{pl} wraz z przemieszczeniem s_{pl} próbki względem gorącej płyty. Można więc stan ten nazwać stanem ustalonym operacji uplastyczniania. W każdym z przypadków można zaobserwować dodatnią korelację pomiędzy siłą uplastyczniającą F_{pl} , a wykonanym przemieszczeniem s_{pl} .

Podczas dalszego przebiegu tej operacji, można wyróżnić *II* fazę, w której wartość siły uplastyczniania F_{pl} zmienia się w większości przypadków w sposób nieliniowy. Charakter tej zmienności wyraźnie zależy od prędkości uplastyczniania v_{pl} oraz średnicy pasa d . Można ten stan nazwać stanem nieustalonym uplastyczniania. O ile przebieg *I* fazy jest przewidywalny, o tyle *II* faza wymaga dalszej analizy.

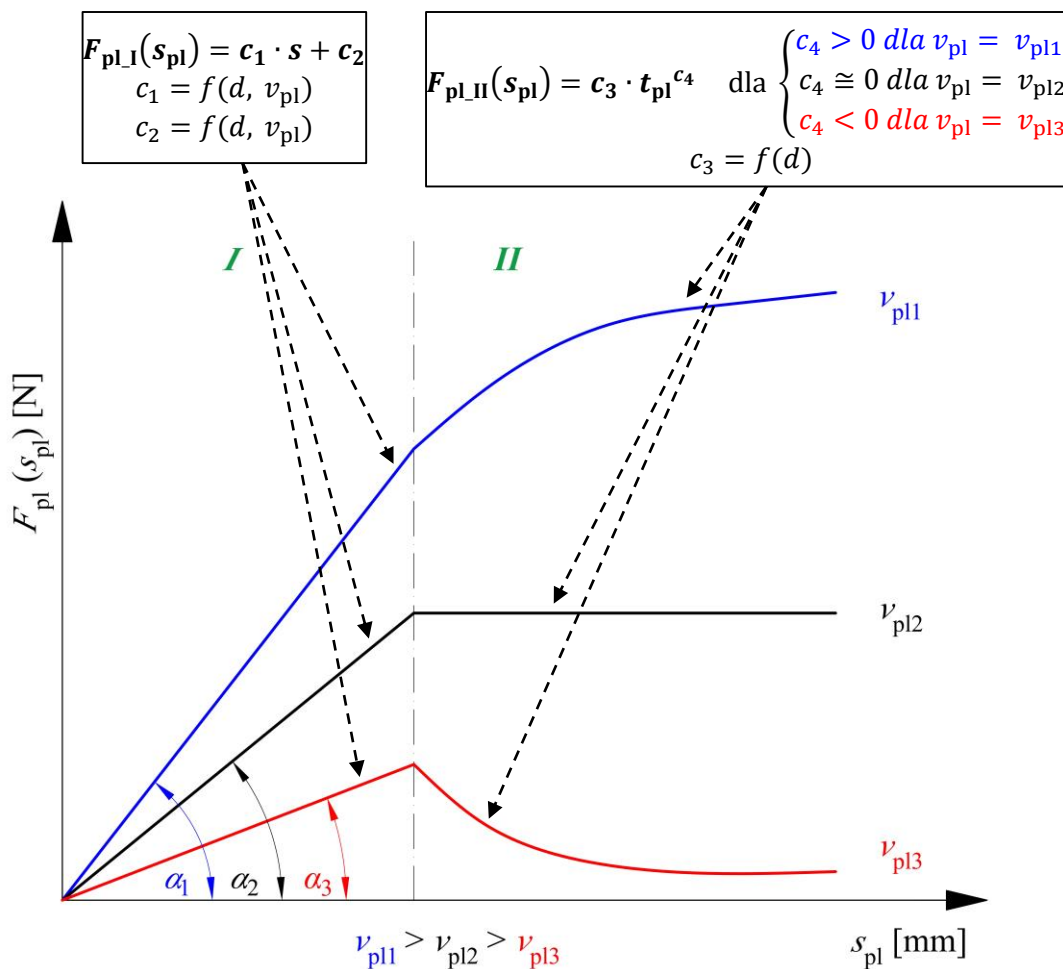
Analizując przebieg *II* fazy uplastyczniania dla pasa o średnicy $d = 12$ mm (Tab. 33), można zaobserwować, że dla prędkości v_{pl} równych $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ i $4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ wartość siły F_{pl} zmniejsza się nieliniowo wraz ze wzrostem czasu uplastyczniania t_{pl} . W przypadku prędkości v_{pl} równych $12 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ i $16 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ wartość siły F_{pl} rośnie natomiast nieliniowo wraz ze wzrostem czasu uplastyczniania t_{pl} . Interesującą obserwacją jest również przebieg siły uplastyczniania F_{pl} przy prędkości v_{pl} równej $8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, kiedy siła F_{pl} przyjmuje wartości niemal stałą, niezależną od czasu uplastyczniania t_{pl} .

Podobne zależności można zaobserwować przy uplastycznianiu pasa o średnicy $d = 18$ mm (Tab. 34), z tą jednak różnicą, że dla prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, wartość siły F_{pl} rośnie nieliniowo, w odróżnieniu od pasa o mniejszej średnicy d . Przy pozostałych wartościach prędkości uplastyczniania v_{pl} zaobserwowano podobne zjawiska jak w przypadku pasa o średnicy $d = 12$ mm.

Analizując przebieg *I* i *II* etapu można, dokonając aproksymacji uzyskanych charakterystyk, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, przy założeniu dopasowania danych do modelu określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,996$. W wyniku tego działania, możliwe jest uzyskanie schematu zależności siły uplastyczniania materiału pasa F_{pl} od czasu t_{pl} lub przemieszczenia s_{pl} , oparty na matematycznym opisie (Rys. 88).

Interpretacją zjawiska proporcjonalnego wzrostu wartości siły uplastyczniającej F_{pl} w *I* fazie operacji uplastyczniania, może być fakt, że proces nagrzewania materiału pasa nie jest natychmiastowy. W przeciwieństwie do często przyjmowanych założeń dotyczących nagrzewania materiału przez gorącą płytę, polegających na modelowaniu tej operacji jako nagrzewania jednostronnego ciała półnieskończonego z przyłożeniem źródła ciepła do jego jedynej powierzchni symetrii [76, 166, 171, 176], wymianie ciepła pomiędzy próbka, a gorącą płytą w warunkach rzeczywistych towarzyszy pewien opór cieplny [58, 159, 195]. Dodatkowo, każdy materiał charakteryzuje się pewną bezwładnością cieplną wynikającą ze skończonej wartości współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} [198]. W związku z tym, przy założeniu że prędkość uplastyczniania v_{pl} jest stała i niezerowa, w tym etapie częściowo zachodzi zjawisko ściskania

nieuplastycznionego jeszcze ciała stałego, przez co wzrost siły docisku F_{pl} wraz z przemieszczeniem s_{pl} jest efektem spodziewanym. Zgodnie z rezultatami prób ściskania (Rys. 49), przyłożenie siły ściskającej F_{pl} do materiału w zakresie niewielkich odkształceń charakteryzuje się zakresem liniowym, co znajduje odzwierciedlenie w I etapie uplastyczniania materiału (Tab. 33 i 34). Oczywistym jest natomiast fakt, że współczynnik kierunkowy tej prostej c_1 (Rys. 88) zmienia swoją wartość wraz ze zmianą prędkości v_{pl} oraz średnicy d , przy czym korelacja pomiędzy tymi wielkościami jest dodatnia.



Rys. 88. Charakterystyka zmiany siły uplastyczniania pasa F_{pl} w funkcji przemieszczenia próbki pasa względem gorącej płyty s_{pl} : I – stan ustalony uplastyczniania, II – stan nieustalony uplastyczniania, F_{pl} – siła potrzebna do uplastyczniania materiału, t_{pl} – czas uplastyczniania, s_{pl} – przemieszczenie pasa względem gorącej płyty, v_{pl} – prędkość uplastyczniania, v_{pli} – poszczególne grupy prędkości uplastyczniania, T_p – wartość temperatury gorącej płyty, $c_1 \dots c_4$ – współczynniki funkcji opisujących uplastycznianie, α_i – kąt nachylenia części proporcjonalnej zależności w I fazie

W przypadku II fazy tej operacji, zaobserwowana zmiana charakteru przebiegu krzywej uplastyczniania (Rys. 88) w zależności od stałej i niezerowej prędkości v_{pl} i średnicy d , wynika głównie z ograniczonej szybkości nagrzewania tworzywa. Jest to związane ze skończoną i w przybliżeniu stałą wartością współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} , niezależną od prędkości uplastyczniania v_{pl} . W związku z tym, w II fazie zachodzą trzy rodzaje zjawisk, których efekty można zaobserwować na podstawie analizy przebiegu siły uplastyczniania F_{pl} (Rys. 88) i kształtu próbek po uplastycznieniu (Rys. 89):

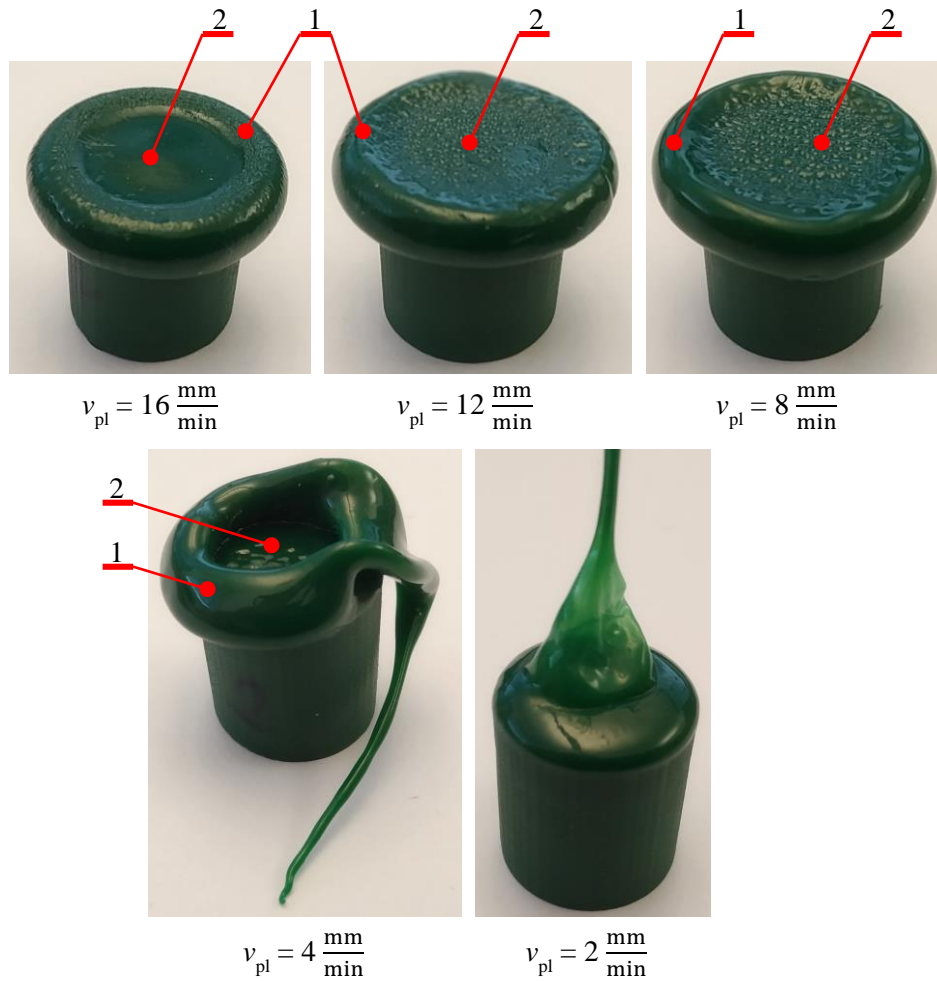
- w przypadku niskiej wartości prędkości uplastyczniania v_{pl3} (dla pasa o średnicy $d = 12$ mm jest to $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ i $4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$) materiał jest przegrzewany, w wyniku zbyt małej wartości prędkości przemieszczania

się próbki v_{pl} względem szybkości nagrzewania. Skutkuje to wyraźnym spadkiem wartości siły uplastyczniania F_{pl} (Rys. 88), w wyniku ściskania materiału podlegającego plastycznemu płynięciu. Analizując kształt próbki po operacji uplastyczniania (Rys. 89), można zaobserwować brak wyraźnej granicy pomiędzy rdzeniem (2), a wypływką (1). Jest to wynikiem nadmiernego odkształcenia materiału, jego nadtopienia i wypłynięcia z obszaru roboczego. Można zatem wywnioskować, że takie uplastycznienie jest nadmierne i powoduje niepotrzebną stratę energii i materiału. W praktyce przemysłowej natomiast, zjawisko to może powodować dodatkowe problemy konstrukcyjno-technologiczne, związane z wypływaniem stopionego polimeru z obszaru roboczego maszyny,

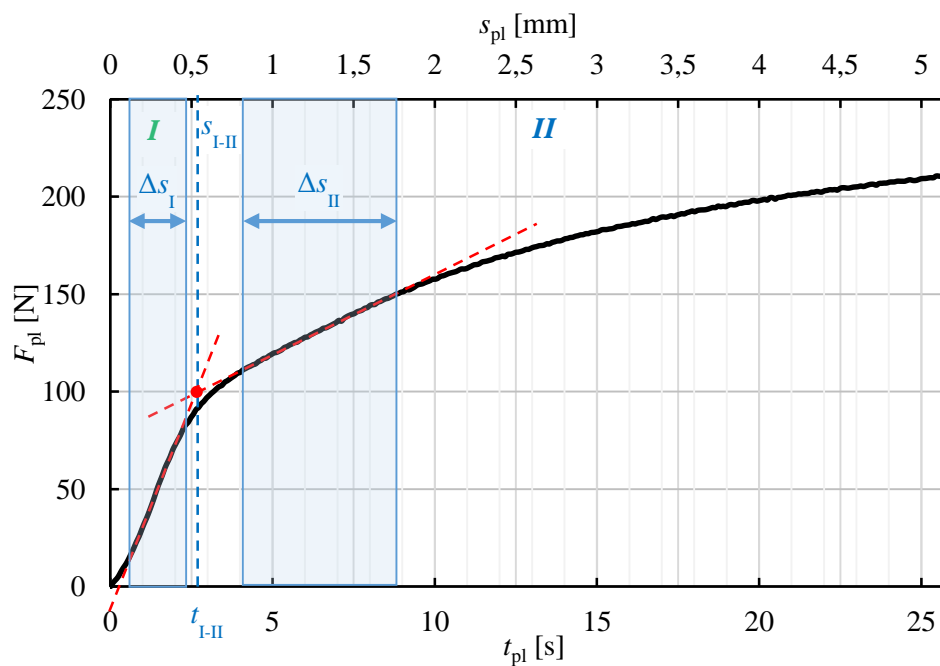
- w przypadku wysokiej wartości prędkości uplastycznienia v_{pl1} (dla pasa o średnicy $d = 12$ mm jest to $12 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ i $16 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$) materiał jest niedogrzewany, ponieważ prędkość dociskania próbki do płyty jest znacząco większa v_{pl} od szybkości rozchodzenia się ciepła w strukturze polimeru. W wyniku tego, jest on niedostatecznie uplastyczniony, przez co w zasadzie zachodzi ściskanie ciała stałego. W wyniku tego siła uplastyczniania F_{pl} znacząco narasta w podczas dalszego przebiegu tej operacji (Rys. 88). Obserwowalnym efektem jest połyskliwa struktura rdzenia (2), z którego uplastyczniony materiał jest w całości wyciśnięty do obszaru wypływkę (1) (Rys. 89). Zjawisko to jest niekorzystne, ponieważ rdzeń materiału nie posiada wystarczającej temperatury i stopnia uplastycznienia do utworzenia trwałego połączenia. Dodatkowo niekorzystnie zwiększa się wartość sił technologicznych procesu, co również pogarsza jego efektywność energetyczną,
- w przypadku pośredniej wartości prędkości uplastycznienia v_{pl2} (dla pasa o średnicy $d = 12$ mm jest to około $8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$), materiał jest właściwie uplastyczniany. Analizując zależność siły uplastycznienia F_{pl} od czasu t_{pl} (Rys. 88), można zauważyć niemal stały przebieg jej wartości, co świadczy o tym, że następuje równowaga pomiędzy przewodzeniem ciepła, a odkształcaniem tworzywa. Obserwowalnym efektem tego zjawiska jest równomierne nadtopienie zarówno obszaru wypływkę (1) jak i rdzenia (2) (Rys. 89). Taki przebieg operacji uplastycznienia można uznać za prawidłowy i operację tą na potrzeby dalszych prac można nazwać jako *uplastycznianie efektywne*.

Na bazie otrzymanych wyników (Tab. 33 i 34), można przeprowadzić szerszą analizę skupioną wokół czasu uplastyczniania t_{pl} . Rozważanie całkowitej wartości tego parametru może być bezcelowe, ponieważ zależy ona tylko od maksymalnego przemieszczenia podczas uplastycznienia s_{pl_max} , która jest znów zależna od wstępnych warunków wynikających z przygotowania powierzchni pasa do zgrzewania. Dodatkowo, ze względu na odmienny charakter przebiegu operacji uplastyczniania w II fazie tej operacji dla różnych parametrów technologicznych, hipotetyczna analiza czasu t_{pl} przy którym uzyskiwana jest maksymalna wartość siły uplastyczniającej F_{pl_max} wydaje się bezcelowa.

Interesującym parametrem jest natomiast czas t_{I-II} przejścia pomiędzy fazami podczas operacji uplastyczniania. Wartość tego parametru dla poszczególnych uśrednionych charakterystyk uplastyczniania (Tab. 33 i Tab. 34) można wyznaczyć na podstawie przecięcia stycznych do charakterystyki w bezpośrednim otoczeniu spodziewanej wartości czasu przejścia t_{I-II} (Rys. 90).



Rys. 89. Próbki po badaniach uplastyczniania na gorącej płycie pasa o średnicy $d = 12 \text{ mm}$: v_{pl} – prędkość uplastyczniania, 1 – obszar wypływu, 2 – rdzeń pasa



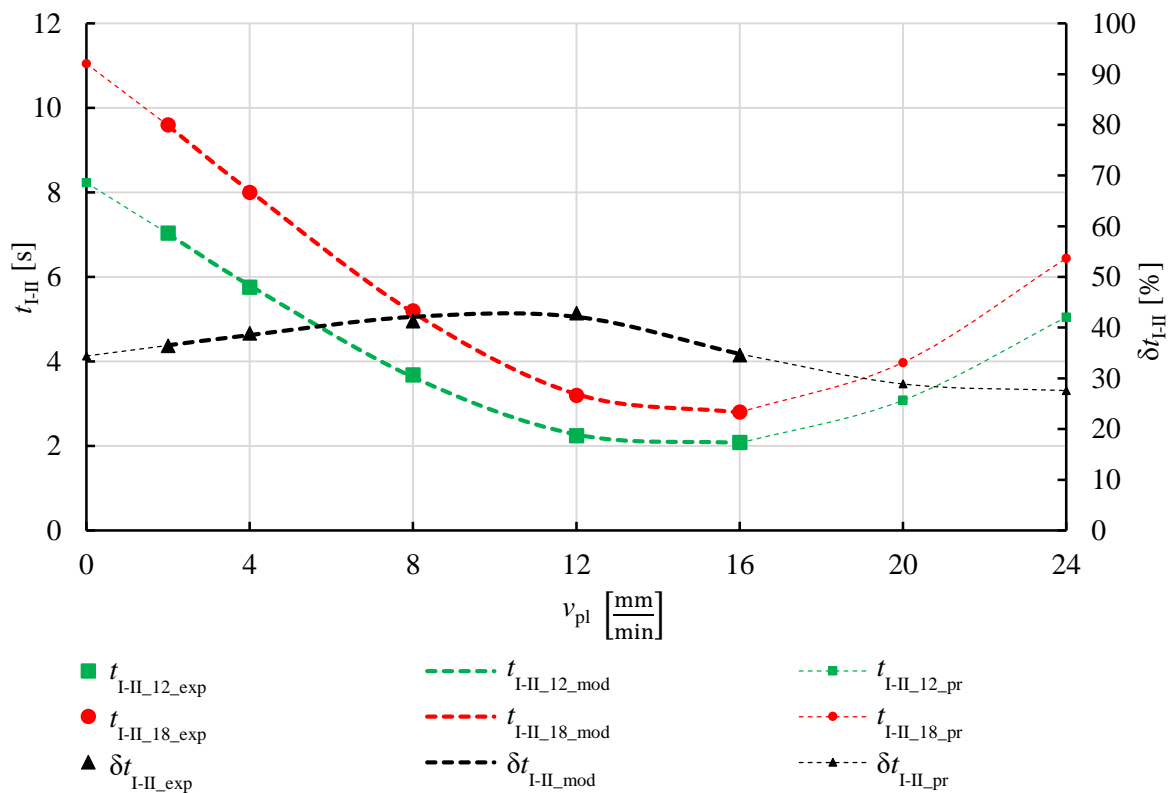
Rys. 90. Metodyka wyznaczania wartości czasu przejścia pomiędzy kolejnymi fazami uplastyczniania: t_{pl} – czas uplastyczniania, F_{pl} – siła uplastyczniania, s_{pl} – przemieszczenie przy uplastycznianiu, t_{I-II} – czas przy zmianie fazy uplastyczniania, s_{I-II} – przemieszczenie przy zmianie fazy uplastyczniania; *I* – uplastycznianie ustalone, *II* – uplastycznianie nieustalone

W celu precyzyjnego określenia wartości tego parametru, założono że styczne do charakterystyki uplastycznienia $F_{pl}(s_{pl})$ w obu fazach tej operacji wyznaczone będą na podstawie stycznych:

- w fazie I w zakresie Δs_I obejmującym cały liniowy zakres uplastycznienia,
- w fazie II w zakresie Δs_{II} obejmującym co najmniej 20% szerokości zakresu uplastycznienia (tj. przedział o szerokości co najmniej 1 mm odnosząc to do przemieszczenia s_{pl}),

przy założeniu dopasowania stycznej do funkcji uplastycznienia współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,9$.

Parametr ten określa wartość czasu t_{pl} podczas procesu uplastycznienia (można go również odnieść do przemieszczenia s_{pl} ze względu na stałą wartość prędkości v_{pl}), przy którym uplastycznianie ustalone zmienia swój charakter w nieustalone. W celu poddania go szerszej analizie, można zestawzić go np. z prędkością uplastycznienia v_{pl} dla obu średnic badanych próbek (Rys. 91).



Rys. 91. Charakterystyka czasu t_{I-II} przejścia pomiędzy kolejnymi fazami uplastycznienia w funkcji prędkości tej operacji v_{pl} dla obu średnic badanych we wstępnym etapie, a także względnej różnicy δt_{I-II} pomiędzy wartościami tego parametru określonej w tej samej dziedzinie: $t_{I-II_12_exp}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, wyznaczona eksperymentalnie, $t_{I-II_12_mod}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, wyznaczona z modelu matematycznego, $t_{I-II_12_pr}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, przewidywana dla innych prędkości uplastycznienia v_{pl} (analogiczne oznaczenia dla pasa o średnicy $d = 18$ mm oraz dla względnej różnicy δt_{I-II} pomiędzy obydwooma rodzajami pasa)

Obie uzyskane charakterystyki, mogą zostać aproksymowane z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, przy założeniu dopasowania modelu do danych pomiarowych określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,9996$, do postaci funkcji Fouriera reprezentowanej zależnością:

$$t_{I-II_mod} = a_0 + a_1 \cdot \cos(a_2 \cdot v_{pl}) + b_1 \cdot \sin(b_2 \cdot v_{pl}), \quad (5.3)$$

gdzie: a_0, a_1, a_2, b_1 i b_2 stanowią współczynniki stałe. W wyniku tego działania otrzymano modelowe przebiegi czasu potrzebnego do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm (funkcja $t_{I-II_12_mod}$) oraz $d = 18$ mm

(funkcja $t_{I-II_{12_mod}}$), oraz przewidywane w szerszym zakresie prędkości uplastycznienia v_{pl} (funkcje $t_{I-II_{12_pr}}$ oraz $t_{I-II_{12_pr}}$), przedstawione na Rys. 91.

Jak wynika z wykreślonych charakterystyk, początkowo wartość czasu t_{I-II} zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości uplastycznienia v_{pl} , co jest efektem oczekiwanym, ze względu na to, że wyższa prędkość źródła ciepła powoduje szybsze nagrzewanie się materiału (rozdział 5.4). Przy dalszym zwiększaniu prędkości uplastycznienia v_{pl} dynamika zmiany wartości tego parametru staje się coraz mniejsza. Matematycznym dowodem tego zjawiska może być wartość pochodnej funkcji opisującej ten parametr (5.3), która dąży do zera w przypadku, gdy zmienna niezależna (prędkość uplastycznienia v_{pl}) dąży do wartości około $17 \frac{mm}{min}$, czyli maksymalnej badanej. Zjawisko to można również zaobserwować podczas analizy otrzymanych uśrednionych charakterystyk uplastycznienia (Tab. 33 i 34), gdzie wraz ze zwiększaniem się wartości prędkości uplastycznienia v_{pl} zacierają się wyraźne granice pomiędzy obiema fazami.

Fizyczną interpretacją tego zjawiska może być fakt, że zwiększenie prędkości uplastycznienia v_{pl} skutkuje niewystarczającą szybkością nagrzewania się materiału, w stosunku do prędkości odkształcenia. W związku z tym, przy wyższych wartościach prędkości v_{pl} zachodzi raczej ściskanie materiału w stanie stałym, a nie właściwe uplastycznienie. Skutkuje to tym, że poszczególne charakterystyki uplastycznienia $F_{pl}(s_{pl})$, dla różnych średnic próbek d (Tab. 33 i 34), stają się do siebie podobne (przy założeniu różnych wartości liczbowych siły F_{pl} , co wynika z innego pola przekroju) oraz do wyników próby ściskania (Rys. 49). W wyniku tego, przy wyższych wartościach prędkości v_{pl} jej wpływ na przebieg uplastycznienia staje się mniejszy, ze względu na większy wpływ właściwości sprężystych materiału niż lepkich, ponieważ jest on niedostatecznie rozgrzany. Oczywiście, nadal uzyskane wartości siły uplastyczniającej F_{pl} są różne, ale kształt charakterystyki uplastycznienia (a raczej procesu ściskania ciała stałego) jest podobny.

Korzystając z opracowanych funkcji ($t_{I-II_{12_mod}}$ oraz $t_{I-II_{12_mod}}$) można dokonać ich ekstrapolacji w dziedzinie prędkości uplastycznienia v_{pl} uzyskując charakterystyki predykcyjne ($t_{I-II_{12_pr}}$ oraz $t_{I-II_{12_pr}}$) dla niższych i wyższych wartości prędkości v_{pl} (Rys. 91). Analizując ich przebieg w rozszerzonej dziedzinie v_{pl} można zaobserwować wzrost wartości czasu przejścia pomiędzy fazami uplastycznienia. Dla niższych wartości prędkości, efekt ten jest spodziewany, ze względu na wolniejsze nagrzewanie się materiału, w wyniku niższej wartości prędkości źródła ciepła, co powoduje, że proces ten trwa dłużej. Natomiast dla wyższych wartości prędkości, zjawisko to jest nieoczekiwane i wynika prawdopodobnie z całkowitej zmiany natury procesu – przejście do czystego ściskania ciała stałego, zamiast uplastycznienia. W takim przypadku, odpowiedź materiału na wymuszenie nie zależy tak znacząco od prędkości odkształcenia. Zjawisko to natomiast nie ma większego wpływu na dalsze działania badawcze nad zgrzewaniem, ponieważ ten zakres prędkości uplastycznienia v_{pl} nie może mieć zastosowania, wobec niedostatecznego nagrzewania materiału.

Jak wynika z przedstawionej charakterystyki (Rys. 91) zależności pomiędzy uzyskanymi wartościami czasu przejścia z fazy *I* do *II* dla obu średnic d pasa są bardzo podobne, a różnica pomiędzy nimi jest stała w całej dziedzinie v_{pl} . W celu weryfikacji tego zjawiska, wyznaczyć można parametr kontrolny δt_{I-II} , stanowiący różnicę procentową pomiędzy wartościami czasu t_{I-II} dla obu średnic we wszystkich punktach pomiarowych, wyznaczany na podstawie zależności:

$$\delta t_{I-II_exp}(v_{pl}) = \frac{|t_{I-II_18_exp} - t_{I-II_12_exp}|}{t_{I-II_18_exp}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

Ponadto, wyznaczony parametr poddać można również operacji aproksymacji i ekstrapolacji, otrzymując odpowiednio wartości δt_{I-II_mod} oraz δt_{I-II_pr} .

Jak wynika z analizy otrzymanych w ten sposób charakterystyk δt_{I-II_exp} , δt_{I-II_pr} , δt_{I-II_mod} oraz δt_{I-II_pr} , przedstawionych w dziedzinie v_{pl} (Rys. 91), parametr ten jest nieliniowo zależny od prędkości v_{pl} , przy czym wartość maksymalną obserwuje się w okolicach pośrednich wartości v_{pl} . Różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wynosi około 20%.

Różnica pomiędzy czasem przejścia zmiany fazy uplastyczniania δt_{I-II} przyjmuje wartości wynoszące od około 28% do 42%, przy czym dla pasa o średnicy $d = 18$ mm wartości czasu t_{I-II} są zawsze wyższe. Fizyczną interpretacją tego zjawiska jest wyższa objętość materiału, który musi zostać rozgrzany do temperatury uplastycznienia (o około 56%), co wynika z wyższej wartości średnicy d . W związku z tym, potrzebne jest więcej energii cieplnej do wywołania wzrostu temperatury materiału. Zakładając stałą moc cieplną dostarczaną przez gorącą płytę, co skutkuje stałym strumieniem ciepła, zgodnie z prawami termodynamiki dłuższy czas nagrzewania w takim przypadku jest efektem oczekiwanym [198].

W przypadku wysokich wartości prędkości uplastyczniania v_{pl} materiał nie nagrzewania się dostatecznie i jest wtedy raczej ściskany w stanie stałym, niż uplastyczniany. W takim przypadku, dla tego tworzywa sztucznego (TPU C85A) różnica pomiędzy poszczególnymi średnicami d podczas ściskania jest zauważalna (Rys. 46), ale nie jest tak znacząca jak podczas plastycznego płynięcia, gdzie występuje duży udział właściwości lepkich, na rzecz właściwości sprężystych.

Niższe wartości parametru δt_{I-II} przy niższej prędkości v_{pl} wynikają z faktu, że materiał w tym przypadku jest nadmiernie nagrzewany. Należy zauważyć, że stosunek pola powierzchni tworzącej pasa A (odpowiedzialnego za straty energii cieplnej na drodze promieniowania i konwekcji) do nagrzewanej objętości V , maleje wraz ze zwiększaniem wartości średnicy pasa d (przy określonej jednostkowej wysokości h):

$$\Omega = \frac{A}{V} = \frac{\pi \cdot d \cdot h}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h} = \frac{4}{d} \quad (5.5)$$

W rezultacie wpływ wielkości powierzchni strat ciepła A jest mniejszy dla pasów o większej średnicy d , stąd takie próbki charakteryzują się mniejszą względną stratą energii podczas uplastyczniania. Zjawisko to może powodować nieznaczny spadek czasu potrzebnego do zmiany fazy uplastyczniania t_{I-II} dla większej średnicy d , względem tej mniejszej, dla niskich wartości prędkości v_{pl} , kiedy czas nagrzewania jest długi i straty energii są wysokie. Powoduje to zmniejszenie wartości współczynnika δt_{I-II} w tym zakresie dziedziny v_{pl} . Należy jednak pamiętać o tym, że to zjawisko nie zbilansuje większej objętości materiału, który trzeba nagrzać, w związku z tym różnica w tym aspekcie pomiędzy średnicami nadal jest widoczna.

5.3.3. Badania finalne uplastyczniania pasa – dyskusja rezultatów

Po doprecyzowaniu efektywnego zakresu prędkości uplastyczniania v_{pl} po pierwszym etapie badań, przeprowadzono finalne próby uplastyczniania, podczas których: zawężono zakres zmienności prędkości uplastyczniania v_{pl} , uzmienniono wartość temperatury gorącej płyty T_p oraz uzupełniono wyniki

o dodatkową średnicę pasa $d = 15$ mm. Przykładowe uśrednione uzyskane wyniki badań uplastyczniania dla pasa o średnicy $d = 15$ mm i temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ i różnych prędkości uplastyczniania v_{pl} przedstawiono w tabeli 35.

Wyniki otrzymane z poszczególnych prób badawczych były względnie powtarzalne, maksymalne odchylenie standardowe od średniej w tym przypadku nie przekraczało 10%.

W ogólnym ujęciu wyniki otrzymane w tym etapie badań są niemal identyczne z tymi otrzymanymi w wyniku badań wstępnych. Operacja uplastyczniania tworzywa, podobnie jak w poprzednim przypadku podzielona może być na dwie fazy: uplastycznienia ustalonego (*I*) i nieustalonego (*II*). Odpowiednio dobrany zakres prędkości uplastyczniania v_{pl} pozwolił na ukazanie różnic pomiędzy poszczególnymi przebiegami *II* fazy, na granicy pomiędzy nadmiernym nagrzewaniem tworzywa, a ścisaniem ciała stałego.

Podobnie jak w poprzednim etapie badawczym, wszystkie otrzymane wyniki można podzielić na trzy podstawowe grupy ze względu na charakter zmienności siły uplastyczniającej F_{pl} w zależności od odległości uplastycznienia s_{pl} (lub czasu t_{pl}). Przy założeniu zwiększania tylko prędkości uplastyczniania v_{pl} i stałych wartości pozostałych parametrów (T_p oraz d), można poczynić 3 następujące obserwacje:

- wartość siły F_{pl} w pierwszej kolejności narasta niemal liniowo, a potem się zmniejsza w sposób nieliniowy, dla niższych wartości v_{pl} ,
- wartość siły F_{pl} w pierwszej kolejności narasta niemal liniowo, a potem jest niemal stała z pewnym nieliniowym odchyleniem, dla pośredniej wartości v_{pl} ,
- wartość siły F_{pl} w pierwszej kolejności narasta niemal liniowo, a potem się znów narasta, jednakże w sposób nieliniowy, dla najwyższej stosowanej prędkości v_{pl} .

Otrzymane w tych badaniach wyniki, można również przedstawić na diagramie modelowym operacji uplastyczniania pasa (Rys. 88), z tym że składowe funkcje opisujące jej przebieg, przyjmują postać:

$$F_{pl_I}(s_{pl}) = c_1 \cdot s + c_2, \quad (5.6)$$

gdzie:

$$c_1 = f(v_{pl}, T_p, d), \quad (5.7)$$

$$c_2 = f(v_{pl}, T_p, d), \quad (5.8)$$

a także:

$$F_{pl_{II}}(s_{pl}) = c_3 \cdot t_{pl}^{c_4}, \quad (5.9)$$

dla:

$$c_3 = f(d), \quad (5.10)$$

oraz:

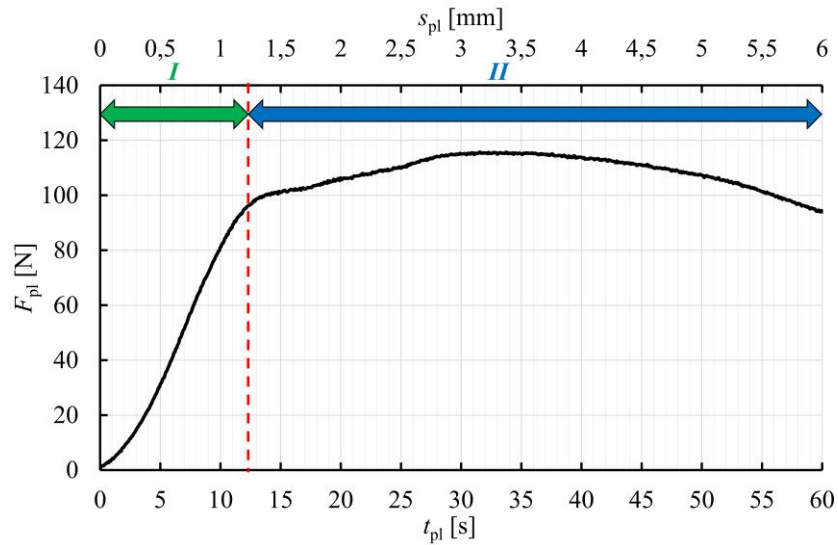
$$c_4 = f(T_p) > 0 \text{ dla } v_{pl} = v_{pl1}, \quad (5.11)$$

$$c_4 = f(T_p) = 0 \text{ dla } v_{pl} = v_{pl2}, \quad (5.12)$$

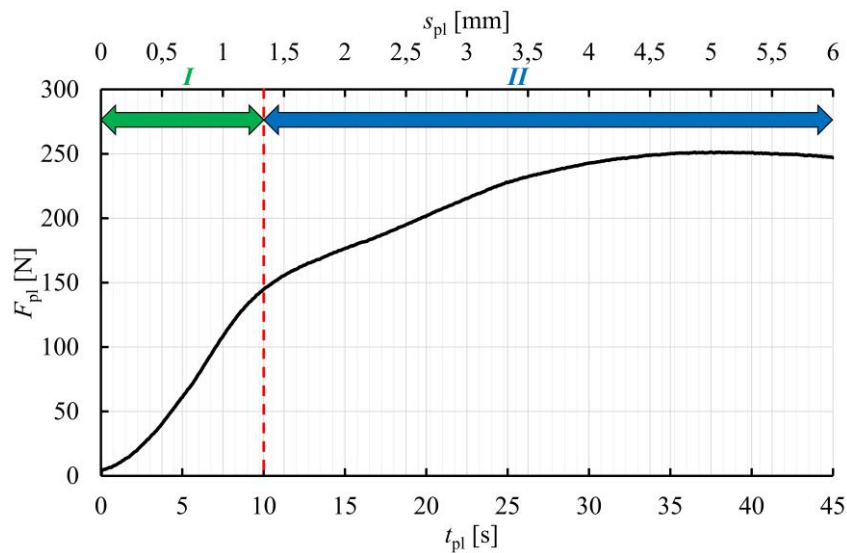
$$c_4 = f(T_p) < 0 \text{ dla } v_{pl} = v_{pl3}. \quad (5.13)$$

Tab. 35. Wybrane charakterystyki uśrednionej siły uplastyczniania F_{pl} pasa o średnicy $d = 15$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 6, 8 i 10 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$, dla temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$, w zależności od czasu t_{pl} uplastyczniania oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – faza wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – faza zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastyczniania v_{pl}

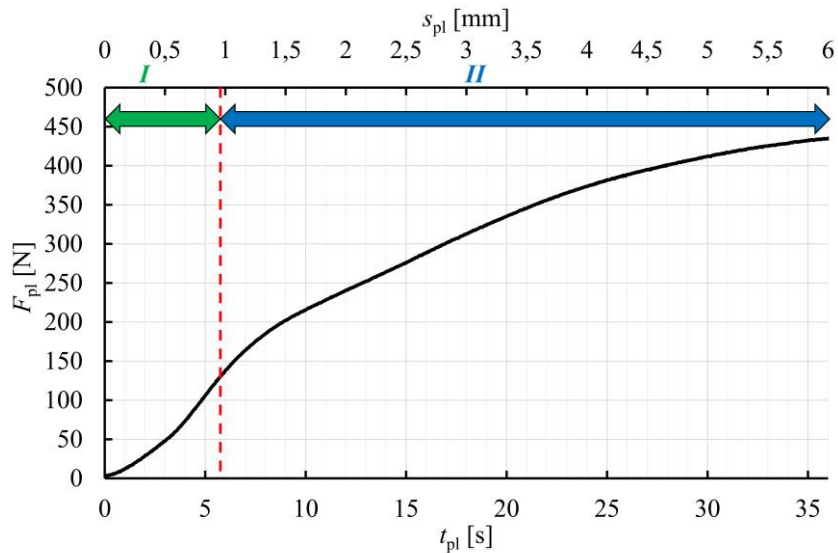
a) $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$



b) $v_{pl} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$



c) $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$



Na podstawie analizy otrzymanych charakterystyk $F_{pl}(t_{pl})$, pod kątem wpływu poszczególnych parametrów technologicznych na przebieg tej operacji i biorąc pod uwagę możliwość wykreślenia charakterystyki modelowej, można wysunąć następujące wnioski:

- zakładając stałe wartości: średnicy pasa d oraz temperatury gorącej płyty T_p , występuje dodatnia korelacja pomiędzy współczynnikiem c_1 charakterystyki modelowej, a prędkością uplastyczniania v_{pl} , co również potwierdzono w badaniach wstępnych,
- zakładając stałe wartości: średnicy pasa d oraz prędkości uplastyczniania v_{pl} , występuje ujemna korelacja pomiędzy współczynnikiem c_1 charakterystyki modelowej, a wartością temperatury gorącej płyty T_p ,
- zakładając stałe wartości: prędkości uplastyczniania v_{pl} oraz temperatury gorącej płyty T_p , występuje dodatnia korelacja pomiędzy współczynnikiem c_1 charakterystyki modelowej, a średnicą pasa d .

Obserwacje te pozwalają na potwierdzenie wnioskowania dotyczącego zjawisk fizycznych zachodzących podczas tej operacji, które zostało przeprowadzone we wstępnym etapie badań.

5.3.4. Modelowanie charakterystyki uplastycznienia materiału

W celu wyznaczenia efektywnych parametrów procesu uplastyczniania pasa na gorącej płycie, można wyznaczyć model matematyczny opisujący zależność siły uplastyczniającej F_{pl} od podstawowych parametrów technologicznych podczas uplastyczniania (prędkość uplastyczniania v_{pl} oraz wartość temperatury gorącej płyty T_p) oraz od przemieszczenia podczas uplastyczniania s_{pl} [66].

Z punktu widzenia projektowania urządzenia, celem jest uzyskanie maksymalnej możliwej efektywności energetycznej. Wiąże się to w pierwszej kolejności z pozyskaniem takich parametrów technologicznych, przy których wymagana moc napędu głównego będzie jak najmniejsza. Z drugiej jednak strony, wysoką efektywność energetyczną tego procesu, należy rozumieć jako uzyskanie takiego przebiegu uplastyczniania, które będzie cechować się:

- dostatecznym i niezbyt małym stopniem rozgrzania materiału, który powinien powodować jego wystarczające uplastycznienie, tak aby nie zachodził proces ściskania materiału w stałym stanie skupienia. Zjawisko takie może zachodzić w przypadku zastosowania:
 - zbyt niskiej wartości temperatury gorącej płyty T_p ,
 - zbyt wysokiej wartości prędkości uplastyczniania v_{pl} .

Taki przebieg tej operacji mógłby powodować:

- nadmierny wzrost siły uplastyczniającej F_{pl} , co powoduje niepotrzebne straty energii,
- trudności z właściwym zainicjowaniem reakcji chemicznych i interakcji fizycznych między makromolekułami polimeru,
- a z drugiej strony, niezbyt nadmiernym nadtopieniem (wręcz przegrzaniem) materiału. Taki przypadek może powodować wypływanie tworzywa ze strefy roboczej, skutkujący znacznymi deformacjami pasa oraz stratą materiału. Dodatkowo zjawisko to generować będzie niepotrzebne straty energii. Przyczyny takiego stanu, są dokładnie odwrotne względem czynników powodujących niedostateczne rozgrzanie tworzywa.

Na podstawie wykonanej analizy zjawisk fizycznych, można więc wywnioskować, że prawidłowy przebieg operacji uplastyczniana, w odniesieniu do jednoznacznego i weryfikowalnego parametru jakim jest siła F_{pl} , powinien charakteryzować się możliwie niską jej wartością i stałym przebiegiem w całym zakresie uplastyczniana nieustalonego. Działanie to powinno zapewnić poprawny przebieg procesu zgrzewania.

Po sformułowaniu takich wytycznych, uwzględniając wyniki przeprowadzonych badań, można więc opracować model matematyczny wpływu parametrów technologicznych (prędkości uplastyczniana v_{pl} i temperatury gorącej płyty T_p) na wartość siły F_{pl} w II fazie tej operacji. Wtedy też zazwyczaj obserwowalna jest jej maksymalna wartość, na przestrzeni całej operacji:

- na początku tej fazy dla niewielkich wartości prędkości uplastyczniana v_{pl} oraz względnie wysokiej wartości temperatury gorącej płyty T_p ,
- po środku tej fazy dla pośrednich wartości prędkości uplastyczniana v_{pl} i pośredniej wartości temperatury gorącej płyty T_p ,
- pod koniec tej fazy dla względnie dużych wartości prędkości uplastyczniana v_{pl} oraz względnie niewielkiej wartości temperatury gorącej płyty T_p .

Do opracowywania modelu matematycznego przyjęto następujące uwarunkowania dotyczące zmienności parametrów procesu:

- średnica pasa d zmienna w sposób dyskretny i przyjmująca wartości: 12 mm, 15 mm i 18 mm,
- temperatura gorącej płyty T_p zmienna w sposób ciągły w zakresie od 270°C do 300°C,
- prędkość uplastyczniana v_{pl} zmienna w sposób ciągły w zakresie od $4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ do $10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$,

Wyznaczenie modelu matematycznego opisującego funkcję przebiegu siły uplastyczniana F_{pl} wymaga badania przebiegu charakterystyki uplastyczniana $F_{pl}(s_{pl})$ w zakresie uplastyczniana nieustalonego – czyli w ramach drugiej fazy operacji. W tym celu, w zakresie otrzymanych charakterystyk $F_{pl}(s)$ wyznaczono pięć punktów kontrolnych $s_1 \dots s_5$, których położenie określone jest poprzez odległość uplastyczniana s (Rys. 92). Monotoniczność funkcji $F_{pl}(s)$ w takim przypadku, można zbadać poprzez wyznaczenie stycznych do funkcji $F_{pl}(s)$ w każdym z punktów kontrolnych s_i , opisanych za pomocą równania:

$$F_{pli} = a_i \cdot s_i + b_i, \quad (5.14)$$

$$\text{dla } i = 1 \dots 5. \quad (5.15)$$

Szukane współczynniki prostej, będącej styczną do funkcji $F_{pl}(s)$, wyznaczono metodą regresji liniowej z przedziału o szerokości Δs :

$$\Delta s = 0,4 \text{ mm}, \quad (5.16)$$

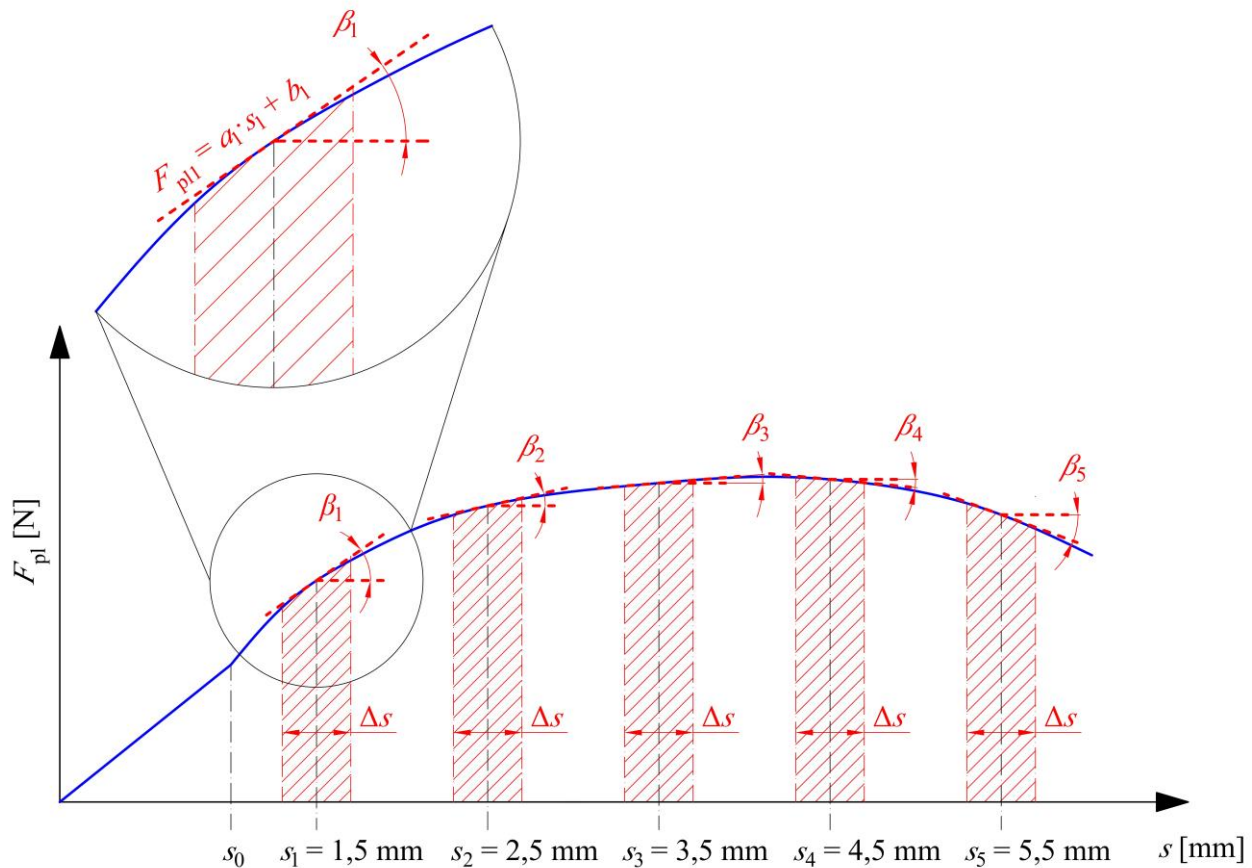
będącego w następującej korelacji z punktami kontrolnymi:

$$\text{od } s_i - 0,2 \text{ mm}, \quad (5.17)$$

$$\text{do } s_i + 0,2 \text{ mm}, \quad (5.18)$$

tak aby środek analizowanych przedziałów był umieszczony dokładnie w punkcie s_i , co warunkuje styczność do krzywej w punkcie. Wyznaczone funkcje liniowe cechują się dopasowaniem charakterystyk do

danych określonym współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,95$. Można więc uznać, że dane te są względnie dobrze dopasowane, co wynika głównie z niewielkiej szerokości analizowanego przedziału.



Rys. 92. Przykładowa rzeczywista charakterystyka uplastyczniania materiału pasa $F_{pl}(s)$ z oznaczonym sposobem badania monotoniczności funkcji w zakresie nieustalonego uplastyczniania tworzywa: $F_{pl1} \dots F_{pl5}$ – wartości siły uplastyczniającej w poszczególnych punktach kontrolnych, s_0 – wartość początkowa przemieszczenia (granica rozpoczęcia nieustalonego uplastyczniania), $s_1 \dots s_5$ – współrzędne punktów kontrolnych, Δs – zakres przedziału przemieszczenia podlegający analizie, $a_1 \dots a_5$ – współczynniki kierunkowe prostych aproksymujących, $b_1 \dots b_5$ – współczynniki stałe prostych aproksymujących, $\beta_1 \dots \beta_5$ – kąt nachylenia stycznych w punktach pomiarowych $s_1 \dots s_5$

W związku z przyjętymi współrzędnymi punktów kontrolnych s_i (1,5 mm; 2,5 mm; 3,5 mm; 4,5 mm; 5,5 mm), model matematyczny zostanie wyznaczony dla przedziału od 1,5 mm do 5,5 mm – tak aby uzyskać najlepsze odwzorowanie otrzymanych danych empirycznych w postaci modelu.

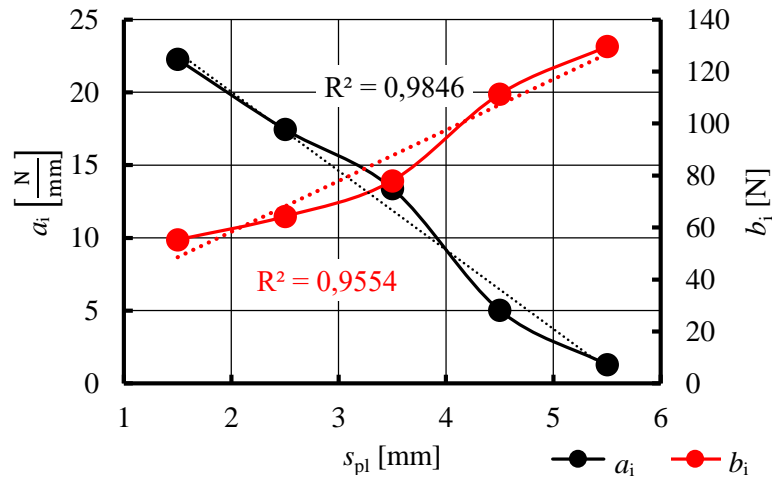
W następnej kolejności wyznaczono zależność współczynników równania (5.14) od położenia punktu kontrolnego s (Rys. 93). Współczynniki te można opisać za pomocą funkcji liniowej, przy dopasowaniu krzywej do danych określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,95$:

$$a_i = a_{sa} \cdot s + b_{sa}, \quad (5.19)$$

$$b_i = a_{sb} \cdot s + b_{sb}. \quad (5.20)$$

Na tej podstawie, możliwe jest wyznaczenie modelu opisującego zależność siły uplastyczniającej F_{pl_mod} od położenia punktu kontrolnego w całym zakresie dziedziny – przemieszczenia s :

$$F_{pl_mod} = (a_{sa} \cdot s + b_{sa}) \cdot s + (a_{sb} \cdot s + b_{sb}). \quad (5.21)$$



Rys. 93. Przykładowa zależność pomiędzy współczynnikami a_i oraz b_i , a także przemieszczeniem podczas uplastycznienia s dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, gorącą płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$

Otrzymana na tym etapie zależność (5.21), nie uwzględnia żadnych zmiennych parametrów technologicznych uplastyczniania materiału (d , T_p , v_{pl}). W związku z tym, postanowiono uzmiennić tę funkcję i w pierwszej kolejności wyznaczono zależność współczynników otrzymanego równania (5.21) od prędkości uplastyczniania v_{pl} (Rys. 94). Możliwe jest ich opisanie za pomocą funkcji liniowej, przy dopasowaniu danych do modelu określonego za pomocą współczynnika determinacji $R^2 > 0,96$, za pomocą zbioru funkcji postaci:

$$a_{sa} = a_{vasa} \cdot v_{pl} + b_{vasa}, \quad (5.22)$$

$$b_{sa} = a_{vbsa} \cdot v_{pl} + b_{vbsa}, \quad (5.23)$$

$$a_{sb} = a_{vasb} \cdot v_{pl} + b_{vasb}, \quad (5.24)$$

$$b_{sb} = a_{vbsb} \cdot v_{pl} + b_{vbsb}. \quad (5.25)$$

Na tej podstawie możliwe jest wyznaczanie funkcji opisującej zależność siły uplastyczniającej F_{pl_mod} od przemieszczenia s oraz prędkości uplastyczniania v_{pl} :

$$F_{pl_mod} = [(a_{vasa} \cdot v_{pl} + b_{vasa}) \cdot s + (a_{vbsa} \cdot v_{pl} + b_{vbsa})] \cdot s + (a_{vasb} \cdot v_{pl} + b_{vasb}) \cdot s + (a_{vbsb} \cdot v_{pl} + b_{vbsb}). \quad (5.26)$$

Otrzymana zależność (5.26) nie uwzględnia jednakże temperatury gorącej płyty T_p jako kolejnego parametru, dodatkowo zmiennego w sposób ciągły. Aby uzupełnić ten brak wyznaczono zależność współczynników wyznaczonego równania (5.26) od wartości temperatury gorącej płyty T_p (Rys. 95). Wykorzystując regresję liniową, przy dopasowaniu danych określonym współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,9$, współczynniki równania (5.26) można przedstawić jako:

$$a_{vasa} = a_{tavasa} \cdot T_p + b_{tavasa}, \quad (5.27)$$

$$b_{vasa} = a_{tbvasa} \cdot T_p + b_{tbvasa}, \quad (5.28)$$

$$a_{vbsa} = a_{tavbsa} \cdot T_p + b_{tavbsa}, \quad (5.29)$$

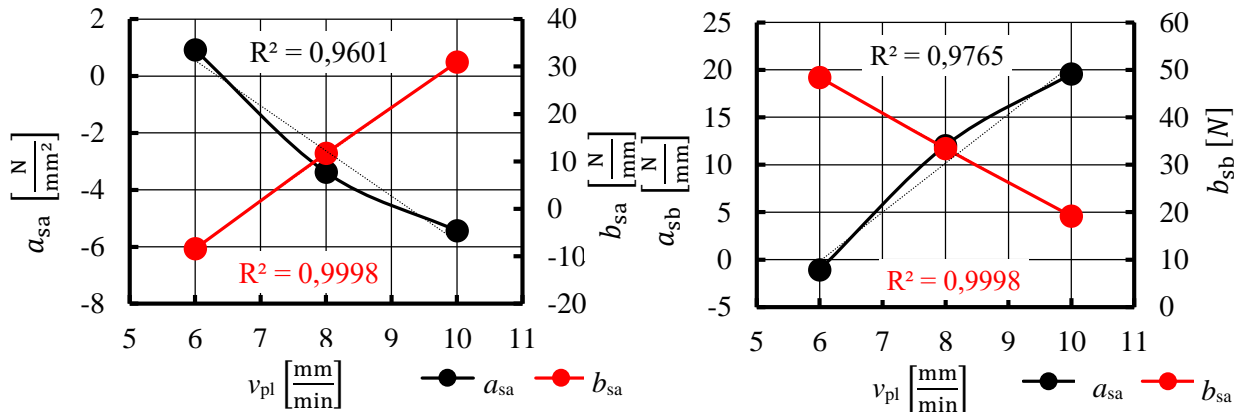
$$b_{vbbsa} = a_{tbvbbsa} \cdot T_p + b_{tbvbbsa}, \quad (5.30)$$

$$a_{vasb} = a_{tavasb} \cdot T_p + b_{tavasb}, \quad (5.31)$$

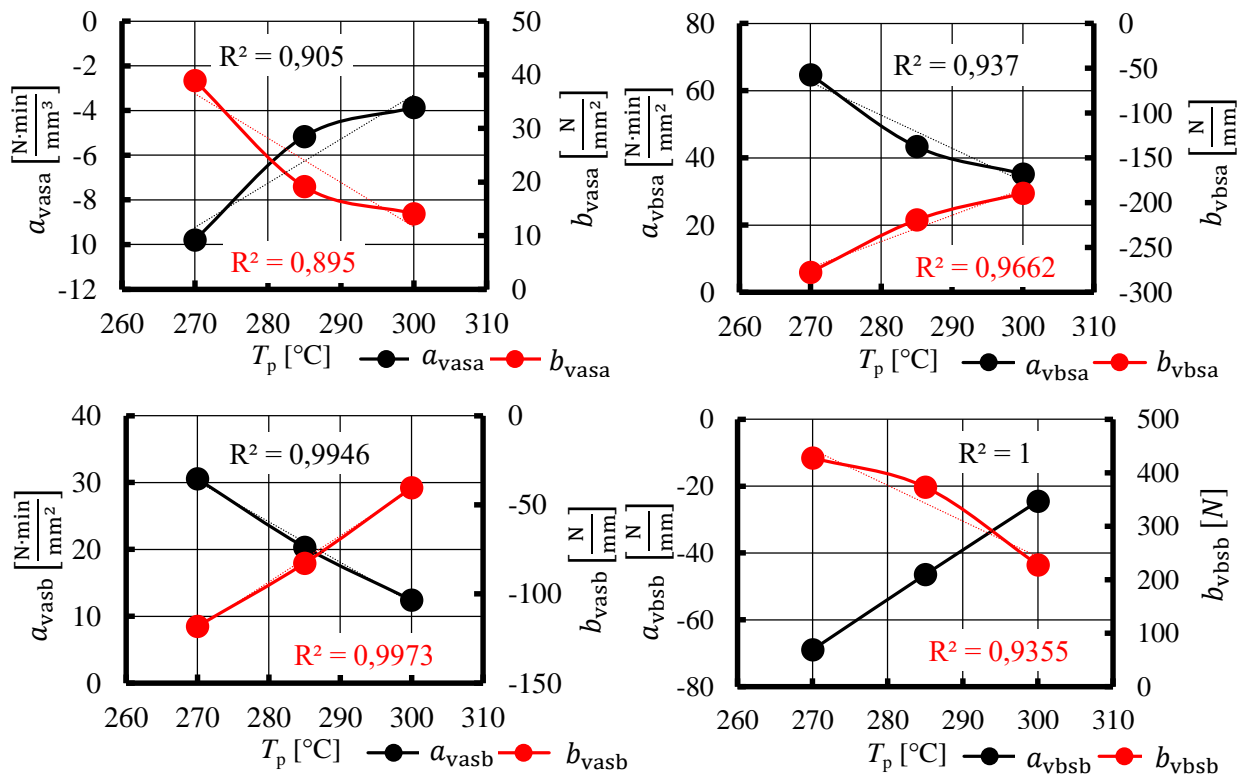
$$b_{vasb} = a_{tbvasb} \cdot T_p + b_{tbvasb}, \quad (5.32)$$

$$a_{vbsb} = a_{tavbsb} \cdot T_p + b_{tavbsb}, \quad (5.33)$$

$$b_{vbsb} = a_{tbvbsb} \cdot T_p + b_{tbvbsb}. \quad (5.34)$$



Rys. 94. Przykładowa zależność pomiędzy wartościami współczynników a_{sa} , b_{sa} , a_{sb} , oraz b_{sb} , a prędkością uplastyczniania materiału pasa v_{pl} , dla cięgna o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$



Rys. 95. Przykładowa zależność pomiędzy współczynnikami: a_{vasa} , b_{vasa} , a_{vbbsa} , b_{vbbsa} , a_{vasb} , b_{vasb} , a_{vbsb} oraz b_{vbsb} , a wartością temperatury gorącej płyty T_p , dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Wykorzystując wyznaczone współczynniki, wartość siły uplastyczniającej F_{pl_mod} w zależności od parametrów technologicznych (T_p oraz v_{pl}) a także przemieszczenia s , można opisać jako:

$$F_{pl_mod} = \{[(a_{tavasa} \cdot T_p + b_{tavasa}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvasa} \cdot T_p + b_{tbvasa})] \cdot s + (a_{tavbsa} \cdot T_p + b_{tavbsa}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvbsa} \cdot T_p + b_{tbvbsa})\} \cdot s + \{[(a_{tavasb} \cdot T_p + b_{tavasb}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvasb} \cdot T_p + b_{tbvasb})] \cdot s + (a_{tavbsb} \cdot T_p + b_{tavbsb}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvbsb} \cdot T_p + b_{tbvbsb})\}. \quad (5.35)$$

Należy zauważyć, że uzyskana zależność (5.35) nie uwzględnia średnicy pasa d . Uzmiennianie modelu siły uplastyczniającej F_{pl_mod} od tego parametru jest jednak bezcelowe, ponieważ jego wartość zmienia się sposób dyskretny, zależny od aktualnych wymagań. Celem opracowywania tego modelu nie jest optymalizacja średnicy zgrzewanego pasa d , a dobór parametrów dla założonej wartości tego parametru.

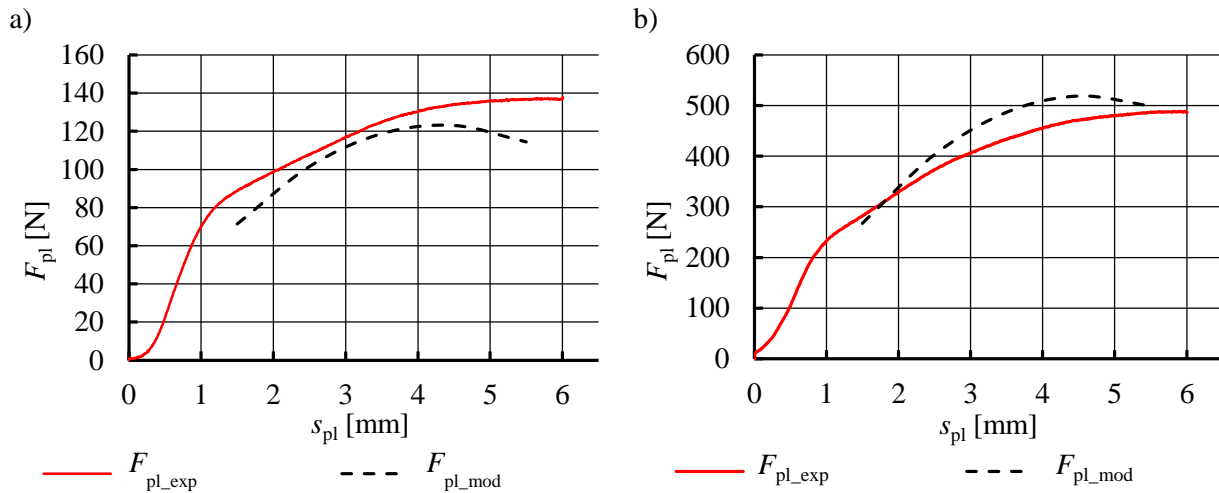
Na podstawie wyznaczonego modelu (5.35) wyznaczono wartości siły uplastyczniającej F_{pl_mod} i porównano je z wynikami otrzymanymi na podstawie badań empirycznych procesu uplastyczniania materiału F_{pl_exp} . Przykładowe zestawienie wartości tego porównania, dla losowo wybranych punktów kontrolnych (wartości przemieszczenia podczas uplastycznienia s_i) i różnych wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz prędkości uplastycznienia v_{pl} , przedstawiono w Tab. 36.

Tab. 36. Wyniki porównania pomiędzy wstępnie wyznaczonymi wartościami siły uplastyczniającej z otrzymanego modelu F_{pl_mod} , a wynikami badań eksperymentalnych F_{pl_exp} , a także wartościami siły uplastyczniającej obliczonymi na podstawie skorygowanego modelu $F_{pl_mod_c}$ dla kilku, losowo wybranych punktów kontrolnych s_i

Parametr	Oznaczenie	Wartość								
		12			15			18		
Średnica pasa	d [mm]									
Temperatura gorącej płyty	T_p [°C]	270±1	285±1	300±1	270±1	285±1	300±1	270±1	285±1	300±1
Prędkość uplastyczniania	v_{pl} $\left[\frac{mm}{min}\right]$	6	8	10	8	10	6	6	10	8
Współrzędna punktu kontrolnego	s_i [mm]	2,5	3,5	4,5	2,5	1,5	3,5	2,5	4,5	1,5
Siła z badań empirycznych	F_{pl_exp} [N]	56,918	72,520	88,886	253,747	201,968	86,973	312,758	741,677	246,999
Siła z pierwotnego modelu	F_{pl_mod} [N]	45,193	73,199	85,927	300,144	210,657	81,419	316,090	784,093	215,600
Błąd pierwotnego modelu	δF_{mod} [%]	20,60	0,94	3,33	18,28	4,30	6,39	1,07	5,72	12,71
Siła ze skorygowanego modelu	$F_{pl_mod_c}$ [N]	54,409	72,111	89,847	246,347	201,192	86,175	313,959	744,032	243,062
Błąd skorygowanego modelu	δF_{mod_c} [%]	4,41	0,56	1,08	2,92	0,38	0,92	0,38	0,32	1,59

Na podstawie analizy porównawczej uzyskanych wyników (F_{pl_mod} i F_{pl_exp}), można wywnioskować, że w niektórych punktach pomiarowych wyniki te znacznie się różnią. W związku z tym, wykonano również zestawienie graficzne przebiegu siły uplastyczniającej F_{pl_mod} (zgodnie z opracowanym modelem), z danymi empirycznymi F_{pl_exp} (Rys. 96). Na tej podstawie można wywnioskować, że uzyskane odchyłki

wynikają głównie z innego kształtu przebiegu siły uplastyczniającej uzyskanej z modelu F_{pl_mod} względem tej z badań empirycznych F_{pl_exp} . Skutkuje to niedostatecznie dokładnym odwzorowywaniem wartości siły uplastyczniającej uzyskanej ze sformułowanego modelu, jednakowego w całym zakresie przemieszczenia, pomimo dobrego zgrubnego dopasowania wartości.



Rys. 96. Przykładowe charakterystyki uplastyczniania materiału $F_{pl}(s)$ w aspekcie porównania przebiegu wartości siły uplastyczniającej wyznaczonej z opracowanego modelu (F_{pl_mod}) i uzyskanej z badań (F_{pl_exp}) dla: a) pasa o średnicy $d = 12$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; b) pasa o średnicy $d = 18$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

W celu kwantyfikacji tych odchyłeń, wyznaczono więc procentową różnicę pomiędzy uzyskanymi wynikami we wszystkich punktach kontrolnych, którą można określić jako procentowy błąd modelu:

$$\delta F_{mod} = \frac{|F_{pl_exp} - F_{pl_mod}|}{F_{pl_exp}} \cdot 100\%. \quad (5.36)$$

Jak wynika z liczbowego porównania wyników (Tab. 36), dla niektórych punktów kontrolnych wartość funkcji błędu modelu δF_{mod} przekracza 20%, co w tym przypadku nie jest wynikiem zadowalającym.

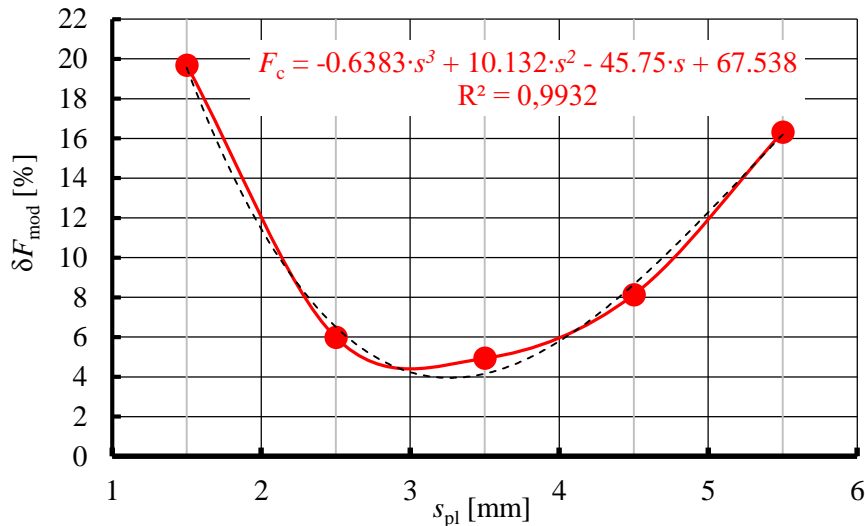
W celu poprawy dopasowania modelu, dla każdej z 27 grup parametrów zmiennych podczas badań uplastyczniania, opracowano funkcję korekcyjną $F_c(s)$, na podstawie procentowych błędów dopasowania modelu w każdym z punktów kontrolnych δF_{mod} . Wykorzystując metodę regresji dla funkcji nieliniowej, możliwe jest jej opisanie za pomocą wielomianu trzeciego stopnia, przy dopasowaniu charakterystyki do zbioru punktów określonym współczynnikiem determinacji $R^2 > 0.99$ (Rys. 97). W związku z tym, wyznaczona funkcja korekcyjna F_c przyjmuje postać:

$$F_c = a_c \cdot s^3 + b_c \cdot s^2 + c_c \cdot s + d_c. \quad (5.37)$$

Biorąc pod uwagę fakt, że funkcja korekcyjna F_c (5.37) została opracowana na podstawie wartości procentowych, opisujących różnice pomiędzy wartością siły wynikającą z modelu, a uzyskaną w sposób eksperymentalny, skorygowany model siły uplastyczniającej $F_{pl_mod_c}$ można przedstawić jako:

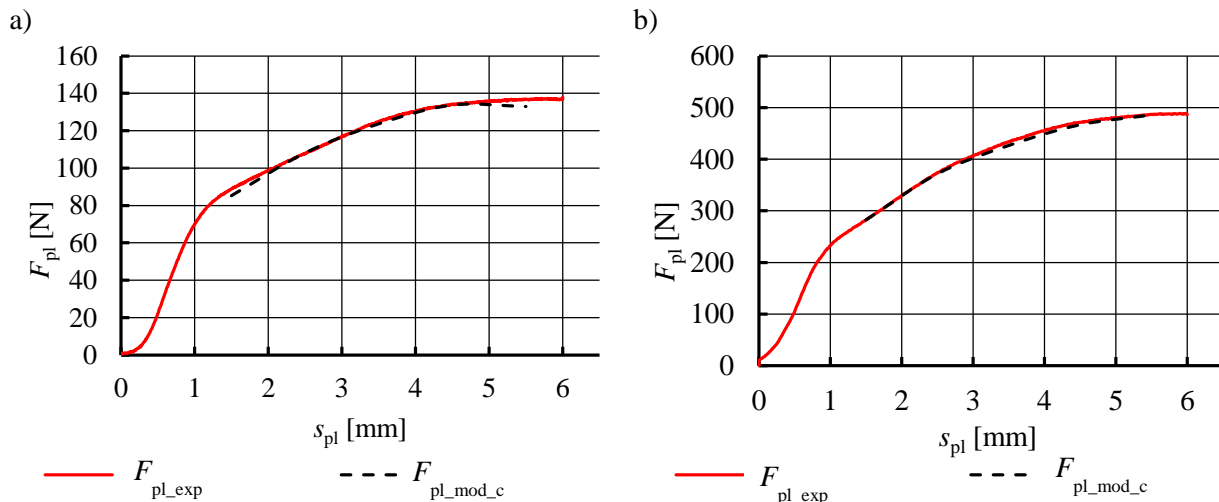
$$F_{pl_mod_c} = F_{pl_mod} \cdot \left(\frac{100 + F_c}{100} \right). \quad (5.38)$$

Na podstawie wyników ze skorygowanego modelu $F_{pl_mod_c}$, możliwe jest wyznaczenie jego błędu procentowego δF_{mod_c} , względem wyników badań eksperymentalnych F_{pl_exp} , w poszczególnych punktach kontrolnych s_i . Procedura obliczania tej wartości jest taka sama jak dla modelu pierwotnego (5.36).



Rys. 97. Przykładowa funkcja korekcyjna przedstawiająca zależność procentowego błędu opracowanego modelu δF_{mod} dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{\text{pl}} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$

Porównanie wyników eksperymentalnych z danymi uzyskanymi ze skorygowanego modelu (Tab. 36 oraz Rys. 98) pokazuje, że zastosowanie funkcji korekcyjnej F_c pozwoliło na lepsze dopasowanie opracowanego modelu do parametrów empirycznych. Dzięki temu, analizując wszystkie przypadki zestawu parametrów technologicznych operacji zgrzewania, błąd modelu δF_{mod_c} nie przekroczył 5% (Tab. 36), co należy uznać za wynik zadowalający.



Rys. 98. Przykładowe charakterystyki uplastyczniania materiału $F_{\text{pl}}(s)$ w aspekcie porównania przebiegu wartości siły uplastyczniającej wyznaczonej z opracowanego, skorygowanego modelu ($F_{\text{pl}_\text{mod}_c}$) i uzyskanej z badań (F_{pl_exp}) dla: a) pasa o średnicy $d = 12$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{\text{pl}} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; b) pasa o średnicy $d = 18$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{\text{pl}} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Należy jednak pamiętać, że zarówno funkcja pierwotna F_{pl_mod} , korekcyjna F_c , a w konsekwencji skorygowany model $F_{\text{pl}_\text{mod}_c}$, są ważne przede wszystkim dla przyjętego zakresu parametrów technologicznych operacji uplastyczniania materiału (v_{pl} oraz T_p), ze względu na to, że opracowane zostały na podstawie badań wykonanych w określonym zakresie. Na potrzeby projektowania układu napędowego urządzenia, podejście to jest jednak wystarczające.

5.3.5. Optymalizacja parametrów technologicznych uplastyczniania

Po wyznaczeniu funkcji opisującej zależność siły uplastyczniającej F_{pl} od podstawowych parametrów technologicznych podczas uplastyczniania (prędkości uplastyczniania v_{pl} , temperatury gorącej płyty T_p oraz przemieszczenia podczas uplastyczniania s_{pl}) możliwe jest wykonanie optymalizacji parametrów technologicznych uplastyczniania w celu uzyskania pożądanego przebiegu tej operacji [66]. Jako bazę do modelowania w takim przypadku można przyjąć wyznaczoną funkcję $F_{pl_mod_c}$.

Na potrzeby tych działań można również wykorzystać wykonany wcześniej podział dziedziny uplastyczniania (Rys. 92). Pozwoli to na wykorzystanie punktów kontrolnych, w których możliwe będzie badanie przebiegu funkcji uplastyczniania, na potrzeby określenia wypełnienia funkcji celu optymalizacji.

Na podstawie tak postawionych wniosków, można więc określić następujące funkcje celu do przeprowadzenia optymalizacji:

- minimalizacja wartości siły uplastyczniania F_{pl} , którą można opisać jako:

$$\min F_{pl}(s_{pl}). \quad (5.39)$$

Biorąc pod uwagę możliwość wykorzystania wcześniej określonych punktów kontrolnych o współrzędnych s_i , w sposób matematyczny tę funkcję celu można zrealizować poprzez sprawdzenie maksymalnej wartości siły uplastyczniającej:

$$\max F_{pli}, \quad (5.40)$$

w poszczególnych punktach kontrolnych:

$$i = 1 \dots 5 \quad (5.41)$$

i porównywanie uzyskanych wartości do wyników dla innych parametrów technologicznych. Operacja ta pozwoli na wyznaczenie wartości nastaw (v_{pl} i T_p), przy której maksymalna wartość siły uplastyczniającej F_{pl} będzie jak najniższa,

- stała wartość siły uplastyczniania F_{pl} w całym badanym zakresie przemieszczenia s_{pl} (w drugiej fazie uplastyczniania), przy założeniu odchyłek od wartości średniej nie większych niż 10%. Tę funkcję celu, w ujęciu ogólnym można zapisać jako:

$$F_{pl}(s_{pl}) \cong \text{const}. \quad (5.42)$$

Biorąc po uwagę możliwość wykorzystania punktów kontrolnych s_i , w sposób matematyczny tę funkcję celu można opisać jako:

$$\delta F_{pl} = \frac{|F_{mod_c,i} - F_{mod_c,j}|}{F_{mod_c,i}} \cdot 100\% < 10\%, \quad (5.43)$$

przy czym jej rozpatrywanie można sprowadzić do sekwencyjnego sprawdzania spełnienia tego warunku matematycznego. Na potrzeby dalszych rozważań funkcja ta może być określona jako *funkcja kontrolna*.

W celu wykonania optymalizacji parametrów technologicznych operacji uplastyczniania pasa na gorącej płycie, mając sformułowane funkcje celu, dokonano powiązania pomiędzy arkuszem kalkulacyjnym MS Excel, a oprogramowaniem Simulia Isight (Rys. 99). MS Excel był odpowiedzialny za sekwencyjne

wykonywanie przeliczeń wartości funkcji $F_{pli}(s_{pl})$ oraz $\delta F_{pl}(s_{pl})$, w pięciu założonych punktach kontrolnych, wykorzystując standardowe procedury obliczeniowe. Oprogramowanie Simulia Isight z wbudowanym modulem optymalizacyjnym [199], pełniło trzy zasadnicze funkcje:

- sekwencyjnego podstawiania wartości parametrów technologicznych i współrzędnej punktów kontrolnych (v_{pl} , T_p oraz s_i) do formuł obliczających wartości funkcji $F_{pli}(s_{pl})$ oraz $\delta F_{pl}(s_{pl})$, w celu wywoływania kolejnych iteracji obliczeń w oprogramowaniu MS Excel,
- gromadzenia wyników w postaci wartości siły uplastyczniania F_{pl} i funkcji kontrolnej δF_{pl} ,
- optymalizacji podstawianych parametrów prowadzącej do spełnienia funkcji celów (5.39 i 5.42).

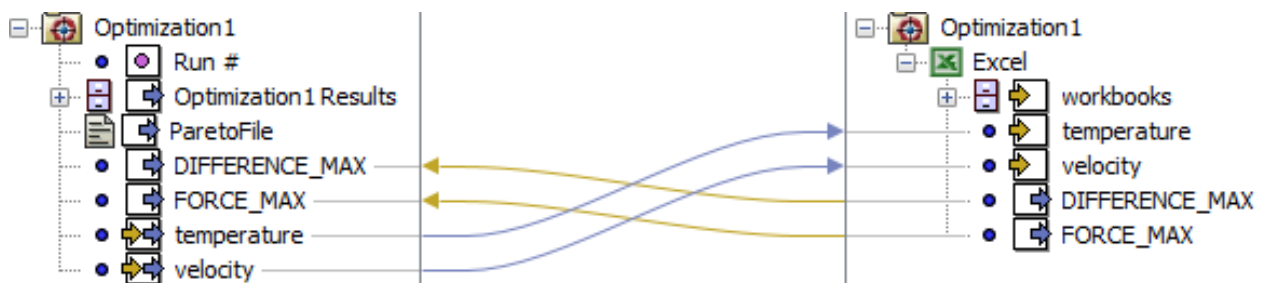
Optymalizacji dokonano wykorzystując algorytm genetyczny NCGA (Neighbourhood Cultivation Genetic Algorithm). Przyjęto następujące założenia dotyczące optymalizacji:

- populacja 50 osobników,
- 200 generacji,
- dozwolone podwójne krzyżowanie,
- współczynniki skalowania, z racji oczekiwanej różnicy w rzędzie wielkości otrzymywanych wartości (Simulia Isight dokonuje obliczeń na wielkościach bezwzględnych):

$$SF F_{pli} = 100, \quad (5.44)$$

$$SF \delta F_{pl} = 10. \quad (5.45)$$

Te założenia do obliczeń, skutkowały wykonaniem 10000 iteracji.

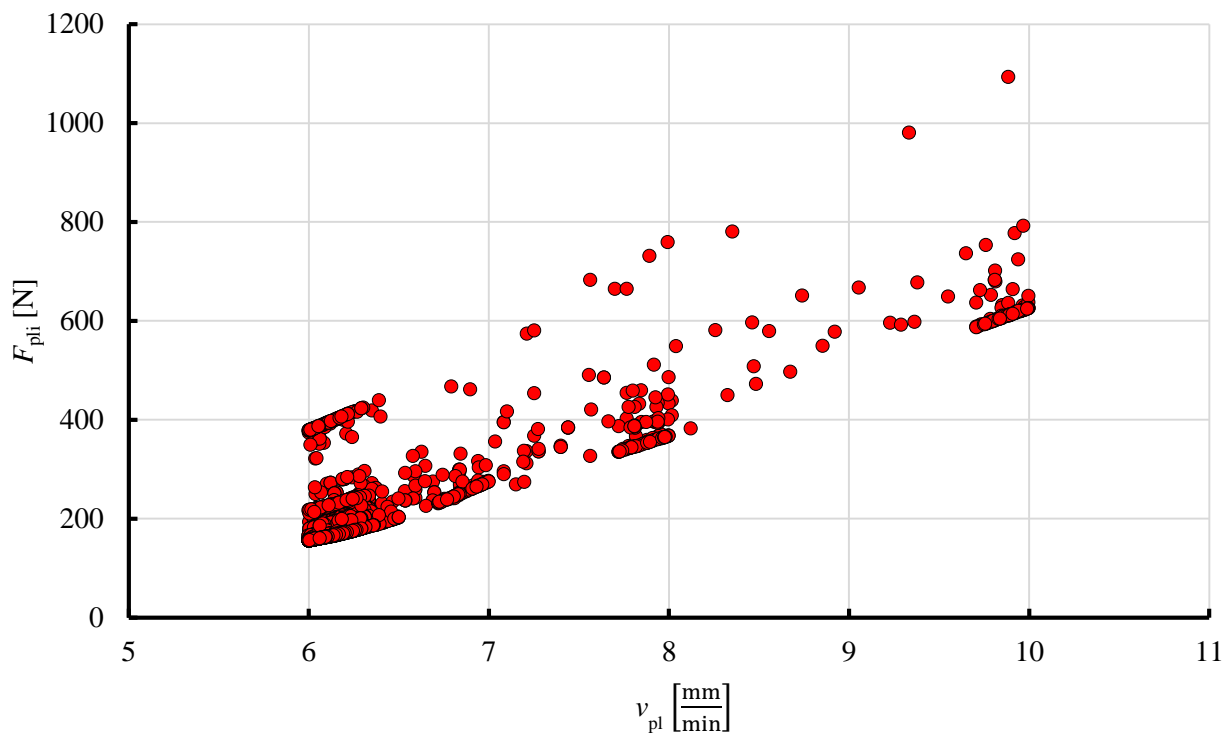


Rys. 99. Przykładowy widok prezentujący połączenie pomiędzy poszczególnymi parametrami modułu optymalizacji w oprogramowaniu Simulia Isight i arkusza kalkulacyjnego MS Excel

Na rysunku 100 przedstawiono przykładową mapę zagęszczenia punktów obliczeniowych, wynikającą z działania algorytmu genetycznego. Zgodnie z opracowanym modelem matematycznym (5.35 i 5.38), zależność siły podczas uplastyczniania F_{pl} jest nieliniowa względem prędkości uplastyczniania v_{pl} , co znalazło odzworowanie w ogólnym trendzie rozłożenia punktów obliczeniowych. Algorytm podczas kolejnych iteracji koncentrował się w otoczeniu, w którym występuje najmniejsza wartość siły uplastyczniającej F_{pl} , czyli przy niższych wartościach prędkości uplastyczniania v_{pl} , co jest oczekiwanym skutkiem jego działania, biorąc pod uwagę nałożone funkcje celu.

Na rysunku 101 przedstawiono przykładową powierzchnię utworzoną przez wartości siły uplastyczniającej F_{pli} (w poszczególnych punktach kontrolnych) w zależności od parametrów technologicznych operacji (v_{pl} oraz T_p), na podstawie przeliczenia modelu w poszczególnych punktach kontrolnych podczas optymalizacji. Wzrost wartości siły uplastyczniającej F_{pl} , wraz ze zwiększeniem prędkości uplastyczniania v_{pl} oraz

zmniejszeniem temperatury gorącej płyty T_p jest efektem spodziewanym, co potwierdzono w badaniach eksperymentalnych.



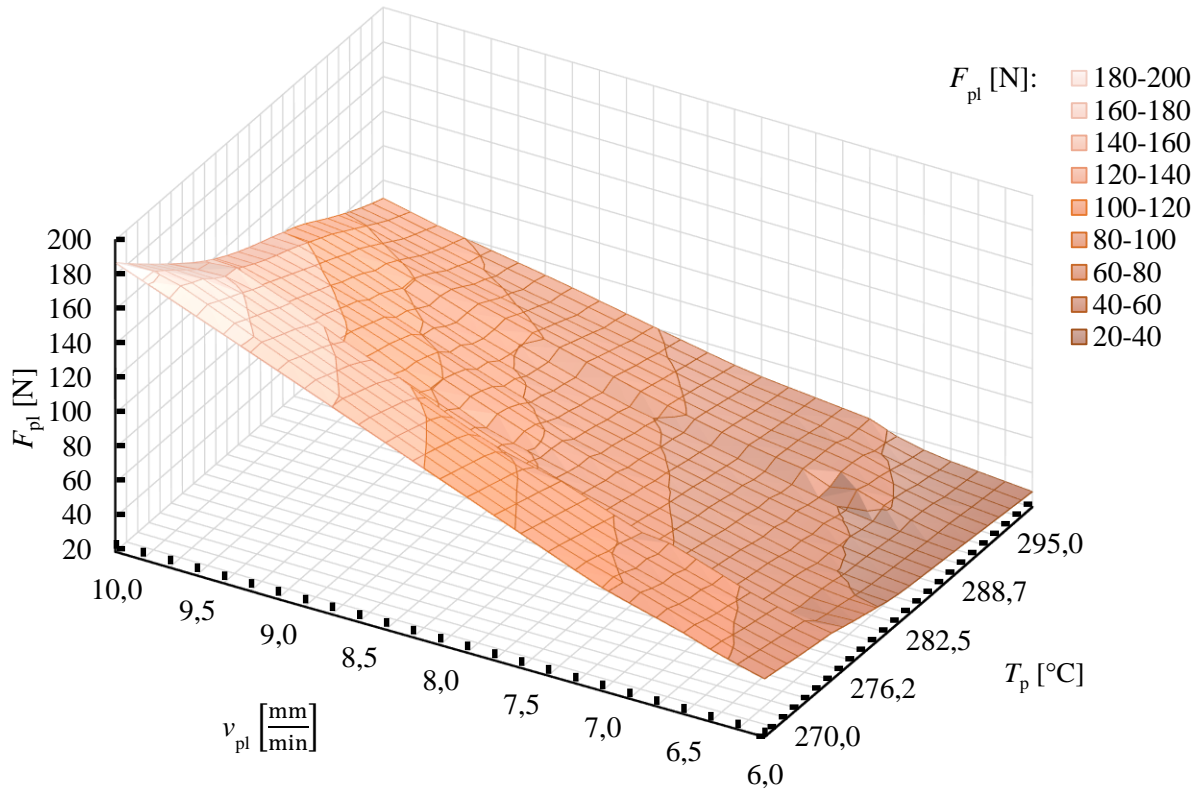
Rys. 100. Przykładowa mapa rozmieszczenia punktów obliczeniowych podczas obliczeń z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA, w postaci korelacji pomiędzy otrzymywanymi wartościami siły uplastyczniającej F_{pli} w poszczególnych punktach kontrolnych, w funkcji prędkości uplastycznienia v_{pl} , przy stałej wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz średnicy pasa $d = 18$ mm

Przedstawiona charakterystyka pokazuje, że nastąpiło niemal całkowite pokrycie zakresu zmiennych parametrów podczas obliczeń. Charakterystyka ta nie oddaje jednak zagęszczenia poszczególnych punktów, które jest różne ze względu na to, że algorytm genetyczny podczas obliczeń i bieżącej kontroli wyników zagęszcza punkty obliczeniowe wokół rozwiązania optymalnego (Rys. 100).

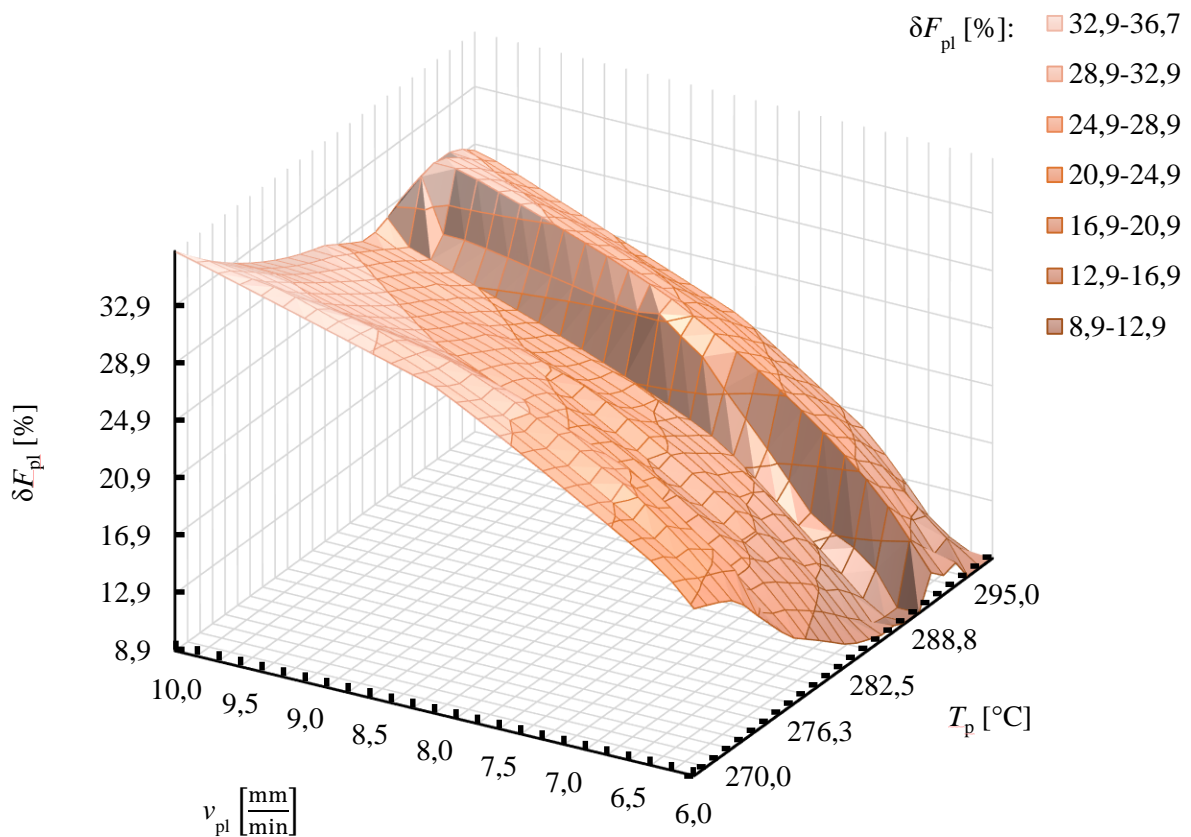
Na rysunku 102 natomiast, przedstawiono przykładową powierzchnię utworzoną przez wartości funkcji kontrolnej δF_{pl} , w zależności od parametrów technologicznych operacji (v_{pl} oraz T_p), na podstawie przeliczenia opracowanego modelu w poszczególnych punktach obliczeniowych podczas optymalizacji. Obszar środkowy tej powierzchni, w którym obserwowane jest jej załamanie, jest miejscem w którym należy poszukiwać rozwiązania spełniającego drugą funkcję celu, czyli najmniejszej wartości różnicy siły uplastycznienia δF_{pl} pomiędzy kolejnymi punktami kontrolnymi.

Końcowe wyniki przeprowadzonej optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego przedstawiono w tabeli 37. Na tej podstawie można przyjąć efektywne parametry technologiczne ($v_{pl,eff}$ i $T_{p,eff}$) zapewniające jednocześnie możliwie niską wartość siły uplastycznienia, wyznaczoną ze skorygowanego modelu ($F_{pl,eff,mod,c}$) jak i względnie stały jej przebieg (parametr $\delta F_{pl,eff,mod,c}$).

Jak wynika z uzyskanych rezultatów, w przypadku porównywania uplastycznienia pasów o różnych średnicach d , większy wpływ na zmianę końcowych rezultatów ma wartość temperatury gorącej płyty T_p niż prędkości uplastycznienia v_{pl} .



Rys. 101. Przykładowe wyniki optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA dla pasa o średnicy $d = 18$ mm, w formie powierzchni wyznaczonej przez wartości siły uplastyczniającej F_{pl} w zależności od wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz prędkości uplastyczniania v_{pl}



Rys. 102. Przykładowe wyniki optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA dla pasa o średnicy $d = 18$ mm, w formie powierzchni wyznaczonej przez wartości funkcji kontrolnej δF_{pl} w zależności od wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz prędkości uplastyczniania v_{pl}

Tab. 37. Wyniki optymalizacji parametrów technologicznych procesu zgrzewania doczołowego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA

Parametr	Oznaczenie	Wartość		
Średnica pasa	d [mm]	12	15	18
Efektywna wartość temperatury gorącej płyty	T_{p_eff} [°C]	277,5	292,5	300
Efektywna wartość prędkości uplastyczniania	v_{pl_eff} $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	6,45	6,49	6,29
Efektywna siła uplastyczniania materiału z modelu	$F_{pl_eff_mod_c}$ [N]	56,90	107,55	179,86
Maksymalna różnica pomiędzy dowolnymi punktami kontrolnymi z modelu	$\delta F_{pl_eff_mod_c}$ [%]	8,24	6,92	8,35
Efektywna siła uplastyczniania materiału z eksperymentu	$F_{pl_eff_exp}$ [N]	58,58	103,32	185,56
Maksymalna różnica pomiędzy dowolnymi punktami kontrolnymi z eksperymentu	$\delta F_{pl_eff_exp}$ [%]	7,95	8,03	8,47
Odchyłka skorygowanego modelu	$\delta F_{eff_mod_c}$ [%]	2,87	3,93	3,25

W celu weryfikacji opracowanego modelu, dla wyznaczonych parametrów efektywnych (T_{p_eff} oraz v_{pl_eff}) oraz badanych średnic pasa d , przeprowadzono powtórne badania eksperymentalne uplastyczniania materiału. Na podstawie ich wyników, uzyskano wartości siły uplastyczniania materiału $F_{pl_eff_exp}$ oraz wartość parametru kontrolnego $\delta F_{pl_eff_exp}$, po czym wyznaczono odchyłkę wartości siły efektywnej według skorygowanego modelu ($\delta F_{eff_mod_c}$) względem eksperymentu. Jej wartość nie przekroczyła 5%.

5.4. Rozkład temperatury podczas zgrzewania

5.4.1. Wstępne prace nad modelowaniem rozkładu temperatury

Wymiana ciepła podczas operacji doczołowego zgrzewania pasów (Rys. 82) jest dość złożonym zagadnieniem. Ogólnie, mamy w tym przypadku do czynienia z niestalonym przepływem ciepła, który charakteryzuje się tym, że poszczególne wartości temperatury w nagrzewanym pasie – określone za pomocą pola temperatury, zmieniają się w czasie. Jest to istota tego zjawiska, zachodzącego najczęściej podczas nagrzewania lub chłodzenia przebiegającego w krótkim czasie [124, 200, 201].

Najbardziej charakterystyczną i jedną z najważniejszych operacji zgrzewania, zgodnie z opracowaną metodologią jej przeprowadzania (Rys. 82), jest uplastycznienie pasa na gorącej płycie, podczas którego zachodzi odkształcenie materiału w warunkach obciążenia ściskającego i temperatury o zmiennej wartości. Przebieg tej fazy procesu zgrzewania warunkuje dalsze możliwości uplastycznionej końcówki pasa do utworzenia trwałego złącza podczas doprasowania i chłodzenia. W związku z tym, uzasadnioną jest analiza nagrzewania pasa skupiona głównie na tej operacji.

Podczas uplastyczniania materiału (Rys. 82a), w układzie utworzonym przez końcówki pasa (1a i 1b), uchwyty (2a i 2b) oraz gorącą płytę (3), w którym zachodzą procesy termomechaniczne, można wyróżnić następujące sposoby wymiany ciepła [124, 200, 201]:

- przewodzenie, czyli przekazywanie energii wewnętrznej zachodzące między bezpośrednio stykającymi się ciałami lub tylko w strukturze jednego układu. Zjawisko to polega na transferze energii kinetycznej atomów i cząsteczek (dla przypadku cieczy) lub poprzez drgania atomów w sieci krystalicznej i ruchu swobodnych elektronów (dla ciał stałych krystalicznych) lub poprzez drgania atomów w łańcuchach makrocząsteczek (dla ciał stałych amorficznych). W przypadku uplastycznienia pasa, zjawisko to zachodzi (Rys. 82a):
 - pomiędzy powierzchniami: gorącej płyty (3) i końcówek pasa (1a i 1b),
 - pomiędzy powierzchnią tworzącą końcówki pasa (1a i 1b), a uchwytami (2a i 2b) jeżeli te są umieszczone dostatecznie blisko gorącej płyty (w odległości mniejszej niż a_n),
 - wewnątrz struktury pasa (1a i 1b),
- konwekcja, polegająca na przekazywaniu energii wewnętrznej w wyniku ruchów płynu (gazu lub cieczy), posiadającego obszary o różnych temperaturach. Zjawisko to może zachodzić samoistnie, bez dodatkowego wymuszenia ruchu cząsteczek płynu (konwekcja naturalna) lub może być wymuszone, poprzez wprowadzenie w ruch cząsteczek płynu (konwekcja wymuszona). W przypadku zgrzewania według zaproponowanej metody, zjawisko to polega na ochładzającym oddziaływaniu powietrza atmosferycznego na pas i gorącą płytę, przy czym w klasycznym ujęciu ruch tego medium nie jest wymuszany. Konwekcja powoduje obniżanie wartości temperatury powierzchni gorącej płyty (3), pasa (1a i 1b) oraz uchwytów (2a i 2b), w miejscach w których wartość ich temperatury jest wyższa niż temperatura otoczenia T_o ,
- promieniowanie termiczne, które polega na emitowaniu promieniowania elektromagnetycznego, przez ciało rozgrzane do temperatury o wartości wyższej od zera bezwzględnego. Promieniowanie to niesie ze sobą energię cieplną, w wyniku czego energia wewnętrzna ciała promieniującego jest w tym przypadku częściowo zamieniana na energię radiacyjną i wypromieniowywana do otoczenia.

Dominującym sposobem wymiany ciepła podczas tej operacji, mającym oczywisty wpływ na wzrost temperatury pasa, jest przewodnictwo cieplne, zarówno kontaktowe jak i wewnątrz materiału. Ten rodzaj wymiany ciepła jest również podstawowym, brany pod uwagę przez wielu badaczy, w aspekcie modelowania procesu zgrzewania doczołowego [76, 111, 113, 166, 181, 190].

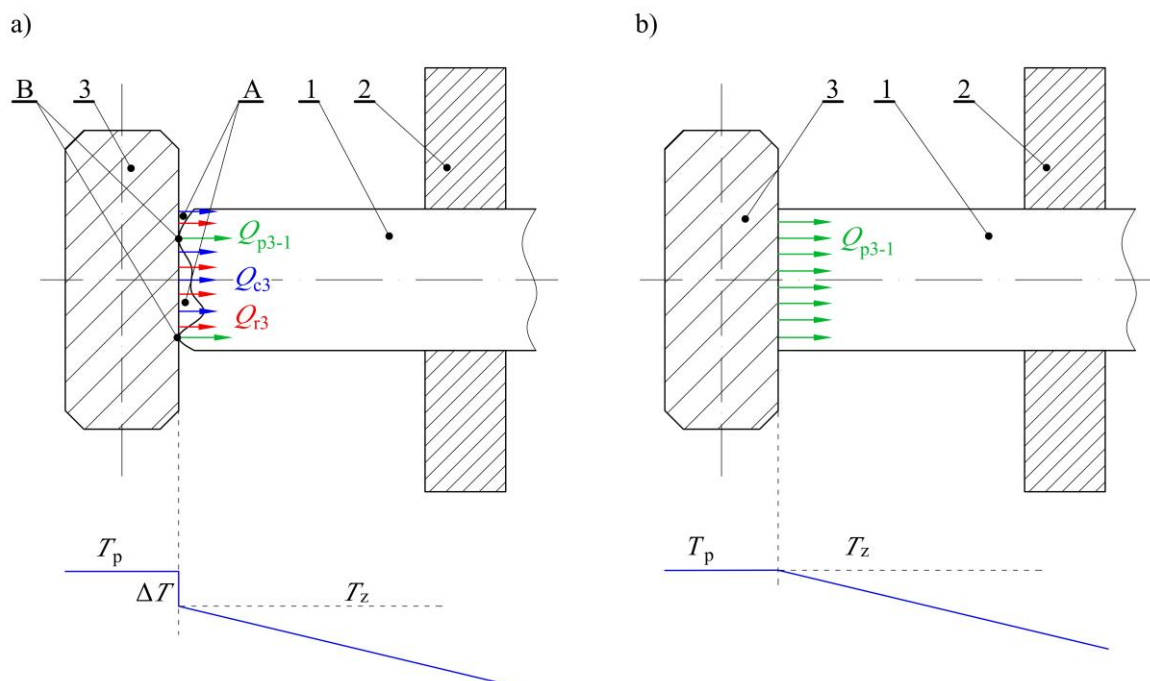
Promieniowanie cieplne, zarówno z powierzchni gorącej płyty jak i powierzchni zewnętrznej pasa, nie jest tak znaczące jak przewodzenie, ponieważ temperatura w procesie jest względnie niska i jej wartość zazwyczaj nie przekracza 300°C. W takich przypadkach, ten mechanizm wymiany ciepła często jest zaniebdywany w modelowaniu procesów zachodzących w takim zakresie wartości temperatury [202].

Pominięcie promieniowania cieplnego w bilansie wymiany ciepła w procesach technologicznych wynika również z bardzo wielu, zmiennych czynników wpływających na oddawanie energii tym sposobem, m.in. struktury i barwy powierzchni, których wpływ jest kłopotliwy do określenia. Dodatkowo zmienne warunki w przemysłowych procesach technologicznych wpływają na to, że ilość energii oddawanej tym sposobem jest trudna do przewidzenia i zmienna.

W przypadku przemysłowego zgrzewania pasów, wpływ promieniowania na rozkład temperatury w takim procesie jest dość niejednoznaczny. Wynika to z tego, że z jednej strony energia cieplna jest tracona

w wyniku promieniowania z pasa, natomiast z drugiej strony promieniowanie stanowi dodatkowy mechanizm nagrzewania końcówki pasa z gorącej płyty. W związku z tymi czynnikami, na tym etapie oddziaływanie to zostanie pominięte.

Oddziaływanie konwekcyjne również w tym przypadku nie jest tak znaczące jak przewodzenie, głównie ze względu na to, że nie zachodzi wymuszenie obiegu strumienia gazów w obszarze uplastycznianego materiału. W związku z tym zjawisko konwekcji wymuszonej, charakteryzującej się większą efektywnością przenoszenia ciepła od konwekcji naturalnej [202], nie zachodzi. Samo zjawisko konwekcji naturalnej w tym przypadku, w porównaniu do przewodzenia jest mniej znaczące. Zostanie ono jednak uwzględnione, jednakże na podstawie przybliżonych współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła, dopiero na odpowiednim etapie obliczeń. Wynika to z trudności w precyzyjnym określeniu rzeczywistych współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła, a także ze względu na fakt, że w warunkach przemysłowego łączenia pasów, po ulokowaniu maszyny w hali produkcyjnej, utrzymanie powtarzalnej temperatury otoczenia, a także ściśle określonych warunków np. przepływu powietrza jest trudne.

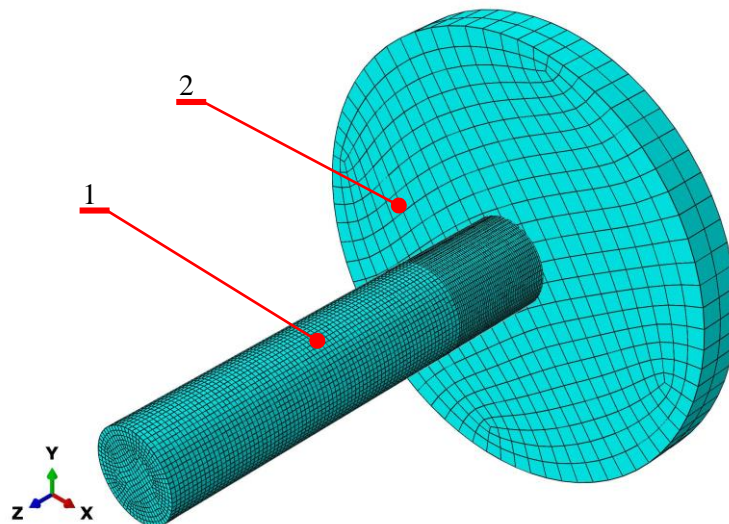


Rys. 103. Porównanie nagrzewania wyrównanej i niewyrównanej powierzchni pasa: 1 – pas, 2 – uchwyt pasa, 3 – gorąca płyta, A – pustki (wypełnione przez rozgrzany gaz), B – punkty kontaktu pomiędzy niewyrównaną powierzchnią, a gorącą płytą; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone w wyniku przewodzenia kontaktowego, Q_{r3} – ciepło przenoszone przez promieniowanie, Q_{c3} – ciepło przenoszone drogą konwekcji; T_z – temperatura zgrzewania, T_p – temperatura gorącej płyty, ΔT – różnica temperatury

Wyrównanie pasa zachodzące w trakcie jego uplastyczniania, zachodzące poprzez nadtopienie jego powierzchni czołowej (Rys. 82a), umożliwia odpowiednie jej przygotowanie do zgrzewania. Dzięki temu zmniejszane jest prawdopodobieństwo występowania wad złącza, a także zapewnia się ustalone warunki wymiany ciepła pomiędzy pasem, a płytą (Rys. 103) [190]. Kontaktowe przewodzenie ciepła, zachodzące jedynie na wierzchołkach nierówności (Q_{p3-1}), konwekcja w pustych przestrzeniach wypełnionych gorącym powietrzem (Q_{c3}) oraz promieniowanie cieplne (Q_{r3}), zamieniane są na kontaktowe przewodzenie ciepła zachodzące na całej powierzchni czołowej (Q_{p3-1}). Z tego powodu, warunki wymiany ciepła są bardziej

przewidywalne, a sam proces bardziej efektywny. W związku z tym, zmniejsza się lub całkowicie likwiduje zjawisko kontaktowego oporu cieplnego, którego obecność podczas nagrzewania nie jest pożądana. Występowanie kontaktowego oporu cieplnego wynika z szeregu czynników związanych ze zgrzewanym materiałem oraz jakością powierzchni czołowych przed operacją uplastyczniania (co wiąże się głównie ze sposobem ich przygotowywania przed zgrzewaniem). Wpływa to na przewodzenie ciepła w przypadku, co sprawia, że wymiana ciepła staje się niejednorodna. W wyniku tego, rozkład temperatury uzyskiwany w wyniku takiego przewodzenia ciepła może nie być do końca przewidywalny oraz równomierny [195]. Obserwowalnym skutkiem występowania kontaktowego oporu cieplnego, zazwyczaj jest skokowy spadek temperatury w płaszczyźnie styku dwóch ciał [203, 204]. Należy jednak zauważyć, że zjawisko to jest nie do uniknięcia w pierwszych chwilach uplastyczniania pasa, dlatego zasadnym jest przeprowadzenie analizy jego wpływu na całą operację uplastyczniania pasa, dla konkretnych parametrów nagrzewania.

W tym celu można rozpatrzyć nieustaloną wymianę ciepła pomiędzy gorącą płytą, a pasem podczas nagrzewania na początku fazy uplastyczniania materiału, dla różnych przypadków występowania ewentualnego kontaktowego oporu cieplnego [58]. Zadanie to można wykonać z wykorzystaniem metody elementów skończonych, w systemie ABAQUS. W tym celu wykonano model 3D gorącej płyty w formie osiowoosymetrycznej (średnica $d_p = 20$ mm, grubość $t_p = 5$ mm). Pas natomiast zamodelowano jako ciało stałe w postaci pręta (długość $L_t = 200$ mm, średnica $d = 4$ mm). Materiałowi pasa nadano określone parametry termodynamiczne, których wartości na potrzeby tych wstępnych badań przyjęto na podstawie dostępnych danych literaturowych (Tab. 38). Założono również, że gorąca płyta jest stalowa. Model FEM, z siatką elementów skończonych, przedstawiono na rysunku 104.



Rys. 104. Widok zdyskretyzowanego modelu MES: 1 – pas, 2 – gorąca płyta

Analizy zostały wykonane dla 3 przypadków kontaktowego przewodzenia ciepła pomiędzy płytą, a pasem, co w analizie numerycznej zrealizowano w następujących sposób:

- dla idealnego kontaktowego przewodnictwa cieplnego założono nieskończenie duży współczynnik kontaktowego przewodzenia ciepła ($h_t = \infty$), dla całego czasu trwania analizy (przypadek oznaczony jako ID),

- dla przypadku występowania oporu cieplnego podczas całego procesu nagrzewania: współczynnik kontaktowego przewodzenia ciepła $h_r = 2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, dla całej analizy [203, 204] (przypadek oznaczony jako WR),
- w przypadku oporu cieplnego występującego jedynie na początku nagrzewania (przypadek oznaczony jako SR):
 - przyjęto $h_r = 2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, dla czasu $t_{upl} = 2,55$ s (szacowany czas do uplastycznienia warstwy o grubości $a_{pl} = 0,2$ mm, przy założeniu temperatury uplastycznienia $T_{upl} = 210^\circ C$) wyznaczonego na bazie obliczeń numerycznych dla przypadku WR,
 - następnie przyjęto $h_r = \infty$, dla dalszego czasu nagrzewania.

Tab. 38. Wstępnie przyjęte parametry do badań rozkładu temperatury w nagrzewanym pasie podczas wstępnego etapu uplastyczniania materiału (źródła wybranych wartości [83, 203, 204])

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Gęstość	$\rho_p \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	1168
Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	$C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	1700
Przewodność cieplna	$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,21
Temperatura gorącej płyty	$T_p [K]$	300
Temperatura otoczenia	$T_o [K]$	20
Kontaktowa przewodność cieplna przy założeniu występowania oporu cieplnego	$h_r \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	2
Kontaktowa przewodność cieplna przy założeniu idealnego kontaktowej przewodności cieplnej	$h_r \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	∞
Zakres czasu analizy	$t [s]$	1-180

W celu weryfikacji wyników otrzymanych metodą elementów skończonych i wykonania walidacji tego modelu, przeprowadzono obliczenia analityczne, prowadzące do wyznaczenia rozkładu temperatury w pasie. Działanie to w takim przypadku wymaga rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego, które można przedstawić w ogólnej postaci [198]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5.46)$$

gdzie: $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ – przewodność cieplna materiału pasa, $\rho_p \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ – gęstość tworzywa, $C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, $q_v [W]$ – ilość ciepła generowana wewnątrz materiału, $T [K]$ – temperatura, $t [s]$ – czas; x, y, z – współrzędne kartezjańskie.

W ogólnym przypadku, rozwiązanie tego zagadnienia jest kłopotliwe. W związku z tym, w praktycznych aplikacjach zazwyczaj stosuje się ustandaryzowane rozwiązania tego równania, dla określonych warunków początkowo-brzegowych, których formuła pozwala na dostosowanie rozwiązania równania do odpowiedniego przypadku wymiany ciepła. Na potrzeby wstępnych rozważań nad zgrzewaniem doczołowym, zorientowanych na rozpoznanie wpływu kontaktowego oporu cieplnego na nagrzewanie się pasa, poczyniono następujące założenia:

- pas jest ciałem półnieskończonym, z dużym stosunkiem długości L_t do średnicy d , wykonany z materiału o właściwościach izotropowych,
- nagrzewanie następuje jedynie od płaskiej powierzchni czołowej,
- pomijana jest konwekcyjna wymiana ciepła i promieniowanie,
- nie występuje zjawisko generowania ciepła w objętości materiału,
- nie uwzględnia się zmiany stanu skupienia tworzywa,
- temperatura gorącej płyty T_p jest stała i jej wartość jest równomierna na całej powierzchni,
- gęstość ρ_p , ciepło właściwe C_p , współczynnik kontaktowego oporu cieplnego h_t oraz współczynnik przewodności cieplnej λ są stałe i niezależne od temperatury i są przyjmowane na podstawie dostępnych danych literaturowych,
- nie uwzględnia się rozszerzalności termicznej materiału.

W związku z poczynionymi założeniami, przepływ ciepła w opisywanym przypadku przyjmuje postać jednowymiarową, co skutkuje uproszczeniem ogólnego równania przewodzenia ciepła (5.46) do postaci:

$$a_{dc} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5.47)$$

gdzie: a_{dc} oznacza dyfuzyjność cieplną, opisaną za pomocą zależności:

$$a_{dc} = \frac{\lambda}{\rho_p \cdot c_p}. \quad (5.48)$$

Założenie, że nagrzewane ciało jest półnieskończone, może być poczynione, gdy liczba Fouriera spełnia warunek [124, 201]:

$$Fo = \frac{a_{dc} \cdot t}{L_t^2} \ll 1. \quad (5.49)$$

W związku z tym, w rozpatrywanym przypadku nagrzewania, dla przyjętych parametrów materiałowych (Tab. 38) i określonych wymiarów próbki pasa (d oraz L_t) może być ono uwzględnione. Zakładając następujące warunki początkowo – brzegowe:

$$T(x, 0) = T_o, \quad (5.50)$$

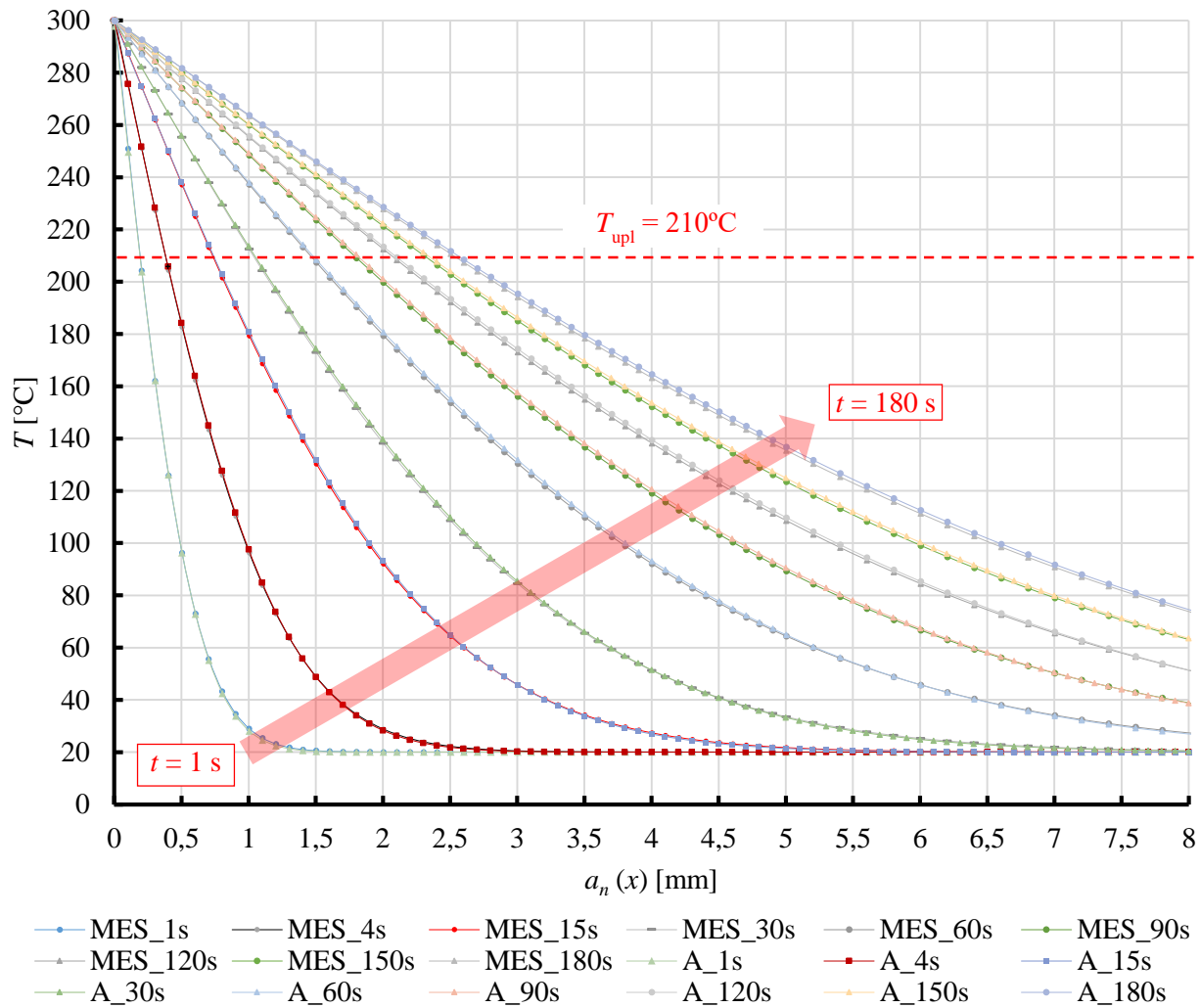
$$T(0, t) = T_p, \quad (5.51)$$

$$T(\infty, t) = T_o, \quad (5.52)$$

a także stosując transformację Laplace'a, możliwe jest otrzymanie jednowymiarowego rozkładu temperatury dla nieskończonej półprzestrzeni (w tym przypadku w osi pasa), w postaci:

$$T(x, t) = T_p + (T_o - T_p) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right). \quad (5.53)$$

W celu uzyskania rzeczywistych wyników do obliczeń przyjęto parametry przedstawione w Tab. 38. Obliczenia wykonano dla 27 wartości czasu nagrzewania, w zakresie od 1 s do 180 s. W ten sposób otrzymano się funkcję rozkładu temperatury $T(a_n)$ wzdłuż osi pasa (zgodnie ze współrzędną x), w zależności od czasu t . Wybrane wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych, rozkładu temperatury podczas nagrzewania, dla przypadku idealnego przewodzenia ciepła pomiędzy pasem, a gorącą płytą w całym zakresie czasu nagrzewania (ID), przedstawiono na rysunku 105.

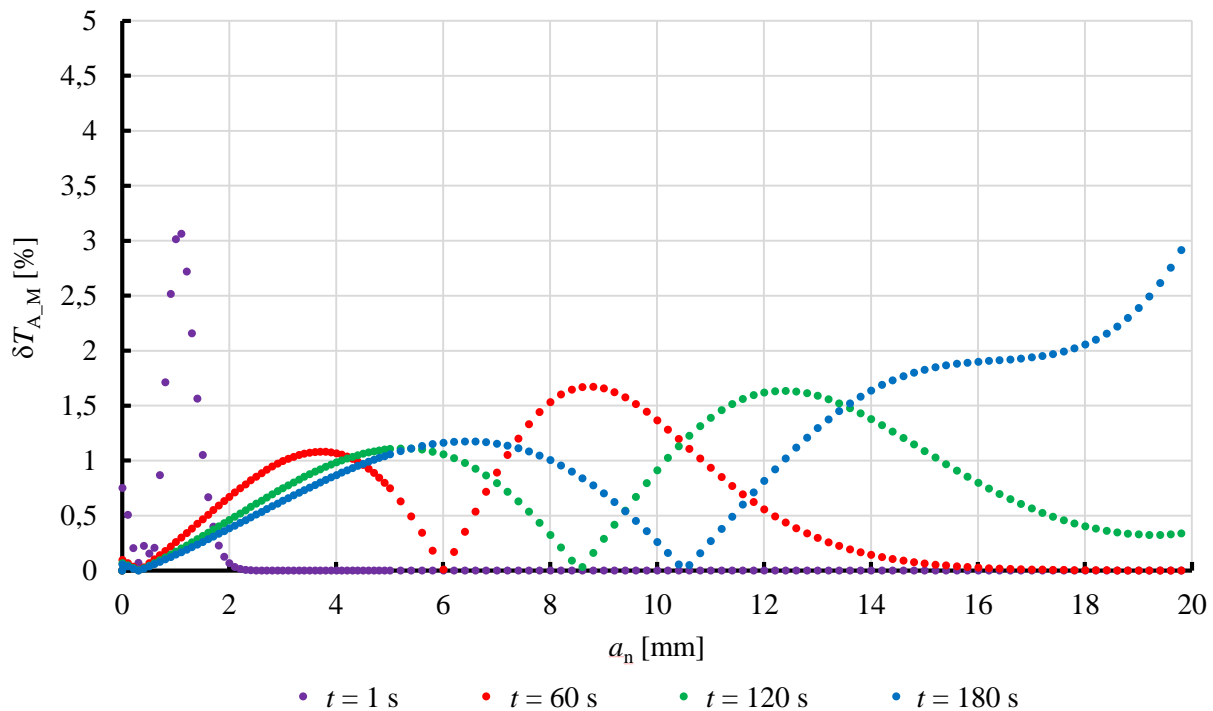


Rys. 105. Zależności pomiędzy temperaturą T i odległością rozgrzaną a_n , dla różnych wartości czasu t przy idealnej kontaktowej przewodności: MES_ t – wyniki uzyskane z modelu numerycznego, A_ t – wyniki analityczne

Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych są bardzo podobne. W celu weryfikacji opracowanego modelu numerycznego, wyznaczono wartość względnej różnicy procentowej δT_{A_M} , pomiędzy wartościami temperatury wyznaczonymi analitycznie T_A oraz za pomocą obliczeń numerycznych T_M , z zależności:

$$\delta T_{A_M} = \frac{|T_A - T_M|}{T_A} \cdot 100\%. \quad (5.54)$$

Maksymalna wyznaczona różnica pomiędzy obliczonymi wartościami nie przekracza 3,5%, co jest wynikiem zadowalającym. Pozwala to na pozytywną weryfikację opracowanego modelu numerycznego i można uznać, że tak przygotowany model MES dobrze odwzorowuje rozkład temperatury. Największe różnice pomiędzy wartościami temperatury (parametr δT_{A_M}) odnotowano dla najniższego czasu nagrzewania $t = 1\text{ s}$. Jednak w ogólnym ujęciu wpływ czasu nagrzewania t na wartość tego parametru jest niejednoznaczny, co przedstawiono na kilku wybranych przykładach na rysunku 106. Dla wszystkich wartości czasu nagrzewania t , podczas analizy tego parametru w dziedzinie odległości a_n , zauważono spadek jego wartości w taki sposób, że przy wartości temperatury $T \approx 45^{\circ}\text{C}$, wartość tej różnicy osiąga wartość bliską zero. Zjawisko to jednak nie ma realnego wpływu na proces nagrzewania, ponieważ takie wartości temperatury są bezużyteczne na potrzeby zgrzewania, więc odstępiono od jego szczegółowej analizy.



Rys. 106. Charakterystyka względnej różnicy wartości temperatury δT_{A_M} w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n), dla czterech wartości czasu nagrzewania t

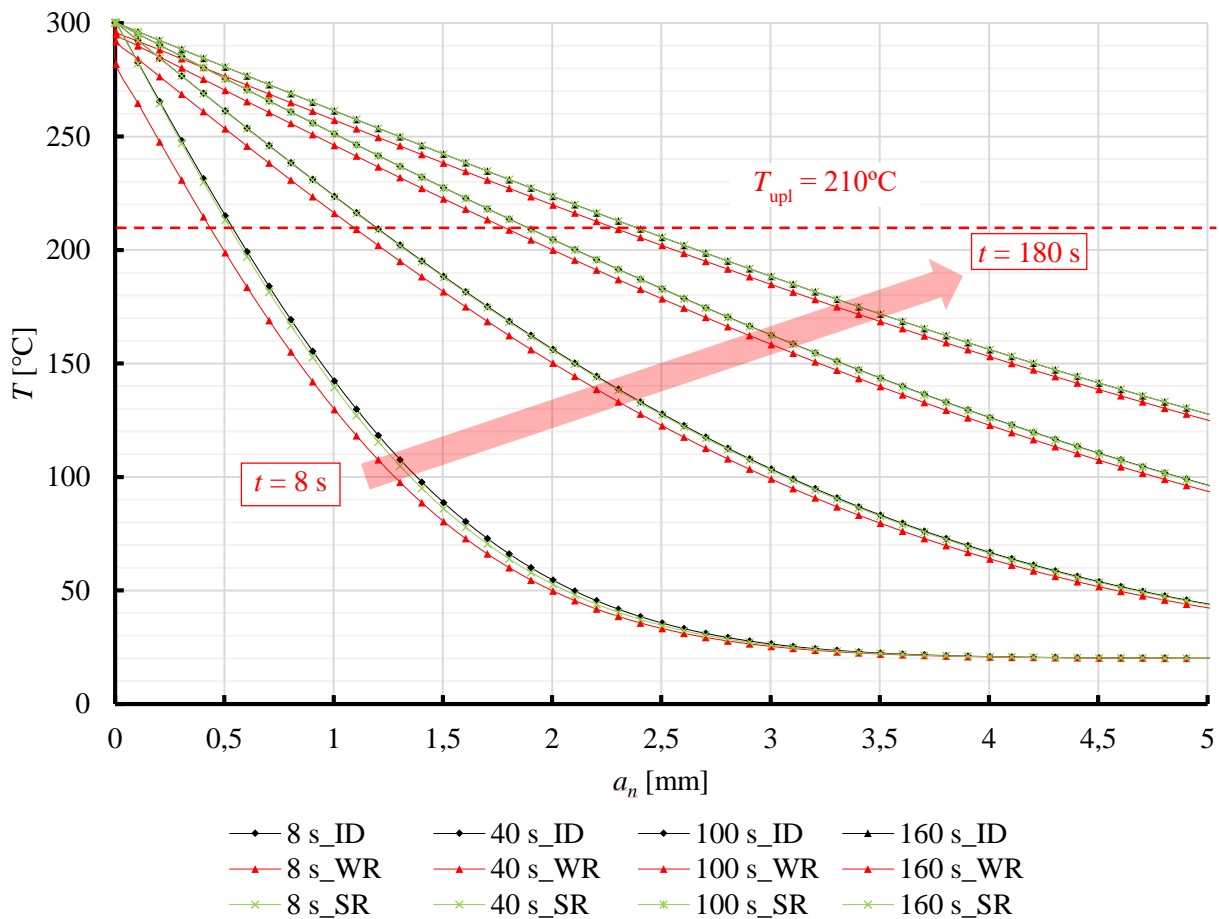
Porównanie wybranych charakterystyk rozkładu temperatury $T(a_n)$ wyznaczonych metodą elementów skończonych, dla wszystkich rozpatrywanych przypadków kontaktowego przewodzenia ciepła, w przedziale czasu t od 8 s do 160 s, przedstawiono na rysunku 107.

Rozkład temperatury różni się, w zależności od przyjętego modelu przewodnictwa cieplnego, na styku gorącej płyty oraz pasa. W przypadku założenia występowania kontaktowego oporu cieplnego podczas całego procesu nagrzewania (WR), obserwuje się widoczny spadek wartości temperatury w kolejnych punktach nagrzewanego pasa. Wynika to między innymi ze skokowego spadku wartości temperatury na jego powierzchni czołowej, która ma bezpośredni kontakt z rozgrzaną płytą. Jest on o tyle znaczący, że nie obserwuje się wyrównania wartości temperatury nawet w przypadku długotrwałego nagrzewania (180 s).

Nieco inaczej jest, w przypadku porównania nagrzewania z idealnym przewodzeniem ciepła (ID), a założeniem oporu cieplnego występującego tylko w początkowym okresie uplastycznienia (SR – zanim warstwa uplastyczniona osiągnie grubość $a_{pl} = 0,2$ mm). Dla niewielkich wartości czasu nagrzewania (do 60 s) obserwuje się wyraźne różnice pomiędzy tymi rozkładami wartości temperatury. W tym przypadku, uwzględnienie oporu cieplnego, w początkowej fazie nagrzewania, powoduje nieznaczne obniżenie wartości temperatury w analizowanych punktach. Dla dłuższego czasu nagrzewania (powyżej 60 sekund), rozkłady temperatury wyrównują się, co jest spowodowane dostatecznym rozgrzaniem pasa, dzięki długotrwałemu przewodzeniu z idealną kontaktową przewodnością cieplną.

Na podstawie wyznaczonych rozkładów temperatury określono wartość grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} , przy założeniu że uplastycznienie zachodzi w temperaturze $T_{upl} > 210^{\circ}\text{C}$. Na rysunku 108 przedstawiono zależność pomiędzy grubością warstwy uplastycznionej a_{pl} , a czasem nagrzewania t . Grubość warstwy uplastycznionej rośnie nieliniowo wraz ze wzrostem wartości czasu nagrzewania. Należy

zauważyć jednak, że dynamika tego wzrostu zmniejsza się wraz z upływem czasu nagrzewania. Wynika z tego, że zwiększanie czasu nagrzewania nie niesie za sobą efektu proporcjonalnego zwiększenia grubości warstwy uplastycznionej. Analizując tę zależność (Rys. 108) oraz uzyskane rozkłady temperatury w czasie (Rys. 105 i 107), należy zauważyć, że zwiększenie wartości temperatury gorącej płyty T_p mogłoby skutkować bardziej efektywnym wzrostem grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} , w stosunku do zwiększania czasu nagrzewania t .



Rys. 107. Zależność pomiędzy temperaturą T i odległością rozgrzaną a_n , dla różnych wartości czasu nagrzewania i trzech modeli kontaktu: t_{ID} – kontakt idealny, t_{SR} – kontaktowy opór cieplny na początku procesu nagrzewania, t_{WR} – kontaktowy opór cieplny podczas całego nagrzewania

Liczbowe wartości grubości warstwy uplastycznionej, wraz z procentowymi zmianami w stosunku do idealnego przewodzenia ciepła (ID) przedstawiono w tabeli 39. Wyznaczono również względne różnice pomiędzy ich wartościami, z zależności:

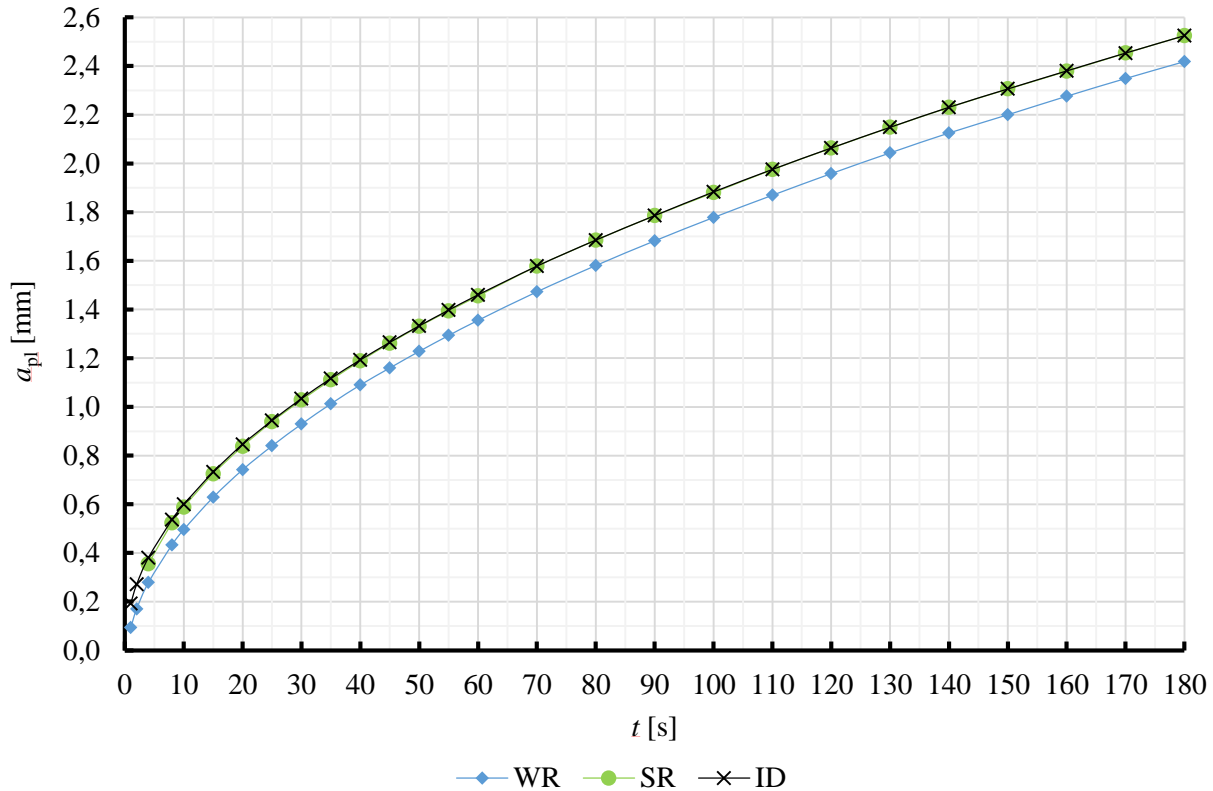
$$\delta a_{pl_SR} = \frac{|a_{pl_SR} - a_{pl_ID}|}{a_{pl_ID}} \cdot 100\%, \quad (5.55)$$

$$\delta a_{pl_WR} = \frac{|a_{pl_WR} - a_{pl_ID}|}{a_{pl_ID}} \cdot 100\%. \quad (5.56)$$

Przyjęcie modelu kontaktu z oporem cieplnym, występującym jedynie w początkowej fazie procesu (SR), dla czasu nagrzewania trwającego więcej niż 70 sekund, nie powoduje zmiany w grubości warstwy uplastycznionej, w stosunku do założenia idealnego przewodnictwa cieplnego (ID) – wartości oznaczone na czerwono w tabeli 39. W przypadku modelu kontaktu z oporem cieplnym, występującym w czasie

całego procesu nagrzewania (WR), spadek grubości warstwy uplastycznionej jest bardzo wyraźny i obecny w całym zakresie czasu nagrzewania – różnica δa_{pl_WR} osiąga wartości mniejsze od 5% dopiero powyżej czasu obejmującego 170 sekund nagrzewania.

Przedstawione wyniki obliczeń i symulacji wskazują, że przyjęcie odpowiedniego modelu kontaktowego przewodzenia ciepła pomiędzy gorącą płytą a pasem, ma kluczowe znaczenie podczas wyznaczania rozkładu temperatury i grubości warstwy uplastycznionej, powstałych w wyniku nagrzewania.



Rys. 108. Korelacja pomiędzy grubością warstwy uplastycznionej a_{pl} i czasem nagrzewania t , przy wartości temperatury uplastycznienia $T_{upl} = 210^{\circ}\text{C}$: WR – kontaktowy opór ciepły obecny przez cały czas nagrzewania, SR – kontaktowy opór ciepły obecny tylko w początkowej fazie, ID – nagrzewanie bez kontaktowego oporu ciepłego

Tab. 39. Wartości grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} dla trzech przypadków kontaktowego przewodzenia ciepła

	ID	SR		WR	
t [s]	a_{pl_ID} [mm]	a_{pl_SR} [mm]	δa_{pl_SR} [%]	a_{pl_WR} [mm]	δa_{pl_SR} [%]
4	0,380	0,355	6,6	0,278	26,8
8	0,536	0,524	2,3	0,433	19,2
10	0,599	0,588	1,9	0,496	17,2
.
50	1,333	1,331	0,1	1,228	7,8
55	1,397	1,394	0,2	1,293	7,4
60	1,460	1,456	0,3	1,356	7,2
70	1,578	1,578	0,0	1,473	6,7
80	1,685	1,685	0,0	1,581	6,2
90	1,786	1,786	0,0	1,682	5,8
.
170	2,453	2,453	0,0	2,349	4,2
180	2,525	2,525	0,0	2,419	4,2

W przypadku przyjęcia modelu z kontaktowym oporem cieplnym (pomiędzy pasem, a gorącą płytą), występującym w czasie trwania całego procesu (WR), rozkład temperatury $T(a_n)$, a tym samym grubość warstwy uplastycznionej a_{pl} , znacząco odbiega od wartości uzyskanych dla przypadku idealnego przewodzenia ciepła (ID). Z tego względu nagrzewanie jest mniej efektywne. Sytuacja taka może mieć miejsce, podczas uwalniania oparów tworzywa w trakcie nagrzewania płytą, o zbyt wysokiej temperaturze (degradacja termiczna materiału). Jednakże zakłada się, że przy prawidłowym przebiegu procesu zgrzewania sytuacja ta nie powinna mieć miejsca, dlatego ten model nie musi być wykorzystywany.

Podsumowując wykonane badania wstępne, uwzględnienie kontaktowego oporu cieplnego, występującego jedynie w początkowym etapie nagrzewania (np. do momentu uplastycznienia warstwy o grubości $a_{pl} = 0,2$ mm), dla dłuższego czasu (powyżej 70 sekund), nie ma znaczenia dla określenia grubości warstwy uplastycznionej (przy założonym w tabeli 38 współczynnika kontaktowej przewodności cieplnej). Jednocześnie należy zauważyć, że już dla czasu nagrzewania o wartości wyższej niż 4 s, różnica pomiędzy wartościami temperatury w poszczególnych punktach wyznaczonych według tych dwóch modeli (ID i SR) nie przekracza nawet 3%, co stanowi pomijalną różnicę. Z tego względu przy założeniu nagrzewania przez dłuższy czas t (dłuższy niż 4s), model uwzględniający kontaktowy opór cieplny, z powodzeniem może być zastąpiony modelem uwzględniającym idealną kontaktową przewodność cieplną w całym zakresie czasu. Jednocześnie ważną obserwacją jest to, że zwiększenie czasu nagrzewania t jest mniej efektywnym sposobem zwiększania grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} , niż zmiana wartości temperatury płyty T_p .

5.4.2. Wyznaczanie rozkładu temperatury podczas uplastycznienia materiału

Wymianę ciepła podczas uplastycznienia materiału pasa na gorącej płycie można zamodelować rozwiązując ogólne równanie wymiany ciepła (5.46), na wiele sposobów (wykorzystując kilka rodzajów założeń, skutkujących zastosowaniem określonych warunków początkowo-brzegowych) [198, 200-202].

Najczęściej stosowaną metodą podejścia do tego problemu jest modelowanie pasa w formie ciała półnieskończonego [166], ograniczonego wyłącznie jedną płaszczyzną w przestrzeni. Konieczne w tym przypadku założenia:

- braku wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią boczną pasa, a otoczeniem,
- dostatecznie dużej długości pasa, tak aby liczba Fouriera spełniała warunek (5.49),

powodują, że zagadnienie znacząco się upraszcza. W tym przypadku uzyskuje się rozwiązanie równania przewodnictwa cieplnego, zgodnie z procedurą przedstawioną w równaniach (5.47-5.52), co na potrzeby wstępnych rozważań jest wystarczające. Jednakże, w celu uzyskania w miarę precyzyjnego modelu wymiany ciepła podczas uplastycznienia, podejście to wydaje się być zbyt mocno uproszczone.

Kolejnym podejściem opisu wymiany ciepła podczas uplastycznienia, które było już wykorzystywane w przypadku opisu cyklu procesu zgrzewania (podzielonego na pięć faz), sterowanego poosiową siłą technologiczną F_{tl} [76], jest metoda polegająca na podzieleniu uplastycznienia na dwie fazy:

- wyraźnego przemieszczania się gorącej płyty podczas wstępnego wyrównywania powierzchni,
- nagrzewania powierzchni bez wyraźnego przemieszczania się gorącej płyty, przy zmniejszonej sile docisku.

W takim przypadku, przy założeniu pominięcia wymiany ciepła z otoczeniem drogą konwekcji i radiacji, w pierwszej fazie przyjmuje się model pasa jako model ciała półnieskończonego, które przemieszcza się z określoną prędkością względem źródła ciepła. Model ten często wykorzystywany jest do obliczeń rozkładu temperatury podczas spawania. Może on zostać użyty do wyznaczenia rozkładu wartości temperatury w ciele, które porusza się względem źródła ciepła lub w przypadku poruszającego się źródła ciepła względem nagrzewanego ciała.

W tym przypadku należy zwrócić uwagę na to, że przyjmuje się stałą prędkość przemieszczania końcówki pasa względem gorącej płyty. Zgodnie z tym modelem równanie przewodnictwa ciepła (5.46) w jednowymiarowym układzie współrzędnych przyjmuje postać:

$$v_w \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = a_{dc} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5.57)$$

gdzie v_w stanowi prędkość przemieszczenia się źródła ciepła. Przy założeniu warunków brzegowych:

$$T_x(x, t = 0) = T_o \quad (5.58)$$

$$\text{dla } 0 \leq x \leq L,$$

$$T_x(x = 0, t > 0) = T_p, \quad (5.59)$$

otrzymujemy rozwiązanie, w postaci funkcji rozkładu temperatury podczas wyrównywania powierzchni pasa T_w , w zależności od odległości od gorącej płyty (współrzędna x):

$$T_w(x) = T_p + (T_o - T_p) \cdot e^{\left(-\frac{v_w \cdot x}{a_{dc}}\right)}. \quad (5.60)$$

Zgodnie z tą zależnością, takie podejście do wstępnego uplastyczniania pasa powoduje otrzymanie ustalonego rozkładu temperatury (niezależnego od czasu t). Wynika to z przyjmowanych założeń, że gorąca płyta jako ruchome źródło ciepła, przemieszczając się względem pasa, stanowi wyznacznik ruchomego układu współrzędnych, według którego ten rozkład temperatury jest oznaczony.

W następnej kolejności, podczas nagrzewania w etapie, w którym nie występuje siła docisku lub przyjmuje niewielką wartość, przewodzenie ciepła od gorącej płyty do nagrzewanej końcówki oraz w materiale nagrzewanym według tych założeń przyjmuje stan nieustalony. W związku z tym można dla tego przypadku wykorzystać model nagrzewania odcinka ciała półnieskończonego umieszczonego pomiędzy dwiema płaszczyznami o stałych temperaturach, dla którego temperatura początkowa jest funkcją zależną od odległości od gorącej płyty [198]. W związku z tym, ogólne równanie przewodnictwa cieplnego przyjmie postać (5.46):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{dc} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (5.61)$$

Zakładając warunek początkowy:

$$T_n(x, t = 0) = T_w(x), \quad (5.62)$$

gdzie T_n stanowi temperaturę podczas takiego nagrzewania, a także warunki brzegowe pierwszego rodzaju:

$$T_n(x = 0, t > 0) = T_p, \quad (5.63)$$

$$T_n(x = L, t > 0) = T_o, \quad (5.64)$$

otrzymujemy rozwiązanie tego równania w postaci [76]:

$$T_n(x, t) = T_o + (T_p - T_o) \cdot \frac{x}{L} + \frac{2}{\pi} \cdot \sum_1^\infty \left(\frac{T_p \cdot \cos(n\pi) - T_o}{n} \cdot \sin\left(\frac{n\pi \cdot x}{L}\right) \cdot e^{\frac{-a_{dc} \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2}} \right) + \frac{2}{L} \cdot \sum_1^\infty \left(\sin\left(\frac{n\pi \cdot x}{L}\right) \cdot e^{\frac{-a_{dc} \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2}} \int_0^L T_w(x') \cdot \sin\left(\frac{n\pi \cdot x'}{L}\right) dx' \right). \quad (5.65)$$

Funkcja będąca rozwiązaniem tego równania opisuje rozkład temperatury w nagrzewanym pasie w zależności od czasu nagrzewania t oraz współrzędnej x . Etap wyrównania oraz właściwego nagrzewania można również rozpatrywać łącznie, nie uwzględniając zjawisk zachodzących podczas przemieszczania pasa oraz jego docisku, zgodnie z opracowanym cyklogramem procesu zgrzewania (Rys. 82).

Przedstawione wyżej metody nie uwzględniają również ewentualnej zmiany stanu skupienia nagrzewanego materiału podczas zmiękczenia i topnienia. W związku z tym nagrzewanie pasa można również rozpatrywać łącznie poprzez model nagrzewania ciała półnieskończonego wraz ze zmianą stanu skupienia, która zachodzi podczas topnienia tworzywa. Rozwiązanie takiego zagadnienia również prowadzi do otrzymania rozkładu temperatury w funkcji współrzędnej x pasa oraz czasu t , zarówno dla fazy stałej, jak i ciekłej. Przyjmując model ciała prętowego, ograniczonego płaszczyzną $x = 0$, o temperaturze $T_p > T_t$, które ulega topieniu z przemieszczeniem frontu topnienia, można zapisać równanie przewodnictwa cieplnego dla fazy stałej [202]:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_{dc,s} \cdot \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (5.66)$$

oraz ciekłej:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = a_{dc,c} \cdot \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2}. \quad (5.67)$$

W takim przypadku należy przyjąć warunek początkowy w postaci:

$$T(x, 0) = T_o, \quad (5.68)$$

oraz warunki brzegowe:

$$T(0, t) = T_p, \quad (5.69)$$

$$T(\infty, t) = T_o, \quad (5.70)$$

a także warunki przejścia pomiędzy fazą stałą, a ciekłą:

$$T_s = T_c = T_t, \quad (5.71)$$

$$\text{gdzie } x = X(t)$$

oraz bilans pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła dla fazy stałej (λ_s) i ciekłej (λ_c), uwzględniający utajone ciepło zmiany stanu skupienia nagrzewanego tworzywa (L_h):

$$\lambda_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_c \cdot \frac{\partial T_c}{\partial x} = L_h \cdot \rho_p \cdot \frac{\partial X}{\partial t}. \quad (5.72)$$

Stosując rozwiązanie Neumanna [198] otrzymujemy funkcję opisującą rozkład temperatury w zależności od czasu i współrzędnej dla fazy ciekłej:

$$T_c(x, t) = T_p - \frac{T_p - T_t}{\text{erf} \beta} \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{dc,c} \cdot t}} \right), \quad (5.73)$$

a także dla fazy stałej:

$$T_s(x, t) = \frac{T_t}{\operatorname{erfc} \beta \cdot \sqrt{\frac{a_{dc,c}}{a_{dc,s}}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{dc,s} \cdot t}} \right). \quad (5.74)$$

Aktualną współrzędną płaszczyzny topnienia można wyznaczyć z zależności:

$$X(t) = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{a_{dc,c} \cdot t}. \quad (5.75)$$

Współczynnik β jest pierwiastkiem równania, uwzględniającym dodatkowo ciepło właściwe materiału w fazie ciekłej ($C_{p,c}$):

$$\frac{e^{-\beta^2}}{\operatorname{erf} \beta} - \frac{\lambda_s \cdot \sqrt{a_{dc,c}} \cdot T_t \cdot e^{-\beta^2 \frac{a_{dc,c}}{a_{dc,s}}}}{\lambda_l \cdot \sqrt{a_s} \cdot (T_p - T_t) \cdot \operatorname{erfc} \left(\beta \cdot \sqrt{\frac{a_{dc,c}}{a_{dc,s}}} \right)} = \frac{\beta \cdot L_h \cdot \sqrt{\pi}}{C_{p,c} \cdot (T_p - T_t)} \quad (5.76)$$

i może być wyznaczony rozwiązując to równanie numerycznie lub graficznie. Rozkład temperatury w tym przypadku jest zależny od funkcji błędów Gaussa.

Ta metoda wyznaczania rozkładu temperatury w uplastycznianym pasie wydaje się najbardziej odpowiednia. Jej zastosowanie obarczone jest jednak trudnościami związanymi z tym, że zgodnie z wynikami badań zorientowanych na właściwości materiałowe tego tworzywa (rozdział 4.3.2), nie jest możliwym określenie jednoznacznej granicy topnienia tego tworzywa. Przekłada się to na fakt, że podczas tego procesu nie zachodzi zauważalne topnienie struktury krystalicznej, a raczej uplastycznianie w szerszym zakresie wartości temperatury. Ze względu na to, że podczas nagrzewania tego materiału (przeprowadzanego m.in. metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC) nie zaobserwowano wyraźnych efektów termicznych świadczących o przejściu fazowym (ze stanu stałego do ciekłego, bądź odwrotnie), nie jest możliwym wyznaczenie utajonego ciepła topnienia L_h . Podobnie problematycznym jest wyznaczenie oddzielnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla stanu stałego i ciekłego (λ_s oraz λ_c), a także ciepła właściwego dla stanu ciekłego $C_{p,c}$. W związku z tymi czynnikami, na obecnym etapie wiedzy na temat zachowania się tego materiału w temperaturze o podwyższonej wartości, model ten nie może zostać zastosowany.

Przedstawione sposoby modelowania wymiany ciepła, które mogły by być zastosowane na potrzeby opisu uplastyczniania materiału pasa, charakteryzują się również tym, że nie uwzględniają strat energii w wyniku konwekcji zachodzącej na powierzchni wewnętrznej pasa. Aby uwzględnić to zjawisko w modelowaniu wymiany ciepła można się posłużyć innym podejściem – modelem ciała prętowego, z przemieszczającym się źródłem ciepła [198].

Zagadnienie to może być rozpatrzone w konwencji odwróconej, kiedy to pręt przemieszcza się względem źródła ciepła, co niewątpliwie ma miejsce podczas uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie, przy założeniu sterowania przemieszczeniem – kiedy prędkość uplastyczniania v_{pl} jest stała. Biorąc pod uwagę konwekcję pomiędzy pasem, a otoczeniem gazowym, ogólne równanie jednowymiarowego przewodzenia ciepła w pasie, przy założeniu wzrostu wartości temperatury w kierunku zgodnym ze współrzędną x zorientowaną wzdłuż osi pasa, przyjmuje postać:

$$a_{dc} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v_{pl} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \nu \cdot v_{pl} = 0, \quad (5.77)$$

gdzie v stanowi współczynnik określający konwekcyjną wymianę ciepła dla cienkiego pręta: o obwodzie S i polu przekroju poprzecznego A , który jest wyznaczany z zależności:

$$v = \frac{\alpha_k \cdot S}{c_p \cdot \rho_p \cdot A}, \quad (5.78)$$

przy czym α_k stanowi współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła, dla konwekcji swobodnej w otoczeniu powietrza atmosferycznego. Zakładając warunki brzegowe:

$$T_x(x, t = 0) = T_0 \quad (5.79)$$

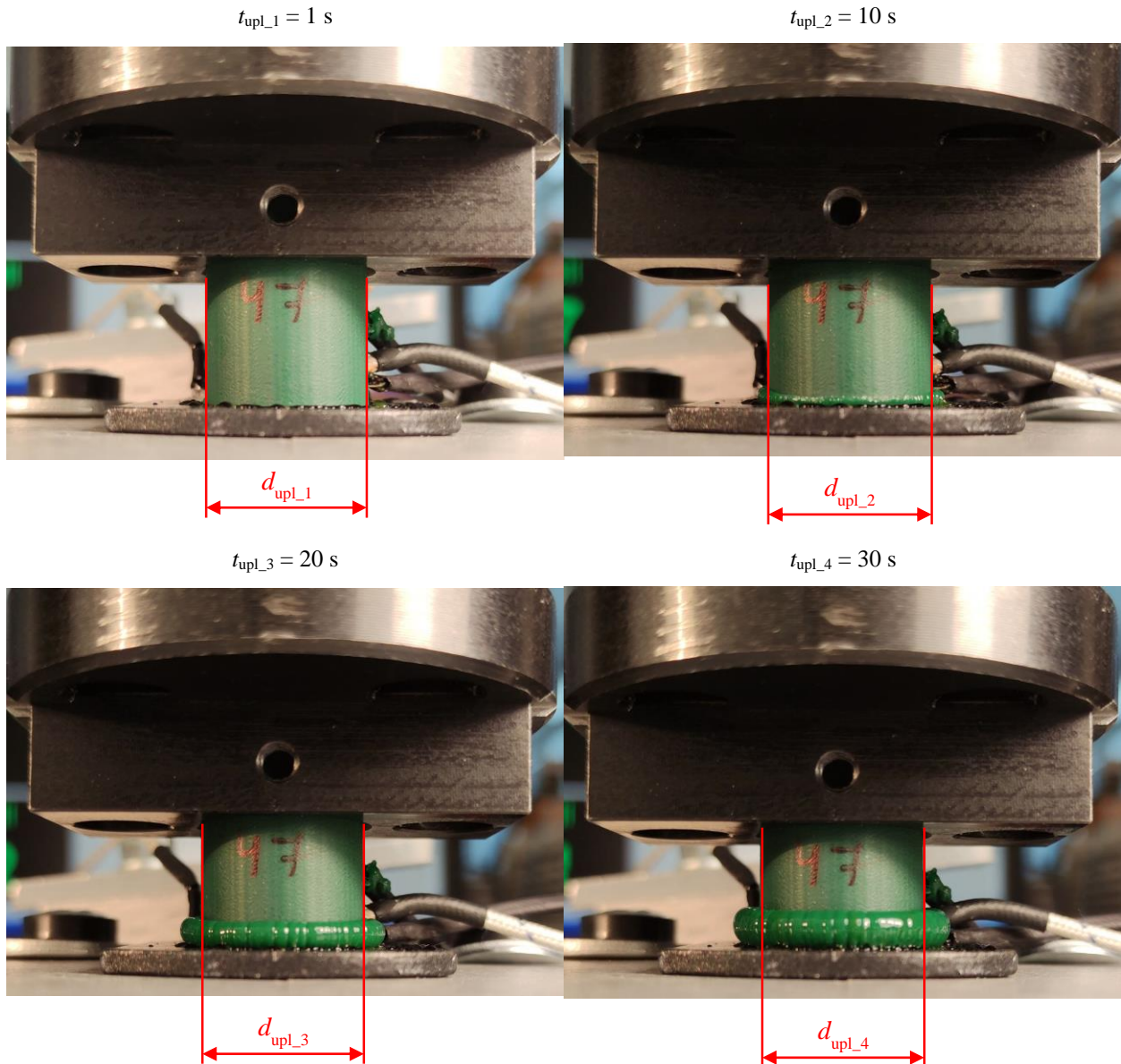
$$T_x(x = 0, t > 0) = T_p, \quad (5.80)$$

uzyskuje się rozkład wartości temperatury w dowolnej chwili t :

$$T_{pl}(x) = (T_p - T_0) \cdot e^{-\frac{v_{pl} \cdot \sqrt{v_{pl}^2 + 4 \cdot a_{dc} \cdot v}}{2 \cdot a_{dc}} x} + T_0. \quad (5.81)$$

Oczywistym jest, że takie podejście stanowi znaczące uproszczenie, ze względu na fakt, że tak określony rozkład temperatury jest stacjonarnym, tj. niezależnym od czasu t , podczas gdy wymiana ciepła w tej operacji jest niestabilna. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że funkcja opisująca rozkład temperatury (5.81) określa jej wartość dla ruchomego układu współrzędnych, to znaczy poruszającego się z badanym obiektem (źródłem ciepła lub w tym przypadku nagrzewanym prętem, w postaci pasa). W takim ujęciu, globalnie zachodząca niestabilna wymiana ciepła, definiowana względem poruszającego się obiektu (źródła ciepła lub elementu nagrzewanego poruszającego się względem nieruchomego źródła ciepła), staje się lokalnie ustaloną, rozpatrując ją względem ruchomego układu współrzędnych związanego z przemieszczającym się elementem.

Zjawisko wymiany ciepła należy odnieść bezpośrednio do operacji uplastycznienia pasa oraz jej podziału na fazy (Rys. 87, Tab. 33 i 34). Oczywistym jest, że w *I* fazie – uplastycznienia ustalonego, materiał jest niedostatecznie rozgrzany, w wyniku czego zachodzi częściowe ściskanie ciała stałego, czego skutkiem jest wzrost wartości siły uplastyczniającej F_{pl} , niezależnie od parametrów operacyjnych. Następnie po tym, po czasie t_{I-II} , następuje zmiana odpowiedzi materiału na takie ściskanie, spowodowana postępującym uplastycznieniem. Biorąc pod uwagę, że przemieszczenie uchwytu próbki zarówno podczas badań uplastycznienia, jak i w realnym procesie, zachodzi ze stałą prędkością v_{pl} , kłóci się to z ideą lokalnie ustalonej wymiany ciepła. Wynika to jednak z faktu, że w *I* fazie uplastycznienia, podczas dociskania końcówki pasa do płyty, prędkości poszczególnych punktów materialnych, zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie gorącej płyty, nie są równe prędkości v_{pl} . Przyczyną tego zjawiska jest ściskanie całej próbki na początku tej fazy, co zaobserwowano podczas analizy wymiarów próbek, na podstawie zarejestrowanych prób uplastycznienia (Rys. 109). Podstawowym obserwowalnym efektem jest zwiększanie się całej średnicy d próbki w *I* fazie, przy czym po wyraźnym uformowaniu wypłytki wartość tego parametru geometrycznego się zmniejsza. Oczywiście zarejestrowane w taki sposób wyniki (rejestracja wideo kamerą wysokiej rozdzielczości), nie mogą służyć do jednoznacznej oceny ilościowej operacji ściskania, ponieważ pomiary na podstawie obrazu są obciążone dość dużym błędem, mogą jednak stanowić bazę do analizy porównawczej zmiany geometrii próbki podczas ściskania.



Rys. 109. Zmiany postaci wypłytki podczas uplastyczniania wraz z orientacyjnym określeniem chwilowej średnicy pasa d_{upl} dla różnych wartości czasu uplastyczniania t_{upl} dla pasa o średnicy wyjściowej $d = 17,96$ mm, uplastycznianego gorącą płytą o temperaturze $T_p = 299,7$ °C z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Na podstawie tak przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że

$$d_{upl_2} > d_{upl_1} \cong d_{upl_3} \cong d_{upl_4}, \quad (5.82)$$

przy czym:

$$\frac{d_{upl_2}}{d_{upl_1}} \cong 1,02, \quad (5.83)$$

co świadczy o zwiększeniu średnicy o około 2% w I fazie operacji (d_{upl_2}) względem średnicy wyjściowej (a dokładnie w pierwszej sekundzie uplastyczniania – d_{upl_1}), przy czym jej wartość podczas dalszego uplastyczniania (d_{upl_3} i d_{upl_4}) zmniejsza się z powrotem do wartości zbliżonej do średnicy wyjściowej (d_{upl_1}).

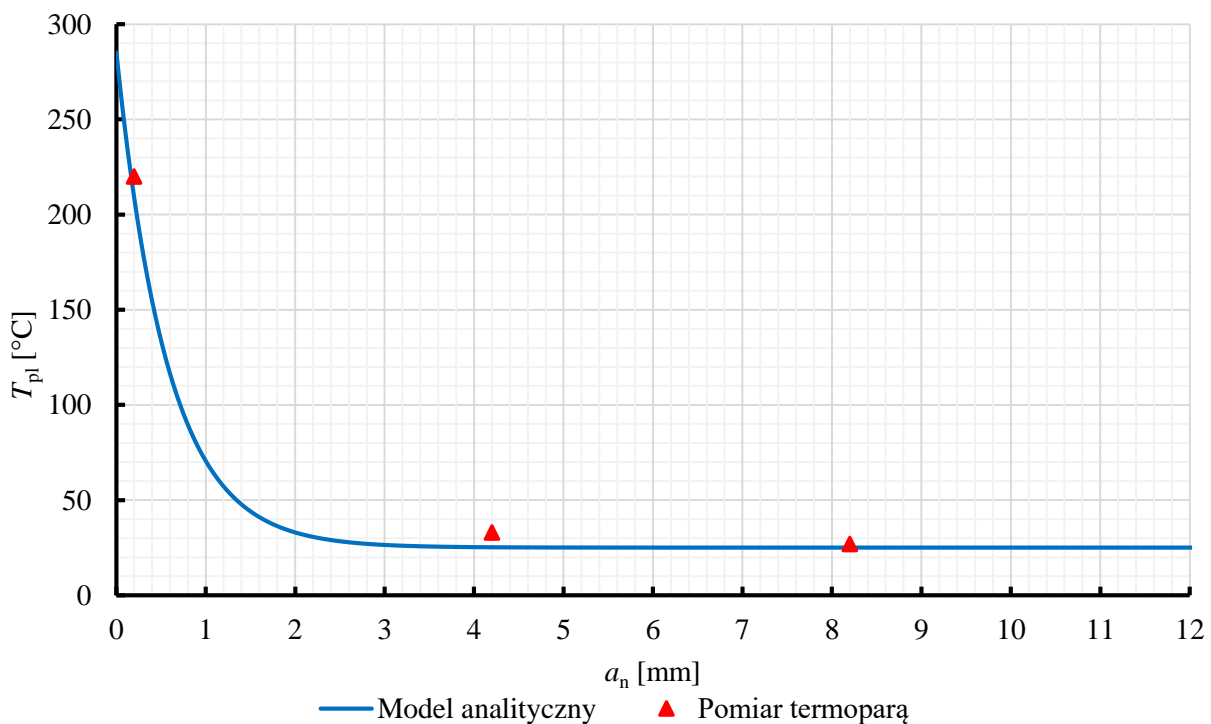
Rozkład temperatury może być więc wyznaczony według zależności (5.81), ze wskazaniem na II fazę tej operacji, czyli uplastycznianie nieustalone. W związku z tym przeprowadzono obliczenia rozkładu temperatury dla tego przypadku, dla parametrów podanych w tabeli 40. Parametry do obliczeń zostały przyjęte

na podstawie wykonanych badań materiałowych (rozdział 4.3.2), natomiast współczynnik konwekcyjnego przewodzenia ciepła dla konwekcji naturalnej w otoczeniu powietrza atmosferycznego α_k na podstawie uśrednionych danych z literatury [205, 206]. Obliczenia pola przekroju poprzecznego A i obwodu S , wykonano standardowo – jak dla kształtu walcowego.

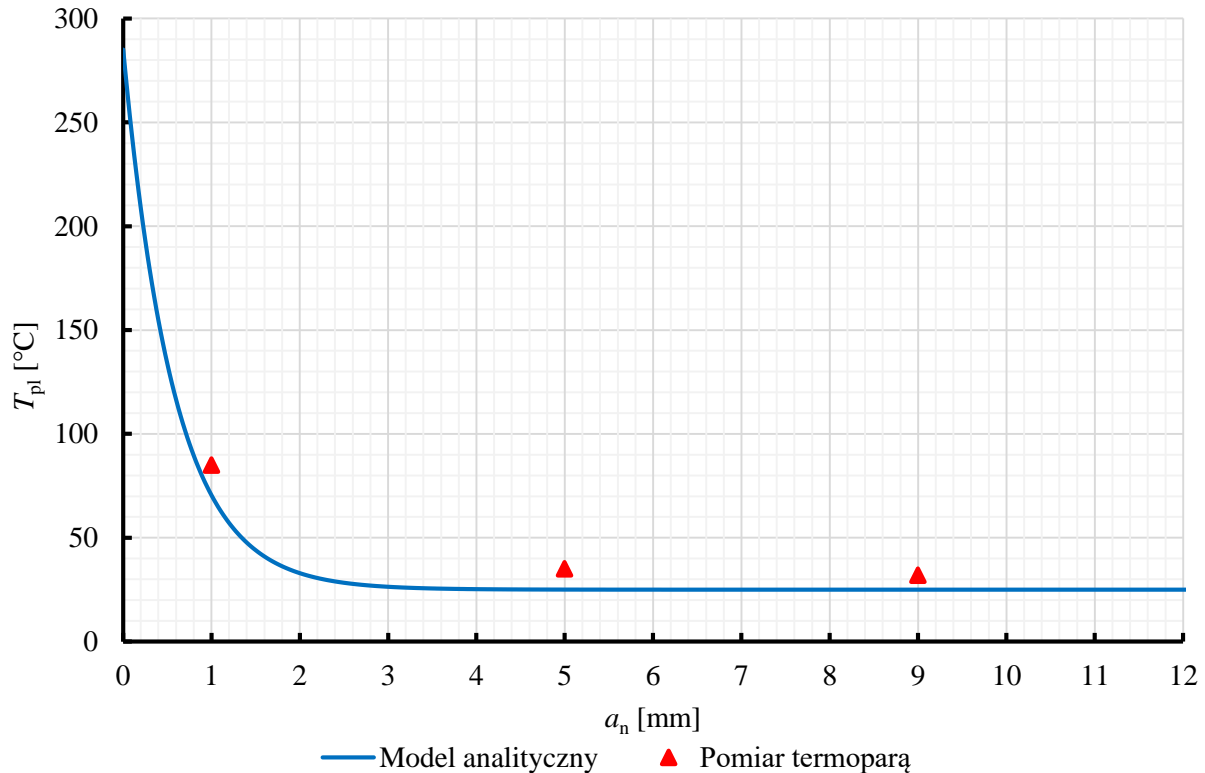
Tab. 40. Wstępnie przyjęte parametry do badań rozkładu temperatury w nagrzanym pasie podczas wstępnego etapu uplastyczniania materiału (źródła wybranych wartości [83, 205, 206])

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica pasa	d [mm]	15, 18
Prędkość uplastyczniania	v_{pl} $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	6
Temperatura gorącej płyty	T_p [K]	285, 300
Temperatura otoczenia	T_o [K]	20
Współczynnik dyfuzyjności cieplnej	a_{dc} $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$	$5,76 \cdot 10^{-8}$
Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	C_p $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	$3,7 \cdot T + 1658$
Współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła	α_k $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right]$	10
Gęstość materiału pasa	ρ_p $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	1190

Przykładowe wyniki przeprowadzonych obliczeń dla dwóch grup parametrów przedstawiono na rysunku 110 oraz 111. Na otrzymanych wykresach zamieszczono również wartości temperatury, zarejestrowane w punktach pomiarowych (5.1, 5.2 oraz 5.3) podczas badań eksperymentalnych (Rys. 85).



Rys. 110. Rozkład temperatury T_{pl} podczas uplastyczniania materiału pasa w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n) dla pasa o średnicy $d = 18$ mm uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ na gorącej płycie o temperaturze $T_p = 300^\circ\text{C}$, wyznaczony w sposób analityczny i eksperymentalnie w trzech punktach pomiarowych, po przemieszczeniu $s_{pl} = 2,8$ mm



Rys. 111. Rozkład temperatury T_{pl} podczas uplastyczniania materiału pasa w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n) dla pasa o średnicy $d = 15$ mm uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ na gorącej płycie o temperaturze $T_p = 285^\circ\text{C}$, wyznaczony w sposób analityczny i eksperymentalnie w trzech punktach pomiarowych, po przemieszczeniu $s_{pl} = 2$ mm

Jak wynika z otrzymanych zależności, zastosowany model w tym zakresie dość dobrze odwzorowuje rozkład temperatury. Należy jednak zauważyć, że najważniejszym punktem pomiarowym w badaniach empirycznych była termopara nr 5.1 (Rys. 85) – zlokalizowana najbliżej gorącej płyty. Tylko ona była w stanie zarejestrować zauważalną zmianę wartości temperatury, podczas badań z określonym wcześniej maksymalnym przemieszczeniem s_{pl_max} . Wynika to z tego, że materiał ten posiada dość niską wartość współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} (dawniej nazywanego współczynnikiem wyrównywania temperatury), który dla dobrych przewodników cieplnych (np. metali) przyjmuje zazwyczaj wartość 2 rzędy wielkości wyższą [205]. Obserwowalnym efektem tego zjawiska jest to, że nagrzewanie za pomocą gorącej płyty jest względnie lokalne – podczas zgrzewania można taki pas trzymać ręką bezpośrednio tuż obok gorącej płyty, bez poparzenia się. Jest to również bardzo ważna cecha z technologicznego punktu widzenia – pas taki może być chwytny podczas zgrzewania przez szczęki bardzo blisko jego płaskich końców, ze względu na niewielki spadek wytrzymałości wraz z temperaturą, co poprawia precyzję operowania tym zakończeniem i ogranicza ryzyko wybożenia.

Maksymalna odchyłka wartości temperatury wyznaczonej według modelu (5.81), względem pomiaru wykonanego za pomocą termopary nr 5.1 (Rys. 85), nie przekracza 20%. Wobec faktu, że położenie tego czujnika w uplastycznianym materiale często pod koniec uplastyczniania było niestabilne, ze względu na formowanie wypływkę, jest to wynik zadowalający. Dodatkowo, należy zauważyć, że do modelowania przyjęto pewien uśredniony współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła α_k ze względu na to, że pomiar

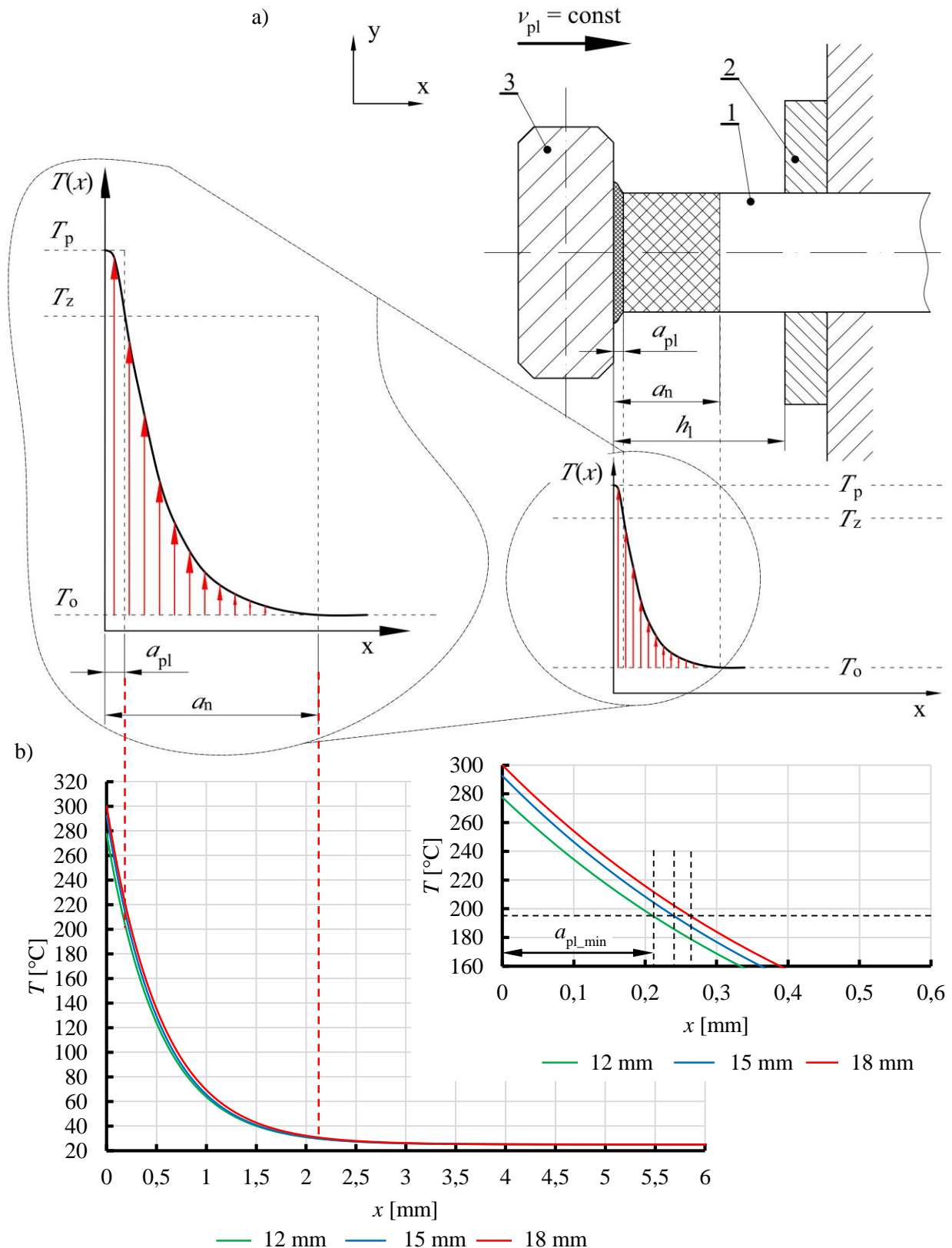
wartości rzeczywistej był niemożliwy. Biorąc pod uwagę fakt, że w przemysłowych warunkach realizacji operacji zgrzewania warunki otoczenia nie są stałe, można uznać, że ten model jest wystarczający na potrzeby rozważań nad wymianą ciepła w praktycznej realizacji tego procesu.

5.5. Estymacja parametrów uplastyczniania efektywnego

Szacowanie wartości siły, którą należy przyłożyć do uplastyczniania pasa jest ważnym zagadnieniem z punktu widzenia opisu przebiegu tej operacji za pomocą wartości parametrów fizycznych, które mogą obejmować zarówno właściwości materiałowych, jak i parametry technologiczne procesu. Istotnym wydaje się więc wykonanie analizy tego zagadnienia dla II fazy tej operacji (Rys. 87) i przypadku stałego przebiegu siły uplastyczniania F_{pl} , (uplastycznianie efektywne), dla którego zachodzi lokalnie ustalona wymiana ciepła. Analizując zachowanie się tego materiału w podwyższonej temperaturze, można wysunąć wniosek, że podstawowym parametrem fizycznym charakteryzującym uplastyczniany materiał, który ma wpływ na ten proces jest lepkość dynamiczna η . W istocie, podczas takiego przebiegu tej operacji, siła oddziałująca na strukturę materiału podczas jego dociskania do gorącej płyty, powoduje plastyczne płynięcie tworzywa na powierzchni grzewczej. Celowym wydaje się zatem rozpatrywanie lepkości dynamicznej tworzywa, jako parametru mającego główny wpływ na naprężenie uplastyczniające σ_{pl} .

Lepkość dynamiczną tworzywa i jej zależność od wartości temperatury, wyznaczono na podstawie wyników badania dynamicznej analizy termomechanicznej (Rys. 66) i ekstrapolowano na cały analizowany zakres temperatury (parametr η_{mod_avg}). Istotnym jest jednak fakt, że zjawiska fizyczne zachodzące podczas uplastyczniania materiału w procesie zgrzewania doczołowego są zgoła odmienne od tych zachodzących w badaniu DMTA. Główną różnicą jest sposób odkształcania materiału, który podczas zgrzewania podlega ścisłaniu, a nie skręcaniu. W związku z tym, rezultaty badania lepkości dynamicznej η materiału w kierunku poprzecznym nie są wystarczające. Niezbędnym jest zatem określenie lepkości w kierunku wzdłużnym. Aby móc poddać lepkość materiału dalszej analizie, należy wziąć pod uwagę uzyskiwane prędkości odkształcenia, w celu określenia praw jakim podlega lepkość podczas zgrzewania (Rys. 112).

Analizując odkształcanie się materiału podczas uplastyczniania, należy zwrócić uwagę na fakt, że odkształcenie nie jest jednolite na całej długości pasa poddawanego ścisłaniu, co odróżnia tę sytuację od modelowego procesu ścisłania. W rozpatrywanym przypadku, odkształcenie materiału (1) w wyniku ścisłania zachodzi na odcinku h_1 zlokalizowanym pomiędzy uchwytem pasa (2), a gorącą płytą (3). Biorąc pod uwagę fakt, że materiał pasa odkształca się jednostronnie (nagrzewanie zachodzi w taki właśnie sposób), w wyniku zmniejszenia wytrzymałości pod wpływem podwyższonej temperatury, można przyjąć, że część pasa o temperaturze $T = T_0$, jest doskonale sztywna, w porównaniu do części której temperatura przekracza wartość T_0 . Dodatkowo, podczas obserwacji zachowania się próbki podczas uplastyczniania efektywnego (cechującego się w przybliżeniu ze stałą siłą F_{pl} w II fazie tej operacji – Rys. 109), nie odnotowano zauważalnego odkształcenia materiału poza obszarem wypłytki, czyli w przybliżeniu poza obszarem rozgrzanym do temperatury zgrzewania T_z . W związku z tym, na potrzeby tej analizy można przyjąć założenie, że całkowite odkształcenie materiału, podczas dociskania do gorącej płyty, zachodzi w obszarze rozgrzanym do temperatury zgrzewania T_z .



Rys. 112. Uplastycznianie pasa podczas zgrzewania doczołowego: a) schemat i oczekiwany rozkład temperatury w osi pasa, b) rozkład temperatury podczas uplastyczniania dla efektywnych parametrów technologicznych (T_{pl_eff} i v_{pl_eff} – Tab. 37) i trzech średnic pasa d (12 mm, 15 mm i 18 mm): 1 – nieruchoma końcówka pasa, 2 – uchwyt, 3 – gorąca płyta; v_{pl} – prędkość uplastyczniania, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastyczniania pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia, h_1 – odległość wysunięcia pasa z uchwytu, a_{pl_min} – minimalna odległość uplastyczniania dla temperatury T_{u_min} , x – współrzędna zorientowana wzdłuż osi pasa, T – temperatura (ogólnie)

Pewną trudnością towarzyszącą tej analizie jest brak ściśle określonej wartości temperatury, przy której zgrzewany materiał podlega uplastycznianiu podczas zgrzewania (czyli temperatury zgrzewania T_z), co wynika z zachowania się pokrewnego do ciała amorficznego. Z tego powodu, do dalszej analizy można posłużyć się zakresem wartości temperatury zgrzewania określonym przez:

- minimalną wartość temperatury, przy której może zachodzić uplastycznienie dla tego materiału, wyznaczoną na podstawie badania DMTA – $T_{z_min} = 197^\circ\text{C}$ (Rys. 60b),
- maksymalną wartość temperatury, przy której można użytkować materiał ze względu na degradację termiczną, wyznaczoną na podstawie termogravimetrii – $T_{z_max} = 305^\circ\text{C}$ (Rys. 67a).

W związku z tym, możliwe jest sformułowanie założenia, że odkształceniu podczas uplastyczniania podlega jedynie odcinek o długości a_{pl} , rozgrzany do minimalnej temperatury przy której może zachodzić uplastycznienie tego materiału tj. T_{z_min} , wobec względnie dużej sztywności tworzywa, które temu uplastycznieniu nie podlega. Analizę wartości tego parametru można wykonać na podstawie rozkładu temperatury, wyznaczonego dla uplastyczniania przeprowadzonego z wykorzystaniem efektywnych parametrów technologicznych (Rys. 112). Zakładając, że podczas uplastyczniania pas wykonuje przemieszczenie s_{pl} , to w sposób ogólny odkształcenie, któremu jest poddany przyjmuje wartość:

$$d\varepsilon = \frac{ds_{pl}}{a_{pl}} \quad (5.84)$$

Przemieszczenie s_{pl} określane jest w funkcji prędkości uplastycznienia v_{pl} :

$$ds_{pl} = v_{pl} \cdot dt, \quad (5.85)$$

w związku z czym, prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon}$ można opisać za pomocą zależności:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{ds_{pl}}{a_{pl}} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_{pl}}{a_{pl}} \quad (5.86)$$

Powyższe rozważania są ważne tylko dla przypadku stałej prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon}$, co zachodzi podczas ustalonego przebiegu operacji uplastyczniania, w II fazie przy założeniu stałej wartości siły F_{pl} – czyli podczas uplastyczniania efektywnego. Z punktu widzenia analizy, realizowanej w kierunku wykorzystania wartości lepkości do opisu uplastyczniania, interesującym jest maksymalna wartość prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon}$, która podobnie jak w przypadku analizy wyników z badania DMTA posłuży do określenia czy uplastyczniony polimer w tych warunkach może być traktowany jak ciało newtonowskie.

Dostarczanie ciepła do materiału pasa za pomocą gorącej płyty skutkuje wzrostem wartości jego temperatury, opisanym zgodnie z rozkładem $T(x)$ (zależności 5.81), powodując różną jego podatność na odkształcenie. W wyniku tego rozkład prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon}$ wzdłuż osi pasa nie jest jednorodny, a spodziewanym efektem jest jego powiązanie z rozkładem temperatury $T(x)$ (Rys. 112). Dodatkowo, wartość odległości a_{pl} również zależy od tego parametru. Biorąc jednak pod uwagę hipotetyczną maksymalną prędkość uplastyczniania, która została zastosowana do badań:

$$v_{pl_max} = 16 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 0,27 \frac{\text{mm}}{\text{s}}, \quad (5.87)$$

a także przy założeniu minimalnej odległości a_{pl_min} w obszarze pomiędzy uchwytem, a gorącą płytą, uzyskanej podczas uplastyczniania z parametrami efektywnymi (Rys. 112) równej:

$$a_{pl_min} = 0,21 \text{ mm}, \quad (5.88)$$

maksymalna uzyskana prędkość odkształcenia będzie wynosić:

$$\dot{\varepsilon} = 1,27 \frac{1}{s}. \quad (5.89)$$

Niezależnie od rzeczywistego rozkładu prędkości uplastycznienia $\dot{\varepsilon}$, jej wartość nie może być wyższa, a maksimum jest zlokalizowane w bezpośrednim otoczeniu gorącej płyty, co wynika z największej podatności materiału w tym miejscu. W związku z tym, podczas rozpatrywanego uplastycznienia pasa, prędkości odkształceń pozostają w zakresie lepkości newtonowskiej, czyli poniżej $10 \frac{1}{s}$, podobnie jak podczas badania DMTA. Oznacza to, że warunki odkształcenia podczas uplastycznienia są takie same jak w badaniu DMTA, czyli dowolna wartość naprężenia stycznego lub normalnego $\tau(\sigma)$ jest w korelacji liniowej z szybkością odkształcenia $\dot{\gamma}(\dot{\varepsilon})$. Wartość lepkości, której znajomość jest konieczna do modelowania procesu, jest więc możliwa do wyznaczenia na podstawie przeprowadzonych badań lepkości w analizie DMTA.

W związku z tym, że dla tego przypadku newtonowskie prawa plastycznego płynięcia mogą zostać zastosowane, w celu wyznaczenia lepkości wzdłużnej η_e na potrzeby ściskania/rozciągania można posłużyć się definicją lepkości Troutona, zgodnie z którą [89, 103]:

$$\eta_e = 3 \cdot \eta = 3 \cdot \eta_{mod_avg}(T). \quad (5.90)$$

Na tej podstawie, przy użyciu zależności (4.29 i 5.90) (Rys. 66), możliwe jest wyznaczenie właściwej wartości lepkości dynamicznej materiału pasa na potrzeby analizy zachowania się tworzywa, podczas uplastycznienia w procesie zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty. Należy jednak zauważyć, że takie założenia są ważne dla określonej wartości ilorazu prędkości uplastycznienia v_{pl} oraz grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} , tak aby nie przekroczyć prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 10 \frac{1}{s}$, w związku z czym podczas doboru parametrów technologicznych konieczne będzie sprawdzanie tego warunku.

Biorąc pod uwagę newtonowskie prawo plastycznego płynięcia, a także wyznaczoną lepkość wzdłużną, związek pomiędzy naprężeniem, lepkością i prędkością odkształcenia można opisać jako [89]:

$$\eta_e = \frac{\sigma_n}{\dot{\varepsilon}}, \quad (5.91)$$

gdzie: σ_n – składowa normalna tensora naprężenia. Zakładając jednoosiowy stan obciążenia próbki podczas dociskania do gorącej płyty, a także stałą prędkość odkształcenia i stałą średnicę rdzenia próbki (uplastycznianie efektywne w II fazie, ze stałą siłą F_{pl}), można zapisać związek:

$$\sigma_n = \sigma_{pl} = \frac{F_{pl}}{A}, \quad (5.92)$$

gdzie A stanowi pole przekroju poprzecznego rdzenia próbki. Biorąc pod uwagę poczynione rozważania (5.86, 5.91 oraz 5.92), finalną zależność pomiędzy tymi podstawowymi parametrami uplastycznienia można zapisać jako:

$$\sigma_{pl} = \eta_e \cdot \dot{\varepsilon} = \eta_e \cdot \frac{v_{pl}}{a_{pl}}. \quad (5.93)$$

Uwzględniając wyznaczony model zależności lepkości materiału pasa od wartości temperatury (4.29 i 5.90), lepkość wzdłużną w otoczeniu gorącej płyty dla TPU C85A, można opisać za pomocą zależności:

$$\eta_e = 3 \cdot \left[a_1 \cdot e^{(b_1 \cdot T_p)} + a_2 \cdot e^{(b_2 \cdot T_p)} \right], \quad (5.94)$$

co pozwala wyprowadzić ostateczne powiązanie pomiędzy parametrami technologicznymi, a naprężeniem przy uplastycznianiu:

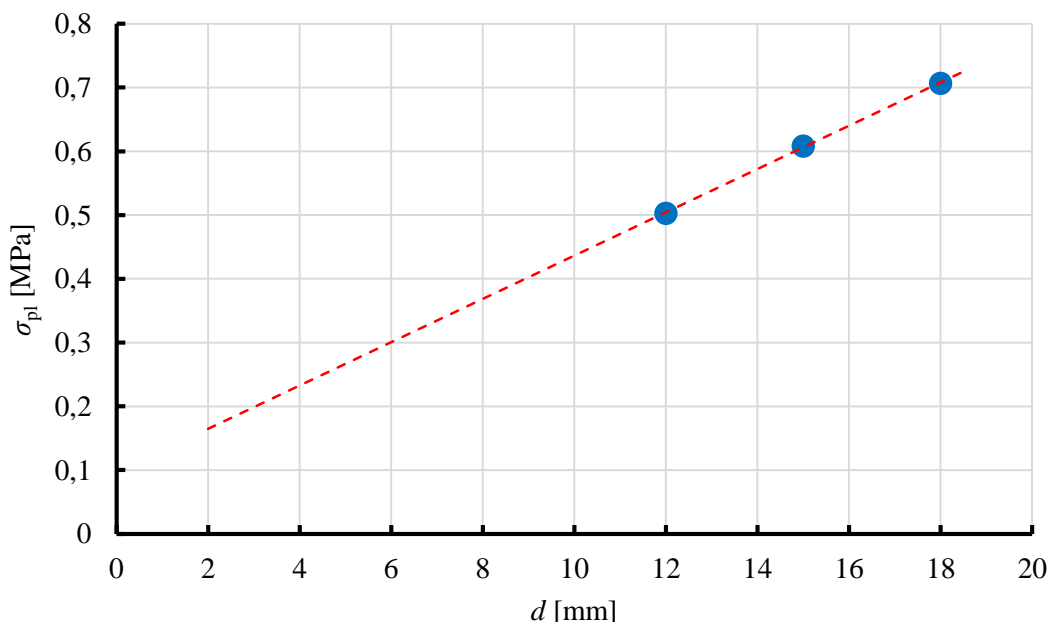
$$\sigma_{pl} = \eta_e \cdot \dot{\epsilon} = 3 \cdot \left[a_1 \cdot e^{(b_1 \cdot T_p)} + a_2 \cdot e^{(b_2 \cdot T_p)} \right] \cdot \frac{v_{pl}}{a_{pl}}, \quad (5.95)$$

gdzie: a_1 , a_2 , b_1 , b_2 są stanowią współczynniki modelu lepkości, wyznaczonego empirycznie na podstawie badań cyklicznego skręcania w warunkach zmiennej temperatury.

Na podstawie wykonanych rozważań można więc opracować ogólną metodologię estymacji wartości siły uplastyczniania F_{pl} oraz doboru wartości parametrów technologicznych, na potrzeby uzyskania efektywnego przebiegu tej operacji. Istotną trudnością tego działania jest brak jednoznacznej informacji na temat wartości temperatury zgrzewania T_z , przy której zachodzi uplastycznianie. Bazując jednak na wynikach badań empirycznych, dla efektywnego przebiegu tej operacji, można wyznaczyć naprężenie przy którym zachodzi uplastycznienie σ_{pl} w funkcji średnicy pasa d (Rys. 113). Uzyskane wartości można aproksymować za pomocą funkcji liniowej przy założeniu dopasowania danych określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,999$ do postaci:

$$\sigma_{pl} = 0,339 \cdot d + 0,0969. \quad (5.96)$$

Zależność ta może być wykorzystana przy estymacji siły podczas uplastyczniania dla innych średnic pasa d , co pozwoli uzyskać jedną z niewiadomych równania 5.95.



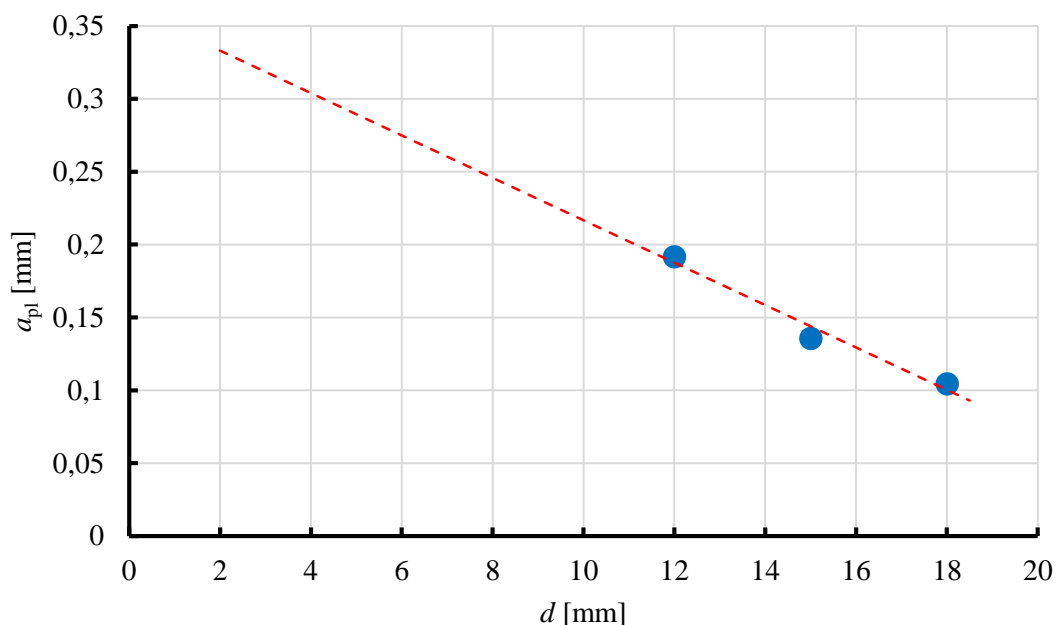
Rys. 113. Zależność pomiędzy naprężeniem przy uplastycznianiu σ_{pl} , a średnicą pasa d , dla uplastyczniania wykonanego z wykorzystaniem parametrów zapewniających efektywny przebieg tej operacji i trzech średnic pasa (na podstawie wartości $F_{pl_eff_mod_c}$ z tabeli 37)

Wartość odległości a_{pl} , czyli odcinka materiału rozgrzanego do temperatury zgrzewania T_z (która jest nieznaną), pozostaje w ogólnym ujęciu niewiadomą. Jej wartość można jednak opisać matematycznie, w funkcji średnicy pasa d , na podstawie wyników badań empirycznych uplastyczniania, dla efektywnego

przebiegu tej operacji, co pozwoli to na rozszerzenie zakresu również na inne średnice zgrzewanego cięgna. Korzystając z wyznaczonych wartości naprężenia przy uplastycznianiu σ_{pl} (Rys. 113), lepkości wzdłużnej η_e określonej dla efektywnej temperatury gorącej płyty T_{p_eff} oraz wartości prędkości v_{pl_eff} (Tab. 37) zapewniającej efektywne uplastycznianie, możliwe jest wyznaczenie parametru a_{pl} dla trzech badanych średnic pasa d (Rys. 114). Przy założeniu dopasowania danych określonego współczynnikiem determinacji $R^2 > 0,98$, wartość funkcji $a_{pl}(d)$ można aproksymować do postaci zależności liniowej:

$$a_{pl} = -0,0145 \cdot d + 0,3621. \quad (5.97)$$

Wartość tego parametru oraz naprężenia przy uplastycznianiu σ_{pl} stanowią wskaźniki pozwalające na uzyskanie efektywnego przebiegu uplastycznienia dla innych wartości średnicy d pasa.



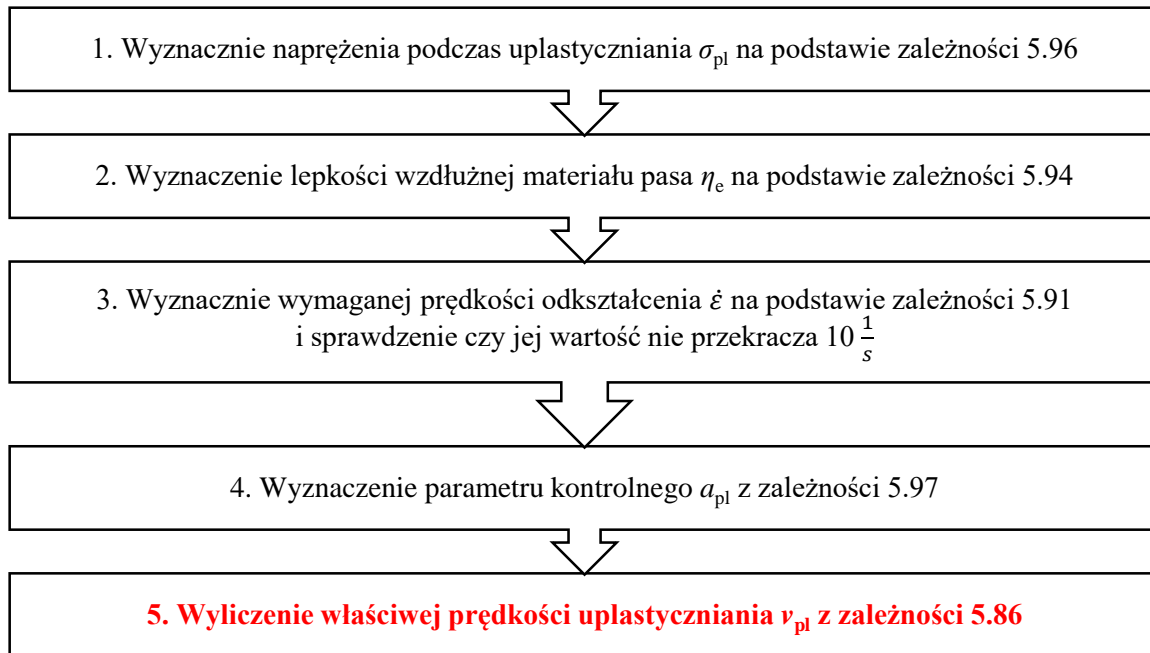
Rys. 114. Zależność pomiędzy odległością rozgrzaną do temperatury uplastycznienia a_{pl} , a średnicą pasa d , dla uplastycznienia wykonanego z wykorzystaniem parametrów zapewniających efektywny przebieg tej operacji

W związku z tym, metodologia estymacji wartości parametrów technologicznych operacji uplastycznienia pasa na gorącej płycie, zapewniających efektywny jej przebieg, dla określonej średnicy d poliuretanowego pasa ciągnowego, w zależności od posiadanych danych wejściowych i zakładanych parametrów statycznych, może przebiegać na dwa sposoby:

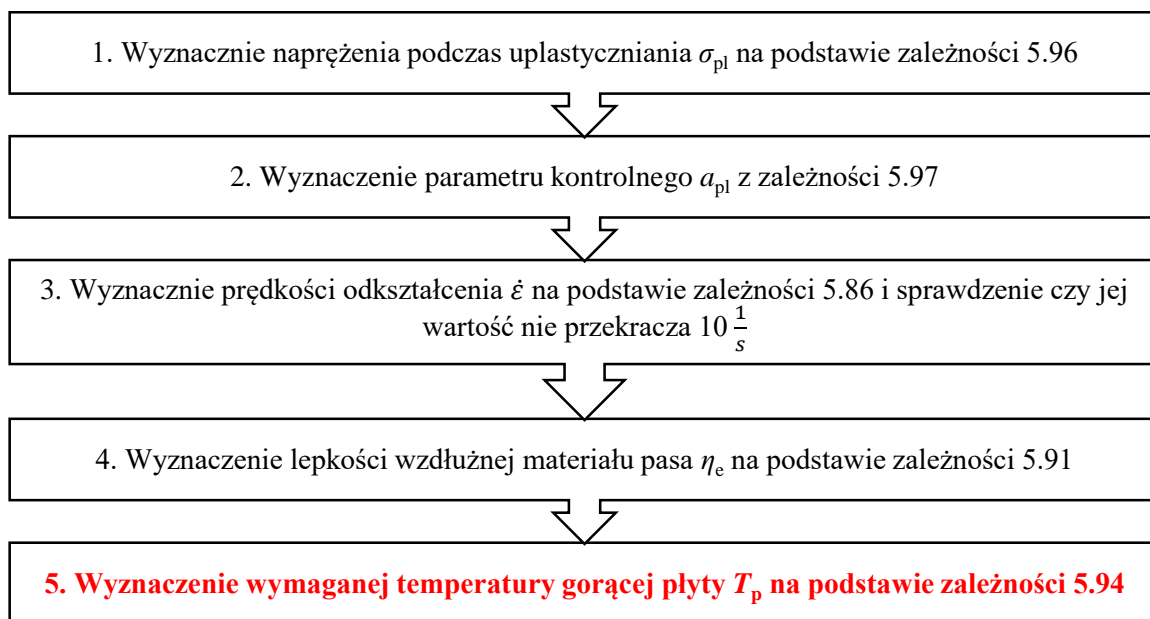
- dla przypadku założonej temperatury gorącej płyty T_p , gdzie istnieje konieczność doboru prędkości uplastycznienia v_{pl} (Rys. 115),
- dla przypadku założonej prędkości uplastycznienia v_{pl} , gdzie istnieje konieczność doboru wartości temperatury gorącej płyty T_p (Rys. 116).

Zastosowanie założonej metodyki postępowania przedstawiono na podstawie dwóch przykładów: estymacji wartości prędkości v_{pl} przy założonej wartości temperatury gorącej płyty T_p (Rys. 117) oraz wyznaczenia wartości temperatury T_p dla założonej prędkości uplastycznienia v_{pl} (Rys. 118). Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, dla uplastycznienia efektywnego, w badanym zakresie, obserwuje się niemal liniową zależność wyznaczanego parametru technologicznego od średnicy pasa d . Jest to efekt oczekiwany,

zgodnie z obserwacją dotyczącą naprężenia przy uplastycznianiu σ_{pl} (Rys. 113) wyznaczonego dla efektywnych parametrów tej operacji.



Rys. 115. Sposób postępowania podczas doboru prędkości uplastyczniania v_{pl} dla założonej średnicy pasa d oraz określonej temperatury gorącej płyty T_p zapewniającej uplastycznianie efektywne

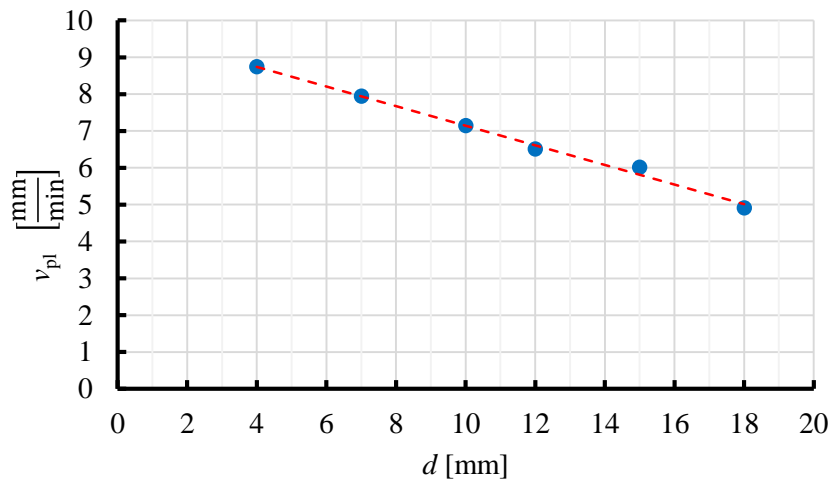


Rys. 116. Sposób postępowania podczas doboru temperatury gorącej płyty T_p dla założonej średnicy pasa d oraz określonej prędkości uplastyczniania v_{pl} zapewniającej uplastycznianie efektywne

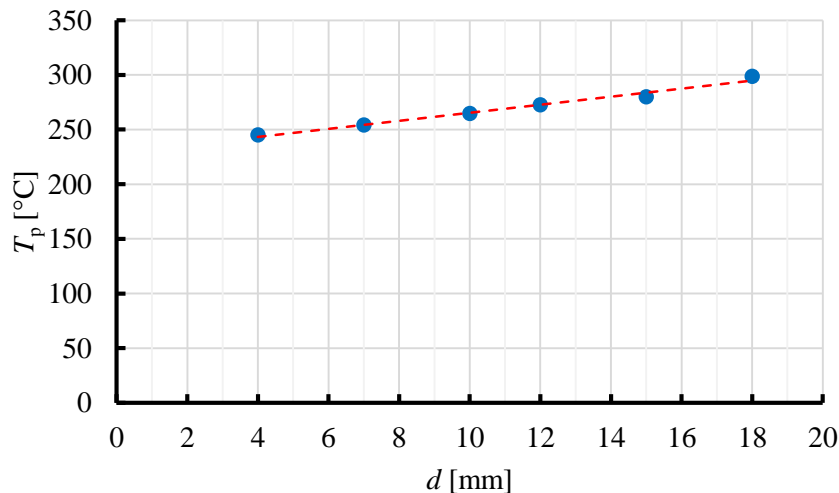
Opisane metody obliczeniowe mogą służyć do rozszerzenia zakresu wartości średnicy pasa podlegającego uplastycznianiu w sposób efektywny, co jest zgodne z założeniami do projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego.

Zastosowanie takich metod postępowania, podczas wyznaczania parametrów technologicznych uplastyczniania pasa, jest w oczywistym stopniu obciążone pewnymi wadami, wynikającymi z pewnych przyjętych uproszczeń. Po pierwsze, metodyka wyznaczania parametrów technologicznych bazuje w tym

przypadku na wynikach badań empirycznych, zarówno w aspekcie lepkości materiału który podlega uplastycznianiu, jak w zakresie samego przebiegu tej operacji technologicznej, co nie jest do końca efektywne w aspekcie uniwersalności tej metodologii postępowania. Należy jednak zauważyć, że aktualny stan wiedzy o tym materiale nie pozwala z pełną jednoznacznością określić wartości temperatury zgrzewania T_z , z wykorzystaniem której w sposób precyzyjny można byłoby określić wartość początkową skutkująca plastycznym płynięciem tego tworzywa w tych warunkach.



Rys. 117. Wyniki doboru efektywnej prędkości uplastyczniania v_{pl} dla sześciu średnic pasa d przy założeniu stałej temperatury gorącej płyty $T_p = 280^\circ C$



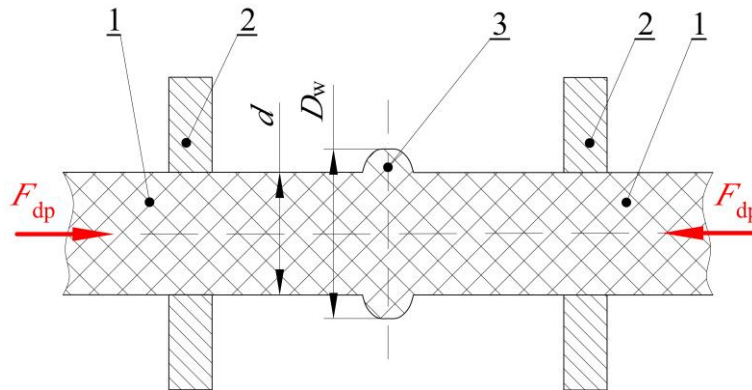
Rys. 118. Wyniki doboru efektywnej temperatury gorącej płyty T_p dla sześciu średnic pasa d przy założeniu stałej prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 6 \frac{mm}{min}$

Należy pamiętać również o tym, że opracowana metodologia postępowania jest możliwa do zastosowania tylko w zakresie newtonowskiego plastycznego płynięcia. Aby spełnić ten warunek, prędkość odkształcenia musi przyjmować dostatecznie małą wartość $\dot{\epsilon} < 10 \frac{1}{s}$, co zależy od aktualnych parametrów technologicznych. Dodatkowo, jej wartość musi być stała, co implikuje zastosowanie tej metody jedynie do uplastyczniania efektywnego – dlatego model ten został opracowany na podstawie wyników optymalizacji, skutkujących wywołaniem takiego przebiegu tej operacji.

5.6. Badania nad ścinaniem wypływki

Wypływkę stanowi nadmiar materiału, w formie pierścienia o średnicy D_w obejmującego spoinę, powstały w wyniku (Rys. 119):

- dociskania materiału do gorącej płyty podczas uplastyczniania (Rys. 82a),
- dociskania uplastycznionych końców pasa do siebie podczas fazy doprasowania (Rys. 82a).



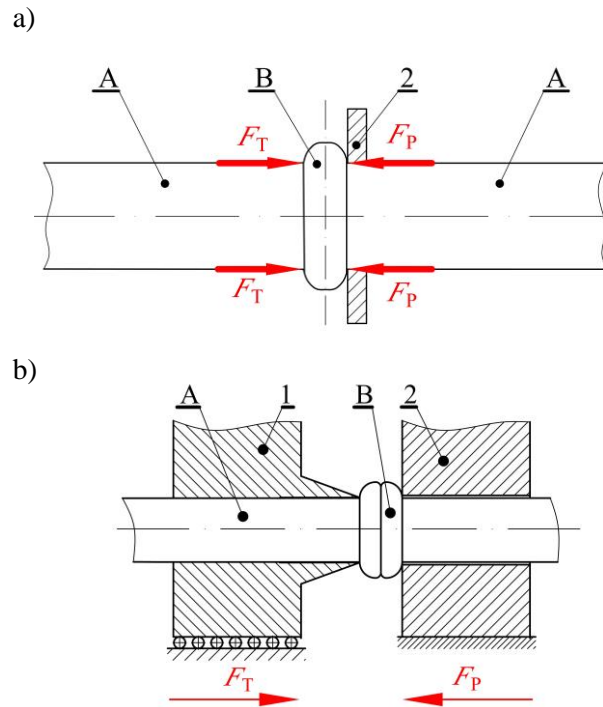
Rys. 119. Końcowe formowanie wypływki podczas doprasowania złącza: 1 – zakończenia pasa, 2 – uchwyty, 3 – wypływka; F_{dp} – siła docisku pasa w końcowej fazie zgrzewania, d – średnica pasa, D_w – średnica zewnętrzna wypływki

Usuwanie wypływki jest istotnym problemem w aspekcie automatyzacji procesu wytwarzania takich pasów ze względu na to, że pas na skutek zgrzania stanowi zamknięty obwód. W związku z tym, operacja ta często jest przeprowadzana ręcznie, przy użyciu prostych narzędzi np. szczypiec tnących bocznych. W kolejnych planowanych pracach badawczo-rozwojowych nad urządzeniem zgrzewającym, konieczne jest jej wdrożenie do realizacji w sposób zautomatyzowany, jako część całkowitego procesu produkcyjnego pasa. W związku z tym opracowano metodologię przeprowadzania ścinania wypływki trzema sposobami, [62, 207-209], przy czym po wstępnych badaniach postanowiono dalej rozwijać jedynie jedną z nich. Polega ona na cięciu jedną krawędzią tnącą, za pomocą ostrza w formie stożkowej tulei, dociskanej do wypływki podpartej na płycie podporowej (Rys. 120).

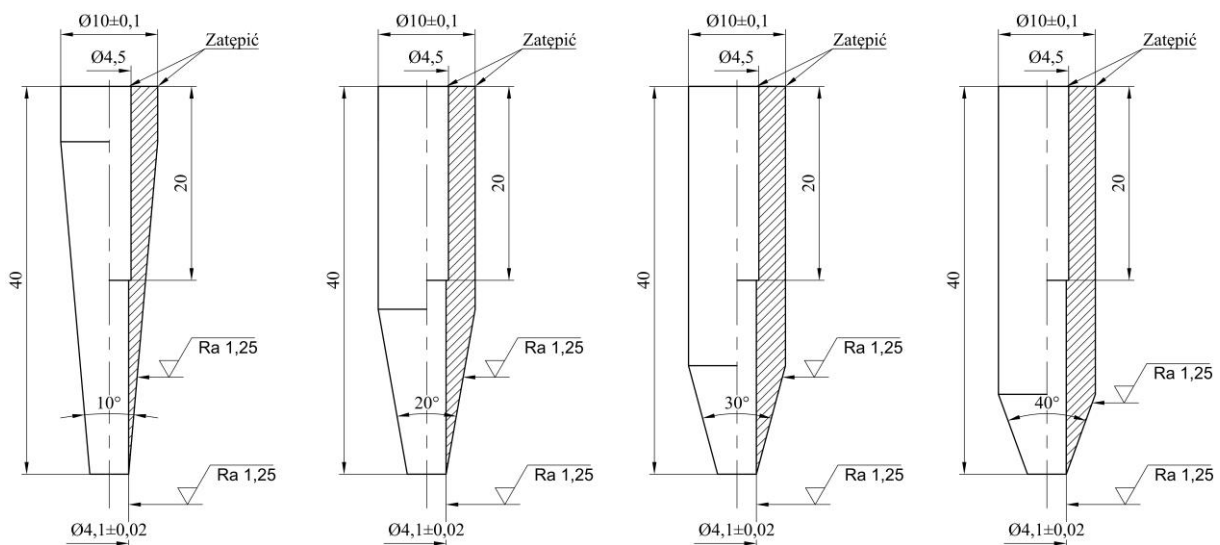
Takie podejście do tej operacji skutkuje jednoczesnym ścinaniem wypływki na całym obwodzie w obszarze leżącym bezpośrednio przy powierzchni tworzącej pasa, za pomocą siły cięcia F_T rozłożonej równomiernie, przy jednoczesnym jej podpieraniu za pomocą sił podporowych F_P . Aby w praktyce zrealizować tę operację, konieczne jest uwzględnienie rozdzielenia ostrza i płyty podporowej na dwie części. Wynika to z konieczności ich rozłączenia w celu wyjęcia pasa stanowiącego zamkniętą pętlę.

W celu określenia wartości siły niezbędnej do wykonania tej operacji przeprowadzono obliczenia analityczne i badania eksperymentalne procesu ścinania wypływki. Prowadzą one do wyznaczenia charakterystyki przebiegu jej usuwania, ze szczególnym zwróceniem uwagi na maksymalną wartość siły technologicznej F_T , potrzebnej do przeprowadzenia tej czynności.

Badania eksperymentalne wykonano dla stożkowych ostrzy tnących o pełnym obwodzie i różnych kątach wierzchołkowych φ : 10°, 20°, 30° i 40°, wykonanych ze stali hartowanej do 58 HRC (Rys. 121). Na czas badań przyjęto uproszczenie, że ostrze tnące stanowi monolityczną część, nie rozdzielaną na dwie połowy, co pozwoliło na uproszczenie konstrukcji oprzyrządowania badawczego.

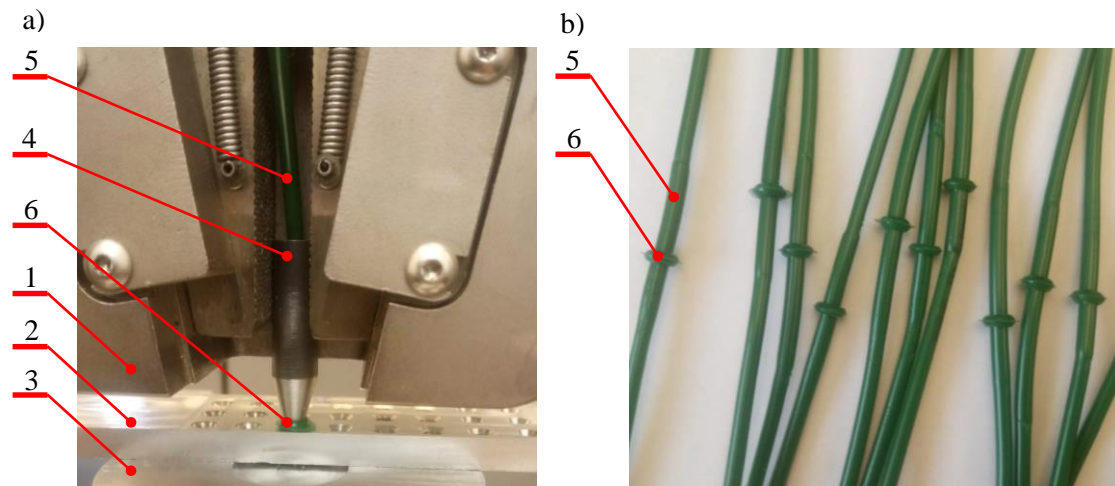


Rys. 120. Jednostronne ścinanie wypływki z jej podparciem: a) siły oddziałujące na wypływkę, b) schemat przykładu realizacji takiej metody, A – pas, B – wypływka, 1 – tulejka ścinająca, 2 – płytki podpierająca; F_T – siły ścinające wypływkę, F_P – siły reakcji płytki podpierającej



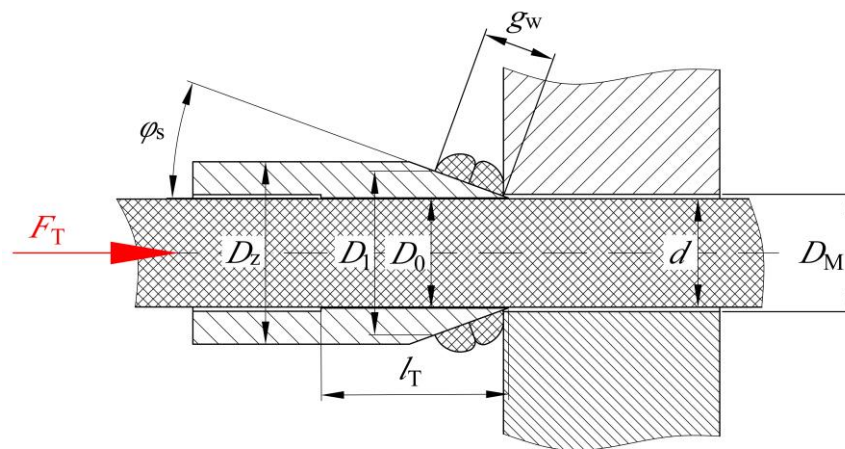
Rys. 121. Rysunki wykonawcze ostrzy wykorzystanych w badaniach ścinania wypływki

Próby ścinania wypływki przeprowadzono dla zgrzanych doczołowo krótkich odcinków pasa o średniej średnicy $d = 4,11$ mm, ścinając po 16 próbek wypływki, dla każdego kąta wierzchołkowego ostrza φ (Rys. 122). Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS Insight 50 kN, z uchwytami samozaciskowymi (1), płaską płytę podporową (2) wykonaną z aluminium PA6 (z otworem umożliwiającym swobodne wprowadzenie pasa) oraz talerz podpierający (3). Badane ostrze (4) uchwycone w szczęcie maszyny MTS (1) dociskano do wypływki (6), przy czym rdzeń pasa (5) z obu stron przeprowadzony był przez otwory w ostrzu (4) oraz płycie podporowej (2). Rejestrowano wartość siły oraz przemieszczenie.



Rys. 122. Badania empiryczne ścinania wyżyłki: a) stanowisko badawcze, b) próbki zgrzanych pasów: 1 – uchwyt maszyny wytrzymałościowej, 2 – płyta podporowa z otworami, 3 – talerz podpierający, 4 – ostrze (tulejka ścinająca), 5 – pas, 6 – wyżyłka

Obliczenia analityczne siły niezbędnej do usuwania wyżyłki przeprowadzono z wykorzystaniem analizy zależności geometrycznych pomiędzy poszczególnymi elementami (Rys. 123) oraz bilansu sił pomiędzy pasem, ostrzem i wyżyłką (Rys. 124).



Rys. 123. Wymiary przyjęte do obliczeń analitycznych: φ_s – kąt pochylenia ścianki ostrza, D_z – średnica zewnętrzna tulejki tnącej, D_0 – średnica otworu tulejki tnącej, d – średnica zewnętrzna pasa, D_M – średnica otworu w podporze, g_w – grubość wyżyłki, F_T – siła niezbędna do ścięcia wyżyłki, l_T – długość powierzchni kontaktu pasa z ostrzem

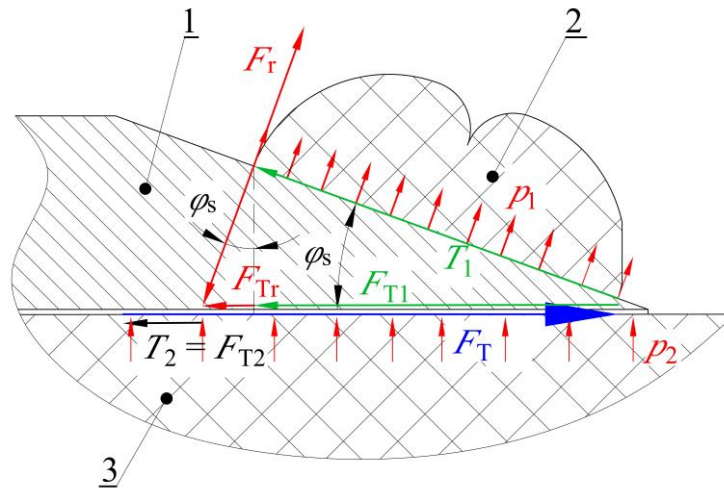
Wartość siły niezbędnej do ścięcia wyżyłki F_T , w ogólnym ujęciu można opisać za pomocą wyrażenia:

$$F_T = F_{Tr} + F_{T1} + F_{T2}, \quad (5.98)$$

gdzie: F_T – siła technologiczna ścinania wyżyłki, F_{Tr} – składowa siły ścinania pochodząca od rozciągania wyżyłki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T1} – składowa siły ścinania pochodząca od tarcia wyżyłki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T2} – składowa pochodząca od tarcia pasa wewnątrz otworu ostrza.

Biorąc pod uwagę zależności geometryczne, korelacja pomiędzy kątem wierzchołkowym stożka tulejki tnącej φ , a kątem pochylenia ścianki ostrza φ_s ma postać:

$$\varphi = 2 \cdot \varphi_s. \quad (5.99)$$



Rys. 124. Zależność pomiędzy wektorami sił podczas ścinania wypływki: 1 – ostrze, 2 – wypływka, 3 – pas; F_T – siła technologiczna ścinania wypływki, F_{Tr} – składowa siły ścinania pochodząca od rozciągania wypływki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T1} – składowa siły pochodząca od tarcia wypływki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T2} – składowa pochodząca od tarcia pasa wewnątrz otworu ostrza, F_r – jednostkowa siła rozciągająca wypływkę, φ_s – kąt pochylenia ścianki ostrza, p_1 – nacisk powierzchniowy wypływki na powierzchnię ostrza, T_1 – sumaryczna siła tarcia na powierzchni ostrza, pomiędzy wypływką, a stożkową powierzchnią ostrza, T_2 – sumaryczna siła tarcia pomiędzy powierzchnią pasa, a otworem w ostrzu

Rozważając wartość siły F_{Tr} , zgodnie bilansem sił (Rys. 124), można zapisać, że:

$$F_{Tr} = F_r \cdot \sin \varphi_s = p_1 \cdot A_s \cdot \sin \varphi_s, \quad (5.100)$$

gdzie: F_r – jednostkowa siła rozciągająca wypływkę, φ_s – kąt pochylenia ścianki ostrza, p_1 – nacisk powierzchniowy wypływki na powierzchnię stożkowej ostrza, A_s – powierzchnia tworzącej stożka, stanowiącej ściankę ostrza, na której znajduje się odkształcona wypływka. Należy przy tym zauważyć, że pole powierzchni zgrzeiny, która jest w kontakcie ze stożkową ścianką ostrza, można obliczyć za pomocą zależności:

$$A_s = \pi \cdot g_w \cdot D_{sr}. \quad (5.101)$$

Naprężenia kontaktowe p_1 , można obliczyć z wykorzystaniem prawa Hooke'a, zakładając do obliczeń średnie odkształcenia na powierzchni stożkowej [1]:

$$p_1 = \varepsilon_{sr} \cdot E_p, \quad (5.102)$$

przy czym: ε_{sr} – średnie odkształcenie wypływki na powierzchni stożkowej, oznaczane w kierunku promieniowym, E_p – moduł sprężystości wzdłużnej materiału pasa. Odkształcenia średnie można natomiast wyznaczyć korzystając z zależności:

$$\varepsilon_{sr} = \frac{D_{sr} - D_0}{D_0}, \quad (5.103)$$

przy czym średnią średnicę wypływki na ostrzu wyznacza się z zależności:

$$D_{sr} = \frac{D_1 + D_0}{2}. \quad (5.104)$$

Średnicę zewnętrzną wypływki na ostrzu natomiast, można wyznaczyć z zależności:

$$D_1 = D_0 + 2 \cdot g_w \cdot \sin \varphi_s. \quad (5.105)$$

W związku z tym, biorąc pod uwagę zależności (5.100-5.105), składową siły cięcia pochodzącą od rozciągania wypływki na stożkowej powierzchni ostrza F_{Tr} , można wyznaczyć z zależności:

$$F_{Tr} = \frac{\pi \cdot g_w^2 \cdot \sin^2 \varphi_s \cdot E_p}{D_0} \cdot (D_0 + g_w \cdot \sin \varphi_s). \quad (5.106)$$

Składowa F_{T1} technologicznej siły cięcia F_T , pochodząca od tarcia wypływki na powierzchni stożkowej ostrza, może być wyznaczona z ogólnej zależności:

$$F_{T1} = T_1 \cdot \cos \varphi_s, \quad (5.107)$$

gdzie T_1 – oznacza sumaryczną siłę tarcia na powierzchni ostrza, pomiędzy wypływką, a stożkową powierzchnią ostrza. Jej wartość może być wyznaczona z zależności:

$$T_1 = \frac{F_r}{\tan \varphi_s}. \quad (5.108)$$

Siła rozciągająca wypływkę F_r , biorąc pod uwagę zależności (5.100-5.107) opisana jest równaniem:

$$F_r = \frac{F_{Tr}}{\sin \varphi_s} = \frac{g_w^2 \cdot \sin \varphi_s \cdot E_p \cdot \pi}{D_0} \cdot (D_0 + g_w \cdot \sin \varphi_s). \quad (5.109)$$

Biorąc więc pod uwagę zależności (5.107-5.109), ostatecznie siła F_{T1} jest wyznaczona z zależności:

$$F_{T1} = \frac{g_w^2 \cdot \cos^2 \varphi_s \cdot E_p \cdot \pi}{D_0} \cdot (D_0 + g_w \cdot \sin \varphi_s). \quad (5.110)$$

Składowa F_{T2} technologicznej siły cięcia F_T , pochodząca od tarcia pasa na walcowej powierzchni otworu ostrza może być wyznaczona z zależności:

$$F_{T2} = p_2 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot l_T \cdot \mu, \quad (5.111)$$

przy czym: μ – współczynnik tarcia pomiędzy pasem, a tulejką tnącą, p_2 – nacisk powierzchniowy pasa w otworze ostrza, który można wyznaczyć z zależności [1]:

$$p_2 = c \cdot w, \quad (5.112)$$

gdzie w – skuteczny wcisk względny złożenia pasa i tulejki, który można obliczyć z zależności:

$$w = \frac{d - D_0}{D_0}, \quad (5.113)$$

a także współczynnik c odkształceń współpracującej pary pas-tuleja, który oblicza się z zależności:

$$c = \frac{1}{\frac{\delta_t + \nu_t}{E_t} + \frac{\delta_p + \nu_p}{E_p}} \quad (5.114)$$

gdzie δ_t – stanowi współczynnik charakterystyczny złącza dla tulei, a δ_p – stanowi współczynnik charakterystyczny złącza dla pasa. Współczynniki te natomiast, obliczono z zależności:

$$\delta_t = \frac{1 + \frac{D_0^2}{D_z^2}}{1 - \frac{D_0^2}{D_z^2}}, \quad (5.115)$$

$$\delta_p = \frac{1 + \frac{D_w^2}{D_c^2}}{1 - \frac{D_w^2}{D_c^2}}. \quad (5.116)$$

Obliczenia, wykorzystując przedstawioną metodykę, wykonano dla wszystkich kątów natarcia ostrza. Ważniejsze wartości zmiennych, które wykorzystano w obliczeniach przedstawiono w tabeli 41.

Badania empiryczne z wykorzystaniem tej metody usuwania wypływki przyniosły spodziewane rezultaty. Wypływka za każdym razem usuwana była w całości. Wyniki badań empirycznych oraz obliczeń

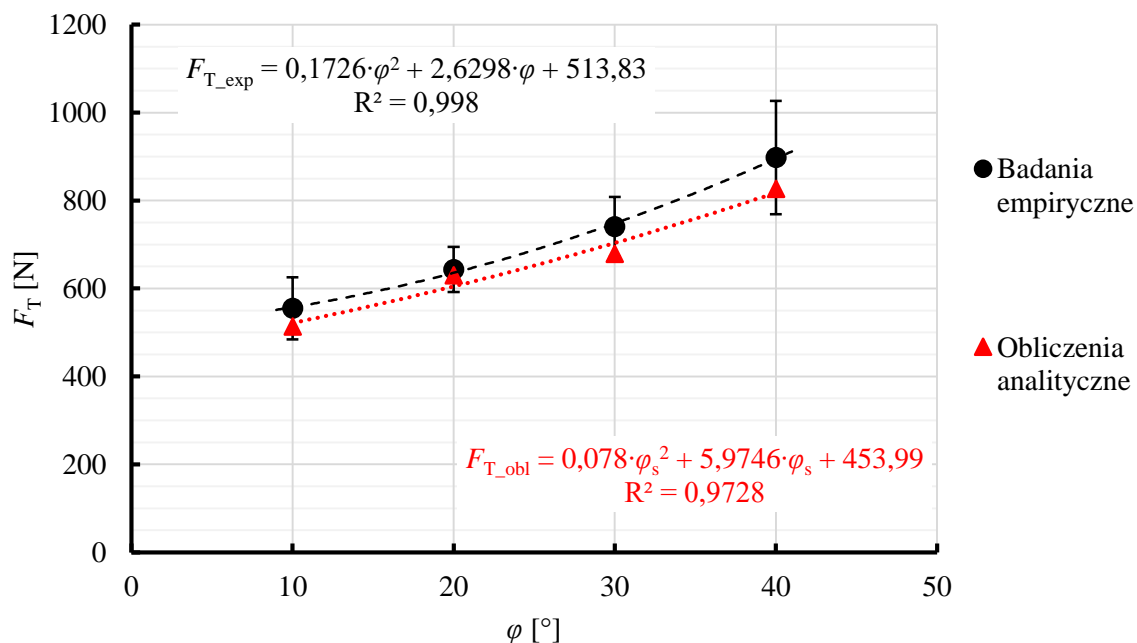
analitycznych dla parametrów przedstawionych w tabeli 41, zestawiono w tabeli 42 oraz na rysunku 125. Dla rozpatrywanej metody ścinania wyływki uzyskano dość dobre odwzorowanie wyników badań, za pomocą opracowanego modelu analitycznego. Różnica rezultatach, sięgająca maksymalnie około 10%, spowodowana jest prawdopodobnym pojawianiem się oddziaływań zginających podczas procesu ścinania oraz spęczaniem pasa w tulei tnącej.

Tab. 41. Ważniejsze parametry przyjęte do obliczeń siły technologicznej potrzebnej do ścinania wyływki po zgrzewaniu doczołowym pasów ciągnowych

Wielkość	Oznaczenie	Wartość			
Kąt wierzchołkowy tulei tnącej	φ [°]	10	20	30	40
Średnica otworu ostrza	D_0 [mm]	4,1	4,1	4,08	4,09
Średnia średnica pasa	d [mm]	4,11			
Długość walcowej części ostrza	l_T [mm]	20			
Współczynnik Poissona pasa	$\nu_p = \nu_{avg}$ [-]	0,462			
Moduł sprężystości pasa	$E_p = E_{c_emp}$ [MPa]	50			
Współczynnik tarcia	μ	0,6			
Współczynnik Poissona tulei	ν_t [-]	0,33			
Moduł Younga tulei	E_t [MPa]	210000			
Grubość wyływki	g_w [mm]	1,60	1,73	1,81	1,96

Tab. 42. Wyniki obliczeń analitycznych i badań empirycznych jednostronnego ścinania wyływki

Wielkość	Oznaczenie	Wartość			
Kąt wierzchołkowy tulei tnącej	φ [°]	10	20	30	40
Siła ścinania wyływki obliczeniowa	F_{T_obl} [N]	513,26	629,52	678,60	826,07
Siła ścinania wyływki z badań	F_{T_exp} [N]	554,85	643,10	740,45	897,74
Odchylenie standardowe populacji	σ [N]	70,81	51,43	67,65	128,84
Błąd modelu	δF_T [%]	8,10	2,16	9,11	8,68



Rys. 125. Wyniki badań empirycznych (F_{T_exp}) oraz obliczeń analitycznych (F_{T_emp}) siły potrzebnej do ścięcia wyływki F_T w zależności od kąta wierzchołkowego ostrza φ

Analizując wyniki, otrzymane zarówno na drodze obliczeń, jak i badań empirycznych, zauważono znaczny wzrost wartości siły ścinania wypłytki F_T , wraz ze wzrostem kąta wierzchołkowego ostrza φ . Jak wynika z analizy rozkładu sił podczas ścinania, jest to spowodowane znacznym wzrostem wartości sił rozciągania wypłytki na powierzchni stożkowego ostrza, wraz ze wzrostem kąta φ , co bezpośrednio przekłada się również na znaczny wzrost wartości sił tarcia na stożkowej powierzchni ostrza.

5.7. Podsumowanie rozdziału

Spotykane w literaturze naukowej podejście do procesu zgrzewania doczołowego różnych materiałów termoplastycznych, w przeważającej części dotyczy produktów o niskiej podatności na wyboczenie (ze względu na złożony przekrój poprzeczny) oraz dużej sztywności w szerokim zakresie temperatury. Skutkuje to tym, że proces zgrzewania sterowany jest w sposób dynamiczny, poprzez zmianę wartości siły lub ciśnienia docisku w poszczególnych fazach.

Chęć zautomatyzowania tej operacji w odniesieniu do zgrzewania elastomerowych pasów ciągnowych, spowodowała konieczność poszukiwania takiego rozwiązania technologicznego tej operacji, aby uwzględnić osobliwe właściwości zgrzewanych pasów ciągnowych oraz maksymalnie uprościć konstrukcję i układ sterowania projektowanego urządzenia.

Opracowana metodologia przeprowadzania zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących charakteryzuje się tym, że podstawowym sterowanym parametrem technologicznym, tej operacji jest przemieszczenie i prędkość przemieszczenia, co wydaje się znacznie łatwiejsze do uzyskania w zautomatyzowanym urządzeniu zgrzewającym, projektowanym na potrzeby przemysłu. Przy założeniu priorytetowej roli uplastyczniania materiału, jako operacji, która warunkuje zachodzenie reakcji chemicznych i interakcji fizycznych między makromolekułami polimeru w dalszych etapach tego procesu technologicznego, przeprowadzono szereg prac badawczych, skupionych na maksymalizacji efektywności tej fazy operacji zgrzewania.

Wykonane badania uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie, w warunkach kontrolowanej prędkości uplastyczniania, z rejestracją siły uplastyczniającej oraz wartości temperatury, skutkowały otrzymaniem grupy zależności siły od przemieszczenia i pozwoliły na wyciągnięcie wniosku, że możliwy jest taki dobór parametrów technologicznych uplastyczniania, ażeby operacja ta cechowała się możliwie najbardziej efektywnym przebiegiem. Należy przez to rozumieć nieprzegrzewanie materiału pasa powodującego jego wypływanie ze strefy roboczej, a także uzyskanie dostatecznego stopnia uplastycznienia tworzywa, tak aby nie wykonywać ściskania ciała stałego podczas zgrzewania. Zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej, przeprowadzanej z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA, pozwoliło na taki dobór parametrów technologicznych, aby uzyskanie takiego efektu było możliwe.

Model matematyczny przebiegu siły uplastyczniania pasa w zależności od przemieszczenia, opracowany na bazie wyników eksperymentalnych, z racji pewnej niedokładności metody (a konkretnie przybliżania wyników za pomocą metody regresji) jest obarczony pewnym błędem. Zastosowanie funkcji korekcyjnej, opracowanej na bazie procentowej odchyłki modelu od pierwotnych wyników powoduje, że różnica

pomiędzy modelem, a wynikami eksperymentalnymi jest dostatecznie mała, jak na potrzeby projektowania układu napędowego urządzenia.

Badania uplastyczniania materiału pasa na gorącej płycie wykonano dla pasów o dużych wartościach średnicy, z górnej części zakresu średnic oferowanych przez producenta. Działanie to było podyktowane głównie technicznymi możliwościami związanymi z umieszczeniem czujników temperatury w strukturze uplastycznianego materiału, a także chęcią zapewnienia możliwie małego o błędzie pomiaru wartości siły uplastyczniającej. W celu umożliwienia zrzutowania praw zachodzących podczas uplastyczniania takich pasów na średnice o mniejszej wartości, będące głównym obszarem zainteresowań w aspekcie projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, przeprowadzono prace badawcze nad estymacją wartości siły/naprężenia uplastyczniającego w zależności od średnicy cięgna. W tym celu wykorzystano modelowanie zachowania się pasa, biorąc pod uwagę jego właściwości fizyczne, z uwzględnieniem analizy wymiany ciepła podczas tej operacji. Z racji braku możliwości opisanego uplastyczniania materiału w sposób jednoznaczny, ze względu na brak precyzyjnej informacji o rzeczywistej wartości temperatury przy której ta operacja zachodzi, posłużono się definicją *uplastyczniania efektywnego*, określonego na podstawie badań empirycznych. Wraz z uwzględnieniem wyników badań materiałowych, pozwoliło to na opracowanie metodologii doboru parametrów tej operacji dla różnych średnic pasa, w taki sposób aby uzyskać efektywny przebieg uplastyczniania.

Prace badawcze poczynione w aspekcie usuwania wypłytki po procesie zgrzewania doczołowego, pomimo że nie są niezbędne do wypełnienia podstawowego wątku badawczego, związanego z uplastycznieniem materiału pasa, pozwalają na pozyskanie informacji potrzebnych w dalszych pracach nad udoskonaleniem projektowanego urządzenia.

6. Projekt konstrukcji zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów ciągnowych

6.1. Założenia projektowe

Podstawowe założenia projektowe, dotyczące konstrukcji urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania pasów, ustalono z producentem gotowych pasów ciągnowych, będącym potencjalnym odbiorcą tej konstrukcji. Na tej podstawie określono formę oraz parametry projektowanego urządzenia w taki sposób, aby spełniało ono założone funkcje. Podstawowe z nich, to:

- łączenie monolitycznych pasów o przekroju kołowym lub pierścieniowym, wykonanych z elastomeru termoplastycznego na bazie poliuretanu,
- zakres wartości średnicy d pasów od 4 mm do 10 mm,
- preferowana metoda łączenia to zgrzewanie doczołowe na rozgrzanej płycie,
- zgrzewanie do postaci zamkniętego obwodu o długości końcowej L_o od 150 mm do 1000 mm,
- możliwe pozostawienie wypływki i usunięcie jej podczas kontroli jakości złącza, w celu uproszczenia konstrukcji urządzenia,
- cykl pracy automatyczny, maksymalne obciążenie pracownika,
- zakres wykonywanych czynności:
 - odwijanie pasa z rolki,
 - przycinanie go na odpowiednią długość,
 - zgrzewanie na rozgrzanej płycie,
 - zapewnienie możliwości samoczynnego usunięcia go z obszaru roboczego, tak aby po wykonaniu określonej liczby sztuk zgrzane pasy z wypływką mogły być odebrane przez pracownika wykonującego usuwanie wypływki i finalną kontrolę jakości,
- w otoczeniu pracy urządzenia zapewniony będzie dostęp do sprężonego powietrza i źródła trójfazowego zasilania elektrycznego.

Uwzględniając powyższe założenia, przeprowadzono prace projektowe skutkujące zbudowaniem prototypu zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego pasy napędowe i transportujące o przekroju kołowym, wykonane z elastomerów termoplastycznych. Ideą opracowania rozwiązania konstrukcyjnego tego urządzenia jest w istocie zastąpienie zgrzewania ręcznego, operacją automatyczną w zakresie: przygotowania pasa, manipulacji jego zakończeniami i wykonania połączenia. Urządzenie dodatkowo musi zapewniać dużą powtarzalność wymiarową wykonanych pasów, w aspekcie długości L_o po zgrzaniu.

6.2. Przegląd aktualnego stanu techniki

Podczas formułowania koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego, a przed rozpoczęciem prac projektowych, przeprowadzono przegląd aktualnego stanu techniki w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych do ręcznego i zautomatyzowanego zgrzewania tworzyw sztucznych metodą gorącej płyty. Dodatkowo zwrócono uwagę na znane w technice metody przeprowadzania tej operacji oraz sposób sterowania procesem. Celem tego działania było rozpoznanie ewentualnych trudności podczas przeprowadzania takiej operacji

technologicznej, szczególnie biorąc pod uwagę jej automatyzację. Przeprowadzone badanie stanu techniki, pozwoliło również na zorientowanie się w poziomie innowacyjności planowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Podczas przeglądu skupiono się na zgrzewaniu z wykorzystaniem gorącej płyty, powszechnie znanej technologii, stosowanej do produkcji wielu wyrobów z tworzyw sztucznych [32, 34, 35, 37]. Poszukiwano również rozwiązań ściśle związanych z wytwarzaniem pasów napędowych i transportujących.

W technice znanych jest wiele metod przeprowadzania procesu zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych z wykorzystaniem gorącej płyty. Opracowano również wiele rozwiązań konstrukcyjnych ręcznych przyrządów i zautomatyzowanych maszyn realizujących ten proces. Niezwykle trudnym jest jednak uzyskanie precyzyjnych informacji budowy i zasady działania poszczególnych rozwiązań, głównie ze względu na ochronę informacji technicznych podmiotów wdrażających te technologie. Dotyczy to w szczególności zgrzewania pasów napędowych i transportujących, gdzie oprócz kwestii konstrukcyjnych dotyczących poszczególnych urządzeń, ochronie podlegają informacje na temat przebiegu i parametrów operacji technologicznych stosowanych w procesie produkcyjnym.

W zakresie komercyjnie stosowanych rozwiązań do zgrzewania doczołowego, na szczególną uwagę zasługuje oprzyrządowanie z serii VaR firmy Volta [210] lub bardzo podobny do niego zestaw firmy BEHAbelt (Rys. 81) [88]. Rozwiązania te stanowią zestaw narzędzi ręcznych, przewidzianych do zgrzewania pasów napędowych lub transportujących. W ich skład wchodzi m.in.: uchwyty, urządzenie grzewcze oraz narzędzia pomocnicze umożliwiające przygotowanie pasa ciągnowego do zgrzewania. Zestaw ten przeznaczony do łączenia pasów klinowych i okrągłych, jest powszechnie stosowany do przeprowadzania operacji zgrzewania w sposób ręczny, zarówno podczas produkcji pasów, jak i w trakcie prac naprawczych. Wadą tego rozwiązania w aspekcie procesu produkcji pasów jest brak możliwości automatyzacji zgrzewania z wykorzystaniem tego rozwiązania. Niekorzystnym jest również brak precyzyjnej kontroli operacji uplastyczniania pasa na gorącej płycie oraz doprasowywania końcówek pasa, ponieważ sterowane są one wartością siły docisku zadawaną ręcznie przez operatora. Biorąc pod uwagę względnie niewielkie właściwości wytrzymałościowe uplastycznionego pasa, może prowadzić to do trudności w powtarzalnym utrzymaniu stałej długości ciągu po zgrzewaniu.

Zautomatyzowane urządzenie zgrzewające wdrożone przez firmę Moltech, do produkcji pasów klinowych z serii Starkline [174, 175], ma możliwość wykonywania zgrzewanego połączenia pasów klinowych. Pozwala to na uzyskanie finalnego produktu w postaci pasa o zamkniętym obwodzie. Rozwiązanie to charakteryzuje się tym, że wyposażone jest w ruchomy chwytak zamontowany na obrotowym ramieniu, którego kinematyka pozwala na osiągnięcie dwóch położeń: z prawej lub lewej od drugiego chwytaka zamontowanego nieruchomo. Należy zauważyć, że zmiana położenia zachodzi przez obrót całego zespołu chwytaka ruchomego wraz z ramieniem, dookoła centralnej osi obrotu. Ten ruchomy zespół jest odpowiedzialny za chwycenie jednej z końcówek pasa, wykonanie obrotu dookoła osi centralnej i dosunięcie jej do końcówki drugiej – uchwyconej w chwytaku nieprzesuwnym. Szczęki tych chwytaków stanowią jednocześnie zamykaną matrycę z zabudowaną spiralą grzewczą, w której wykonywane jest złącze doczołowe. Jest to bardzo interesujące rozwiązanie konstrukcyjne, które pracuje w cyklu automatycznym. Niestety charakteryzuje się tym, że zgrzewanie wykonywane jest w zamkniętej matrycy, której geometria musi być

dostosowana do kształtu i rozmiaru zgrzewanego pasa, co stanowi istotne ograniczenie w aspekcie funkcjonalności i łatwości obsługi urządzenia.

Rozwiązanie z serii GF firmy Fischer [211], stanowi półautomatyczne urządzenie do zgrzewania doczołowego rur wykonanych z materiałów termoplastycznych. Jego działanie polega na dociskaniu zgrzewanego elementu do gorącej płyty, zamocowanej przesuwnie. W wyniku oddziaływania siły docisku jest ona przesuwana i dociskana do powierzchni drugiego zgrzewanego elementu. Po uzyskaniu dostatecznego uplastycznienia, płyta grzewcza jest ręcznie wyjmowana i zgrzewane elementy dociskane są do siebie. Podobnie jak w przypadku rozwiązań firmy Volta [210] i BEHAbelt [88], proces ten jest sterowany za pomocą siły docisku. Dodatkowo ze względu na specyficzne rozwiązanie konstrukcyjne uchwytów zgrzewanych elementów, urządzenie to może być wykorzystane tylko do zgrzewania przedmiotów niewrażliwych na wyboczenie.

Wiele informacji na temat różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów i urządzeń do zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych oraz metod jego przeprowadzania można odnaleźć w bazach patentowych. Opisy patentowe: WO2011157563 [212], WO2010060962 [213], WO9615898 [214], WO03070452 [215], przedstawiają sposób sterowania procesem zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych z wykorzystaniem gorącej płyty, głównie w aspekcie zgrzewania rur. W tych przypadkach zaproponowane metody, opierają się na sterowaniu procesem zgrzewania za pomocą siły docisku elementów zgrzewanych w różnych fazach procesu, przy czym poszczególne wartości siły określono procentowo w różnych konfiguracjach. Podobnie, jak w przypadku poprzednio omawianych rozwiązań, w przemysłowej aplikacji takiej metody sterowania, rozwiązanie to jest problematyczne i względnie drogie. Wynika to głównie z konieczności stosowania dość kosztownego oprzyrządowania do pomiaru wartości siły, które dodatkowo może być problematyczne w eksploatacji w warunkach przemysłowych. Taka metoda sterowania procesem zgrzewania dodatkowo nie zapewni zadowalającej dokładności wymiaru długości obwodu gotowego pasa, a także jego powtarzalności. Z tych względów, rozwiązania te nie są korzystne do zastosowania podczas zgrzewania doczołowego pasów metodą gorącej płyty, przeprowadzanego w sposób automatyczny.

W podobny sposób przedstawiane są wynalazki znane z opisów patentowych: EP114714 [216] i PL171331 [217]. W tym przypadku jednak, twórcy nie wskazują na sposób sterowania procesem zgrzewania, a na ogólny sposób postępowania podczas zgrzewania i konstrukcję oprzyrządowania do jego wykonania. Wynalazki te charakteryzują się tym, że w obu przypadkach zgrzewanie jest przeprowadzane w sposób półautomatyczny, przy czym zaprezentowana metoda i oprzyrządowanie dotyczą zgrzewania elementów o względnie dużej sztywności. Przedstawione rozwiązania nie są korzystne w zastosowaniu do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, ze względu na małą sztywność pasów i możliwe zjawisko wyboczenia. Dodatkowo rozwiązanie to może być kłopotliwe do zautomatyzowania.

Rozwiązanie znane z opisu patentowego EP1110702 [218] stanowi głowicę zgrzewającą, przeznaczoną do wykonywania połączeń metodą zgrzewania doczołowego, z wykorzystaniem gorącej płyty. Głowica ta charakteryzuje się tym, że ma dwa elementy grzejne, przeznaczone do jednoczesnego nagrzewania obu powierzchni. Elementy te, wraz z uchwytami zgrzewanych przedmiotów, są zamontowane na wspólnych prowadnicach, co pozwala zachować właściwe wzajemne pozycjonowanie. Rozwiązanie to, w aspekcie

automatyzacji pracy urządzenia zgrzewającego, jest skomplikowane konstrukcyjnie, co może pogorszyć jego niezawodność. W związku z tym, nie jest ono brane pod uwagę podczas projektowania urządzenia.

Półautomatyczne urządzenie do zgrzewania doczołowego, znane z opisu patentowego EP1068064 [169], stanowi przesuwny uchwyt części łączonych oraz wychylne ramię z urządzeniem grzejnym, którego kąt wychylenia jest regulowany i mierzony. Istotą procesu zgrzewania przeprowadzanego za pomocą tego oprzyrządowania jest dociskanie części zamontowanej w kolumnie przesuwnej do rozgrzanej płyty, a przez to dociskanie tej płyty również do drugiej zgrzewanej części, zamontowanej w sztywnym uchwycie. Układ sterowania mierzy i reguluje kąt płyty grzewczej, przez co steruje również stopniem nadtopienia obu elementów. Stanowi to więc kinematyczne sterowanie procesem, ze względu na to, że regulowanym parametrem jest w tym przypadku położenie i prędkość przemieszczania. Tego typu rozwiązanie nie może jednak zostać zastosowane do zautomatyzowanego zgrzewania pasów, ponieważ nie umożliwia łączenia elementów do postaci zamkniętego obwodu. Dodatkowo, w rozważanym zastosowaniu nie ma potrzeby różnicowania stopnia nadtopienia obu zakończeń pasa, co zostało przedstawione w tym opisie wynalazku.

Rozwiązanie znane z opisu patentowego EP0198709 [219] stanowi automatyczne urządzenie zgrzewające. Charakteryzuje się ono tym, że jest wyposażone w uchwyty zgrzewanych części i urządzenie grzewcze, zamontowane na wspólnej osi. Przemieszczenie tych podzespołów realizowane jest za pomocą jednego siłownika pneumatycznego i złożonego układu dźwigniowego. Rozwiązanie to w swoim założeniu mogłoby być zastosowane do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, jednakże problematycznym byłoby zgrzewanie pasów do postaci zamkniętego obwodu. Urządzenie to jest bardzo skomplikowane konstrukcyjnie, co jest niekorzystne w aspekcie zastosowania do produkcji przemysłowej.

Rozwiązanie znane z opisu patentowego EP0965439 [170] stanowi półautomatyczne urządzenie do zgrzewania rur. W tym przypadku, według opisu patentowego, proces zgrzewania sterowany jest kinematycznie. Ideą rozwiązania konstrukcyjnego wynalazku jest przesuwający się uchwyt, w którym zamontowany jest jeden ze zgrzewanych przedmiotów. Rozwiązanie to nie uwzględnia jednak w żaden sposób obecności, ani kinematyki urządzenia grzewczego. Dodatkowo metodyka ta nie uwzględnia faktu, że element może być zgrzewany do postaci zamkniętego obwodu, a w związku z tym podczas takiego procesu technologicznego, jego zakończenia muszą być odpowiednio zorientowane względem siebie.

Rozwiązanie znane z opisu patentowego EP1063045 [220] stanowi zautomatyzowane urządzenie do zgrzewania profili prętowych. Jego konstrukcja uwzględnia wydawanie wcześniej przyciętego materiału do zgrzewania, jednakże dotyczy to prętów prostych i sztywnych, które nie są wrażliwe na wyboczenie, a dodatkowo nie ma konieczności zmiany orientacji ich końców do zgrzewania. Oprzyrządowanie to nie uwzględnia również automatycznego przycinania elementów do pożądanej długości.

Przegląd wybranych metod i rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów i urządzeń do zgrzewania doczołowego tworzyw sztucznych, a w szczególności pasów napędowych i transportujących z wykorzystaniem metody gorącej płyty, pozwala wyciągnąć następujące wnioski, w aspekcie znanego stanu techniki:

- w większości przypadków rozwiązania nie uwzględniają wszystkich planowanych etapów zgrzewania (w szczególności przygotowania materiału), np. nie uwzględniają przygotowania odcinka materiału o wymaganej długości lub odpowiedniego zorientowania jego końców,

- w wielu przypadkach metody i rozwiązania konstrukcyjne uwzględniają sterowanie procesem za pomocą siły docisku elementów do gorącej płyty (lub wzajemnego docisku do siebie w dalszych fazach procesu), co w aspekcie zgrzewania pasów o względnie niewielkiej wytrzymałości może powodować trudności w uzyskaniu pożądaných wymiarów cięgną po procesie. Wynika to głównie z możliwości występowania względnie wysokich wartości błędów zadawanych parametrów technologicznych. Niewielka wytrzymałość i sztywność pasa wymaga również zwrócenia szczególnej uwagi na zjawisko wyboczenia, które może zachodzić podczas dociskania materiału. W analizowanych opisach rozwiązań operacji zgrzewania zjawiska te są niejako pominięte, ze względu na specyfikę zastosowań do których zostały przewidziane,
- w większości przypadków rozwiązania nie uwzględniają konieczności uzyskania elementu o zamkniętym obwodzie po procesie zgrzewania. Elementy konstrukcyjne znajdujące się w obszarze zgrzewanego elementu, mogą utrudnić wyjęcie zamkniętej pętli pasa po zgrzaniu.

Wykonany przegląd stanu techniki, pozwolił również sformułować pewne dodatkowe wymagania konstrukcyjne do projektowania zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, m.in.:

- zapewnienie współosiowego prowadzenia liniowego układów roboczych urządzenia, odpowiedzialnych za przytrzymywanie zakończeń pasa na czas operacji – co pozwoli na uzyskanie odpowiedniej współosiowości zakończeń pasa w fazie doprasowania,
- wykorzystanie możliwie jak najmniejszej liczby napędów odpowiedzialnych za kontrolę przemieszczenia zakończeń pasa i gorącej płyty w fazie uplastyczniania materiału oraz doprasowania złącza,
- zastosowanie sterowania kinematycznego z kontrolą przemieszczenia i prędkości przemieszczenia dla zespołów odpowiedzialnych za wywoływanie docisku zakończenia pasa podczas uplastyczniania i doprasowywania złącza,
- opracowanie takiej konstrukcji elementów chwytających i ich kinematyki, aby możliwe było nieskrępowane pozyskanie pasa o zamkniętej pętli po wykonanym procesie.

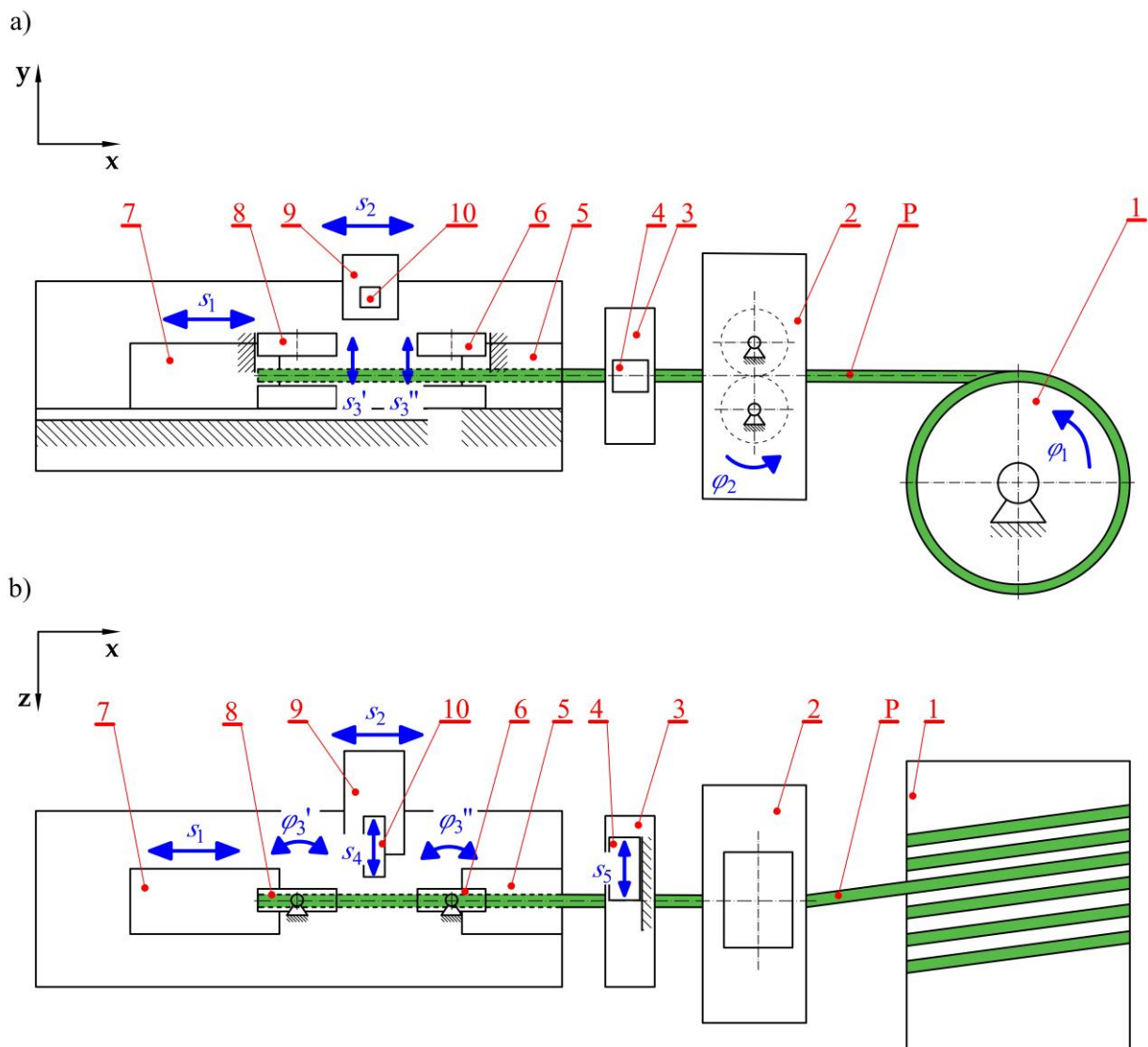
6.3. Koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego

W celu zapewnienia możliwości zrealizowania zaproponowanego cyklu zautomatyzowanego zgrzewania pasów, w pierwszej kolejności opracowano koncepcję funkcjonalną zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego (Rys. 126), realizującą kinematyczny sposób sterowania zgrzewaniem. Opracowane rozwiązanie koncepcyjne przewiduje, że pas (P) pobierany jest przez podajnik rolkowy (2) ze szpuli (1) zamocowanej obrotowo, dzięki czemu możliwe jest jego swobodne odwijanie się. Rolka podajnika (2) obraca się zgodnie z kierunkiem φ_2 i w związku z tym pociąga pas (P), by w dalszej kolejności przemieścić go prostoliniowo do elementów manipulacyjnych maszyny odpowiedzialnych za odpowiednie zorientowanie zakończeń pasa na czas zgrzewania. Pas przesuwany jest poprzez otwór technologiczny w zamocowanym na obudowie podajnika (2) nożowym zespole tnącym (3), w taki sposób, że nie wchodzi w kolizję z żadnym elementem konstrukcyjnym i ma zapewnione swobodne przejście do dalszych modułów maszyny (nożowy zespół tnący (3) jest nieaktywny na czas dozowania pasa (P)). Zespół ten (3) jest wyposażony

w jednostronnie zaostrozony nóż (4), który jest odpowiedzialny za wykonanie cięcia w odpowiednim momencie. Operacja ta zachodzi z wykorzystaniem jednej krawędzi tnącej (klasyczne cięcie nożowe), w wyniku przemieszczenia noża (4) w płaszczyźnie prostopadłej do osi pasa (P).

Takie założenia konstrukcyjne powodują, że wyżej wymienione zespoły funkcjonalne urządzenia (1, 2, 3 i 4) mają możliwość przygotowania odcinka pasa (P) o długości wstępnej L_c (Rys. 16) niezbędnej do uzyskania końcowego produktu o długości L_o . Zachodzi to w wyniku:

- nieskrępowanego podawania pasa (P), ze względu na swobodne odwijanie go z samoczynnie obracającej się szpuli (1). Dodatkowo ze względu na znaczną odległość pomiędzy szpulą możliwe jest uzyskanie relaksacji naprężenia w celu uniknięcia jego samoczynnego skręcania się,
- odmierzenia podanej długości w wyniku pomiaru kąta obrotu rolek w podajniku rolkowym (2),
- ucięcia go w odpowiednim miejscu, prostopadle do osi symetrii.



Rys. 126. Schemat koncepcyjny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych metodą gorącej płyty: a) rzut od boku – widok na płaszczyznę XY prostopadłą do posadzki w miejscu planowanego ustawienia maszyny, b) rzut od góry – widok na płaszczyznę XZ równoległą do posadzki w miejscu planowanego ustawienia maszyny: P – pas, 1 – rolka z pasem, 2 – podajnik rolkowy, 3 – nożowy zespół tnący, 4 – nóż, 5 – chwytak nieruchomy, 6 – szczęki chwytaka nieruchomego, 7 – chwytak ruchomy, 8 – szczęki chwytaka ruchomego, 9 – zespół grzewczy, 10 – gorąca płyta; $s_1 \dots s_5$ – przemieszczenie liniowe, $\varphi_1 \dots \varphi_3$ – przemieszczenie kątowe

Przycięta końcówka pasa (P) podawana jest w dalszej kolejności poprzez chwytak nieprzesuwny (5) aż do chwytaka przesuwnego (7). W pierwszej fazie procesu zgrzewania elementy te (5 i 7) są do siebie dośnute, przy czym mają geometrię zapewniającą nieskrępowany przelot pasa przez ich elementy konstrukcyjne. Na tym kończy się operacja dozowania pasa (P), przy czym należy zauważyć, że jedynym aktywnym członem biorącym w tym udział (wywołującym przemieszczenie pasa (P)) jest podajnik rolkowy (2). W dalszej kolejności szczęka (8) chwytaka przesuwnego (7) zaciska pas (P), poprzez przesunięcie w dół górnej części zgodnie z kierunkiem s_3' . W wyniku tego, końcówka pasa (P) zostaje ściśnięta pomiędzy rozdzielnymi elementami składowymi szczęki (8), w taki sposób, że jej przemieszczenie jest możliwe tylko wraz z chwytakiem przesuwneym (7). Jest to kluczowe dla dalszego przebiegu procesu zgrzewania.

W następnej kolejności rozpoczyna się faza pobierania pasa (P). W tym celu chwytak przesuwny (7) z zaciśniętym pasem (P) przesuwają się w lewo zgodnie z przemieszczeniem s_1 , przy jednoczesnym dozowaniu materiału poprzez podajnik rolkowy (2). Działanie to wspomaga podajnik rolkowy (2) w dozowaniu pasa (P). Niezwykle istotnym jest, że prędkość kątowna rolek podajnika rolkowego (obracających się zgodnie z kierunkiem φ_2) jest zsynchronizowana z prędkością liniową chwytaka przesuwnego (przemieszczającego się zgodnie z kierunkiem s_1), co zapobiega nadmiernemu luzowaniu się cięgna oraz błędowi pomiaru długości (jest ona określana na podstawie położenia kątownego rolki podajnika (2)). Po odmierzaniu pożądaną długości pasa (P) chwytak przesuwny (7) zatrzymuje się. Następnie po tym szczęka (6) chwytaka nieprzesuwnego (5) zaciska pas (P), wykonując ruch w dół zgodnie z kierunkiem s_3'' , co powoduje, że oba końce pasa są unieruchomione. Na tej czynności kończy się faza pobierania materiału. W następnej kolejności nóż (4) zespołu tnącego (3), wykonując ruch zgodny z przemieszczeniem s_5 , odcina pas (P). Dzięki temu sfinalizowany jest pierwszy etap przygotowania cięgna, czyli jego dozowanie i uzyskanie skończonego odcinka o długości L_c (Rys. 16a).

Manipulacja zakończeniami pasa, która jest niezbędna do uzyskania ich odpowiedniej orientacji względem siebie (przez co należy rozumieć ustawienie końcówek naprzeciwko siebie w taki sposób, aby były współosiowe i równoległe – Rys. 16b), zachodzi w kolejnym etapie pracy urządzenia. Operacja ta, w opracowanej koncepcji zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego (Rys. 126), polega na wykonaniu obrotu o 180° szczęk chwytaków (6 i 8) z zaciśniętym pasem (P), zgodnie z przemieszczeniem oznaczonym jako φ_3' oraz φ_3'' . Aby możliwe było wykonanie złącza zgrzewanego, niezależnie od finalnej długości gotowego produktu L_o , końcówki pasa (P) muszą być do siebie zbliżone na niewielką odległość, tak aby mogły zostać uplastycznione na gorącej płycie (10) i następnie dociśnięte do siebie. W związku z tym, w następnej kolejności chwytak przesuwny (7) przemieszcza się zgodnie z przemieszczeniem s_1 w kierunku chwytaka nieprzesuwnego (5), co skutkuje zbliżaniem zakończeń pasa do siebie. W chwili gdy odległość pomiędzy chwytakami staje się dostatecznie mała, chwytak przesuwny (7) zatrzymuje się, co oznacza zakończenie etapu przygotowywania pasa (P) do wykonania połączenia.

Właściwa operacja wykonywania połączenia zgrzewanego rozpoczyna się od nagrzewania końcówek pasa na gorącej płycie (Rys. 82), z jednoczesnym ich dociskaniem do powierzchni tego elementu, co skutkuje ich uplastycznianiem. Aby rozpocząć tę operację, gorąca płyta (10) zabudowana na zespole grzewczym (9) i rozgrzana do temperatury o wartości T_p , musi się znaleźć w obszarze pomiędzy zakończeniami pasa (P).

W tym celu jest ona wysuwana zgodnie z przemieszczeniem s_4 w taki sposób, aby po osiągnięciu swojego skrajnego położenia, znajdowała się pomiędzy zakończeniami pasa (Rys. 126). Bezpośrednio po tym rozpoczyna się procedura uplastyczniania materiału i właściwa operacja zgrzewania.

Podczas uplastyczniania, przy wysuniętej gorącej płycie (10), chwytak przesuwny (7) wraz zaciśniętą końcówką pasa (P) zaczyna przemieszczać się w kierunku chwytaka nieprzesuwne (5), który jest nieruchomy. Ruch ten zachodzi w kierunku zgodnym z przemieszczeniem s_1 . W związku z tym końcówka pasa (P) zamocowana w chwytaku przesuwnym (7) zaczyna zbliżać się do powierzchni gorącej płyty (10). W tym samym czasie gorąca płyta (10) przesuwa się w kierunku końcówki pasa (P), zamocowanej w chwytaku nieprzesuwne (5), zgodnie z przemieszczeniem s_2 . Aby uzyskać efekt jednoczesnego docisku obu końcówek pasa (P) do gorącej płyty (10), układy napędowe zespołu grzewczego (9) oraz chwytaka przesuwnego (7) są ze sobą połączone w taki sposób, że relację pomiędzy przemieszczeniem zespołu grzewczego (9) oraz chwytaka przesuwnego (7) można opisać za pomocą zależności:

$$s_1 = 2 \cdot s_2, \quad (6.1)$$

przy czym warunkiem koniecznym jest to, aby ich ruch zachodził jednocześnie. W związku z tym, zespół grzewczy (9) wykonuje przemieszczenie zgodne z kierunkiem s_2 , który jest taki sam jak s_1 , jednakże jego wartość jest dwukrotnie mniejsza. Biorąc pod uwagę stały przedział czasowy, w którym są one realizowane, prędkości przemieszczenia się zespołu chwytaka przesuwnego (7) oraz zespołu grzewczego (9) są w następującej korelacji:

$$v_1 = 2 \cdot v_2, \quad (6.2)$$

gdzie: v_1 – prędkość przemieszczania się zespołu chwytaka przesuwnego (7), v_2 – prędkość przemieszczania się zespołu grzewczego (9).

Taka konfiguracja układu napędowego urządzenia pozwala na uzyskanie istotnej właściwość funkcjonalnej – jednakowej wartości prędkości względnej pomiędzy zakończeniami pasa (P) zamocowanymi w obu chwytakach (5 i 7), a gorącą płytą (10). Działanie takie zapewnia, że podczas operacji uplastyczniania końcówka pasa (P) zamocowana w chwytaku przesuwnym (7) jest dociskana do gorącej płyty (10) w wyniku ruchu w kierunku s_1 całego zespołu chwytaka przesuwnego (7), w przybliżeniu w takim samym stopniu, jak gorąca płyta (10) do końcówki pasa (P) zamontowanej w chwytaku nieprzesuwne (5) (co zachodzi w wyniku ruchu układu grzewczego (9) w kierunku s_2). Powoduje to, że w przybliżeniu siła docisku obu końcówek pasa do gorącej płyty jest jednakowa. Operacja uplastyczniania pasa jest kontynuowana, aż do uzyskania określonego stopnia uplastycznienia. Parametrem, który umożliwia kontrolę tego stanu, jest wartość przemieszczenia s_1 . Z tego powodu, w opracowanej koncepcji zautomatyzowanego urządzenia, sposób sterowania jest kinematyczny.

Po osiągnięciu przez chwytak przesuwny (7) określonej granicznej wartości przemieszczenia s_1 , operacja uplastycznienia materiału uznawana jest za zakończoną. W następnej kolejności następuje wycofanie gorącej płyty z obszaru roboczego, co realizowane jest poprzez wywołanie jej przemieszczenia zgodnie z kierunkiem s_4 , w kierunku przeciwnym niż w poprzednim etapie (Rys. 126). Dzięki temu możliwe jest zrealizowanie kolejnego etapu zgrzewania – czyli doprasowywania końcówek pasa. Operacja ta polega na ich wzajemnym dociśnięciu do siebie, w celu zapoczątkowania reakcji chemicznych i interakcji fizycznych

między makromolekułami polimeru. Właściwa jej realizacja zachodzi poprzez wywołanie przemieszczenia chwytaka przesuwne (7) z zaciśniętą uplastycznioną końcówką pasa, zgodnie z kierunkiem s_1 w kierunku chwytaka nieprzesuwne (5). Po osiągnięciu określonej w układzie sterowania wartości przemieszczenia s_1 (którą można określić jako wartość spęczenia materiału), chwytak przesuwne (7) zatrzymuje się. Następnie po tym rozpoczyna się chłodzenie złącza.

Przedstawiona koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów umożliwia odpowiednie przygotowanie i wykonanie złącza doczołowego pasów ciągnowych o określonej średnicy i długości obwodu, spełniających warunki początkowe projektu.

6.4. Projekt i budowa zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego

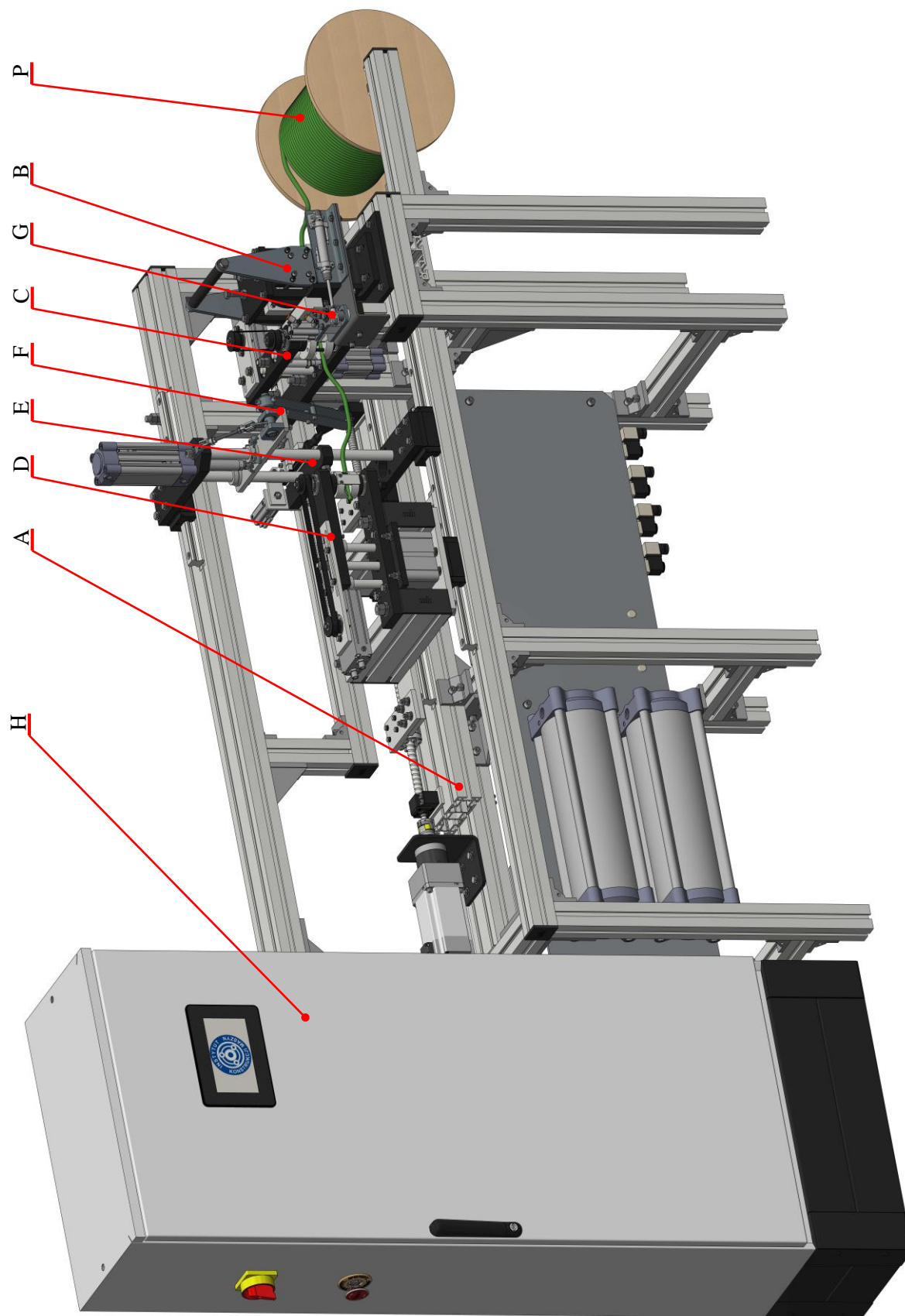
Zaproponowane rozwiązanie koncepcyjne, dotyczące urządzenia i metody zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących, zostało wzięte pod uwagę przy wykonaniu finalnego projektu urządzenia (Rys. 127-129). Po wstępnych testach i niezbędnych poprawkach konstrukcyjnych, prototyp zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego został poddany testom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowej produkcji pasów, zgrzewając pilotażową serię pasów w liczbie kilku tysięcy sztuk. Rozwiązania konstrukcyjne kluczowych mechanizmów urządzenia zostały zgłoszone do urzędu patentowego [221-224].

Zbudowane urządzenie charakteryzuje się tym, że posiada konstrukcję modułową. Każdy z modułów realizuje określoną funkcję, co ostatecznie umożliwia wykonanie doczołowego złącza zgrzewanego. W skład urządzenia wchodzi następujące zespoły funkcjonalne:

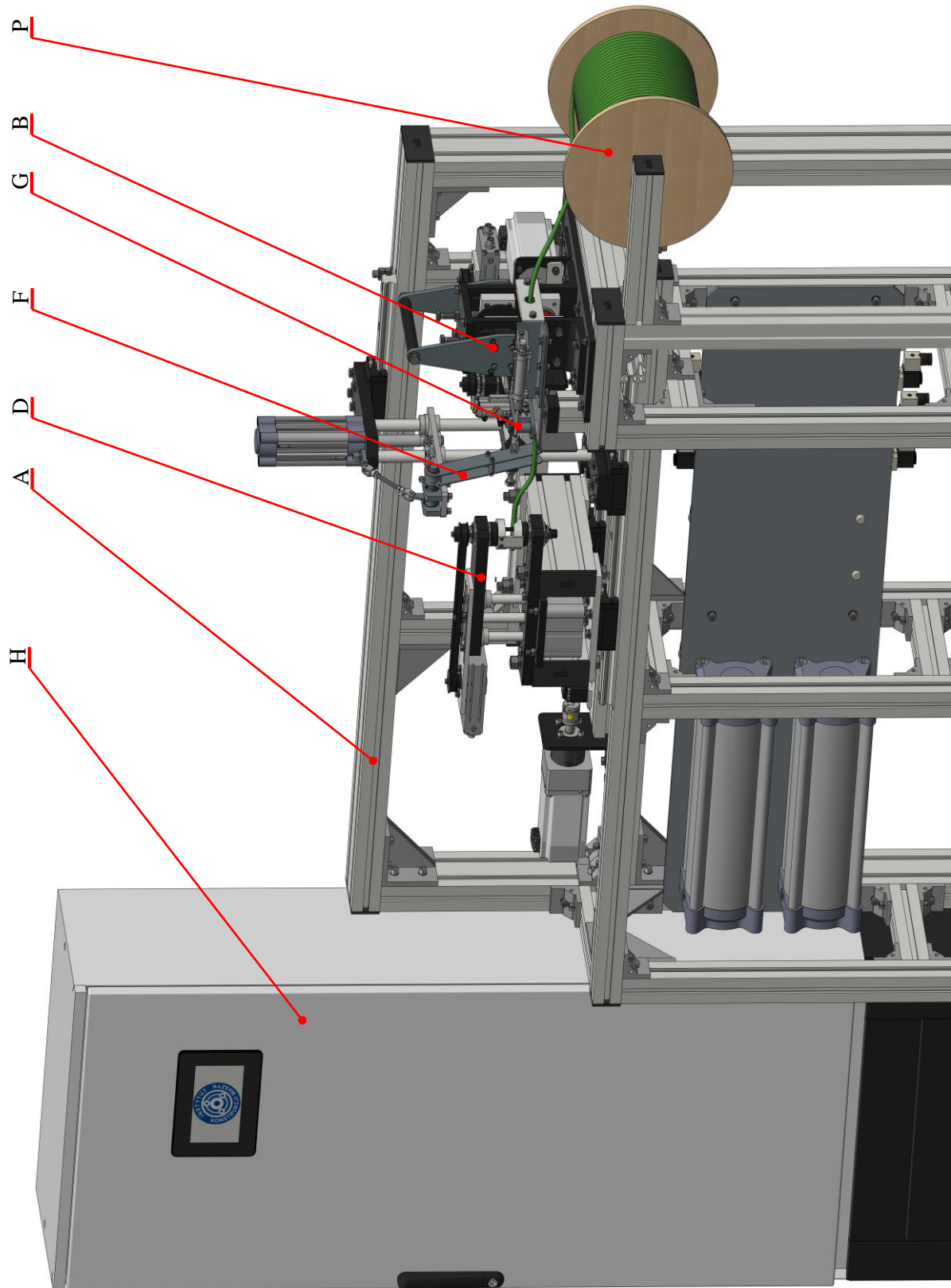
- rama główna z podstawowym elektromechanicznym układem napędowym (A),
- moduł dozujący (B),
- moduł chwytaka nieprzesuwne (C),
- moduł chwytaka przesuwne (D),
- moduł grzewczy (E),
- moduł napinający (F),
- moduł wydający (G),
- układ sterujący (H).

Z punktu widzenia funkcjonalnego, jedynym z ważniejszych podzespołów jest moduł dozujący (B) odpowiedzialny za dozowanie i cięcie pasa, co pozwala na uzyskanie odcinka materiału o długości L_c , zapewniającej uzyskanie gotowego pasa o finalnej długości obwodu L_o (Rys. 16). Podczas przygotowania materiału do wykonania połączenia zespół ten (B) współpracuje z modułem chwytaka przesuwne (D) oraz nieprzesuwne (C), a także modułem napinającym (F) w celu:

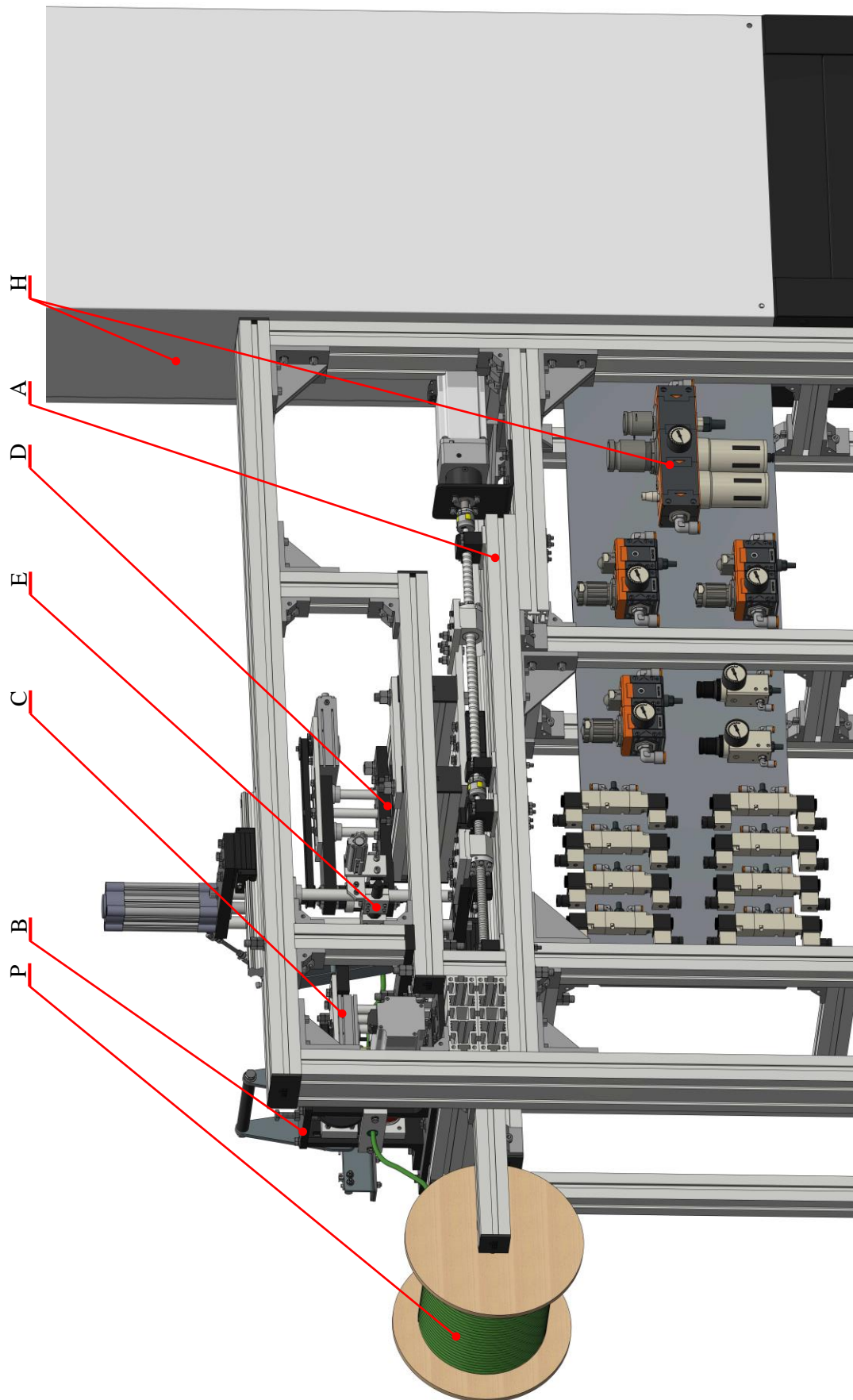
- zapewnienia prawidłowego prowadzenia pasa przez wszystkie części mechaniczne wchodzące w skład poszczególnych podzespołów, tak aby nie następowało zablokowanie pasa w wyniku zahaczenia o dowolną krawędź poszczególnych części,
- ochrony przed zaplątywaniem się pasa, co jest realizowane przez utrzymywanie jego napięcia wstępnego podczas dozowania, w wyniku pociągania go przez moduł chwytaka przesuwne (D), a także jego napinanie przez moduł napinający (F),



Rys. 127. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od przodu, od strony szafy sterującej: A – rama główna, B – moduł dozujący, C – moduł chwytaka nieprzesuwnego, D – moduł chwytaka przesuwnego, E – moduł grzewczy, F – moduł napinający, G – moduł wydający, H – układ sterujący, P – rolka z pasem



Rys. 128. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od przodu, od strony rolki z pasem: A – rama główna, B – moduł dozujący, D – moduł chwytaka przesuwnego, F – moduł napinający, G – moduł wydający, H – układ sterujący, P – rolka z pasem



Rys. 129. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od tyłu, od strony rolki z pasem: A – rama główna, B – moduł dozujący, C – moduł chwytaka nieprzesuwającego, D – moduł chwytaka przesuwającego, E – moduł grzewczy, H – układ sterujący, P – rolka z pasem

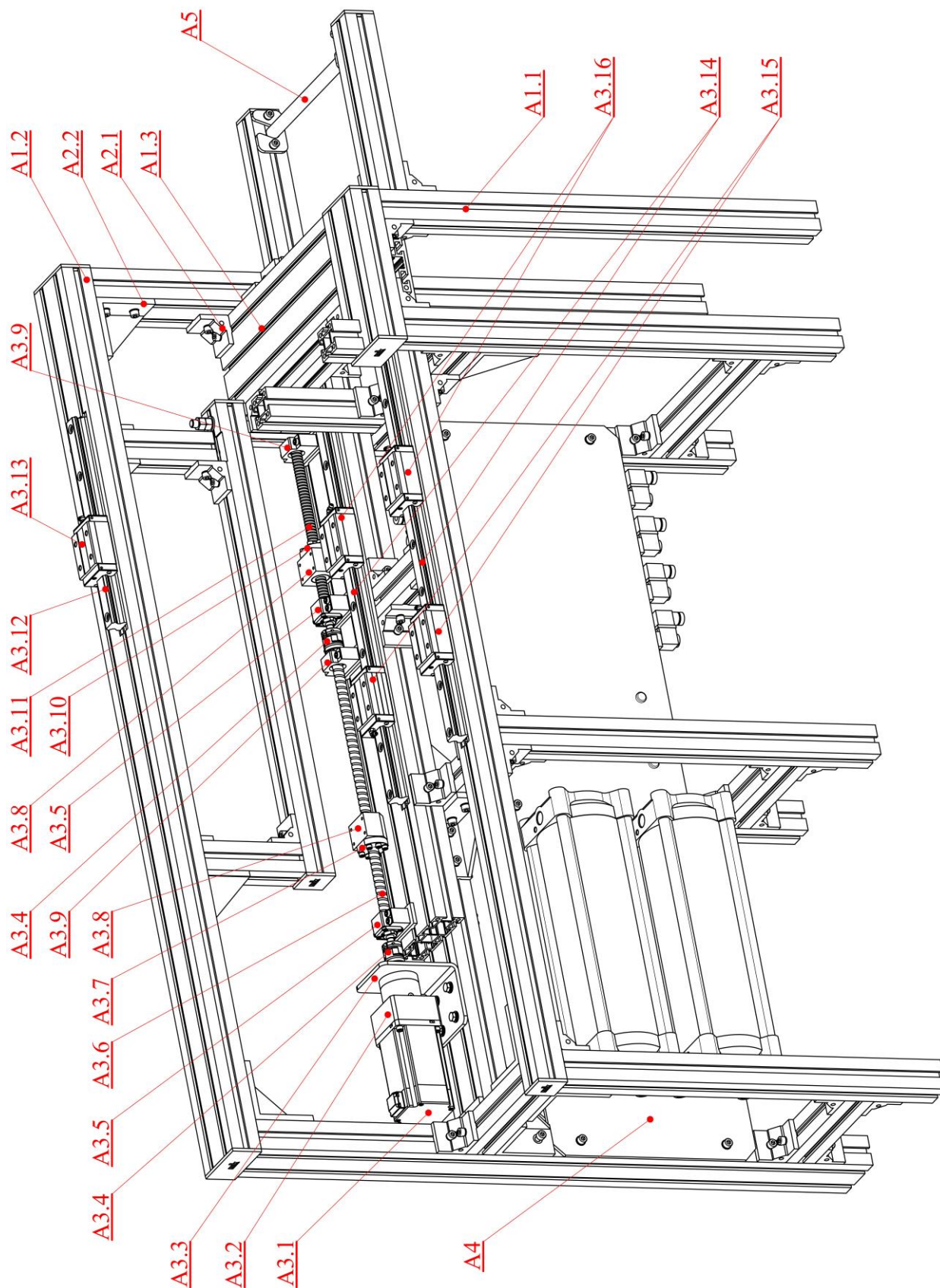
- uzyskania odpowiedniej orientacji końcówek pasa względem siebie, co umożliwi rozpoczęcie operacji zgrzewania. Efekt ten jest osiągany przez odpowiednią konstrukcję i współpracę modułu chwytaka przesuwne (D) i chwytaka nieprzesuwne (C). Osadzenie tych zespołów na wspólnej ramie (A) pozwala na zachowanie niezbędnej współosiowości i równoległości końcówek pasa podczas wykonywania połączenia.

Właściwa operacja zgrzewania możliwa jest dzięki współpracy modułu grzewczego (E) wyposażonego w gorącą płytę z zespołami chwytaków: przesuwne (D) i nieprzesuwne (C), w których zamocowane są zakończenia pasa (P). Moduł grzewczy (E) odpowiedzialny jest za umieszczanie rozgrzanej płyty pomiędzy zakończeniami pasa w fazie uplastyczniania materiału. Uzyskanie właściwej kooperacji zespołu grzewczego (E) i chwytaka przesuwne (D) (spełniającej zależności 6.1 i 6.2), możliwe jest dzięki zastosowaniu wspólnego układu napędowego dla obu tych modułów, zamocowanego do ramy (A), który jest jednocześnie podstawowym układem napędowym urządzenia. W konsekwencji utrzymywany jest efekt jednoczesnego dociskania końcówek pasa do gorącej płyty z obu stron, a także uzyskano względnie uproszczoną strukturę układu napędowego, co prowadzi do uproszczenia konstrukcji całego urządzenia.

Kooperacja pomiędzy modułem chwytaka przesuwne (D) oraz nieprzesuwne (C) umożliwia również wykonanie doprasowania końcówek pasa i poprawne chłodzenie złącza. Współpraca tych elementów z modułem wydającym (G) umożliwia natomiast usunięcie gotowego pasa poza obszar roboczy ruchomych części urządzenia i wydanie go operatorowi.

Rama główna (A) urządzenia (Rys. 130) stanowi konstrukcję strukturalną, która złożona jest z kształtowych profili aluminiowych o różnych rozmiarach (A1.1, A1.2 oraz A1.3). Połączenie pomiędzy nimi jest zrealizowane za pomocą dedykowanych kątowników mocujących (A2.1 oraz A2.2), wyposażonych w wypusty pasowane z rowkami znajdującymi się w profilach. Dzięki temu, analizując możliwość ruchu w kierunku równoległym do powierzchni profilu, połączenie to jest kształtowe. W kierunku normalnym natomiast, każdy kątownik zamocowany jest do odpowiadającego mu profilu za pomocą połączenia śrubowego, które stanowione jest przez śrubę przełożoną przez otwór kątownika oraz nakrętkę umieszczoną w przestrzeni otwartej wewnątrz profilu. Dokręcenie tych połączeń odpowiednim momentem zapewnia właściwą interakcję cierną pomiędzy kątownikami, a odpowiadającymi im profilami. W związku z tym można uznać, że połączenie składowych elementów ramy urządzenia jest kształtowo-cierne.

Taka konstrukcja ramy głównej urządzenia charakteryzuje się tym, że może być podatna na działanie różnego rodzaju drgań, powodujących w najgorszym przypadku luzowanie się połączeń, co w konsekwencji może prowadzić do utraty założonych tolerancji położenia poszczególnych elementów. Dodatkowo, podczas budowy takiego urządzenia, tolerancje położenia poszczególnych zespołów funkcjonalnych są zależne zarówno od dokładności wykonania poszczególnych części, jak i od precyzji montażu, ze względu na brak jednoznacznych baz do osadzenia poszczególnych części. Stanowi to pewnego rodzaju utrudnienie w aspekcie utrzymania pożądanej dokładności pozycjonowania zespołów funkcjonalnych urządzenia, co może wpływać np. na dokładność położenia końcówek pasa podczas doprasowania. Problem ten w przypadku zaprojektowanego urządzenia rozwiązano poprzez wykonanie podfrezowań w kluczowych węzłach, tak, aby były one połączone kształtowo.



Rys. 130. Widok ogólny ramy głównej zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego wraz z podstawowym elektromechanicznym układem napędowym (opis w tekście)

Konstrukcja ta ma jednak bardzo wiele zalet, głównie ze względu na praktycznie nieograniczone możliwości rozbudowy i rekonfiguracji urządzenia. W aspekcie prowadzonych prac badawczych nad

zgrzewaniem i wobec faktu, że urządzenie jest pierwszym prototypem, na którym prowadzono badania eksploatacyjne, uznano, że jest to dobre rozwiązanie. Rama główna stanowi ostoję zaprojektowanego urządzenia i umożliwia połączenie ze sobą wszystkich zespołów funkcjonalnych. Ze względów konstrukcyjnych z ramą zintegrowany został podstawowy elektromechaniczny układ napędowy zgrzewarki, który jest odpowiedzialny za wykonanie kluczowych ruchów roboczych podczas:

- przygotowania materiału pasa do zgrzewania (pobieranie pasa w odpowiedniej ilości),
- uplastyczniania pasa na gorącej płycie (dociskanie końcówek pasa do gorącej płyty),
- doprasowywania uplastycznionych końcówek pasa (dociskanie ich do siebie).

Podstawowym elementem tego układu napędowego jest bezszczotkowy silnik elektryczny prądu stałego (A3.1) wyposażony w: hamulec elektromagnetyczny (odpowiedzialny za utrzymywanie zadanej pozycji pod obciążeniem) oraz enkoder (odpowiedzialny za pomiar aktualnej pozycji wirnika) zabudowane w korpusie silnika. Do silnika w sposób kołnierzyowy dołączony jest reduktor planetarny (A3.2). Głównym celem zastosowania przekładni redukującej była poprawa dokładności pozycjonowania wału wyjściowego tego układu napędowego, ze względu na zwielokrotnienie liczby impulsów enkodera zabudowanego w silniku, przypadających na jednostkę kąta obrotu wału wyjściowego układu napędowego.

Zespół silnika (A3.1) z przekładnią (A3.2) zamocowany jest do ramy urządzenia za pomocą płyty montażowej (A3.3). Z wałem wyjściowym przekładni (A3.2), za pomocą sprzęgła kłowego z wkładką elastomerową (A3.4), połączona jest śruba (A3.6) mechanizmu śrubowo-tocznego, napędzającego moduł chwytaka przesuwne (D na rysunku 127). Śruba ta (A3.6) współpracuje z nakrętką (A3.7), połączoną poprzez swoją obudowę (A3.8) z modułem chwytaka przesuwne (D na rysunku 127). Dzięki temu ruch obrotowy śruby (A3.6) wywoływany przez silnik (A3.1), zamieniany jest na ruch prostoliniowy modułu chwytaka przesuwne (D na rysunku 127) zgodnie z kierunkiem s_1 (Rys. 126). Śruba (A3.6) osadzona jest na ramie urządzenia za pomocą dwóch bloków łożyskowych: ustalającego (A3.5) – wyposażonego w łożysko kulkowe skośne dwukierunkowe (przenoszące siły wzdłużne i poprzeczne) oraz podpierającego (A3.9) – wyposażonego w łożysko kulkowe zwykłe (przenoszącego jedynie siły poprzeczne). Śruba toczna (A3.6) modułu chwytaka przesuwne (D na rysunku 127), poprzez swój ostatni czop, połączona jest, za pomocą sprzęgła kłowego z wkładką elastomerową (A3.4), z kolejny mechanizmem śrubowo-tocznym, złożonym ze śruby (A3.11) modułu grzewczego (E na rysunku 127) oraz nakrętki (A3.10), połączonej poprzez obudowę (A3.8) z modułem grzewczym (E na rysunku 127). Rozwiązanie to zapewnia jednoczesny obrót obu śrub, wywołany za pomocą silnika (A3.1). W wyniku tego, możliwe jest jednoczesne realizowanie przemieszczeń zgodnych z kierunkami s_1 i s_2 (Rys. 126), odpowiednio modułu chwytaka nieprzesuwne oraz modułu grzewczego (D i E na rysunku 127). Zastosowane w tym układzie sprzęgła kłowe (A3.4), dzięki wkładce umieszczonej pomiędzy piastami i wykonanej z elastomeru, zapewniają kompensację niedokładności położenia kąтового i współosiowości pomiędzy poszczególnymi elementami tego układu.

Podstawowy układ napędowy maszyny stanowią również toczne elementy prowadzące, umożliwiające wykonywanie nieskrępowanego ruchu prostoliniowego przez moduł chwytaka nieprzesuwne i moduł grzewczy (D i E na rysunku 127), przy zapewnieniu braku luzów w kierunku poprzecznym w stosunku do kierunku przemieszczenia. Elementy prowadzące w tym przypadku to:

- szyna profilowa górnej prowadnicy modułu grzewczego (A3.12), współpracująca z wózkiem tocznym (A3.13) zamocowanym do modułu grzewczego (E na rysunku 127),
- dwie szyny profilowe prowadnicy dolnej (A3.14), współpracujące tocznie z dwoma wózkami (A3.15) prowadzącymi moduł chwytaka przesuwne (D na rysunku 127) oraz dwoma wózkami (A3.16) prowadzącymi moduł grzewczy (E na rysunku 127).

Taki układ elementów prowadzących te dwa główne zespoły funkcjonalne (D i E na rysunku 127), zapewnia odpowiednie pozycjonowanie końcówki pasa względem płyty grzewczej podczas uplastyczniania materiału oraz doprasowywania złącza w wyniku tego, że wózki prowadnic (A3.15 oraz A3.16) osadzone są na tej samej parze szyn profilowych. Dodatkowym elementem, w który wyposażona została rama główna, jest płyta montażowa elektropneumatycznego układu sterującego (A4). Umożliwia to wykorzystanie wolnego miejsca w dolnym obszarze urządzenia na stosunkowo rozbudowany układ sterujący.

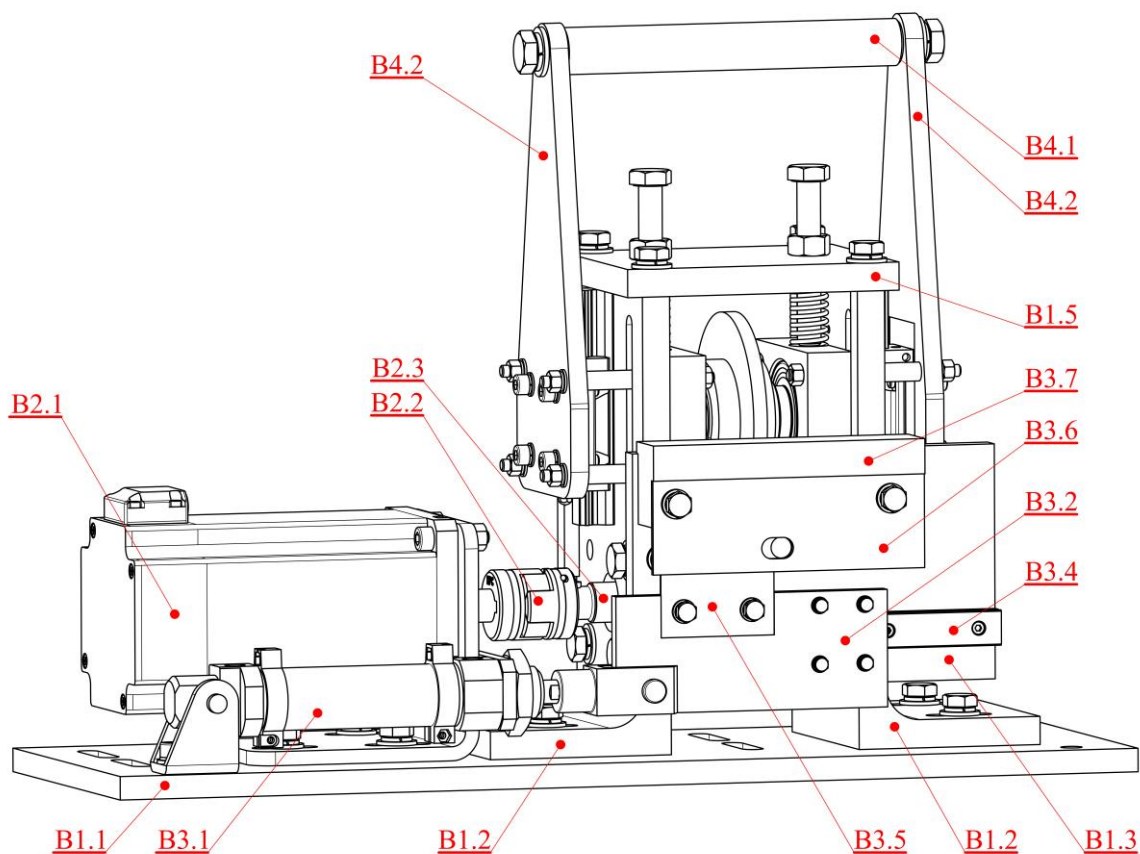
Kolejnym ważnym zespołem funkcjonalnym zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów jest moduł dozujący (Rys. 131-134), odpowiedzialny za następujące czynności związane z przygotowaniem pasa do wykonania połączenia:

- pobieranie go ze szpuli,
- podawanie do dalszych zespołów funkcjonalnych, umożliwiających wykonanie odpowiednich manipulacji zakończeniami i wykonanie złącza zgrzewanego,
- odmierzenie wymaganej długości,
- ucięcie go w odpowiednim miejscu w taki sposób, aby płaska powierzchnia jego końcówki była prostopadła do osi symetrii.

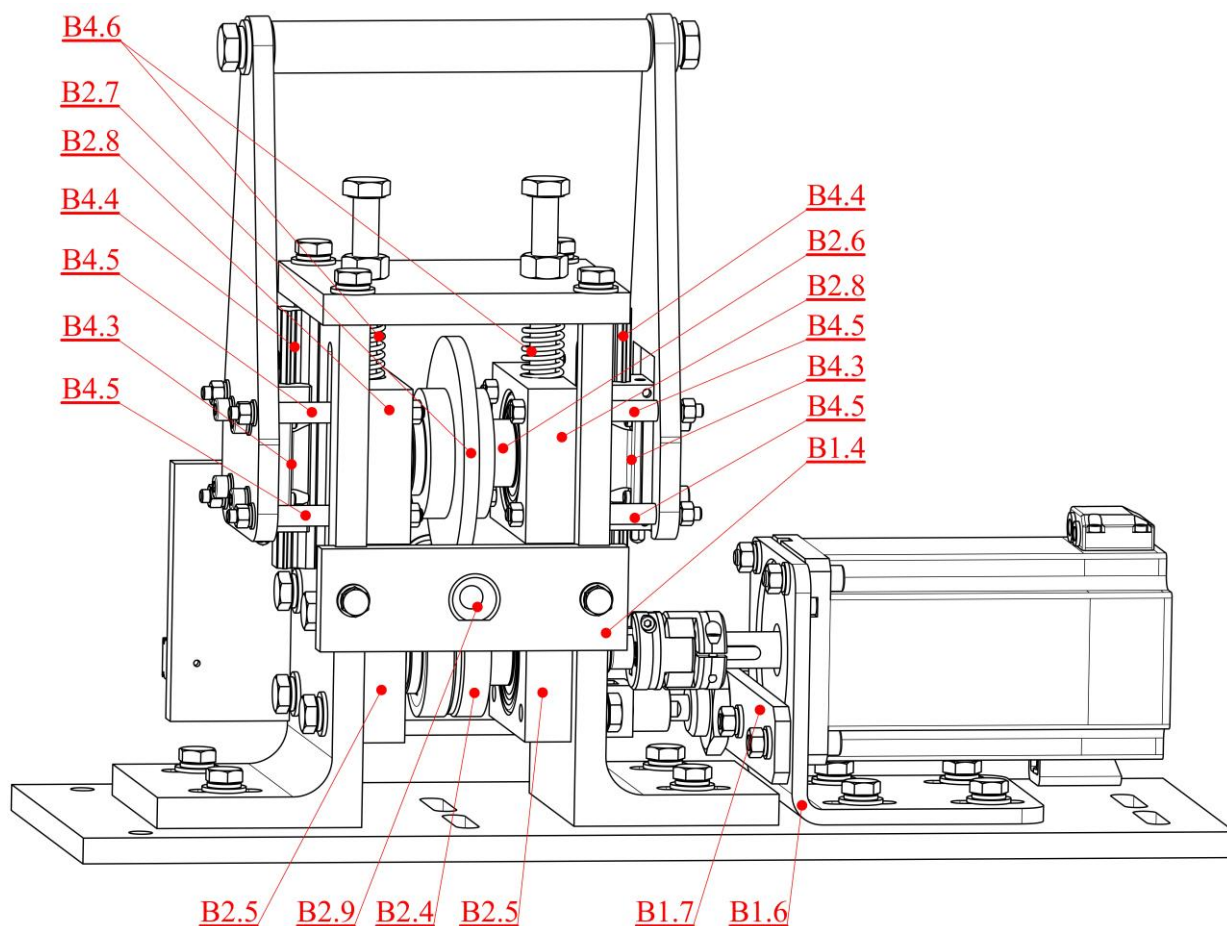
Moduł dozujący podzielony może zostać na cztery podzespoły funkcjonalne:

- korpus (B1.1-B1.7) stanowiący ostoję tego zespołu i łączący go z ramą (A na rysunku 127),
- podzespół dozowania (B2.1-B2.8) odpowiedzialny za pobieranie, podawanie i odmierzanie pasa,
- podzespół cięcia (B3.1-B3.7) odpowiedzialny za ucinanie materiału,
- podzespół dociskacza (B4.1-B4.6) odpowiedzialny za zapewnianie właściwego sprzężenia ciernego pomiędzy pasem, a elementami roboczymi podzespołu dozowania, co zapewnia poprawność wydawania i odmierzania cięgną.

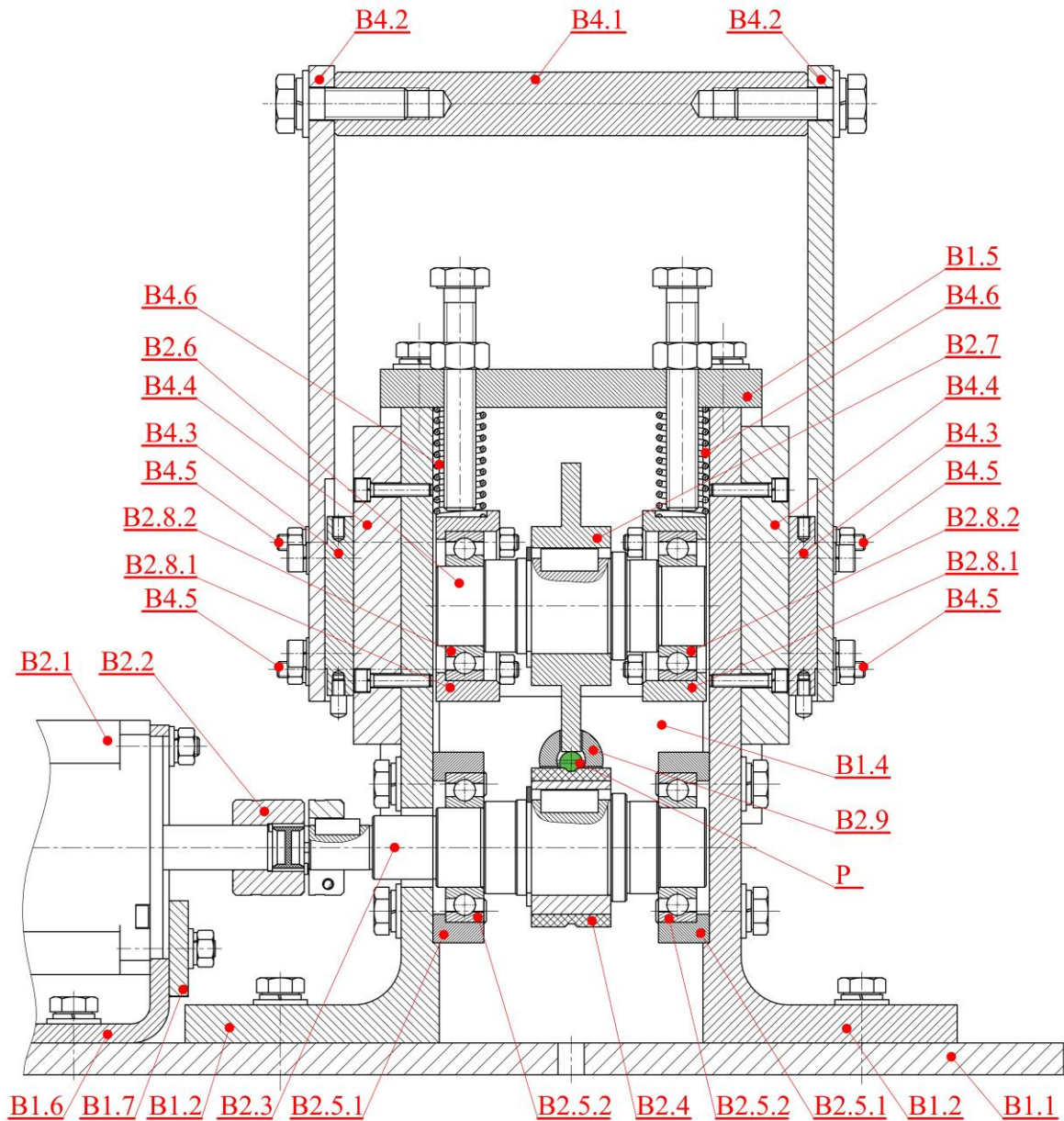
Głównym elementem nośnym korpusu modułu dozującego jest podstawa (B1.1), która umożliwia jego połączenie z ramą urządzenia (A na rysunku 127) i stanowi ostoję dla pozostałych podzespołów. Zastosowanie wspólnej płyty podstawy umożliwia łatwą zmianę orientacji przestrzennej całego modułu dozującego względem pozostałych zespołów urządzenia (szczególnie modułu chwytaka nieprzesuwne (C na rysunku 127), co dodatkowo jest niezależne od ustawień poszczególnych podzespołów modułu dozującego względem siebie. Z podstawą (B1.1), za pomocą połączeń śrubowych, połączone są dwie płyty boczne (B1.2) w formie kątowników z otworami i wyfrezowaniem. Razem z pokrywą przednią (B1.3), tylną (B1.4) oraz górną (1.5), płyty (B1.2) stanowią ostoję dla podzespołów odpowiedzialnych za dozowanie pasa. Połączenia pomiędzy tymi elementami są kształtowe (wyfrezowanie), zabezpieczone przed rozłączeniem się za pomocą śrub. Umożliwia to uzyskanie wysokiej sztywności korpusu i w konsekwencji przekłada się na dużą dokładność wzajemnego położenia elementów składowych modułu i dozowanego pasa.



Rys. 131. Widok ogólny zintegrowanego modułu dozującego od strony układu cięcia pasa (opis w tekście)



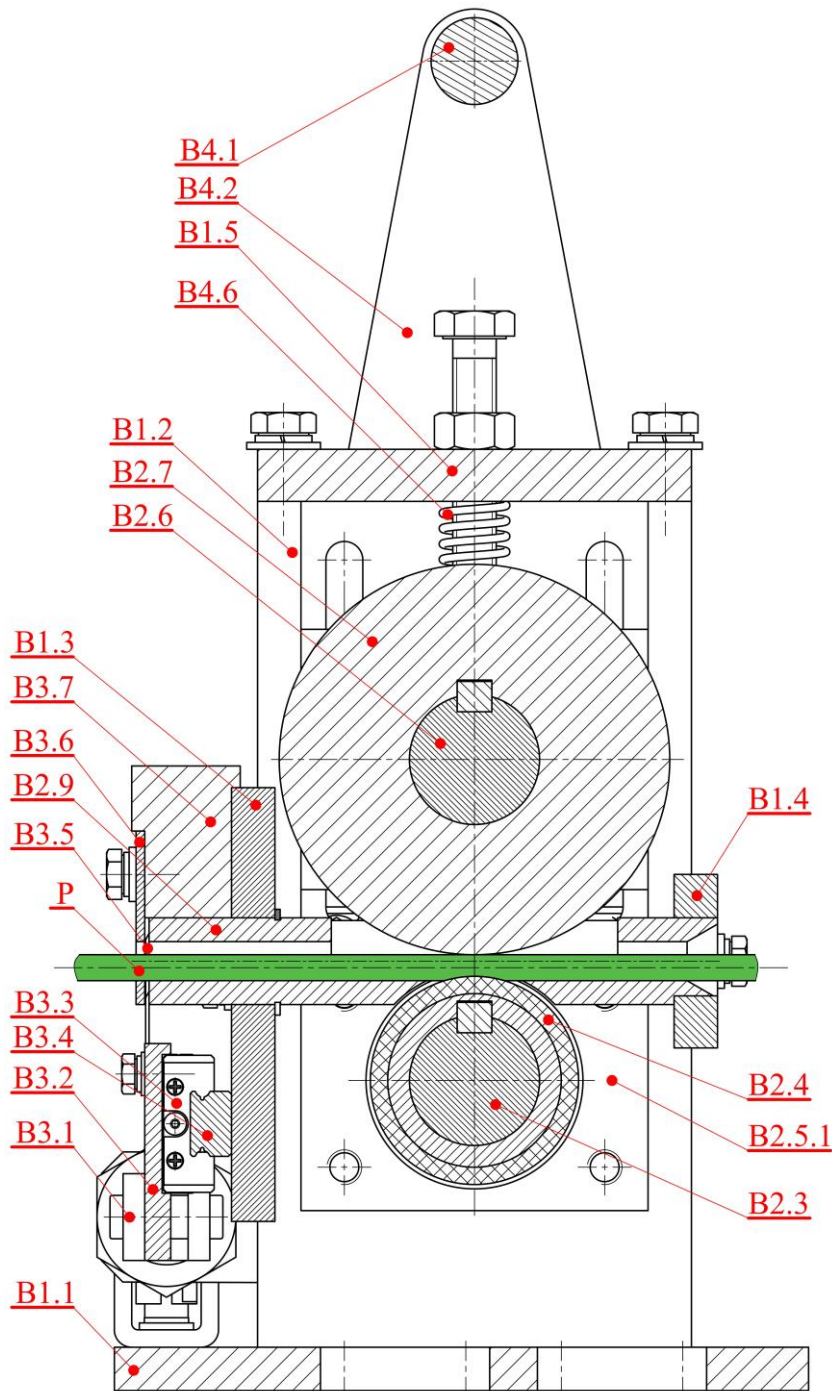
Rys. 132. Widok ogólny zintegrowanego modułu dozującego od strony rolki z pasem (opis w tekście)



Rys. 133. Przekrój przez główną oś pomocniczego napędu elektromechanicznego napędzającego zintegrowany moduł dozujący, w płaszczyźnie prostopadłej do osi dozowanego pasa (opis w tekście)

Jednym z ważniejszych elementów odpowiedzialnych za dozowanie pasa (P) do dalszych zespołów funkcjonalnych urządzenia jest silnik elektryczny bezszczotkowy (B2.1) wyposażony w: hamulec elektromagnetyczny (odpowiedzialny za utrzymywanie zadanej pozycji pod obciążeniem) oraz enkoder (odpowiedzialny za pomiar aktualnej pozycji wirnika) zabudowane w korpusie. Silnik ten jest głównym podzespołem drugiego – pomocniczego napędu elektromechanicznego tego urządzenia. Jest on połączony z podstawą (B1.1) za pomocą płyty montażowej (B1.6). Jego wał wyjściowy, poprzez sprzęgło kłowe z wkładką elastomerową (B2.2), połączony jest z wałem dozującym (B2.3), osadzonym nieprzesuwnie w dwóch blokach łożyskowania (2.5). Elementy te składają się z łożyska kulkowego (2.5.2) osadzonego w obudowie (2.5.1), przykręconej do płyty bocznej (B1.2). W związku z tym, oś obrotu rolki dozującej (B2.4), osadzonej nieprzesuwnie na wale dozującym (B2.3), nie zmienia swojego położenia podczas pracy. Rolka (B2.4) pokryta jest warstwą elastomeru i posiada trapezowe wycięcie w części środkowej, którego ścianki

wchodzą w kontakt z pasem (P). W wyniku tego, materiał jest odpowiednio prowadzony i zapewniona jest właściwa interakcja cierna pomiędzy powierzchnią rolki (B2.4), a powierzchnią zewnętrzną pasa (P).



Rys. 134. Przekrój przez główną oś pomocniczego napędu elektromechanicznego napędzającego zintegrowany moduł dozujący, w płaszczyźnie równoległej do osi dozowanego pasa (opis w tekście)

W celu zapewnienia odpowiedniego docisku pasa (P) do rolki dozującej (B2.4), co pozwala na cierne przeniesienie siły obwodowej, zastosowano rolkę dociskającą (B2.7) oddziałującą na pas (P) od góry. Rolka ta (B2.7) jest osadzona na wale dociskającym (B2.6), umieszczonym w blokach łożyskowania (B2.8), złożonych z łożyska kulkowego (B2.8.2) i obudowy (B2.8.1), która w tym przypadku jest przesuwnie połączona ze ścianą boczną (B1.2). W związku z tym, bloki łożyskowania (B2.8) mogą się przemieszczać

względem ścian bocznych (B1.2), w kierunku równoległym do ich powierzchni. Konstrukcja ta zapewnia możliwość przemieszczenia się rolki dociskającej (B2.7) w kierunku pionowym, co umożliwia zmianę odległości pomiędzy rolkami (B2.4 i B2.7), a w konsekwencji dozowanie pasów o różnej średnicy. Bloki łożyskowe (2.8) połączone są za pomocą łączników (B4.5) z dwiema płytami prowadzącymi (B4.2), połączonymi ze sobą w górnej części modułu za pomocą uchwytu (B4.1). Do płyt (B4.2), za pomocą połączenia śrubowego, zamontowane są wózki prowadnicy liniowej (B4.3), współpracujące tocznie z szynami profilowymi (B4.4), przykręconymi do płyt bocznych (B1.2). Dzięki temu bloki łożyskowe (B2.8), a w konsekwencji wał (B2.6) oraz rolka (B2.7) mogą się swobodnie przemieszczać w kierunku pionowym. Docisk rolki (B2.7) do pasa (P) zapewniony jest poprzez parę sprężyn śrubowych dociskacza (B4.6), osadzonych pomiędzy blokami łożyskowania (B2.8), a pokrywą górną (B1.5).

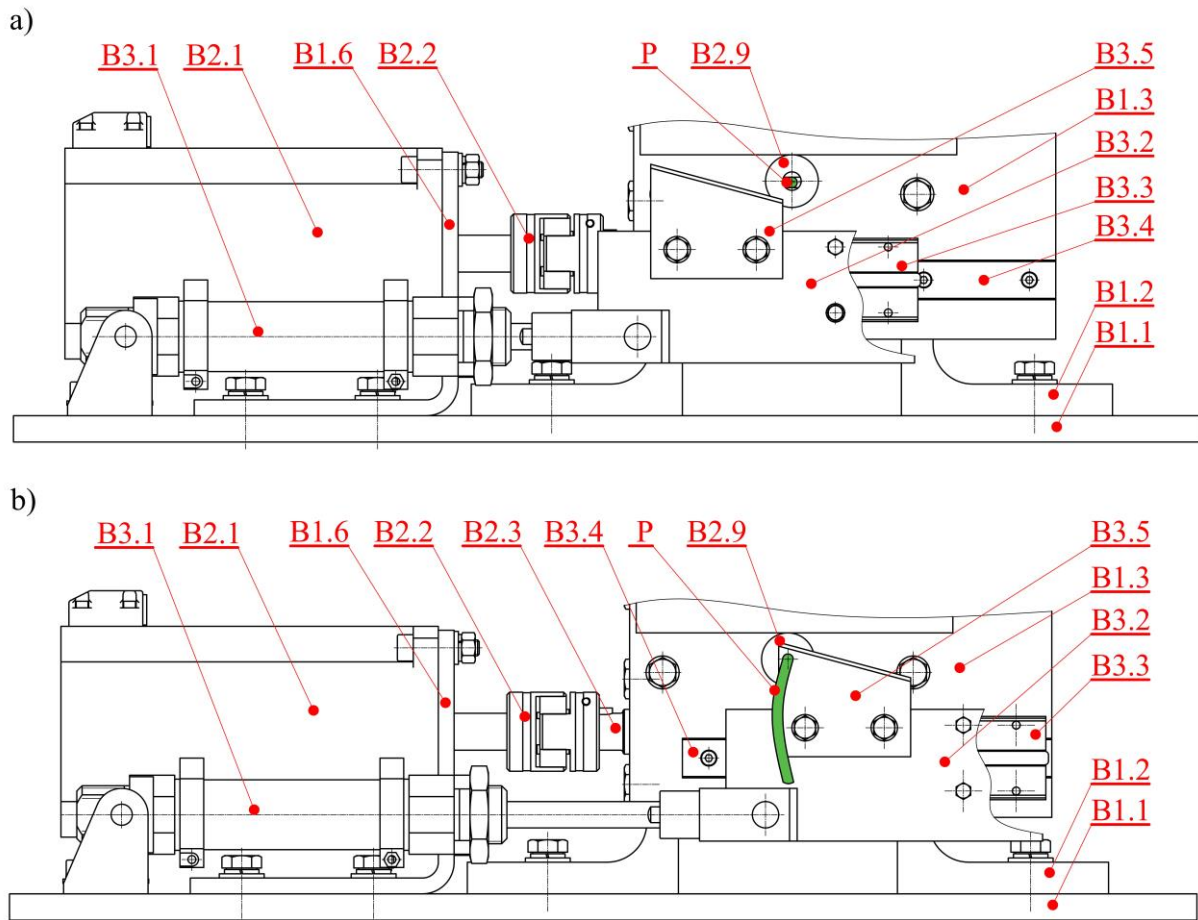
W celu zapewnienia pewności prowadzenia podatnego pasa (P) w module dozującym, w obszarze pomiędzy rolką dociskającą (B2.7), a dozującą (B2.4), umieszczony jest prowadnik pasa (B2.9). Element ten jest zamocowany do pokrywy przedniej (B1.3) i tylnej (B1.4) za pomocą połączeń kształtowych. Prowadnik (B2.9) ma formę cylindryczną, gdzie do poosiowo umieszczonego otworu wprowadzany jest pas (P), przez operatora przed rozpoczęciem zgrzewania serii produktów. Kształtowe wycięcia w środkowym obszarze prowadnika (B2.9), umożliwiają kontakt i bezpośrednie oddziaływanie mechaniczne rolek (B2.4 i B2.7) na pas (P).

Konstrukcja uwzględniająca ruchomą oś wału dociskającego (B2.6), zapewnia odpowiednie oddziaływanie rolki dociskającej (B2.7) na pas (P), a przez to wymagany docisk pasa (P) do rolki dozującej (B2.4). Z drugiej strony, w chwili gdy konieczne jest wyjęcie albo zamontowanie pasa (P), operator urządzenia chwytając za uchwyt dociskacza (B4.1) może podnieść wał dociskający (B2.6) w celu zwiększenia szczeliny pomiędzy rolkami (B2.4 i B2.7). Rozwiązanie to również zapewnia możliwość stosowania różnych średnic pasa (P), która jest ograniczona jedynie średnicą otworu wewnątrz prowadnika (B2.9). Obecność w prowadniku pasa (P) o większej średnicy, wymusza również większy stopień ściśnięcia sprężyn dociskacza (B4.6), co zwiększa siłę docisku ciągną do rolki dozującej (B2.4) – jest to efekt zamierzony.

Podstawowym elementem napędowym podzespołu cięcia pasa jest siłownik pneumatyczny dwustronnego działania (B3.1), zamontowany do podstawy (B1.1) za pomocą dedykowanego uchwytu oraz płyty montażowej (B1.7), połączonej z płytą montażową silnika (B1.6). Do tłoczyska siłownika za pomocą połączenia kształtowego zamontowana jest płyta prowadząca nóż (B3.2). Z drugiej strony natomiast, również kształtowo z zabezpieczeniem za pomocą śruby, jest ona zamontowana do wózka prowadnicy liniowej (B3.3), współpracującego z szyną profilową (B3.4), przykręconą do pokrywy przedniej (B1.3). Na płycie prowadzącej (B3.2) zamontowany jest nóż tnący (B3.5), który odpowiada za cięcie pasa.

Konstrukcja taka umożliwia prostoliniowe przemieszczanie się noża (B3.5) w kierunku prostopadłym do osi dozowanego pasa (Rys. 135) – zgodnie z kierunkiem s_5 (Rys. 126), którego ruch jest inicjowany za pomocą siłownika pneumatycznego (B3.1). Odpowiednio zaostrzona i pochylona krawędź tnąca tego elementu (B3.5) jest zdolna do wykonania cięcia pasa (P) w taki sposób, aby jego powierzchnia po tej operacji była płaska. W celu zapewnienia odpowiedniego podparcia materiału podczas operacji cięcia, wykorzystano następujące cechy geometryczne elementów składowych tego zespołu:

- z jednej strony powierzchnia płaska noża (B3.5) współpracuje bezpośrednio z powierzchnią czołową prowadnika pasa (B2.9), gdzie krawędź otworu prowadnika (B2.9) stanowi punkt podparcia pasa (P) przy cięciu,
- z drugiej strony noża (B3.5) zastosowano pokrywę (B3.6) zamocowaną na podstawie (B3.7) przytworzonej do pokrywy przedniej modułu (B1.3). Krawędź otworu w pokrywie (B3.6) stanowi drugi punkt podparcia pasa (B) podczas operacji cięcia.

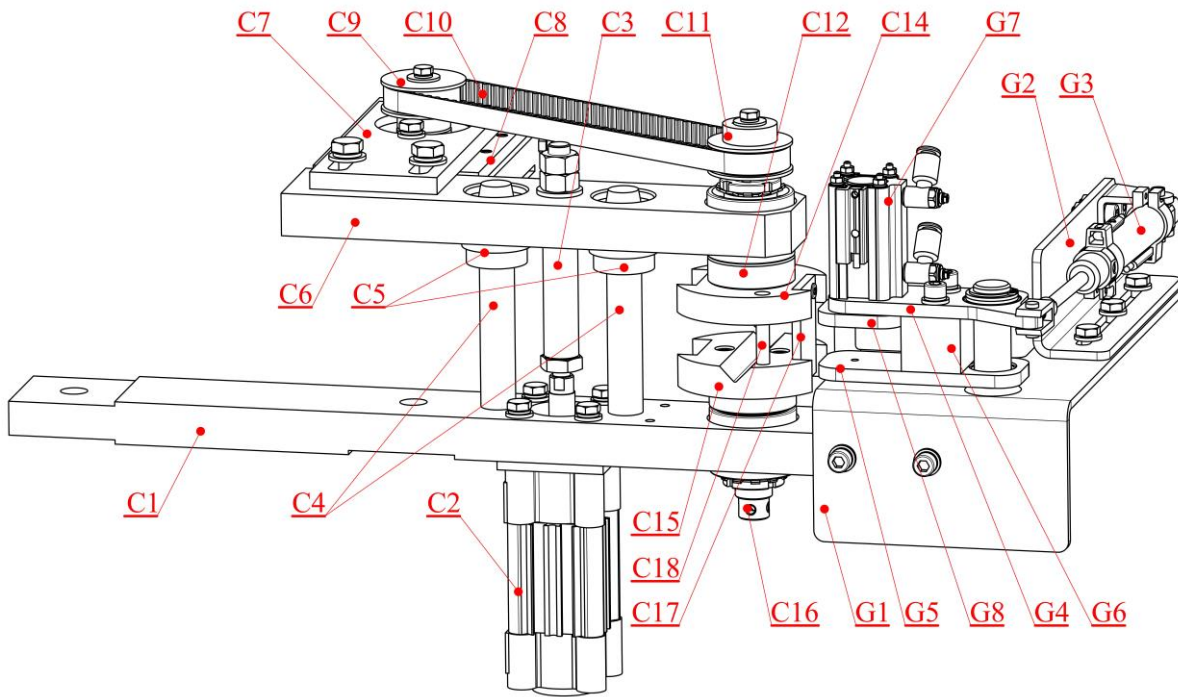


Rys. 135. Widok ogólny zespołu cięcia pasa zabudowany na zintegrowanym module dozującym: a) stan przed wykonaniem cięcia pasa, b) stan po ucięciu pasa (opis w tekście)

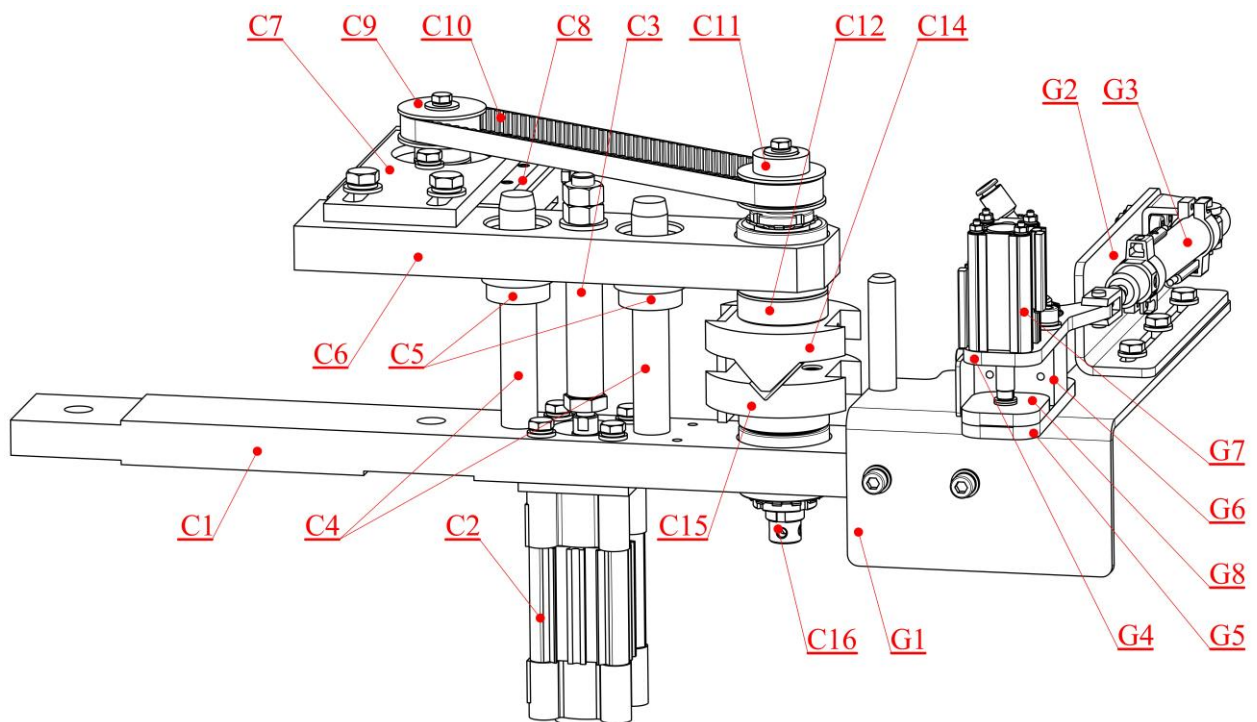
Moduł chwytaka nieprzesuwne (C na rysunku 127) zamontowany jest do ramy urządzenia (A na rysunku 127) za pomocą płyty głównej (C1), połączonej kształtowo z ostoją urządzenia (Rys. 136-138). Do płyty (C1), również za pomocą połączenia kształtowego zamocowane są słupy prowadzące (C4), współpracujące z tulejami tocznymi (C5), stanowiąc łącznie prowadnice liniowe toczne. Tuleje (C5) osadzone są kształtowo w płycie górnej (C6), która jednocześnie poprzez popychacz (C3) połączona jest z tłoczyskiem siłownika pneumatycznego dwustronnego działania (C2), zamocowanym do płyty głównej (C1) za pomocą połączeń śrubowych. Taka konfiguracja umożliwia przemieszczanie się płyty górnej (C6) ruchem prostoliniowym w kierunku pionowym, zgodnie z kierunkiem s_3'' (Rys. 126).

Do płyty górnej (C6), za pomocą płyty montażowej (C7), zamocowany jest pneumatyczny siłownik wahadłowy dwustronnego działania (C8). Jest on wyposażony w wał wyjściowy, na którym zamontowane jest koło pasowe (C9), które poprzez pasek zębany (C10) współpracuje z drugim kołem pasowym (C11),

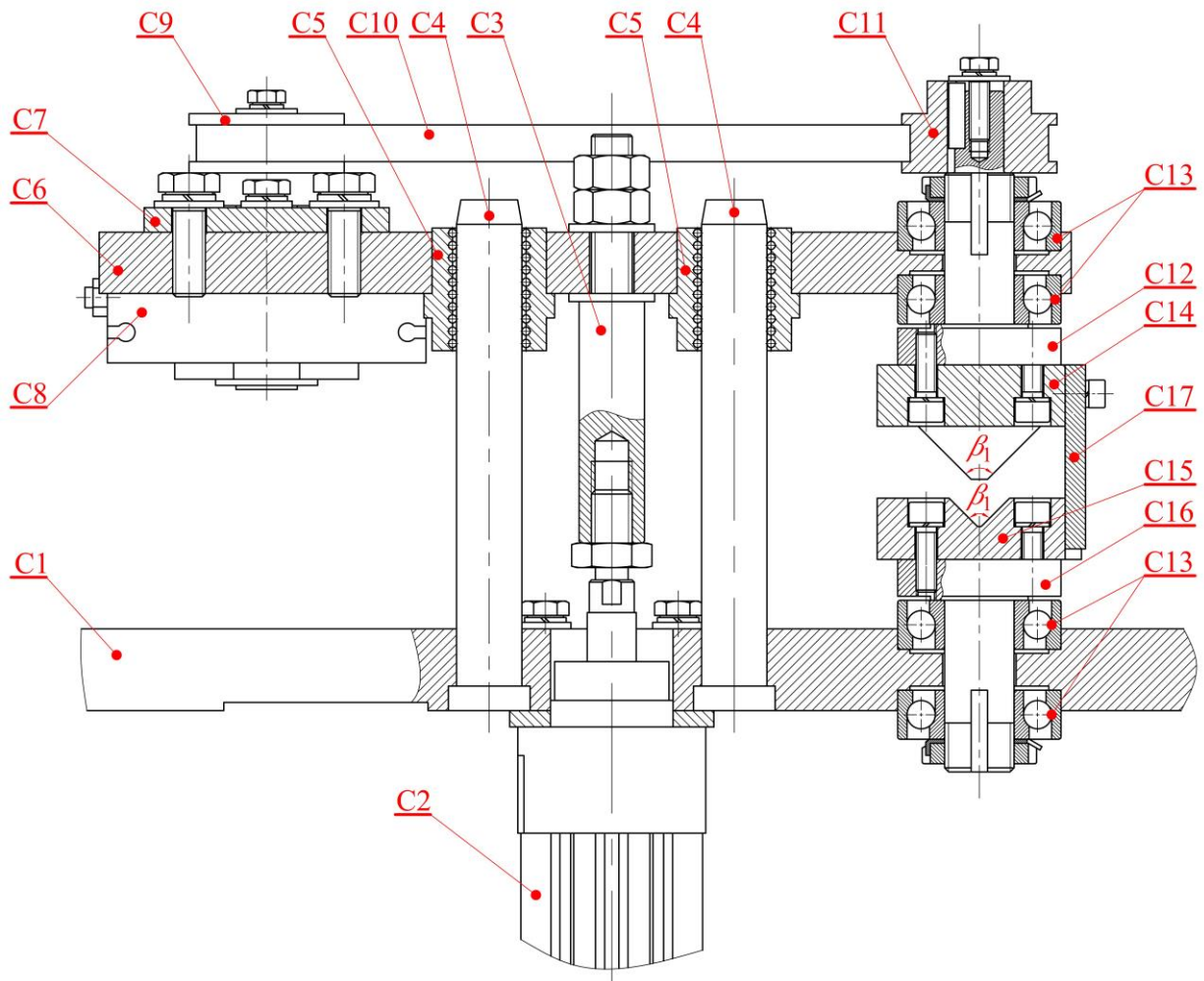
o takiej samej średnicy podziałowej. Element ten natomiast osadzony jest na czopie wału górnego (C12), łożyskowanego w płycie górnej (C6) za pomocą pary łożysk kulkowych skośnych (C13). Taka konfiguracja umożliwi wykonywanie ruchu obrotowego przez wał górny (C12) zgodnie z kierunkiem φ_3 (Rys. 126), który jest wymuszany za pomocą obrotu wału siłownika wahadłowego (C18).



Rys. 136. Widok ogólny modułu chwytaka nieprzesuwnego zintegrowanego z modułem wydającym pas – stan podczas przygotowywania pasa do operacji zgrzewania doczołowego (opis w tekście)



Rys. 137. Widok ogólny modułu chwytaka nieprzesuwnego zintegrowanego z modułem wydającym pas – stan po odbiorze pasa po wykonaniu operacji zgrzewania doczołowego (opis w tekście)



Rys. 138. Przekrój przez główną oś obrotu kluczowych komponentów roboczych modułu chwytaka nieprzesuwającego, bez modułu wydającego pas (opis w tekście)

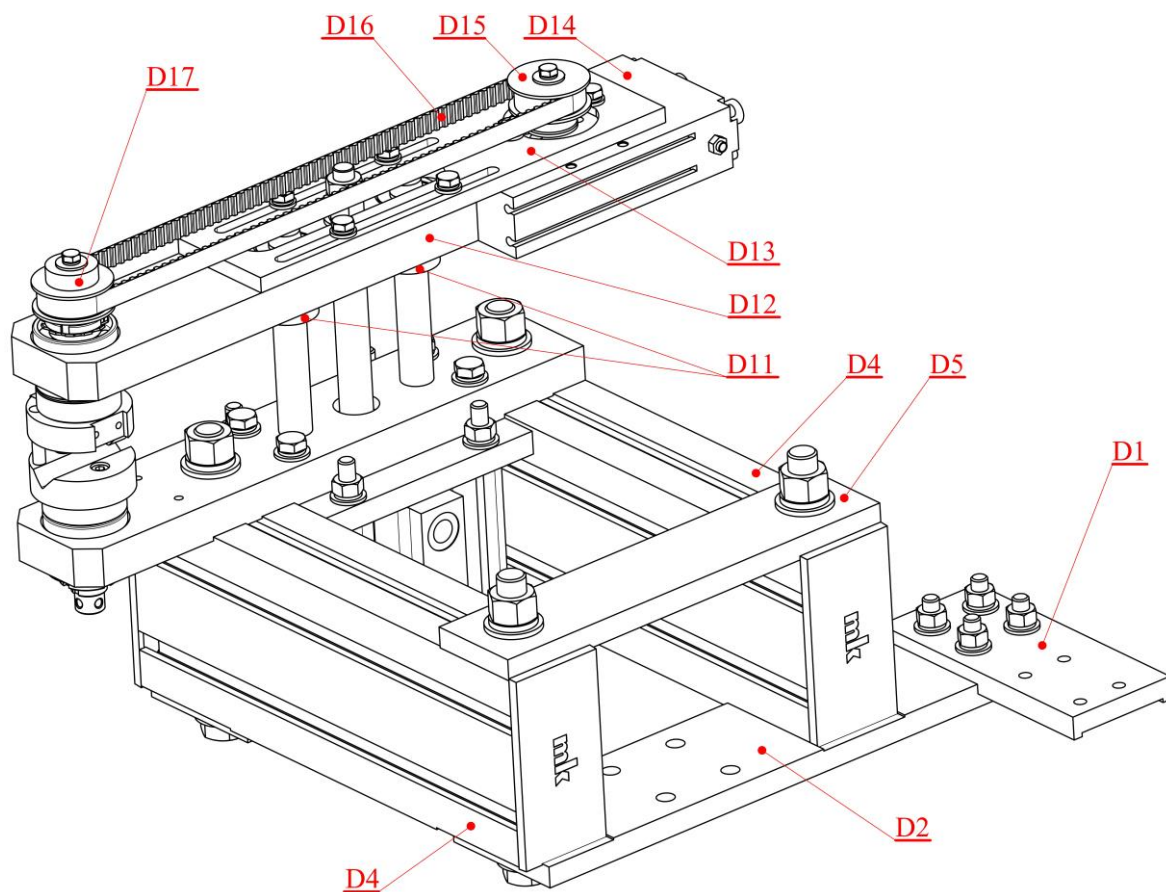
Do wału górnego (C12), za pomocą połączenia kształtowego zabezpieczonego śrubami, zamontowana jest szczęka górna (C14), która jest wyposażona w trapezowy wypust o kącie pochylenia ścian bocznych β_1 , dociskający pas (P) swoim wierzchołkiem. Szczęka ta (C14), odpowiedzialna jest za zaciskanie pasa (P) podczas jego chwytania (na czas manipulacji końcówkami pasa, uplastyczniania, doprasowania i chłodzenia złącza). Współpracuje ona kształtowo ze szczęką dolną (C15), wyposażoną w wybranie o przekroju trójkątnym i takim samym kącie rozwarcia β_1 , którego powierzchnie boczne stanowią bazę do prowadzenia pasa (P). Trapezowy wypust szczęki górnej (C14) wymiarowo odpowiada wybraniu szczęki dolnej (C15) w taki sposób, aby możliwe było zaciskanie pasa (P) o różnych średnicach w rowku szczęki dolnej (C15), bez kolizji ścian bocznych tych części. Dzięki takiej konstrukcji uzyskano pewne osadzenie pasa (P) w szczęce dolnej (C15), przy czym jego oś symetrii, niezależnie od średnicy, jest umiejscowiona zawsze w tej samej płaszczyźnie – co znacząco ułatwia uzyskanie powtarzalności pozycjonowania końcówek pasa względem siebie i względem gorącej płyty podczas operacji zgrzewania.

Aby możliwe było wykonanie manipulacji pasem, obie szczęki muszą mieć możliwość jednoczesnego obrotu. W związku z tym, szczęka dolna (C15) połączona jest z wałem (C16), który jest łożyskowany w płycie (C1), za pomocą pary łożysk kulkowych skośnych (C13). W celu wymuszenia obrotu szczęki dolnej (C15) jednocześnie ze szczęką górną (C14), oba te elementy połączone są ze sobą kształtowo, za

pomocą płaskiego łącznika (C17). Element ten jednocześnie nie ogranicza możliwości ruchu translacyjnego szczęki górnej (C14) względem szczęki dolnej (C15), zachodzącego zgodnie z kierunkiem s_3 ” (Rys. 126). Dodatkowym elementem zabudowy tego modułu jest ogranicznik (C18), ułatwiający układanie się pasa w pożądany sposób podczas wykonywania manipulacji jego zakończeniami.

Taka konstrukcja modułu chwytaka nieprzesuwnego pozwala na realizację dwóch funkcji:

- zaciskania końcówki pasa w szczękach chwytaka (C14 i C15), inicjowanego za pomocą siłownika pneumatycznego dwustronnego działania (C2), dzięki czemu położenie końcówki pasa staje się ściśle określone,
- obrotu końcówek pasa zaciśniętych w szczękach (C14 i C15), inicjowanego za pomocą wahadłowego siłownika pneumatycznego (C8), co umożliwi wykonanie wymaganej manipulacji, niezbędnej do uplastycznienia powierzchni czołowej pasa i następującego po tym wzajemnego doprasowania końcówek do siebie.



Rys. 139. Widok ogólny modułu chwytaka przesuwnego – widok od strony podstawowego układu napędowego zautomatyzowanej zgrzewarki doczołowego (opis w tekście)

W niemal identyczny sposób działa moduł chwytaka przesuwnego (Rys. 139-142). Jego struktura funkcjonalna jest bardzo podobna do modułu chwytaka nieprzesuwnego, z tym że charakteryzuje się on nieco inną postacią konstrukcyjną. Wynika to z konieczności dostosowania go do przemieszczania się zgodnie z kierunkiem s_1 (Rys. 126) wzdłuż elementów prowadzących (A3.14 na rysunku 130), co umożliwia: pobieranie, uplastycznianie i doprasowanie materiału pasa, a także ułatwia usuwanie gotowego produktu z obszaru roboczego maszyny. Nieco inne rozwiązanie tego modułu wynika również z warunków

konstrukcyjnych dotyczących miejsc montażu poszczególnych elementów współpracujących np. komponentów podstawowego układu napędowego (konieczność kompensacji wysokości położenia zespołu chwytającego).

Ostoję modułu chwytaka przesuwne stanowią:

- płyta prowadząca lewa (D2) i płyta prowadząca prawa (D3) zamontowane na wózkach prowadzących (A3.14 na rysunku 130),
- dwa profile kształtowe (D4) łączące ze sobą płyty prowadzące (D2 i D3), połączone z nimi za pomocą połączeń kształtowych, co zapewnia wymaganą sztywność konstrukcji,
- uchwyt nakrętki (D1), który łączy strukturę nośną chwytaka przesuwne (D2, D3 i D4) oraz obudowę nakrętki (A3.8 na rysunku 130) mechanizmu śrubowo-tocznego, odpowiadającego za wywołanie przemieszczenia liniowego tego modułu,
- łącznik górny (D5) usztywniający konstrukcję,
- płyta główna (D6) stanowiąca podstawę mechanizmu manipulacyjnego, podobnie jak płyta główna modułu chwytaka nieprzesuwne (C1 na rysunku 136),
- płyta montażowa siłownika pneumatycznego (D7).

Funkcjonalny zespół części odpowiedzialnych za zaciskanie pasa w szczękach (D20 i D21) złożony z:

- siłownika pneumatycznego dwustronnego działania (D8), zamocowanego do płyty montażowej (D7) połączonej z płytą główną (D6), którego tłoczysko połączone jest z popychaczem (D9) przykręconym do płyty górnej (D12); odpowiedzialnego za zaciskanie pasa w chwytaku poprzez przemieszczenie górnej szczęki względem dolnej zgodnie z kierunkiem s_3' (Rys. 126),
- prowadzenia płyty górnej w postaci słupów prowadzących (D10) połączonych z płytą główną (D6), a także tulejek tocznych prowadnicy liniowej (D11) połączonych z płytą górną (D12),

charakteryzuje się takimi samymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi oraz zasadą działania jak w przypadku modułu chwytaka nieprzesuwne.

Podobna sytuacja zachodzi w przypadku zespołu elementów odpowiedzialnych za manipulację zakończeniem pasa, który jest złożony z:

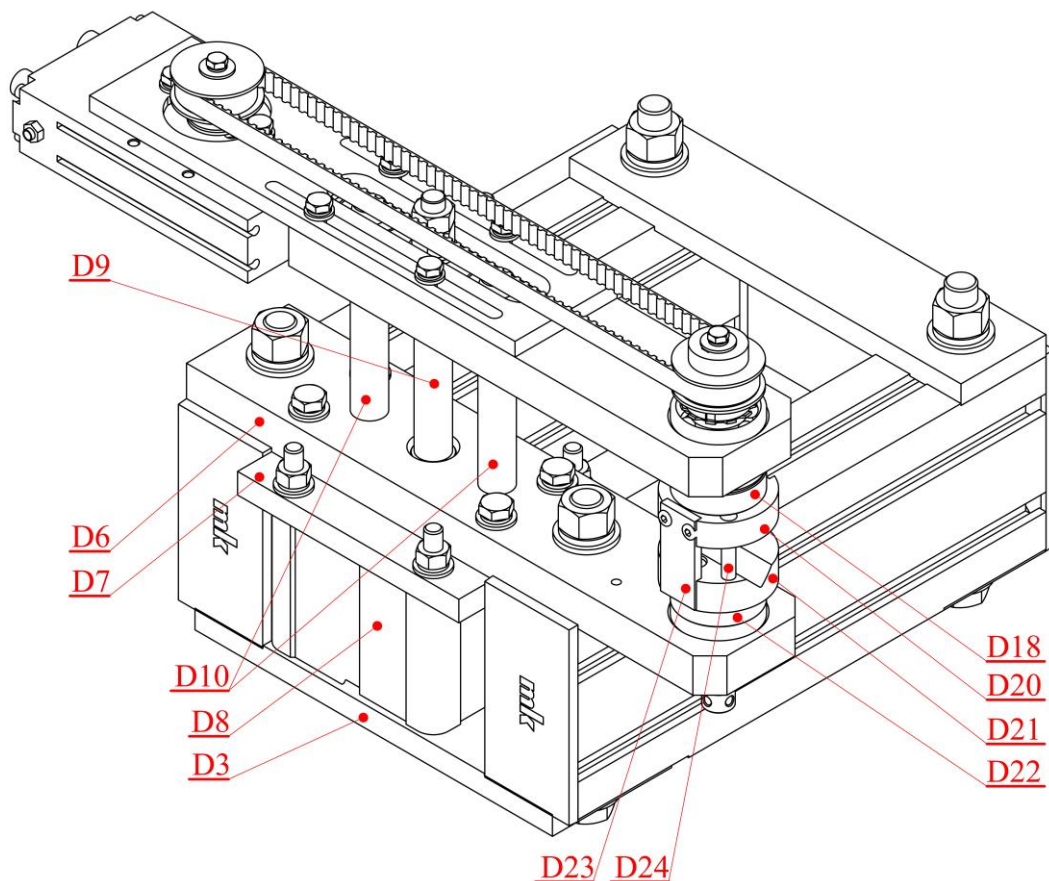
- pneumatycznego siłownika wahadłowego (D14) zamocowanego za pomocą płyty montażowej (D13) do płyty górnej (D6), odpowiedzialnego za obrót szczęk chwytaka w celu ich odpowiedniego zorientowania zgodnie z kierunkiem φ_3'' (Rys. 126),
- przekładni pasowej utworzonej przez koło pasowe siłownika wahadłowego (D15), pas zębaty (D16) oraz koło pasowe wału górnego (D17), przenoszącej ten ruch obrotowy,
- szczęki górnej (D20) zamocowanej do wału (D18) osadzonego w płycie górnej (D12) na łożyskach kulkowych skośnych (D18), współpracującej ze szczęką dolną (D21), zamocowaną do wału (D22) osadzonego na takich samych łożyskach (D18) w płycie głównej (D6). Obie szczęki (D20 i D21) są odpowiedzialne za chwytanie końcówki pasa (P), a w aspekcie geometrii części funkcjonalnej (wypust szczęki górnej dociskający pas oraz zagłębienie szczęki dolnej prowadzące go) są dokładnie takie same jak w module chwytaka nieprzesuwne. Jediną różnicą pomiędzy tymi elementami jest inna średnica korpusu szczęk, co wynika z uwarunkowań konstrukcyjnych,

- łącznika kształtowego (D23) odpowiedzialnego za przenoszenie ruchu obrotowego ze szczęki górnej (D20) na dolną (D21), przy pozostawieniu możliwości wykonywania ruchu translacyjnego szczęki górnej (D20) względem dolnej (D21), w kierunku pionowym,
- ogranicznika (D24) wspomagającego poprawną manipulację pasem i zapobiegającego owijania się pasa na elementach roboczych chwytaka.

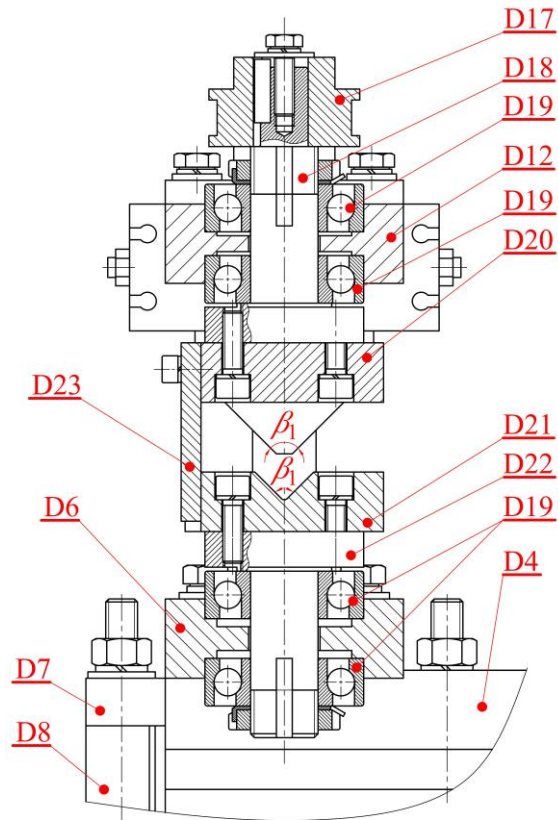
W związku z tym, moduł chwytaka przesuwne jest zdolny do realizowania następujących zadań:

- zaciskania końcówki pasa (P) w szczękach chwytaka (D20 i D21), inicjowanego za pomocą siłownika pneumatycznego dwustronnego działania (D8), dzięki czemu położenie końcówki pasa staje się ściśle określone,
- obrotu końcówek pasa zaciśniętych w szczękach (D20 i D21), inicjowanego za pomocą wahadłowego siłownika pneumatycznego (D14), co umożliwi wykonanie wymaganej manipulacji w celu umożliwienia uplastycznienia powierzchni czołowej i następującego po tym wzajemnego doprasowania końcówek pasa (P),
- pobierania pasa zaciśniętego w szczękach (D20 i D21), uplastyczniania materiału na gorącej płycie oraz doprasowania końcówek pasa, w wyniku wymuszenia przemieszczenia końcówki pasa (P) poprzez moduł chwytaka przesuwne, napędzany za pomocą silnika elektrycznego oraz mechanizmu śrubowo-tocznego (A3.1, A3.6 oraz A3.7 na rysunku 130).

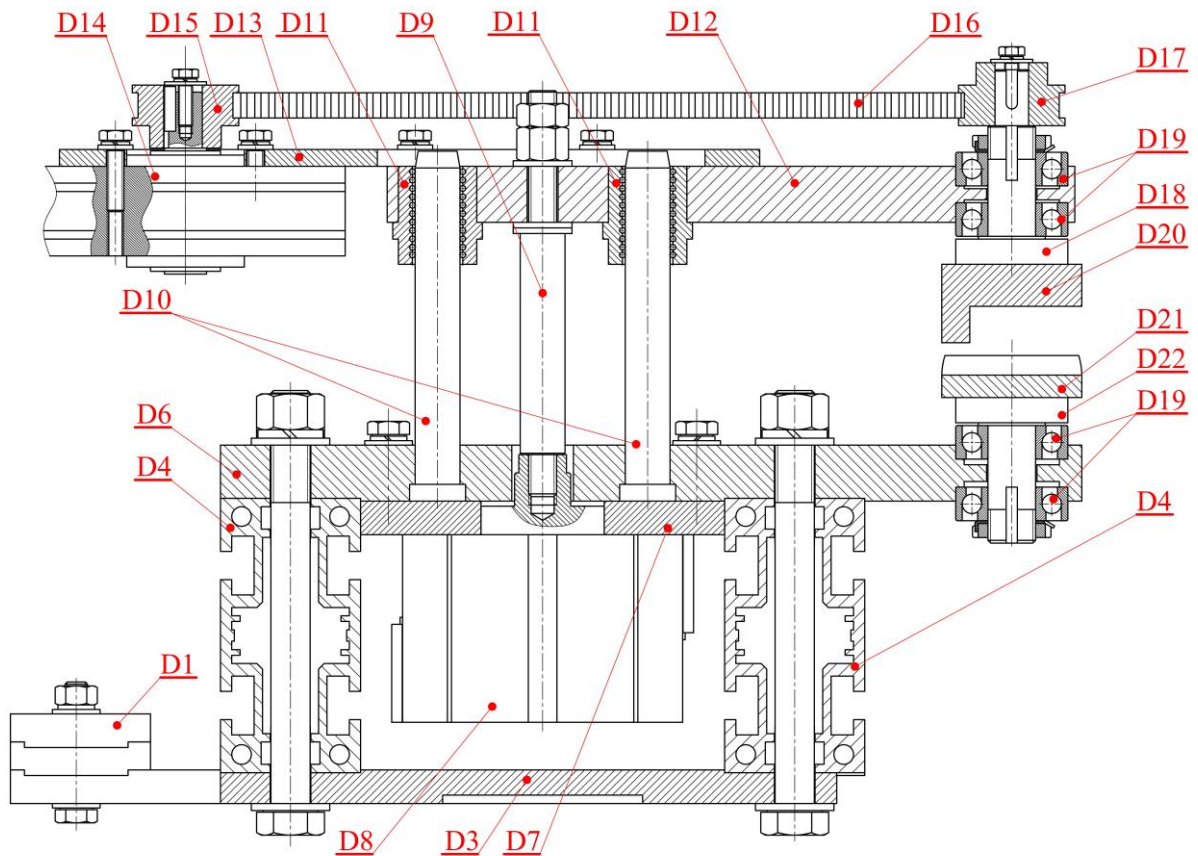
W związku z tym, moduł chwytaka przesuwne stanowi jeden z najbardziej istotnych zespołów funkcjonalnych zaprojektowanego urządzenia.



Rys. 140. Widok ogólny modułu chwytaka przesuwne – widok od strony odbierania pasa (opis w tekście)

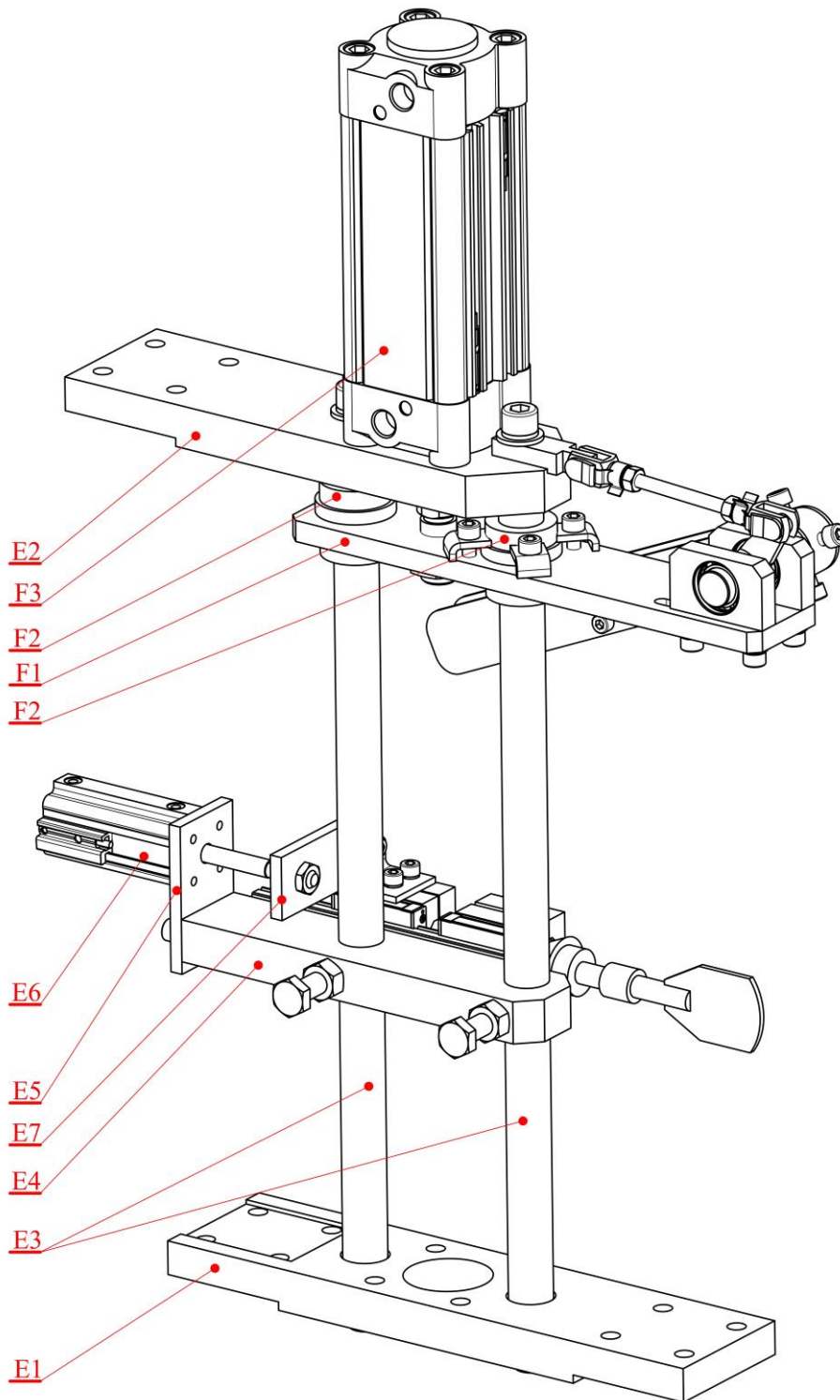


Rys. 141. Przekrój przez główną oś obrotu elementów roboczych modułu chwytaka przesuwnego, w płaszczyźnie prostopadłej do osi zgrzewanego pasa (opis w tekście)



Rys. 142. Przekrój przez główną oś obrotu elementów roboczych modułu chwytaka przesuwnego, w płaszczyźnie leżącej na osi zgrzewanego pasa (opis w tekście)

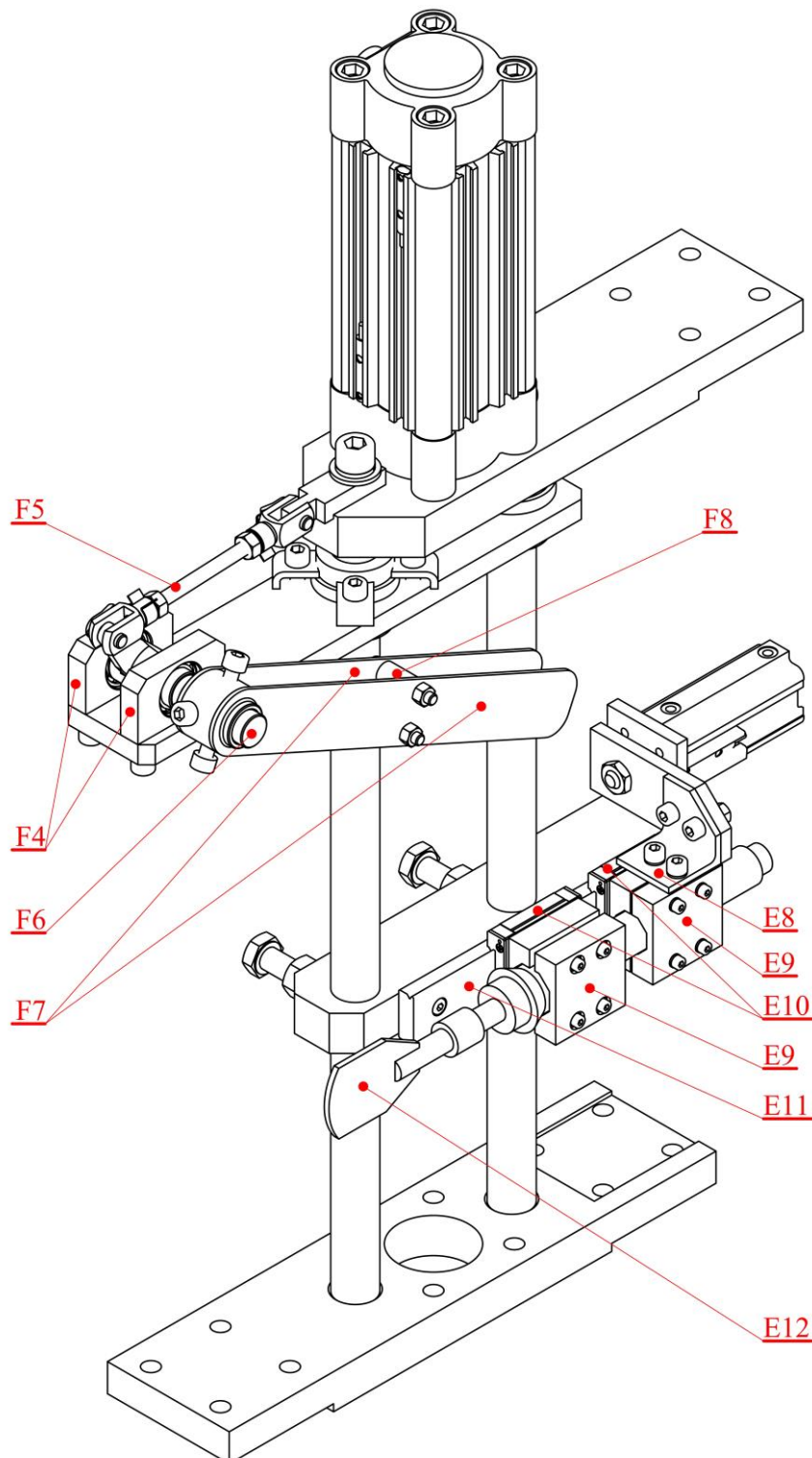
Kolejnym niezwykle ważnym zespołem funkcjonalnym urządzenia jest moduł grzewczy (Rys. 143-145). Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi tego zespołu, stanowiącymi jego ostoję, są płyta montażowa dolna (E1) oraz płyta montażowa górna (E2), połączone ze sobą za pomocą dwóch słupów prowadzących (E3) złączonych z płytami za pomocą połączeń kształtowych.



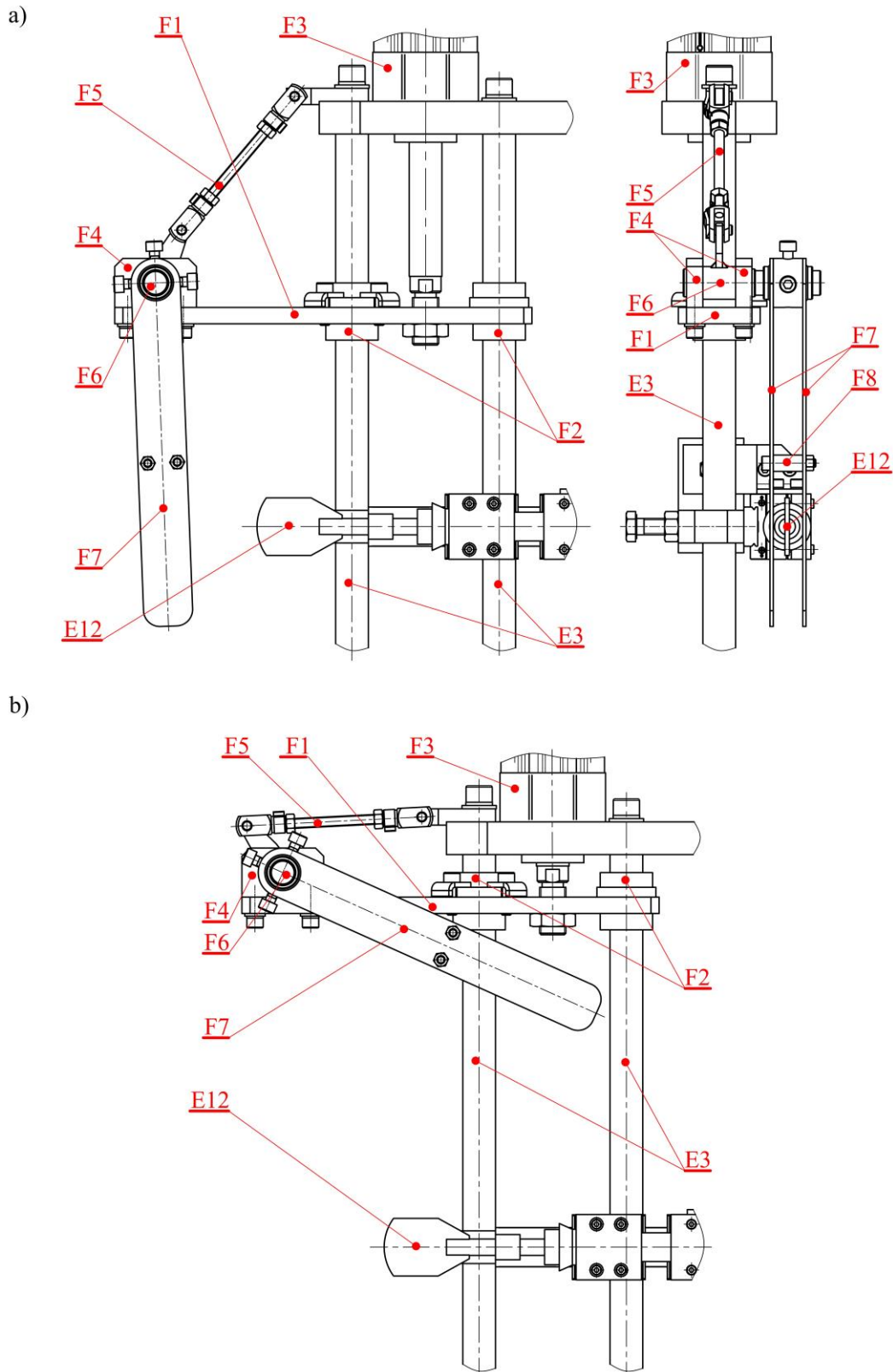
Rys. 143. Widok ogólny modułu grzewczego z modulem napinającym od strony modułu chwytaka przesuwnego, w przypadku wysuniętej płyty grzewczej (opis w tekście)

Płyta dolna (E1) osadzona jest na dwóch wózkach prowadnicy liniowej dolnej (A3.16 na Rys. 130), natomiast płyta górna osadzona jest na wózku prowadnicy liniowej górnej (A3.13 na Rys. 130).

Dodatkowo, płyta dolna (E1) połączona jest z obudową (A3.8 na rysunku 130) nakrętki mechanizmu śrubowo-tocznego napędu modułu grzewczego (A3.10 oraz A3.11 na rysunku 130). Dzięki takiej konstrukcji, możliwe jest przemieszczanie się liniowe tego modułu zgodnie z kierunkiem s_2 (Rys. 126), inicjowane za pomocą silnika elektrycznego podstawowego elektromechanicznego układu napędowego urządzenia (A3.1 na rysunku 130). Osadzenie modułu grzewczego na tych samych przewodnicach co moduł chwytaka przesuwne, pomaga uzyskać dużą dokładność wzajemnego pozycjonowania gorącej płyty i końcówki pasa.



Rys. 144. Widok ogólny modułu grzewczego z modułem napinającym od strony modułu chwytaka nieprzesuwne, w przypadku schowanej płyty grzewczej (opis w tekście)



Rys. 145. Widok modułu napinającego w dwóch możliwych stanach pracy: a) napinacz opuszczony, b) napinacz podniesiony (opis w tekście)

Na słupach prowadzących (E3), w sposób nieprzesuwny osadzona jest płyta główna (E4), połączona poprzez uchwyt (E5) z siłownikiem pneumatycznym dwustronnego działania (E6). Element ten natomiast, poprzez łącznik prosty (E7) i kątowy (E8), połączony jest z dwoma uchwytami urządzenia grzewczego (E9). Do tych elementów zamocowane w sposób nieprzesuwny jest elektryczne urządzenie grzewcze (E12),

wyposażone w płaską płytę, rozgrzewaną w wyniku przepływu prądu elektrycznego przez opornik w niej umieszczony. Płyta ta stanowi główny element roboczy, który służy do nagrzewania końcówek pasa w celu ich uplastycznienia. Aby zapewnić właściwe prowadzenie urządzenia grzewczego (E12) w kierunku prostoliniowym, uchwyty (E9) osadzone są na dwóch wózkach prowadnicy liniowej (E10), współpracujących z szyną profilową (E11), która jest przykręcona do płyty głównej (E4). Konstrukcja taka zapewnia możliwość wykonywania ruchu prostoliniowego przez urządzenie grzewcze (E12), zgodnie z kierunkiem s_4 (Rys. 126), który inicjowany jest za pomocą siłownika pneumatycznego (E6).

Drugim modułem zamontowanym na wspólnej ostoi z modułem grzewczym (E) jest moduł napinający (F). Jego podstawowe zadanie polega na wymuszeniu odpowiedniego napięcia pasa (P), podczas jego pobierania przez moduł chwytaka przesuwne (D). Działanie to zapobiega zaplątywaniu się cięgna w pozostałe podzespoły urządzenia (Rys. 143-145).

Podstawowym elementem składowym tego modułu jest płyta przesuwna (F1), zamocowana na tulejkach prowadnicy liniowej (F2), współpracujących tocznie ze słupami prowadzącymi (E3). Jednocześnie do płyty (F1) zamocowane jest tłoczysko siłownika pneumatycznego dwustronnego działania (F3), który jest przykręcony do płyty montażowej górnej (E2). Dzięki takiej zabudowie, płyta (F1) może przesuwać się w kierunku pionowym, przy czym jej ruch jest inicjowany za pomocą siłownika (F3).

Na płycie przesuwnej (F1) zamontowane są dwie podpory (F4), w których osadzony jest wał napinacza (F6) na łożyskach kulkowych. Element ten wyposażony jest w uchwyt, do którego za pomocą połączenia kształtowego zamontowany jest łącznik (F5), jednocześnie połączony z płytą montażową górną (E2). Na wale (F6) natomiast, w sposób nieprzesuwny i nieobrotowy, zamontowane są dwie płozy napinacza (F7), połączone ze sobą za pomocą łączników (F8). Konstrukcja ta charakteryzuje się tym, że opuszczanie płyty przesuwnej (F1) za pomocą siłownika pneumatycznego (F3) i jednoczesne oddziaływanie łącznika (F5) na wał (F6), powoduje jego obrót wokół własnej osi. W tym czasie płozy napinacza (F7) poruszają się ruchem wychylnym w lewo (Rys. 145a), napinając pas. Podniesienie płyty przesuwnej (F1) powoduje natomiast schowanie się płoz (F7). Konstrukcja zespołu płoz (F7) i łączników (F8) powoduje, że elementy te nie wchodzą w kolizję z płytowym urządzeniem grzewczym (E12).

Ostatnim mechanicznym modułem funkcjonalnym urządzenia jest moduł wydawania gotowego pasa (G na rysunku 127), odpowiedzialny za usuwanie pasa z obszaru roboczego urządzenia oraz wydawanie go na zewnątrz (wydanie operatorowi lub odrzucanie do pojemnika ustawionego obok urządzenia). Zespół ten (Rys. 136 i 137), jest osadzony na płycie montażowej chwytaka nieprzesuwne (C1), z którym połączona jest płyta główna modułu wydającego (G1). Do tego elementu zamocowana jest płyta montażowa siłownika (G2), z którą w sposób nieprzesuwny połączono siłownik pneumatyczny dwustronnego działania (G3), odpowiedzialny za wydawanie pasa.

Podstawowy zespół roboczy modułu wydającego zbudowany jest z płyty górnej ramienia wydającego (G4) i płyty dolnej (G5) połączonych łącznikiem (G6). Zespół tych płyt łożyskowany jest na trzpieniu płyty montażowej (G1), przy czym płyta górna ramienia wydającego połączona jest z tłoczyskiem siłownika wydającego (G3). Do tej płyty górnej (G4) przykręcony jest siłownik pneumatyczny jednostronnego działania (G7) – zaciskający. Jego tłoczysko połączone jest z szczęką zaciskacza (G8).

Taka konstrukcja modułu wydającego powoduje, że siłownik (G7) może zacisnąć odcinek pasa wystający ze szczęk chwytaka nieprzesuwne (C14 i C15) po ich obrocie, pomiędzy swoją szczęką zaciskającą (G8), a płytą dolną (G5). Po przeprowadzeniu operacji zgrzewania i podniesieniu szczęki górnej chwytaka nieprzesuwne (C14) siłownik wydający (G3) może wywołać ruch wahadłowy układu roboczego wydawania, w celu usunięcia pasa z obszaru roboczego chwytaków. Po powrocie tłoczyska siłownika zaciskającego (G7) i zluźnieniu pasa, możliwy jest jego odbiór.

Elektropneumatyczny układ sterujący zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego jest rozdzielony na dwie podstawowe jednostki (Rys. 146-148):

- szafę sterowniczą (H1) zabudowaną komponentami elektrycznymi,
- zestaw komponentów elektropneumatycznych (H2) zamocowanych na płycie (A4 na rysunku 130) połączonej z ramą urządzenia,

a także dodatkowe elementy wyposażenia, zabudowane w różnych miejscach urządzenia, m.in.: elektryczne puszkę łączeniowe (H1.4) lub wyłączniki bezpieczeństwa (H1.2).

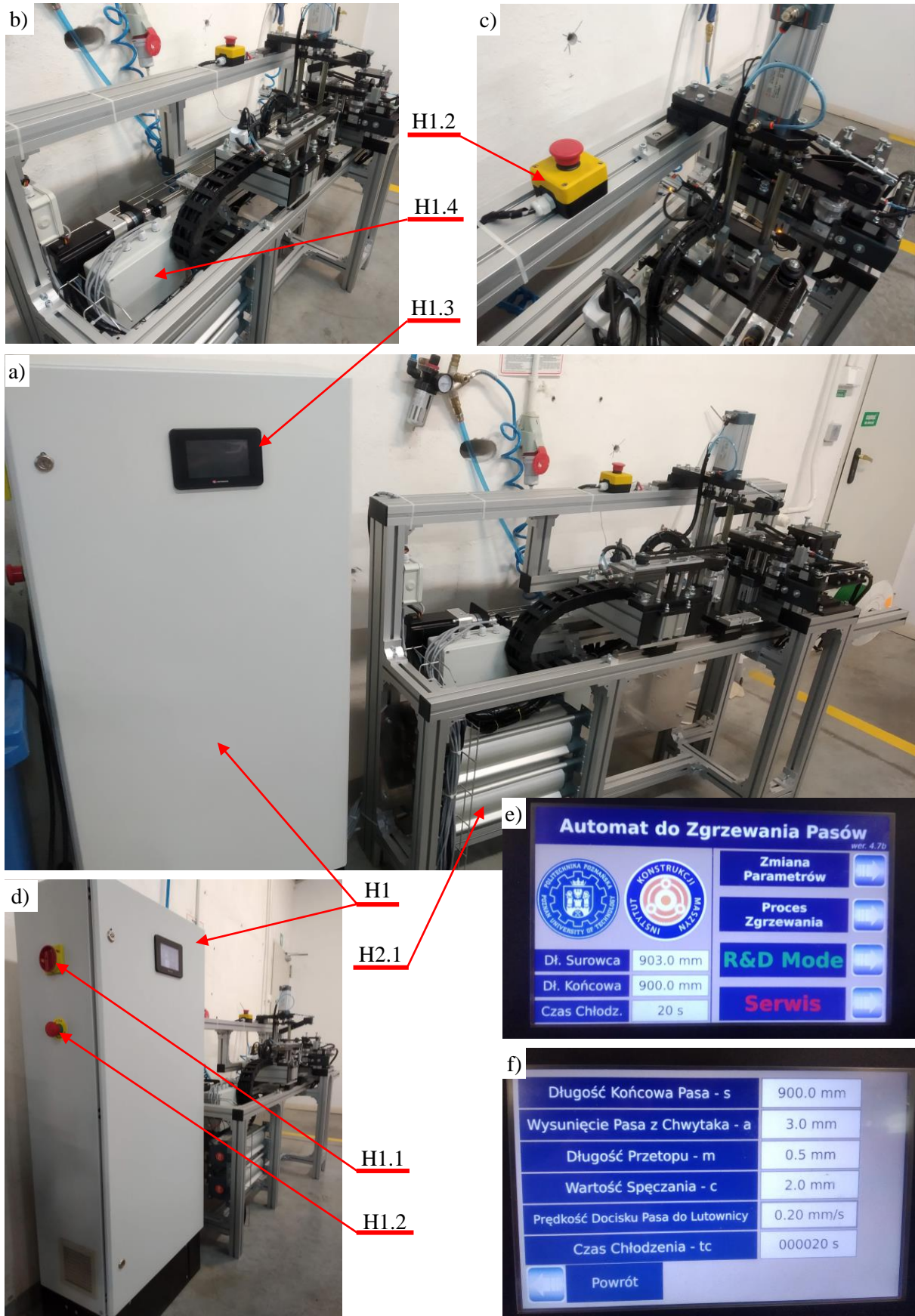
Szafa sterownicza (H1) wyposażona jest w główne podzespoły elektryczne, służące do sterowania urządzeniem. Zabudowane w niej są między innymi:

- wyłącznik główny (H1.1),
- wyłącznik bezpieczeństwa (H1.2),
- sterownik PLC (H1.3) osadzony w drzwiach szafy, który jest zintegrowany z panelem HMI umożliwiającym komunikację pomiędzy układem sterującym, a operatorem. Sterownik ten jest nadrzędną jednostką sterującą w tym urządzeniu,
- router WiFi (H1.5) odpowiedzialny za komunikację pomiędzy poszczególnymi komponentami,
- zasilacz układu sterowania (H1.6),
- zasilacze silników BLDC (H1.7),
- przełącznik załączania zasilania urządzenia grzewczego (H1.8), sterowany ze sterownika PLC,
- moduł rozszerzeń sterownika PLC (H1.9) odpowiedzialny za obsługę wejść i wyjść cyfrowych do sterownika, który posiada ich ograniczoną liczbę,
- regulatory silników BLDC (H1.10) odpowiedzialne za przetwarzanie sygnałów wysyłanych do silników BLDC, a także zbieranie i obróbkę danych z enkoderów w nich zabudowanych.

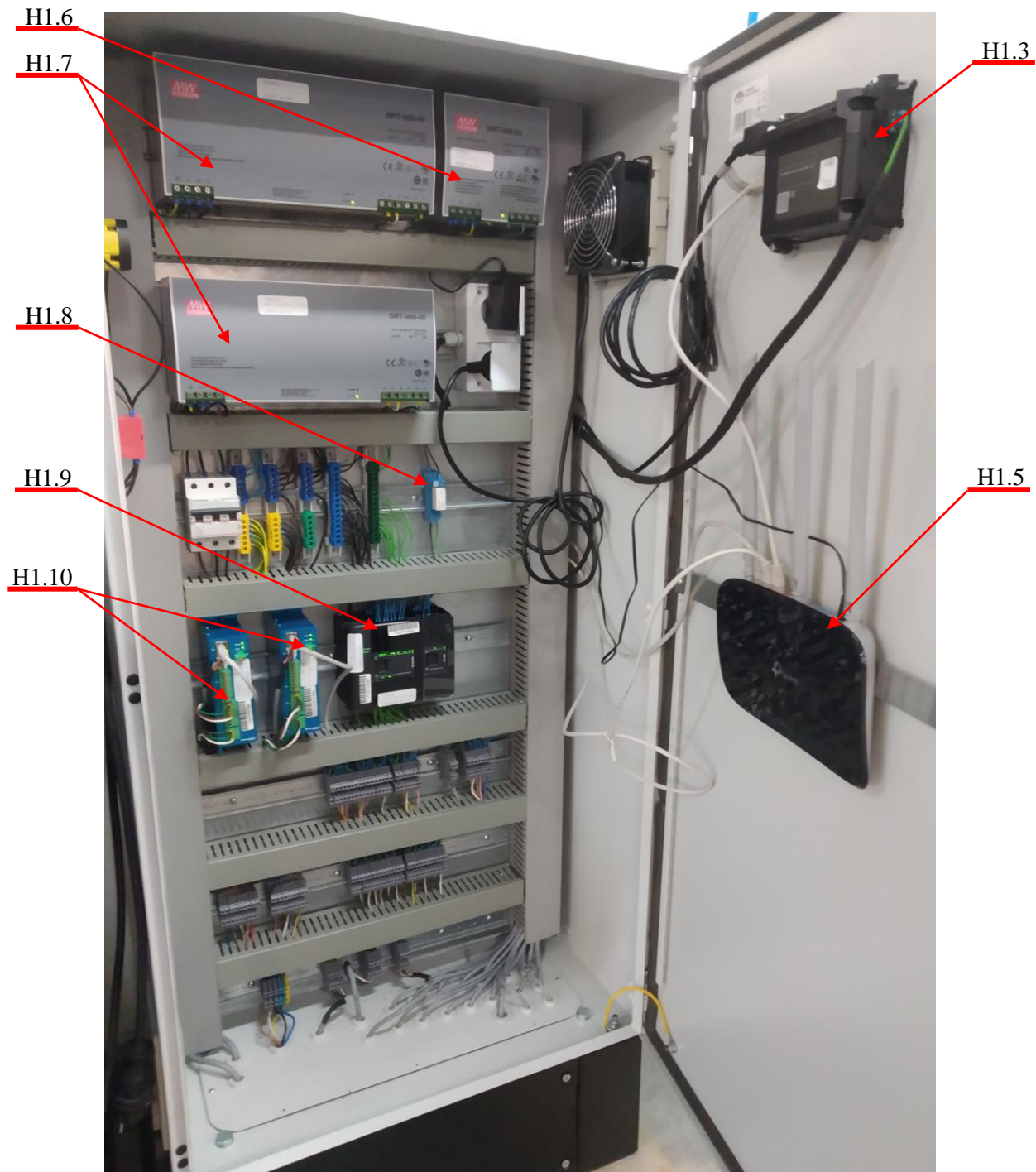
Oprócz tych podzespołów w szafie sterowniczej zlokalizowane jest oprzyrządowanie elektryczne m.in. połączenia lub wyprowadzenia przewodów elektrycznych.

Drugą niezwykle istotną jednostką wchodzącą w skład układu sterowania jest płyta z zestawem komponentów elektropneumatycznych (H2), biorących bezpośredni udział w sterowaniu aktuatorami pneumatycznymi (siłownikami). Część pneumatyczna układu sterowania urządzenia składa się m.in. z:

- zbiorników (H2.1) stanowiących bufor powietrza zasilającego część pneumatyczną urządzenia. Podstawowym ich zadaniem jest zabezpieczenie dostatecznej ilości powietrza zasilającego, tak aby w przypadku awarii źródła zasilania w sprężone powietrze, możliwe było dokończenie aktualnego procesu zgrzewania i powrót wszystkich elementów roboczych do pozycji wyjściowych, bezpiecznych dla osoby obsługującej,

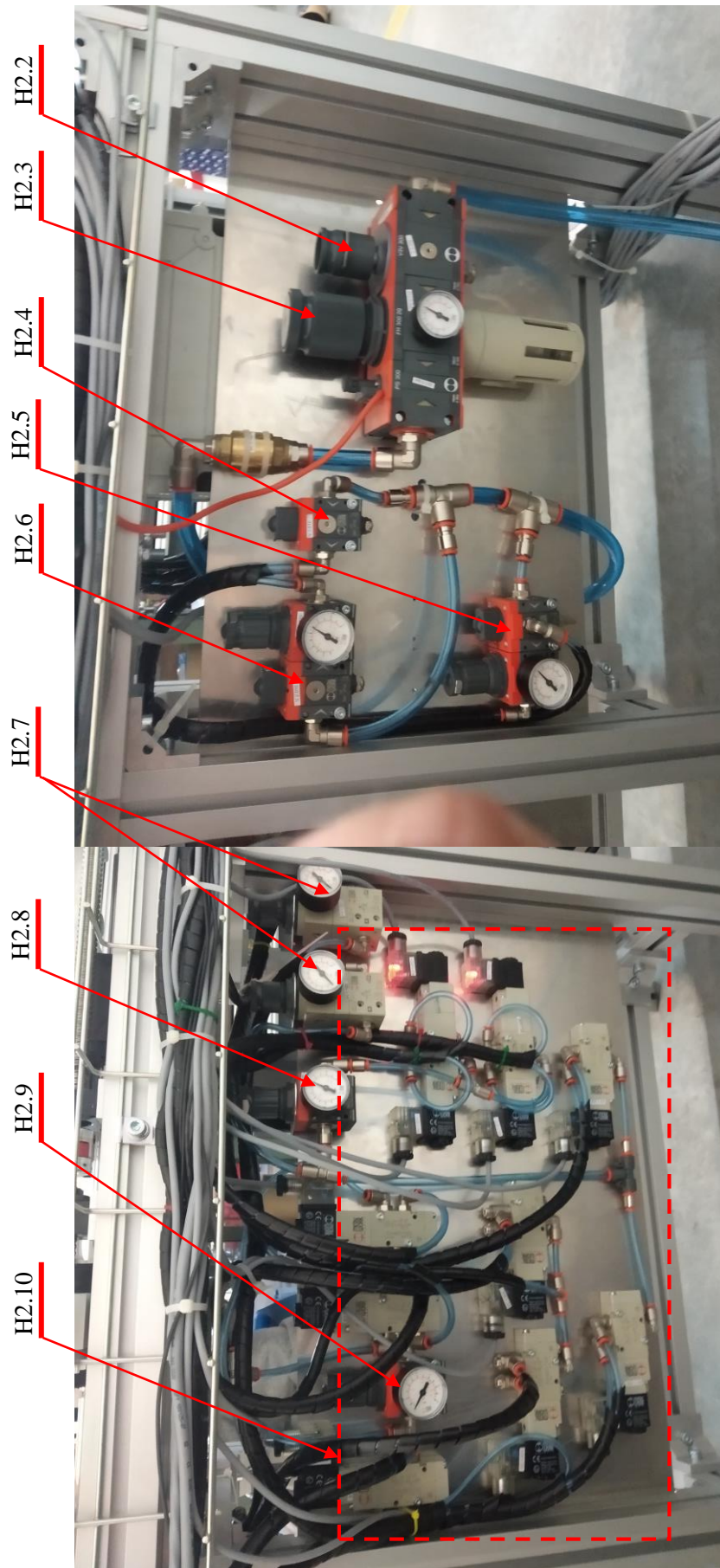


Rys. 146. Widok ogólny na wybrane komponenty elektropneumatycznego układu sterującego zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego (opis w tekście): a) widok ogólny urządzenia z szafą sterującą, b) widok na skrzynię połączeniową zlokalizowaną na korpusie maszyny, c) widok na wyłącznik bezpieczeństwa, d) widok na wyłączniki szafy sterującej, e) ekran główny programu sterującego urządzeniem, f) ekran ustawiania podstawowych parametrów pracy



Rys. 147. Wyposażenie szafy sterowniczej elektropneumatycznego układu sterującego zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, z wyszczególnieniem najważniejszych elementów (opis w tekście)

- głównego zaworu odcinającego sprężone powietrze (H2.2),
- głównego regulatora ciśnienia (H2.3) z filtrem odstożnikowym i manometrem,
- zaworu odcinającego (H2.4) zasilanie w sprężone powietrze dla siłowników odpowiadających za zaciskanie pasa w szczękach chwytaków (C2 i D8),
- zaworu odcinającego z regulatorem ciśnienia (H2.5) obsługującego siłowniki wahadłowe odpowiedzialne za obrót chwytaków (C8 i D14),
- zaworu odcinającego z regulatorem ciśnienia (H2.6) obsługującego siłowniki odpowiedzialne za przemieszczanie urządzenia grzewczego (E6) oraz cięcie pasa (B3.1),



Rys. 148. Widok na płytę z elektropneumatycznymi podzespołami sterującymi zautomatyzowanym urządzeniem zgrzewającym, z wyszczególnieniem najważniejszych elementów (opis w tekście)

- precyzyjnych regulatorów ciśnienia powietrza (H2.7) służących do ustawiania ciśnienia powietrza dla siłowników odpowiadających za zaciskanie pasa w szczękach chwytaków (C2 i D8),
- regulatora ciśnienia (H2.8) obsługującego siłownik modułu napinającego (F3) odpowiedzialny za wychylenie napinacza,
- regulatora ciśnienia (H2.8) obsługującego siłowniki modułu wydającego (G3 i G7),
- elektropneumatycznych zaworów sterujących (H2.10) odpowiedzialnych za sterowanie przepływem powietrza do poszczególnych pneumatycznych elementów wykonawczych.

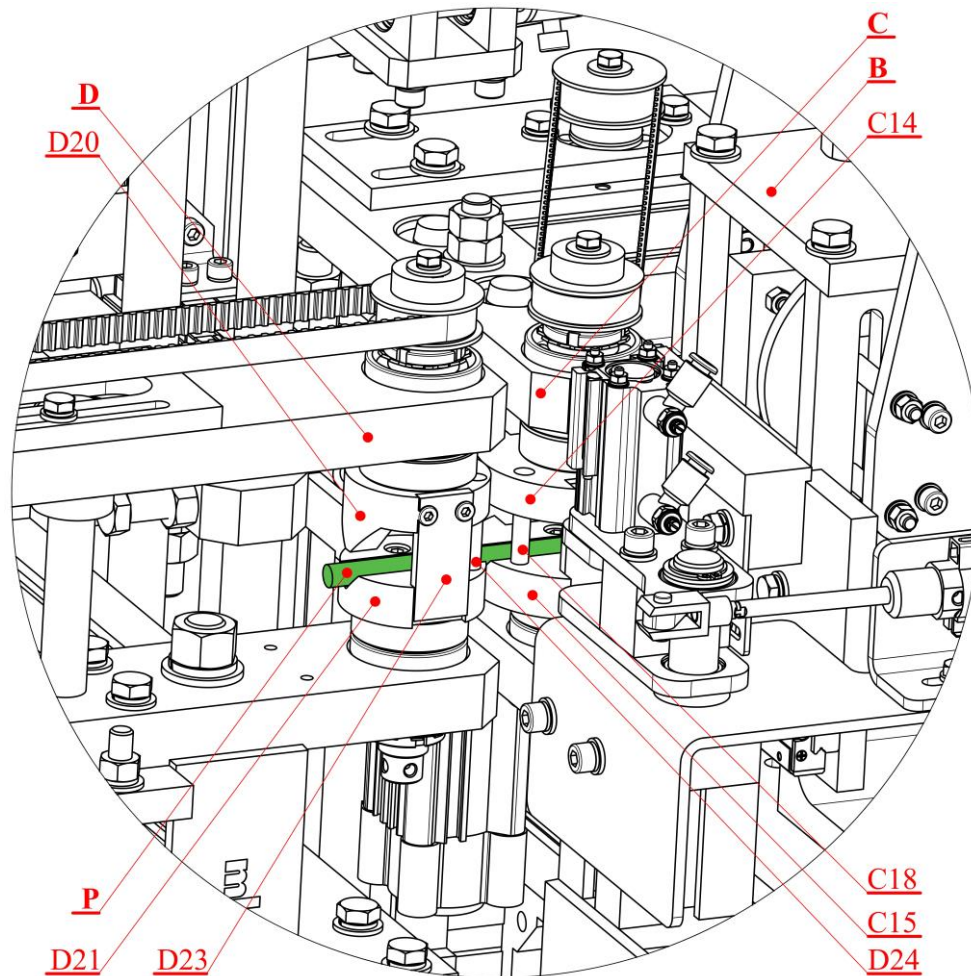
Działanie zaprojektowanego urządzenia, prowadzące do wykonania doczołowego złącza zgrzewanego pasa, można podzielić na kilka etapów ze względu wykonywane operacje (a w szczególności biorące w nich udział podzespoły funkcjonalne):

- dozowanie pasa (Rys. 149),
- uchwycenie końcówki pasa przez chwytak przesuwny (Rys. 150),
- pobieranie pasa przez chwytak przesuwny (Rys. 151 i 152),
- uchwycenie pasa przez chwytak nieprzesuwny (Rys. 153),
- ucięcie pasa (Rys. 153),
- obrót szczęk chwytaków w celu poprawnego zorientowania końcówek pasa (Rys. 153),
- uchwycenie pasa przed moduł wydający (Rys. 153),
- uplastycznianie pasa na gorącej płycie (Rys. 154),
- doprasowanie końcówek pasa do siebie (Rys. 155),
- wydawanie pasa operatorowi lub podanie go do pojemnika (Rys. 156).

Podczas dozowania pasa (Rys. 149) obie pary szczęk chwytaków (D20 i D21 oraz C14 i C15), są do siebie dosunięte w taki sposób, że wchodzi z sobą w kontakt na powierzchniach tworzących. Ze względu na to, że w tym czasie nie ma pomiędzy nimi szczeliny, a wycięcia dolnych szczęk (D21 i C15), w które wprowadzany jest pas (P), są zorientowane dokładnie na wprost siebie, ciągnie (P) może być przesuwane bez nadmiernych oporów i zahaczania się. Podajnik rolkowy (B) w tym czasie dozuje pas (P), poprzez obracanie rolki dozującej za pomocą silnika elektrycznego (B2.1 i B2.4 na rysunku 133), zgodnie z kierunkiem φ_2 . W tym czasie szpula z nawiniętym pasem obraca się swobodnie zgodnie z kierunkiem φ_1 . (Rys. 126). Koniec tej operacji następuje, kiedy pas (P) jest wysunięty poza obszar szczęk chwytaka przesuwne (D20 i D21) na ściśle określonej odległości (jest to parametr nazwany *Wysunięcie Pasa z Chwytaka*, którego wartość wynosi zazwyczaj od 3 mm do 8 mm – zależnie od średnicy materiału – Rys. 146f). Czas oraz prędkość podawania materiału – a przez to długość pasa, która musi być wydana, jest stała i określona w układzie sterowania na podstawie wymiarów poszczególnych części przez które ten pas przechodzi podczas dozowania. W zależności od wartości parametru *Wysunięcie Pasa z Chwytaka* wprowadzonego przez operatora, wielkość ta jest odpowiednio korygowana w programie sterującym.

Uchwycenie końcówki pasa przez chwytak przesuwny (Rys. 150) polega na opuszczeniu szczęki górnej chwytaka przesuwne (D20), zgodnie z kierunkiem s_3' (Rys. 126). Działanie to jest inicjowane za pomocą siłownika pneumatycznego zacisku chwytaka (D8 na Rys. 142). Skutkuje to tym, że płaska powierzchnia

wypustu szczęki górnej (D20) dociska pas (P) do ścian bocznych trójkątnego zagłębienia w szczęce dolnej (D21). W związku z tym, materiał jest podparty w szczękach (D20 i D21) na trzech powierzchniach.



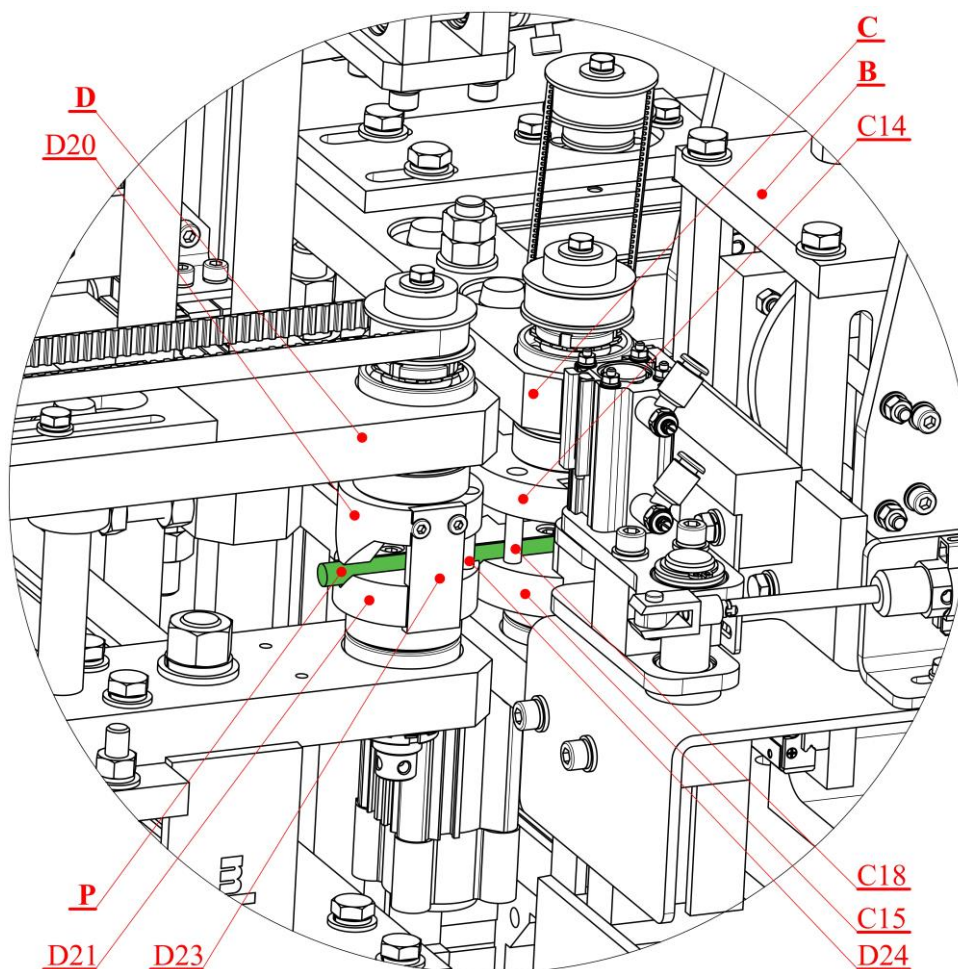
Rys. 149. Widok na zespół chwytaków podczas wydawania pasa przez moduł dozujący, w początkowej fazie operacji przygotowania pasa do zgrzewania (opis w tekście)

Pobieranie pasa przez chwytak przesuwny (Rys. 151 i Rys. 152), polega na przemieszczaniu się tego zespołu (D), z zaciśniętym w szczękach (D20 i D21) pasem (P), zgodnie z kierunkiem s_l (Rys. 126). Działanie to jest inicjowane za pomocą silnika elektrycznego podstawowego układu napędowego (A3.1 na rysunku 130). Należy zauważyć, że w tym samym czasie, ale z prędkością dwukrotnie mniejszą, przemieszcza się moduł napinający (F), osadzony na zespole grzewczym (E). Jednocześnie aktywny jest moduł dozujący (B), którego rolka dozująca (B2.4 na rysunku 133) obraca się podając pas. Prędkość obrotowa rolki dozującej (B2.4 na rysunku 133) oraz liniowa modułu chwytaka przesuwnego (B) są ze sobą skorelowane w taki sposób, że w początkowym okresie dozowania cięgno (P) jest lekko napięte.

W przypadku przygotowywania pasa o długości całkowitej $L_c > 200$ mm, podczas pobierania aktywowany jest napinacz (F), poprzez odpowiednie wysterowanie jego siłownika (F3). Wychylające się płozy (F7), naciskają lekko na cięgno (P) od strony modułu grzewczego (E). Siła tego nacisku jest na tyle niewielka, że nie wywołuje ona zmiany jego kształtu. Należy rozumieć przez to, że napinacz nie powoduje dodatkowego pociągania pasa z modułu dozującego (B). Sytuacja ta zmienia się podczas przygotowywania pasa o długości całkowitej $L_c > 400$ mm. W takim przypadku, w chwili gdy długość aktualnie pobranego

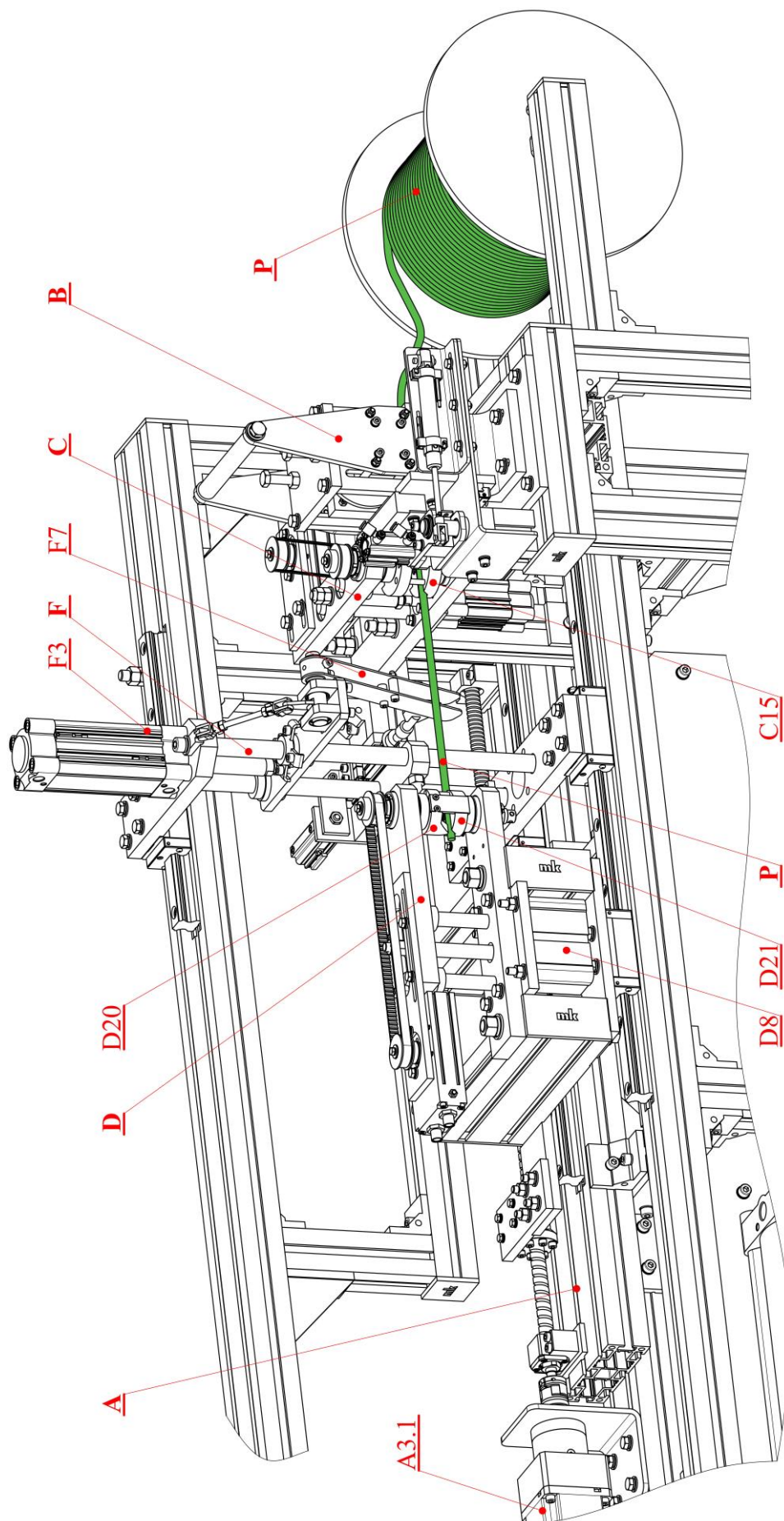
ciągna przekracza tę wartość, moduł chwytaka przesuwne (D) zaczyna zwalniać. Wynika to z ograniczonego skoku roboczego śrubowego układu napędowego (który zapewnia uzyskanie ciągu o długości całkowitej $L_c = 450$ mm, przy przemieszczeniu tego zespołu w skrajne położenie), przez co konieczne jest uniknięcie kolizji elementów roboczych urządzenia. Jednocześnie moduł dozujący (B) kontynuuje wydawanie pasa ze stałą prędkością. W związku z tym, pas umieszczony pomiędzy szczękami (D20 i D21), a rolką dozującą (B2.4 na rysunku 133) staje się luźny. W tym momencie, płozy napinacza (F7) wychylają się nieco dalej, powodując odsunięcie pasa (P) w kierunku zewnętrznym (w stronę operatora). Działanie to ma na celu uniknięcie owijania pasem (P) innych elementów roboczych urządzenia.

Po pobraniu wymaganej ilości pasa (określonej przez operatora parametrem *Długość Końcowa Pasa* – Rys. 146f), moduł dozujący jest zatrzymywany. Na tym kończy się etap pobierania pasa (P).

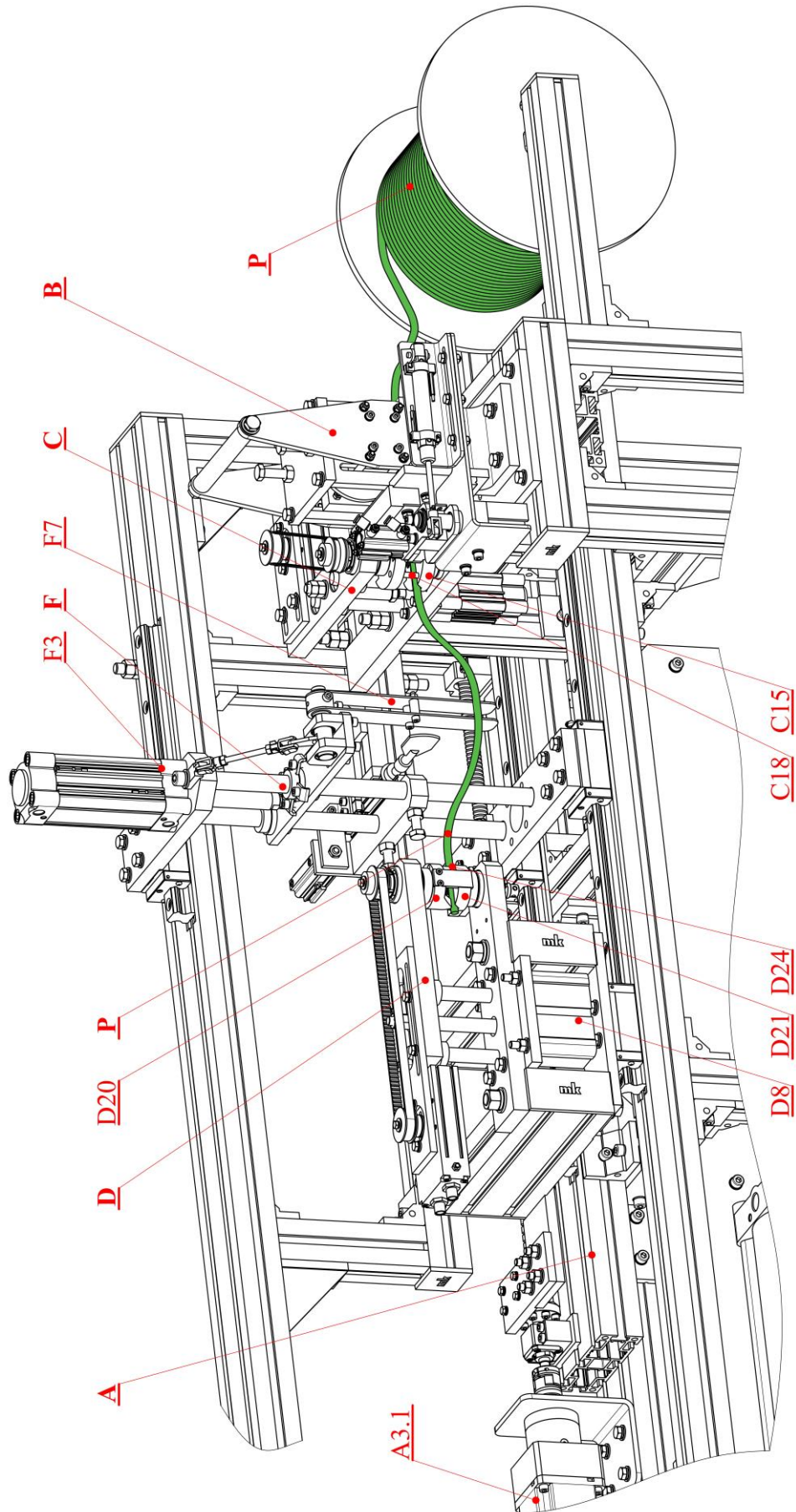


Rys. 150. Widok na zespół chwytaków podczas zaciskania pasa przez elementy modułu chwytaka przesuwne po jego wydaniu w odpowiedniej ilości przez moduł dozujący, w początkowej fazie operacji przygotowania pasa do zgrzewania (opis w tekście)

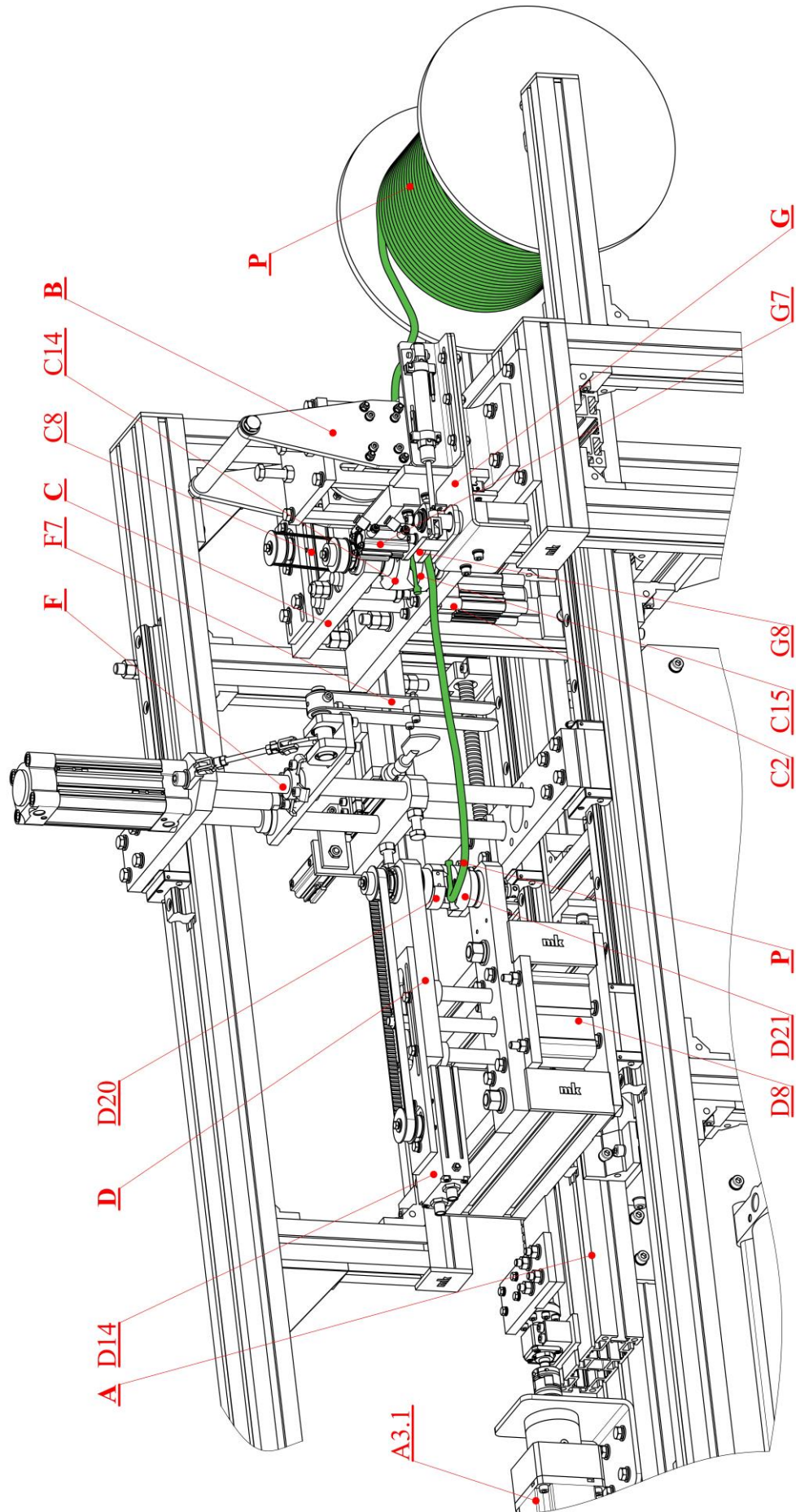
W dalszej kolejności następuje zaciśnięcie pasa w chwytaku nieprzesuwne (Rys. 153). W tym celu, szczeka górna (C14) przemieszcza się zgodnie z kierunkiem s_3'' (Rys. 126). Ruch ten jest inicjowany za pomocą siłownika pneumatycznego (C2). Bezpośrednio po wykonaniu tej czynności, pas (P) jest ucinany przez nóż (B3.5 na rysunku 135), przemieszczający się zgodnie z kierunkiem s_5 (Rys. 126) – prostopadłym do osi pasa (P). Ruch ten jest wywołany za pomocą siłownika pneumatycznego (B3.1 na rysunku 135), przy czym po cięciu nóż pozostaje wysunięty, aż do rozpoczęcia procesu zgrzewania kolejnego pasa.



Rys. 151. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w początkowej fazie pobierania pasa przez moduł chwytaka przesuwającego i jego napinanie przez moduł napinający (opis w tekście)



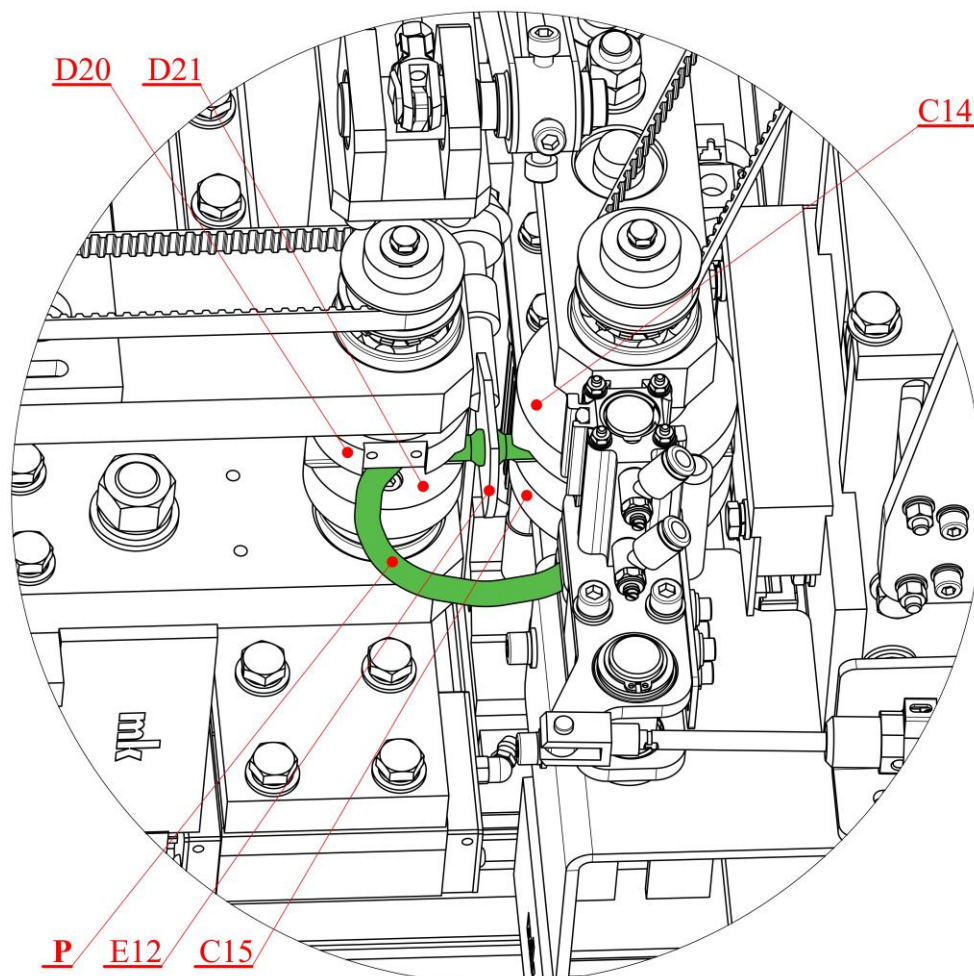
Rys. 152. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w końcowej fazie pobierania pasa przez moduł chwytaka przesuwającego i ochronę przez moduł napinający przed owijaniem się pasa na innych elementach urządzenia, dla przypadku przygotowywania pasa dłuższego niż skok roboczy modułu chwytaka przesuwającego (opis w tekście)



Rys. 153. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w fazie obrotu chwytaków, po pobraniu odpowiedniej ilości pasa, jego ucięciu, a także zabezpieczeniu przez moduł wydający (opis w tekście)

Po ucięciu pasa następuje obrót szczęk chwyteków (D20 i D21 oraz C14 i C15) w celu poprawnego zorientowania zakończeń pasa względem siebie do operacji zgrzewania (Rys. 153). Aby uniknąć nadmiernego rozciągania cięgna (szczególnie w przypadku długości $L_c < 450$ mm) chwytak przesuwny (D) przemieszcza się o 50 mm w stronę chwytaka nieprzesuwne (C), zgodnie z kierunkiem s_1 (Rys. 126), co powoduje jego poluzowanie. W tym czasie płozy napinacza (F7) nadal są wysunięte, co zapobiega owijaniu się pasa na innych elementach roboczych urządzenia. Następnie po tym, za pomocą siłowników pneumatycznych wahadłowych (D14 i C8) inicjowany jest jednoczesny obrót szczęk chwyteków (D20 i D21 oraz C14 i C15) o 180° zgodnie z kierunkami φ_3' i φ_3'' (Rys. 126). Zwrot kierunku ruchu obrotowego jest różny dla obu chwytaków, w taki sposób, aby nadmiar cięgna odkładał się po zewnętrznej stronie urządzenia (zgodnie z działaniem napinacza F). Dzięki temu, końcówki pasa (P) zostają zorientowane swoimi płaskimi powierzchniami dokładnie naprzeciwko siebie, w taki sposób, że te powierzchnie są równoległe, a one same są współosiowe.

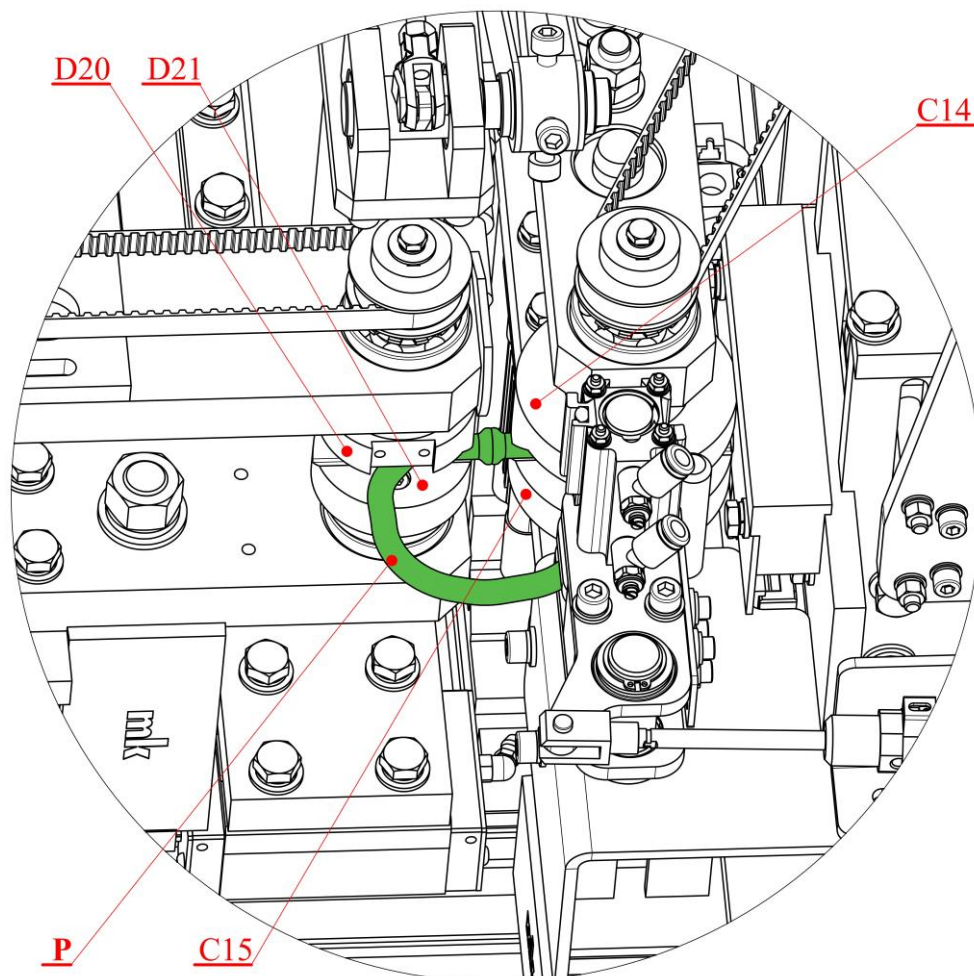
W następnej kolejności zagięta część pasa (P), wystająca ze szczęk chwytaka nieprzesuwne (C14 i C15), znajdująca się pomiędzy płytą dolną ramienia (G5 na rysunku 136), a szczęką zaciskającą (G8 na rysunku 136) modułu wydającego (G), jest zaciskana poprzez ruch szczęki (G8 na rysunku 136) w dół, wywołany uruchomieniem wysuwu tłoczyska siłownika pneumatycznego (G7 na rysunku 136). Działanie to pozwala na późniejsze usunięcie pasa z obszaru roboczego po wykonaniu złącza zgrzewanego.



Rys. 154. Widok na zespół chwytaków podczas uplastyczniania pasa na gorącej płycie (opis w tekście)

W dalszej kolejności rozpoczyna się proces uplastyczniania materiału na gorącej płycie (Rys. 154). W tym celu urządzenie grzewcze (E12), z rozgrzaną wcześniej płytą, wysuwane jest zgodnie z kierunkiem s_4 (Rys. 126), w wyniku uruchomienia wysuwu tłoczyska siłownika pneumatycznego (E6 na rysunku 143). Po tej operacji gorąca płyta znajduje się pomiędzy zakończeniami pasa, w odległości równej połowie dystansu pomiędzy nimi – co wynika z konfiguracji podstawowego układu napędowego urządzenia. Następnie silnik elektryczny podstawowego układu napędowego (A3.1 na rysunku 130) rozpoczyna przemieszczanie modułu chwytaka przesuwne (D) oraz zespołu grzewczego (E) w kierunku chwytaka nieprzesuwne (C), z prędkością uplastyczniania v_{pl} (w programie sterującym jest to parametr nazwany *Prędkość Docisku Pasa do Lutownicy* – Rys. 146f). Jest to wartość określająca względną prędkość pomiędzy gorącą płytą (E12), a szczękami chwytaka nieprzesuwne (C14 i C15) lub pomiędzy szczękami chwytaka przesuwne (D20 lub D21), a gorącą płytą (E12). W tym czasie gorąca płyta (E12) zbliża się do zakończenia pasa zamontowanego w szczękach chwytaka nieprzesuwne (C14 i C15), a zakończenie pasa zamocowane w szczękach chwytaka przesuwne (D20 i D21) do gorącej płyty (E12).

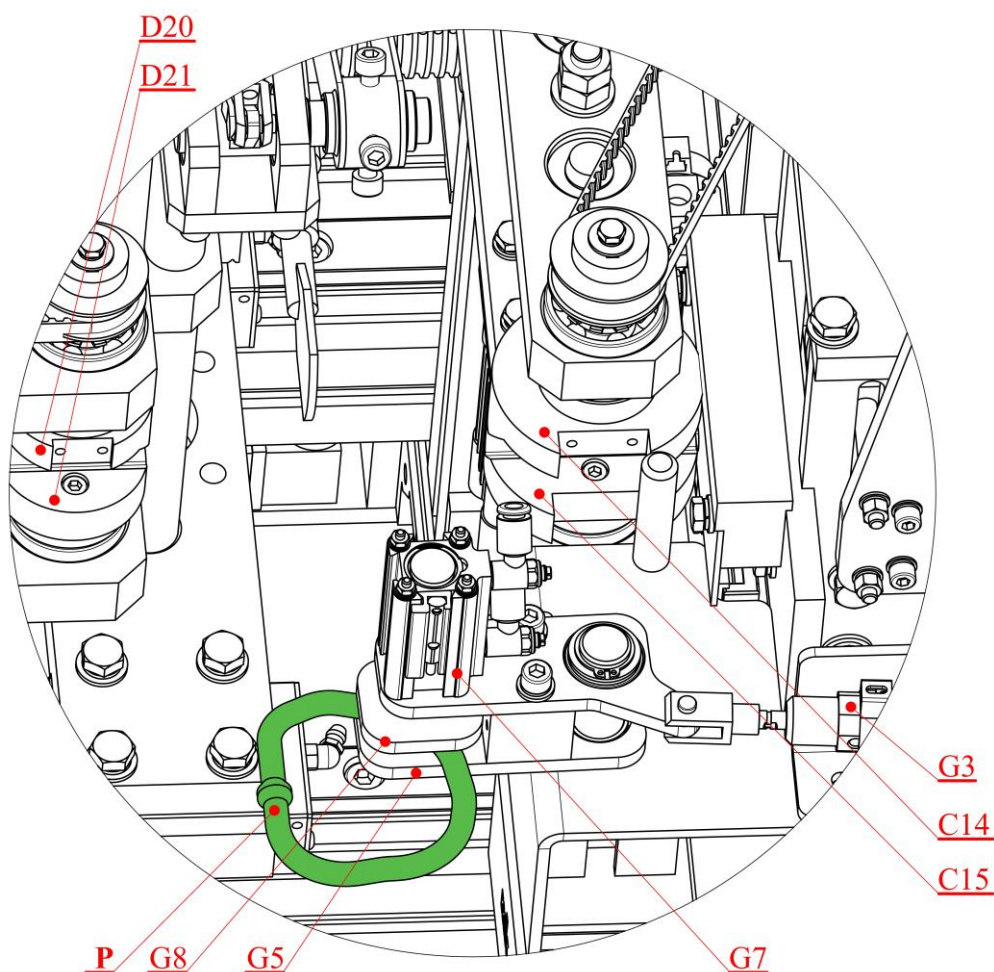
W czasie gdy odległość pomiędzy szczękami chwytaków (D20 i D21 oraz C14 i C15) jest mniejsza niż 40 mm, napinacz pasa (F) wyłącza się (Rys. 145b). Odbywa się to poprzez wysterowanie siłownika napinacza (F3) w kierunku wsunięcia tłoczyska, tak aby podniesiona została płyta przesuwna (F1). W wyniku tego, płozy napinacza (F7) podnoszą się ku górze, dzięki czemu nie są w kursie kolizyjnym z chwytakami.



Rys. 155. Widok na zespół chwytaków podczas doprasowania końcówek pasa (opis w tekście)

Po zrealizowaniu przemieszczenia o określonej wartości, czyli pokonaniu odległości uplastycznienia a_{pl} (w programie sterującym jest to parametr nazwany *Długość Przetopu* – Rys. 146f), układ napędowy zatrzymuje się, co kończy uplastycznianie materiału. Bez zbędnej zwłoki czasowa gorąca płyta jest wycofywana z obszaru roboczego poprzez ruch powrotny, inicjowany wsunięciem tłoczyska siłownika (E6 na Rys. 143). Pokrycie powierzchni gorącej płyty materiałem o niskim współczynniku tarcia ślizgowego w kontakcie z polimerem powoduje, że wycofanie gorącej płyty w kierunku prostopadłym do uplastycznionych końcówek pasa nie wywołuje ich nadmiernego odkształcenia.

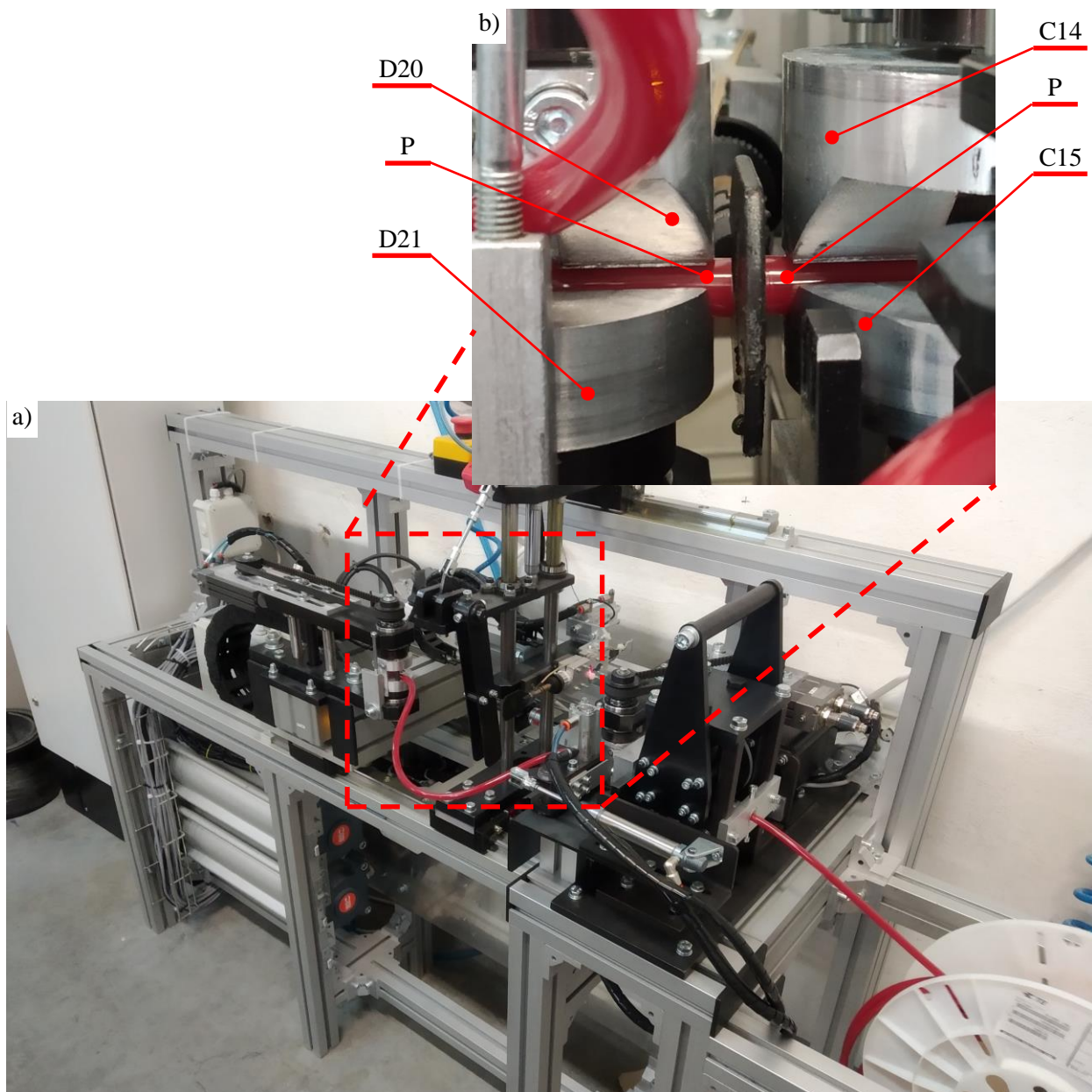
Kolejnym etapem procesu jest doprasowanie końcówek pasa (Rys. 155). W tym celu silnik podstawowego układu napędowego (A3.1 na rysunku 130) rozpoczyna przemieszczanie modułu chwytaka przesuwanego (D) z prędkością v_{dp} w kierunku modułu chwytaka nieprzesuwanego (C). Po pokonaniu odległości wynikającej z grubości gorącej płyty (około 2 mm), uplastycznione zakończenia pasa wchodzi ze sobą w kontakt. Skutkuje to rozpoczęciem interakcji fizycznych i reakcji chemicznych pomiędzy makromolekułami polimeru. Po pokonaniu ustalonej przez operatora odległości a_{dp} (w programie sterującym jest to parametr nazwany *Wartość Spęczenia* – Rys. 146f), chwytak przesuwny zatrzymuje się. Stan bezruchu, z dociśniętymi do siebie zakończeniami pasa, utrzymywany jest przez wprowadzony przez operatora czas chłodzenia złącza t_{ch} (w programie sterującym jest to parametr nazwany *Czas Chłodzenia* – Rys. 146f). Na tym kończy się proces zgrzewania doczołowego.



Rys. 156. Widok na moduł odbierający podczas wydawania pasa po procesie zgrzewania (opis w tekście)

Ostatnim działaniem wykonywanym przez zautomatyzowane urządzenie zgrzewające jest wydawanie pasa (Rys. 156). W tym celu, szczęki górne (D20 i C14) podnoszą się w wyniku przesterowania siłowników pneumatycznych zacisku pasa (D8 i C2). Dodatkowo, po wykonaniu tej czynności, moduł chwytaka przesuwne (D) wykonuje ruch w tył – w kierunku oddalenia się od modułu chwytaka nieprzesuwne (C). Działanie to ma na celu ułatwienie ewentualnego odklejenia się zastygłej spoiny od szczęk chwytaków. Następnie po tym uruchamiany jest siłownik wydający (G3) w zakresie wsuwania tłoczyska, co powoduje obrót ramienia wydającego (G4, G5, G6, G7 i G8) o 90°. Po osiągnięciu skrajnej pozycji, siłownik zaciśkający (G7) wsuwa swoje tłoczysko, co powoduje podniesienie szczęki (G8). W tym momencie pas może być odebrany przez operatora lub spada na dół pod wpływem siły ciężkości, np. do pojemnika.

Fotografię uruchomionego urządzenia, podczas zgrzewania poliestrowego pasa o średnicy $d = 8$ mm, w dwóch fazach pracy przedstawiono na Rys. 157.



Rys. 157. Zautomatyzowane urządzenie zgrzewające podczas zgrzewania poliestrowego pasa: a) widok ogólny podczas dozowania pasa, b) zbliżenie na zespół zgrzewający podczas uplastyczniania materiału (opis w tekście)

6.5. Przykład wdrożenia wyników wykonanych prac badawczych

Głównym celem prowadzonych prac badawczych (rozdział 4 i 5) było uzyskanie wytycznych konstrukcyjnych i parametrów technologicznych procesu, na potrzeby zaprojektowania zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania pasów. Przykładowe wdrożenie wyników tych działań przedstawić można na podstawie projektowania podstawowego elektromechanicznego układu napędowego urządzenia, odpowiedzialnego za wprawianie w ruch modułu chwytaka przesuwnego oraz modułu grzewczego (Rys. 158). Studium przypadku będzie stanowić jedno z podstawowych zadań podczas projektowania tego mechanizmu, którym jest określenie zapotrzebowania na moc podstawowego źródła napędu (w tym przypadku silnik elektryczny BLDC – A3.1 na rysunku 130), na potrzeby operacji uplastyczniania materiału pasa. W tym celu, analizie zostanie poddana struktura układu napędowego, ewentualne straty mechaniczne w nim zachodzące oraz wartość siły technologicznej niezbędnej do uplastycznienia tworzywa.

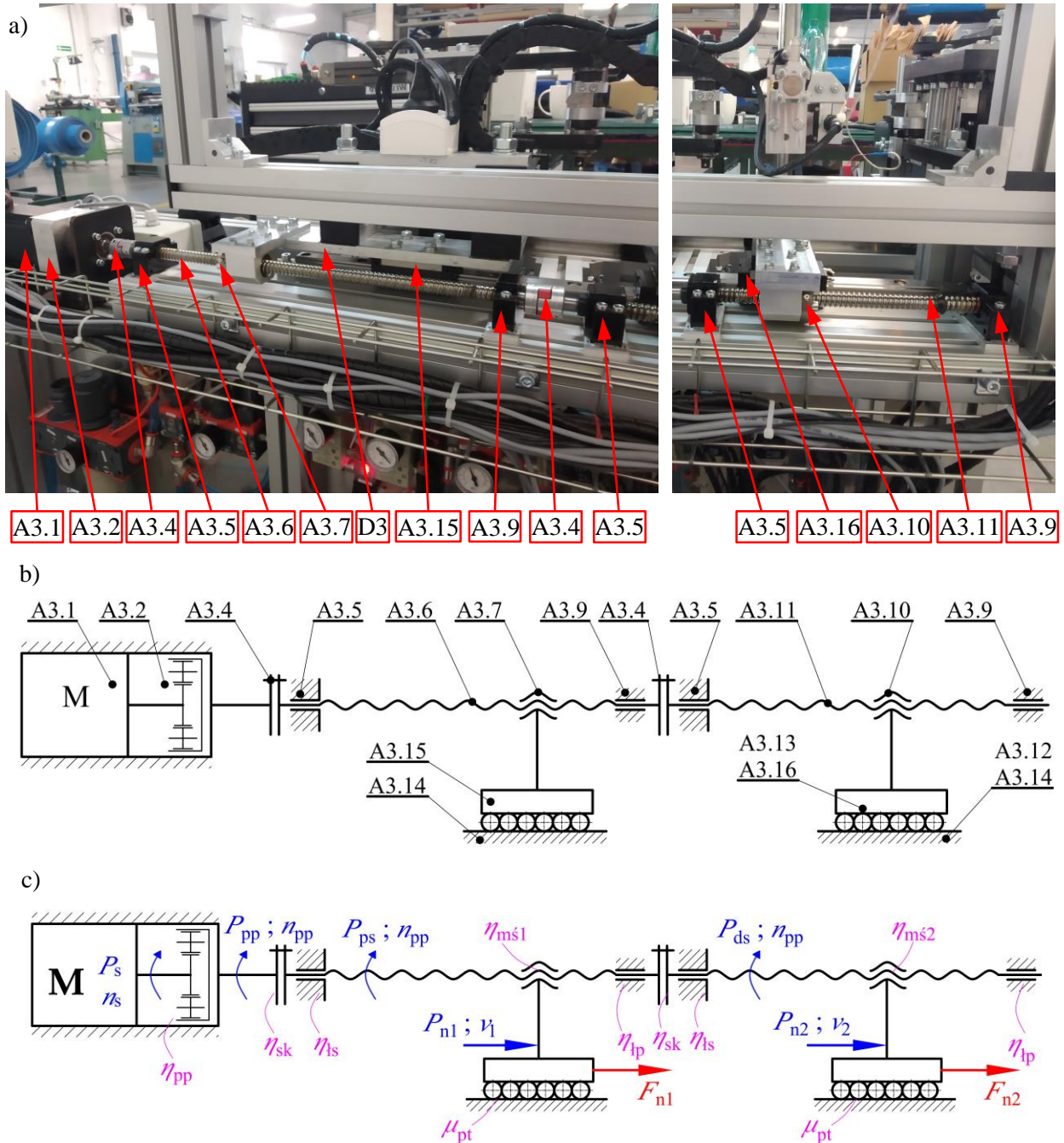
Podstawową cechą konstrukcyjną układu napędowego (Rys. 130 oraz 158) jest możliwość uzyskania założonej zależności pomiędzy prędkościami liniowymi nakrętek mechanizmów śrubowo-tocznych (6.2) napędzających: zespół chwytaka przesuwnego (A3.7) oraz moduł grzewczy (A3.10). Korelacja ta powinna umożliwiać jednoczesne uplastycznienie obu końcówek pasa na gorącej płycie. Aby uzyskać taki efekt, skok zwojów obu śrub tocznych związany jest ze sobą następującą zależnością:

$$p_1 = 2 \cdot p_2, \quad (6.3)$$

gdzie: p_1 – skok zwoju śruby tocznej modułu chwytaka przesuwnego (A3.6), p_2 – skok zwoju śruby tocznej modułu grzewczego (A3.11). Zakładając jednakową prędkość obrotową obu śrub (n_{pp} – prędkość obrotowa na wyjściu z przekładni planetarnej A3.2 – Rys. 158c), zależność 6.2 może być utrzymana.

Podstawowe elementy zaprojektowanego układu napędowego podczas swojego działania wykazują określoną sprawność mechaniczną. W związku z tym, podczas analizy struktury kinematycznej mechanizmu, pod kątem zapotrzebowania na moc, pod uwagę wziąć należy następujące straty energii:

- w przekładni planetarnej (A3.2) o sprawności η_{pp} ,
- na sprzęgle kłowym (A3.4) o sprawności η_{sk} ,
- w łożyskach kulkowych skośnych (A3.5), ze względu na tarcie toczne, przy ogólnej sprawności tego węzła η_{ls} ,
- w łożyskach kulkowych poprzecznych (A3.9), ze względu na tarcie toczne, przy ogólnej sprawności tego węzła η_{lp} ,
- w mechanizmie śrubowym modułu chwytaka przesuwnego (A3.6 i A3.7), przy ogólnej sprawności tego mechanizmu $\eta_{m\acute{s}1}$,
- w mechanizmie śrubowym modułu grzewczego (A3.10 i A3.11), przy ogólnej sprawności tego mechanizmu $\eta_{m\acute{s}2}$,
- na prowadzeniu modułu chwytaka przesuwnego (A3.14 i A3.15), przy założeniu współczynnika tarcia tocznego μ_{pt} ,
- na prowadzeniu modułu grzewczego: dolnym (A3.14 i A3.16) oraz górnym (A3.12 i A3.13), przy założeniu współczynnika tarcia tocznego μ_{pt} .



Rys. 158. Podstawowy elektromechaniczny układ napędowy zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących (opis oznaczeń w tekście): a) fotografia układu napędowego zamontowanego we wdrożonym urządzeniu, b) kinematyczny schemat strukturalny z oznaczeniem kluczowych komponentów, c) kinematyczny schemat strukturalny z oznaczeniem podstawowych wielkości mechanicznych charakteryzujących jego pracę

Po uwzględnieniu wymienionych elementów, w których występują straty energii w wyniku tarcia (ich sprawności nie są równe 100%), działanie projektowanego układu napędowego może być scharakteryzowane za pomocą następujących parametrów mechanicznych:

- prędkości obrotowej wału silnika elektrycznego n_s , która za pomocą reduktora planetarnego zredukowana zostaje do wartości n_{pp} i jest taka sama dla obu mechanizmów śrubowych (A3.6 i A3.7 oraz A3.10 i A3.11),
- prędkości liniowej v_1 wózków prowadzących moduł chwytaka przesuwne (A3.15),

- prędkości liniowej v_2 wózków prowadzących moduł grzewczy (A3.13 i A3.16),
- mocy mechanicznej P_s w ruchu obrotowym, na wale wyjściowym silnika elektrycznego (A3.1),
- mocy mechanicznej P_{pp} w ruchu obrotowym, na wale wyjściowym przekładni planetarnej (A3.2),
- mocy mechanicznej P_{ps} w ruchu obrotowym, na śrubie modułu chwytaka przesuwne (A3.6),
- mocy mechanicznej P_{ds} w ruchu obrotowym, na śrubie modułu grzewczego (A3.11),
- mocy mechanicznej P_{n1} w ruchu liniowym, na module chwytaka przesuwne (D),
- mocy mechanicznej P_{n2} w ruchu liniowym, na module grzewczym (E),
- sił napędowych F_{n1} oraz F_{n2} odpowiednio na module chwytaka przesuwne (D) oraz na module grzewczym (E).

W celu poprawnego określenia zapotrzebowania na moc projektowanego układu napędowego uwzględnić należy następujące czynniki:

- wartości sprawności poszczególnych komponentów składowych,
- przestrzenny rozkład sił w układzie napędowym, co wynika z tego, że miejsce w którym działają siły obciążenia, nie znajdują się w jednej płaszczyźnie z siłami napędowymi. Z związku z tym konieczne będzie uwzględnienie odległości pomiędzy poszczególnymi węzłami konstrukcyjnymi,
- masy poszczególnych podzespołów, jako jedno z kluczowych obciążeń układu napędowego.

W związku z tym, szacowanie zapotrzebowania na moc układu napędowego wymaga przeprowadzenia następujących działań:

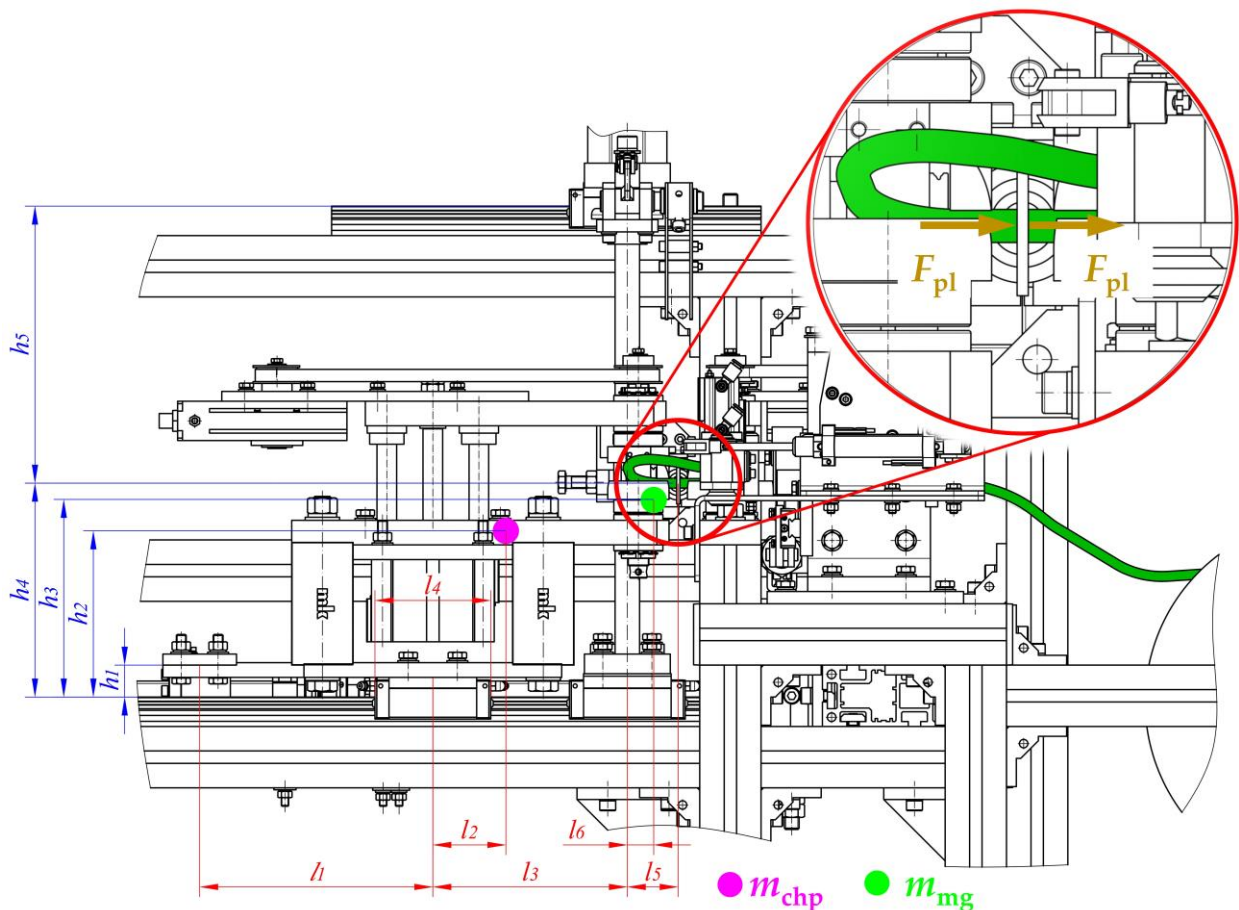
- obliczeń pozwalających na określenie zależności pomiędzy wartościami sił napędowych, które należy dostarczyć do kluczowych członów wykonawczych mechanizmu (F_{n1} oraz F_{n2}) oraz minimalną wymaganą mocą silnika elektrycznego (P_s),
- obliczeń pozwalających na określenie wpływu siły technologicznej podczas uplastyczniania materiału pasa (F_{p1}) na siły napędowe na poszczególnych członach wykonawczych (F_{n1} oraz F_{n2}),
- modelowania procesu uplastyczniania, w celu pozyskania matematycznej zależności opisującej wartość siły uplastyczniania F_{p1} od parametrów technologicznych procesu, na bazie przeprowadzonych prac badawczych (rozdział 4 i 5).

W celu wyznaczenia stanu obciążenia układu napędowego urządzenia, opisanego za pomocą niezbędnych wartości siły napędowej (F_{n1} oraz F_{n2}), koniecznym jest rozpatrzenie stanu obciążenia poszczególnych węzłów konstrukcyjnych, a w szczególności elementów prowadzących moduł chwytaka przesuwne oraz grzewczy. Wynika to z tego, że elementy prowadzące przenoszą wszystkie obciążenia, których kierunek nie jest równoległy do osi szyn prowadzących, a więc po uwzględnieniu tarcia, powodują one dodatkowe opory przemieszczania. Ze względu na przestrzenne rozmieszczenie sił w analizowanej konstrukcji, a także ich trójwymiarowy charakter, przy obliczeniach należy wziąć pod uwagę następujące parametry konstrukcyjne (Rys. 159-161):

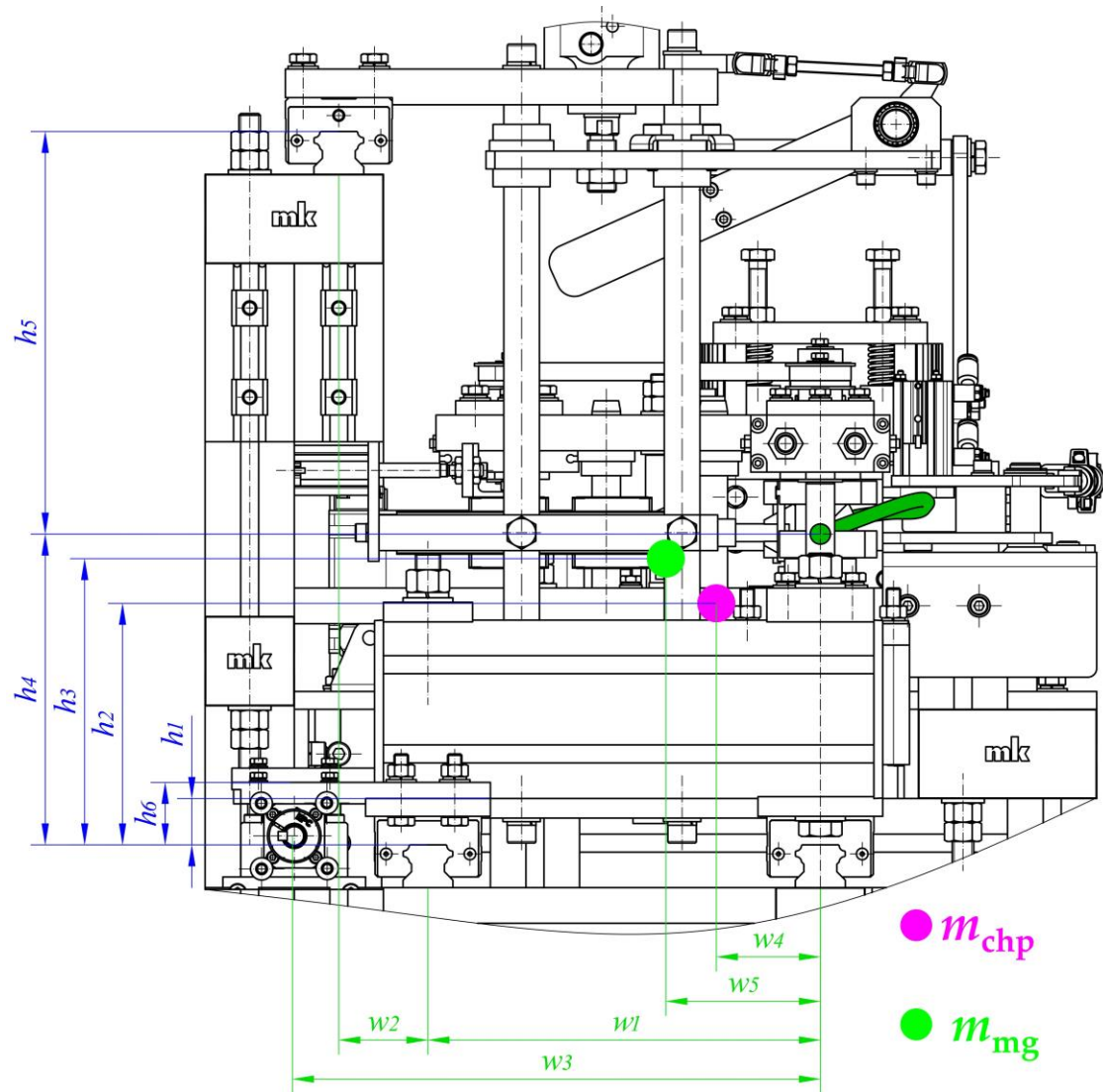
- odległości pomiędzy wózkami prowadnic liniowych ($h_4 + h_5$, l_3 , w_1 , w_2),
- rozmiar, a w konsekwencji długość wózków prowadzących (l_4) – wielkość ta jest taka sama dla wszystkich z nich: zarówno prowadnicy dolnej jak i górnej (ponieważ wszystkie wózki są identyczne),

- odległości pomiędzy miejscami, w których oddziałują siły technologiczne podczas uplastyczniania, a punktami mocowania wózków prowadzących ($h_4, h_5, l_5, l_5 + l_3, w_1, w_1 + w_2$),
- odległości między punktami przyłożenia siły napędowej, a wózkami ($h_1, h_6, l_1, w_3, w_3 - w_1$),
- wartości masy modułu chwytaka przesuwnego m_{chp} oraz modułu grzewczego m_{mg} ,
- odległości pomiędzy środkiem ciężkości zespołu chwytaka przesuwnego, a poszczególnymi wózkami go prowadzącymi (h_2, l_2, w_4),
- odległości pomiędzy środkiem ciężkości zespołu grzewczego, a poszczególnymi wózkami prowadzącymi go podpierającymi (h_3, l_6, w_5).

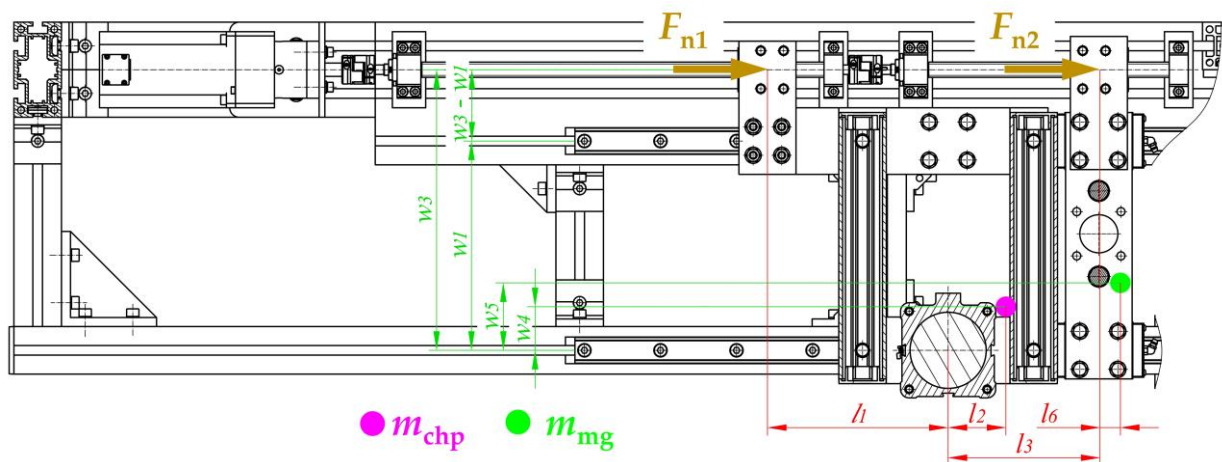
Wymienione parametry geometryczne zespołu, a także wartość poszczególnych sprawności oraz współczynników tarcia, pozwolą na wyznaczenie modelu matematycznego opisującego zależność siły niezbędnej do napędu obu modułów (F_{n1} oraz F_{n2}) od wartości siły niezbędnej do uplastycznienia pasa (F_{pl}), co jest głównym celem tego działania. W następnej kolejności wyznaczona wartość sił napędowych (F_{n1} oraz F_{n2}) będzie przeliczona na minimalną wartość mocy silnika elektrycznego P_s , niezbędną do napędzania mechanizmu.



Rys. 159. Widok poziomy w płaszczyźnie równoległej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwnego, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, F_{pl} – siła uplastyczniająca, $l_1...l_6$ – poszczególne wartości długości, $h_1...h_5$ – poszczególne wartości wysokości



Rys. 160. Widok pionowy w płaszczyźnie prostopadłej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwającego, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, $h_1...h_5$ – poszczególne wartości wysokości, $w_1...w_5$ – poszczególne wartości szerokości



Rys. 161. Przekrój poziomy w płaszczyźnie równoległej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwającego, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, $l_1...l_6$ – poszczególne wartości odległości, $w_1...w_5$ – poszczególne wartości szerokości, F_{n1} – siła napędowa modułu chwytaka przesuwającego, F_{n2} – siła napędowa modułu grzewczego

W celu określenia zapotrzebowania na moc w aspekcie doboru silnika elektrycznego (A3.1 na Rys. 130), konieczne jest wykonanie obliczeń inżynierskich, na potrzeby których znane muszą być poszczególne parametry geometryczne zespołów urządzenia (Rys. 159- 161). Oczywiście jest, że obliczenia projektowe wykonywane są przed wdrożeniem maszyny, dlatego na ich potrzeby konieczne jest poczynienie pewnych założeń konstrukcyjnych dotyczących doboru komponentów oraz wymiarów. W analizowanym przypadku, w pierwszej kolejności przygotowano więc model 3D konstrukcji, z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy. Na bazie wcześniejszych doświadczeń projektowych, przyjęto więc następujące – handlowo dostępne – komponenty składowe podstawowego układu napędowego:

- silnik elektryczny BLDC (seria DB) z zabudowaną na korpusie przekładnią planetarną (seria GP) firmy Nanotec [225],
- sprzęgło kłowe z wkładką elastomerową (seria Rotex GS) firmy KTR [226],
- mechanizm śrubowo-toczny – śruba toczna z nakrętką kulową (typ FSD z obudową typu GFD) firmy Hiwin [227]. Wstępnie parametry geometryczne śruby zostały przyjęte na podstawie zgrubnych obliczeń ze względu na jej wyboczenie. Śruba napędowa modułu chwytaka przesuwne go ma średnicę $d_1 = 16$ mm i skok $p_1 = 10$ mm, natomiast śruba napędu modułu grzewczego ma tą samą średnicę $d_2 = d_1$, ale skok $p_2 = 5$ mm, co pozwala spełnić poczynione założenia (6.3),
- łożysko kulkowe skośne z oprawą (typ SFA) firmy Hiwin [227],
- łożysko kulkowe poprzeczne z oprawą (typ SLA) firmy Hiwin [227],
- prowadnice liniowe (zestawy wózek + szyna profilowa) z kulkami stanowiącymi elementy toczne (typ MSA) firmy PMI [228].

Po przygotowaniu modelu 3D konstrukcji zmierzono wymagane wymiary geometryczne (Rys. 159-161), których wartości przedstawiono w Tab. 43. Wyznaczono również kluczowe masy poszczególnych zespołów, które wynoszą:

- przybliżona masa modułu chwytaka przesuwne go $m_{chp} = 22$ kg,
- przybliżona masa modułu grzewczego $m_{mg} = 11$ kg.

Tab. 43. Wymiary zautomatyzowanego urządzenia zgrzewające go, dotyczące modułu chwytaka przesuwne go oraz grzewczego do obliczeń zapotrzebowania mocy (Rys. 159, Rys. 160 oraz Rys. 161)

Wymiar	Wartość [mm]	Wymiar	Wartość [mm]	Wymiar	Wartość [mm]
h_1	26	l_1	155	w_1	220
h_2	115	l_2	8	w_2	50
h_3	255	l_3	158	w_3	295
h_4	240	l_4	72	w_4	70
h_5	160	l_5	40	w_5	133
h_6	33	l_6	3		

Na podstawie danych katalogowych udostępnionych przed producentów poszczególnych części [225-228], przyjęto również szacowane wartości sprawności poszczególnych komponentów:

- przekładnia planetarna $\eta_{pp} = 0,95$,
- sprzęgło kłowe $\eta_{sk} = 0,98$,

- łożysko kulkowe skośne $\eta_{ls} = 0,99$,
- łożysko kulkowe promieniowe $\eta_{lp} = 0,99$,
- mechanizm śrubowo-toczny o skoku $p_1 - \eta_{ms1} = 0,92$,
- mechanizm śrubowo-toczny o skoku $p_2 - \eta_{ms2} = 0,85$,
- współczynnik tarcia w prowadnicy liniowej tocznej $\mu_1 = 0,005$.

Poczynione założenia konstrukcyjne umożliwią wykonanie obliczeń zapotrzebowania na moc dla projektowanego układu napędowego. W tym celu należy jednakże wziąć jeszcze pod uwagę stan obciążenia, analizowany tym razem pod kątem dynamiki poruszania się elementów składowych tej konstrukcji.

Zapotrzebowanie na moc podstawowego elektromechanicznego układu napędowego należy rozumieć, jako minimalną moc, którą powinien posiadać silnik elektryczny (A3.1 na rysunku 130) w celu zapewnienia odpowiednich parametrów ruchu zespołu chwytaka przesuwnego oraz zespołu grzewczego (D i E na rysunku 127). W ogólnym przypadku obliczenia zapotrzebowania na moc układu napędowego maszyny technologicznej można przeprowadzić na wiele sposobów. W wielu przypadkach wykorzystywane są metody obliczeniowe związane z analizą dynamiki ruchu, szczególnie równania Lagrange'a drugiego rodzaju [229-231]. Jest to spowodowane między innymi dużą dynamiką działania niektórych mechanizmów, co jest naturalne dla takich rozwiązań jak:

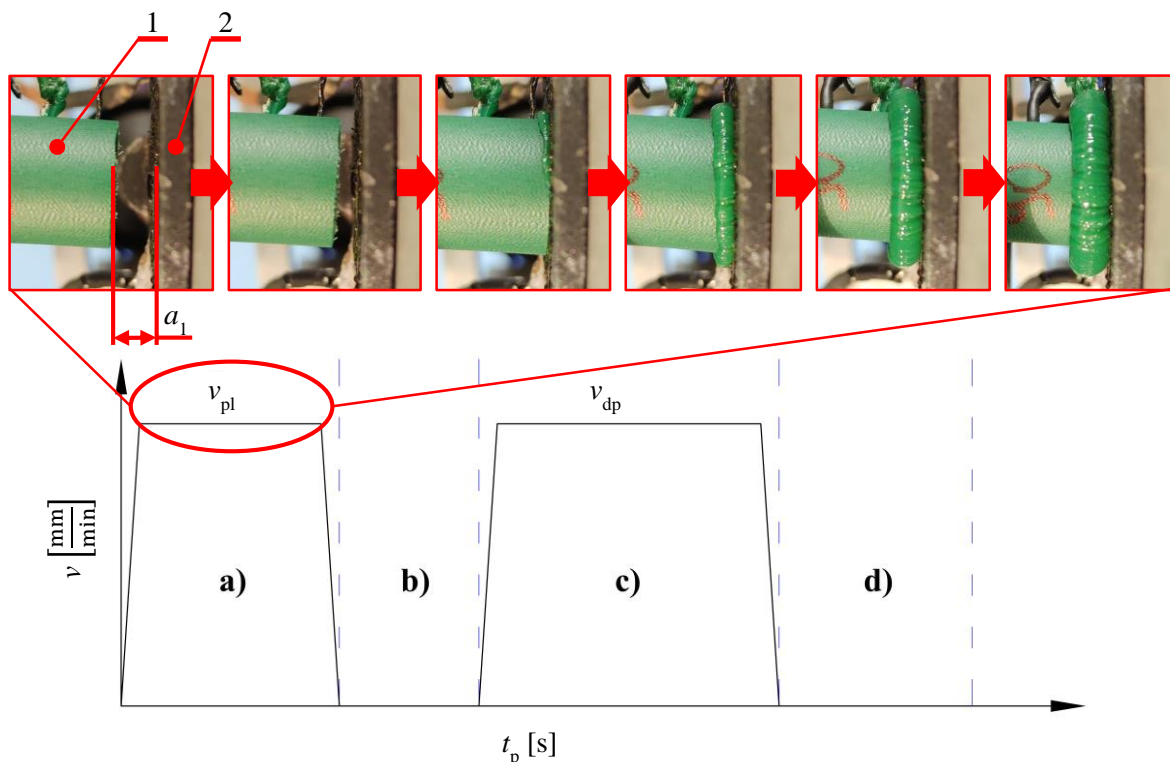
- mechanizmy urządzeń technologicznych pracujących z dużymi prędkościami obrotowymi lub posuwowymi, które muszą być osiągnięte w krótkim czasie od rozruchu [229],
- urządzenia mobilne, które muszą być zdolne do pokonywania różnego rodzaju przeszkód i poruszające się z względnie dużymi prędkościami, osiągając przy tym względnie duże przyspieszenia i opóźnienia [230],
- mechanizmy stabilizujące, szczególnie z regulacją nadążną [231].

Przypadek układu napędowego zautomatyzowanej zgrzewarki pasów wydaje się być zgoła odmienny. Osiągane prędkości przemieszczenia się komponentów (np. zespołu chwytaka przesuwnego) są niewielkie (rzędu kilku milimetrów na minutę). Dodatkowo, w tym przypadku nie określono restrykcyjnych wymagań związanych z czasem rozpędzania i hamowania, w początkowej i końcowej fazie ruchu mechanizmów.

Na podstawie opracowanej metody realizacji procesu zgrzewania (Rys. 82) i wdrożonego rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia (Rys. 127), przebieg procesu zgrzewania można opisać za pomocą cyklogramu (Rys. 162), uwzględniającego zależność prędkości v (v_{pl} lub v_{dp}) osiągniętych podczas operacji, od czasu trwania procesu t_p .

Podczas realnego procesu zgrzewania, w rozpatrywanym zakresie tej operacji, czyli podczas uplastyczniania materiału (a), prędkość uplastyczniania v_{pl} jest stała w szerokim zakresie czasu technologicznego t_p przeznaczonego na tę czynność. Pewnie niewielkie odchyłki od tego stanu następują w początkowym i końcowym zakresie czasu uplastyczniania, kiedy następuje rozpędzanie i hamowanie ruchu mechanizmów. Jednakże łączny czas tych zmian prędkości mechanizmu szacowany jest jako więcej niż 10% czasu trwania całej operacji uplastyczniania. Podczas trwania ruchu ustalonego (ze stałą prędkością v_{pl}) następuje kasowanie luzu początkowego a_1 pomiędzy końcówką pasa (1), a gorącą płytą (2). Następnie po tym inicjowany

jest kontakt pomiędzy tymi powierzchniami i rozpoczyna się właściwe uplastycznianie. Jak wynika z przeprowadzonego eksperymentu dotyczącego uplastyczniania pasa (Rys. 87), moment wejścia w kontakt pasa i gorącej płyty jest czasem, w którym następuje największy wzrost wartości siły uplastyczniającej (faza I na rysunku 88). W związku z tym, możliwe jest przyjęcie uproszczenia, że uplastycznianie materiału rozpoczyna się w momencie jednostajnego, ustalonego ruchu prostoliniowego modułu chwytaka przesuwającego oraz modułu grzewczego (D i E na rysunku 127). W konsekwencji obliczenia obciążenia poszczególnych komponentów układu napędowego w celu wyznaczenia wartości niezbędnej mocy potrzebnej do napędu tych podzespołów mogą być wykonane z wykorzystaniem statycznej analizy sił.



Rys. 162. Cyklogram procesu zgrzewania doczołowego z ilustracją realnego procesu uplastyczniania pasa; fazy procesu: a) uplastycznianie materiału, b) wysuwanie gorącej płyty, c) doprasowanie materiału, d) chłodzenie złącza; v – prędkość przemieszczania się pasa, v_{pl} – prędkość podczas uplastyczniania, v_{dp} – prędkość podczas doprasowywania, t_p – czas trwania procesu, a_1 – odległość początkowa pomiędzy gorącą płytą, a pasem; 1 – pas, 2 – gorąca płyta

Ze względu na trójwymiarowy charakter rozkładu obciążeń oraz punktów podparcia zarówno zespołu chwytaka przesuwającego jak i zespołu grzewczego, analiza rozkładu sił w celu wyznaczenia obciążeń wózków prowadnic oraz sił napędowych F_{n1} oraz F_{n2} (Rys. 159-161) nie jest prostym zagadnieniem. Wymaga ona przeanalizowania wpływu momentów sił oddziałujących na wózki prowadnic. Złożoność zagadnienia szczególnie dotyczy zespołu grzewczego, w którym istnieje statycznie niewyznaczalny układ sił, ze względu na obecność trzech podpór. W związku z tym analiza tych układów wymaga wyznaczenia sił składowych i momentów w poszczególnych płaszczyznach, co dopiero w dalszej kolejności pozwala na wyznaczenie np. sił obciążających prowadnicę.

Po wykonaniu niezbędnych obliczeń, można wyciągnąć wniosek, że wyższa wartość siły oddziałującej na parę wózków prowadzących moduł chwytaka przesuwającego, skupiona jest na prawym wózku (Rys. 160). Jej wartość może być obliczona z zależności:

$$F_{g_mchp_MAX} = \frac{m_{chp}}{w_1} \cdot g \cdot (w_1 - w_4) + \left[(F_{pl} + m_{chp} \cdot g \cdot \mu_1) \cdot h_1 + m_{chp} \cdot g \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot l_4 + l_2 \right) - F_{pl} \cdot h_4 \right] \cdot \frac{1}{l_4}. \quad (6.4)$$

W przypadku 3-wózkowego prowadzenia zespołu grzewczego, siła o największej wartości oddziałuje na prawy dolny wózek (Rys. 160). Jej wartość może być obliczona z zależności:

$$F_{g_mg_MAX} = m_{mg} \cdot g + \frac{F_{pl} \cdot h_5 + m_{mg} \cdot g \cdot l_6 - [(F_{pl} + m_{mg} \cdot g \cdot \mu_1) \cdot (h_4 + h_5 - h_6)]}{h_4 + h_5} + m_{mg} \cdot g \cdot \frac{w_5}{w_2 + w_1}. \quad (6.5)$$

Wyznaczone wartości umożliwiają finalny dobór rozmiaru prowadnic.

W celu wyznaczenia wartości sił napędowych F_{n1} oraz F_{n2} , należy uwzględnić fakt, że wszystkie siły obciążające prowadnicę powodują powstanie oporu tarcia, który musi być pokonany przez układ napędowy. Po uwzględnieniu faktu, że na siłę oporu stawianego przez prowadnicę analizowaną w kierunku przemieszczania się wózka, ostatecznie wpływa jedynie masa prowadzonych zespołów (nie oddziałują tutaj żadne siły technologiczne w kierunku pionowym), wartości siły potrzebnej do napędzania modułu chwytaka przesuwne F_{n1} oraz zespołu grzewczego F_{n2} można wyznaczyć z zależności:

$$F_{n1} = F_{pl} + m_{chp} \cdot g \cdot \mu_{pt}, \quad (6.6)$$

$$F_{n2} = F_{pl} + m_{mg} \cdot g \cdot \mu_{pt}. \quad (6.7)$$

Po wyznaczeniu wartości sił można przystąpić do oszacowania zapotrzebowania na moc układu napędowego. W tym celu należy wziąć pod uwagę przekształcenie energii w mechanizmie śrubowym (z ruchu obrotowego na liniowy) oraz sprawności poszczególnych węzłów konstrukcyjnych (Rys. 158). Biorąc pod uwagę zależność pomiędzy wartościami prędkości podczas operacji uplastyczniania:

$$v_1 = 2 \cdot v_{pl}, \quad (6.8)$$

$$v_2 = v_{pl}, \quad (6.9)$$

bilans mocy dla mechanizmu śrubowego napędzającego chwytak przesuwny przyjmuje postać:

$$P_{ps} \cdot \eta_{m\acute{s}1} = P_{n1} = F_{n1} \cdot v_1 = F_{n1} \cdot 2 \cdot v_{pl}, \quad (6.10)$$

natomiast dla napędu zespołu grzewczego:

$$P_{ds} \cdot \eta_{m\acute{s}2} = P_{n2} = F_{n2} \cdot v_2 = F_{n2} \cdot v_{pl}. \quad (6.11)$$

Biorąc pod uwagę straty energii mechanicznej w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych (sprzęgła, łożyskowania) i mechanizmach (przekładnia planetarna, mechanizm śrubowy), całkowita wymagana moc silnika elektrycznego może być wyznaczona z zależności:

$$P_s = \frac{1}{\eta_{pp} \cdot \eta_{sk} \cdot \eta_{is} \cdot \eta_{lp}} \cdot \left(P_{ps} + \frac{P_{ds}}{\eta_{sk} \cdot \eta_{is} \cdot \eta_{lp}} \right). \quad (6.12)$$

Uwzględniając wcześniej wyznaczone zależności (6.10 i 6.11), zależność na wymaganą moc silnika elektrycznego przyjmuje postać:

$$P_s = \frac{1}{\eta_{pp} \cdot \eta_{sk} \cdot \eta_{is} \cdot \eta_{lp}} \cdot \left(\frac{F_{n1} \cdot 2 \cdot v_{pl}}{\eta_{m\acute{s}1}} + \frac{F_{n2} \cdot v_{pl}}{\eta_{sk} \cdot \eta_{is} \cdot \eta_{lp} \cdot \eta_{m\acute{s}2}} \right). \quad (6.13)$$

Ostatecznie, uwzględniając parametry technologiczne operacji uplastyczniania materiału pasa, straty energii w poszczególnych węzłach oraz właściwości zaprojektowanej konstrukcji (w szczególności masa wybranych zespołów), finalna forma zależności na zapotrzebowanie mocy podstawowego układu napędowego przyjmuje postać:

$$P_s = \frac{1}{\eta_{pp} \cdot \eta_{sk} \cdot \eta_{ts} \cdot \eta_{ip}} \cdot \left[\frac{(F_{pl} + m_{chp} \cdot g \cdot \mu_{pt}) \cdot 2 \cdot v_{pl}}{\eta_{m\acute{s}1}} + \frac{(F_{pl} + m_{mg} \cdot g \cdot \mu_{pt}) \cdot v_{pl}}{\eta_{sk} \cdot \eta_{ts} \cdot \eta_{ip} \cdot \eta_{m\acute{s}2}} \right]. \quad (6.14)$$

Głównym zadaniem zastosowanego mechanizmu śrubowego jest zamiana ruchu obrotowego na postępowy. Biorąc pod uwagę zastosowany skok zwoju obu śrub (6.3), wymagana prędkość obrotowa n_{pp} na wyjściu z przekładni planetarnej (Rys. 158), w zależności od prędkości uplastyczniania pasa v_{pl} może być wyznaczona z zależności:

$$n_{pp} = \frac{2 \cdot v_{pl}}{p_1} = \frac{v_{pl}}{p_2}. \quad (6.15)$$

Biorąc pod uwagę przełożenie przekładni planetarnej i_{pp} , wymagana prędkość obrotowa wału silnika elektrycznego n_s może być wyznaczona z zależności:

$$n_s = n_{pp} \cdot i_{pp}. \quad (6.16)$$

Przeprowadzone obliczenia pozwalają na efektywny wybór silnika elektrycznego, w kontekście wymaganej minimalnej mocy P_s , prędkości obrotowej jego wału n_s oraz przełożenia przekładni i_{pp} . Wyniki obliczeń zapotrzebowania na moce tego układu napędowego, dla zoptymalizowanych parametrów technologicznych operacji uplastyczniania materiału pasa (Tab. 37), przedstawiono w tabeli 44. Uzyskane rezultaty są oczekiwanymi, wzrost siły uplastyczniającej materiał pasa F_{pl} powoduje wzrost wartości zapotrzebowania na moc układu napędowego P_s .

Tab. 44. Wyniki obliczeń zapotrzebowania na moc silnika elektrycznego podstawowego układu napędowego urządzenia dla przypadku zgrzewania trzech różnych średnic pasa

Parametr	Oznaczenie	Wartość		
Średnica pasa	d [mm]	12	15	18
Efektywna wartość temperatury gorącej płyty	T_{p_eff} [°C]	277,5	292,5	300
Efektywna wartość prędkości uplastyczniania	v_{pl_eff} $\left[\frac{mm}{min} \right]$	6,45	6,49	6,29
Siła uplastyczniania materiału	F_{pl} [N]	56,90	107,55	179,86
Siła niezbędna do napędu modułu chwytaka przesuwne	F_{n1} [N]	57,98	108,63	180,94
Siła niezbędna do napędu modułu grzewczego	F_{n2} [N]	57,44	108,09	180,40
Wymagana prędkość obrotowa na śrubach tocznych	n_{pp} $\left[\frac{obr}{min} \right]$	1,290	1,298	1,258
Ogólne zapotrzebowanie na moc silnika BLDC	P_s [kW]	0,0213	0,0403	0,0651

6.6. Podsumowanie rozdziału

Wykonany przegląd stanu techniki dostarczył jednoznacznej informacji na temat braku rozwiązań konstrukcyjnych zautomatyzowanych urządzeń wykonujących zgrzewanie doczołowe metodą gorącej płyty, które mogą być bezpośrednio zaadaptowane do zgrzewania pasów, charakteryzującym się zamkniętym obwodem. W związku z tym, po uwzględnieniu założeń projektowych, opracowano rozwiązanie konstrukcyjne takiego urządzenia.

Zbudowane zautomatyzowane urządzenie zgrzewające do doczołowego łączenia pasów napędowych i transportujących, wykonanych z elastomerów termoplastycznych, charakteryzuje się konstrukcją modułową, gdzie każdy z zespołów odpowiedzialny jest za wykonywanie odpowiednich czynności. Dzięki współpracy wszystkich kluczowych podzespołów, możliwe jest właściwe wykonanie sekwencji następujących operacji:

- odwinięcia pasa ze szpuli lub kręgu bez-szpułowego,
- odmierzenia cięgna i przycięcie go do odpowiedniej długości,
- wykonania manipulacji zakończeniami pasa, w takich sposób, aby uzyskać ich odpowiednie zorientowanie względem siebie na potrzeby zgrzewania,
- wykonania zgrzeiny doczołowej z wykorzystaniem gorącej płyty do uplastyczniania materiału,
- wydania pasa operatorowi,

co pozwala na spełnienie założeń projektowych.

Na podstawie wyników prac badawczych związanych z uplastycznianiem materiału pasa na gorącej płycie oraz założeń projektowych związanych ze sposobem kontroli procesu zgrzewania pasów, opracowano rozwiązanie konstrukcyjne głównego elektromechanicznego układu napędowego urządzenia. Główne wytyczne związane z projektowaniem tego mechanizmu związane były z maksymalnym uproszczeniem jego konstrukcji, co udało się uzyskać dzięki zastosowaniu jednego źródła napędu, odpowiedzialnego za wykonywanie obu kluczowych ruchów roboczych: przemieszczenia ruchomej końcówki pasa i gorącej płyty. Struktura tego układu napędowego, pozwala na uzyskanie jednoczesności tych ruchów roboczych i ich wykonywanie z założoną wcześniej korelacją pomiędzy prędkością przemieszczenia ruchomej końcówki pasa oraz gorącej płyty.

Wyniki wykonanych wcześniej prac badawczych, związane z wyznaczeniem wartości siły koniecznej do efektywnego uplastyczniania materiału pasa, przy założeniu, że w procesie zgrzewania według opracowanej metodologii jest to najwyższa wartość siły obciążającej podstawowy układ napędowy, pozwoliły na analizę stanu obciążenia tej konstrukcji. Takie postępowanie doprowadziło do wyznaczenia zapotrzebowania na moc źródła napędu podstawowego elektromechanicznego układu napędowego. Oczywiście jest, że obliczenia wykonane dla średnic pasa wyższych niż w założeniach konstrukcyjnych, powodują nienaturalne zwiększenie wartości tego parametru, jednakże istotna w tym przypadku jest metodologia postępowania, a uzyskane wyniki pozwalają na utrzymanie pewnego zapasu mocy. Analizując dostępne na rynku rozwiązania w zakresie silników BLDC, wyznaczona moc potrzebna do napędu tego urządzenia, jest w istocie dużo mniejsza niż moc silników tego typu z najniższego typoszeregu, w związku z czym obliczenia przeprowadzone w taki sposób są poprawne.

7. Podsumowanie

7.1. Podsumowanie wykonanych prac

Przeprowadzone prace badawczo-rozwojowe miały na celu opracowanie rozwiązania technologicznego, pozwalającego na zautomatyzowanie zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących, możliwego do realizacji w warunkach produkcji przemysłowej pasów z wykorzystaniem opracowanej konstrukcji zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego. Wykorzystując połączenie pomiędzy szeregiem prowadzonych prac badawczo-rozwojowych, m.in.:

- badaniami materiałowymi dla tworzywa sztucznego o osobliwych właściwościach, w celu rozpoznania jego zachowania w warunkach obciążeń termomechanicznych,
- analizą procesu technologicznego zgrzewania, przeprowadzanego według klasycznego podejścia znanego z literatury naukowej,
- opracowaniem autorskiej metodologii przeprowadzania operacji zgrzewania dedykowanej dla zautomatyzowanego łączenia pasów napędowych i transportujących,
- analizą zjawisk fizycznych zachodzących podczas najważniejszej fazy tego procesu czyli uplastyczniania materiału na gorącej płycie,
- badaniami eksperymentalnymi stanowiącymi odwzorowanie operacji uplastyczniania, w celu wyznaczenia parametrów technologicznych, zapewniających jej efektywny przebieg,
- modelowaniem matematycznym przebiegu operacji technologicznej uplastyczniania, w celu wyznaczenia sił technologicznych, które są niezbędne do jej przeprowadzenia,
- optymalizacją wielokryterialną, z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, fazy uplastyczniania materiału, zrealizowaną pod kątem efektywności energetycznej tej operacji,
- opracowywaniem modeli odwzorowujących fizyczne zachowanie się materiału podczas uplastyczniania, w celu dostosowania uzyskanych wyników do charakterystyki pasów zgrzewanych praktyce przemysłowej, za pomocą zaprojektowanego urządzenia,
- pracami koncepcyjnymi w aspekcie realizacji założonego cyklu zgrzewania,
- właściwymi pracami projektowymi, skutkującymi zbudowaniem prototypu zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, wraz z analizą stanu obciążenia konstrukcji w celu wyznaczenia sił niezbędnych do napędzania poszczególnych podzespołów i finalnym obliczeniem zapotrzebowania energetycznego,

rozwiązano problem praktyczny, polegający na opracowaniu technologii zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących. Prace zwieńczono zbudowaniem prototypu zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, po czym potwierdzono jego działanie na podstawie pilotażowych badań w warunkach przemysłowej produkcji pasów. Modułowość tej konstrukcji umożliwia jej nieustanne udoskonalanie podczas trwania badań eksploatacyjnych, a także późniejszą rozbudowę urządzenia, między innymi o układ odpowiedzialny za operację usuwania wypływki, której metodykę również opracowano i sprawdzono eksperymentalnie w ramach wykonanych prac.

7.2. Plan dalszych prac nad zgrzewaniem pasów

Prace badawcze nad zgrzewaniem doczołowym pasów będą kontynuowane, ze względu na niezmiennie zapotrzebowanie przemysłu w zakresie tej technologii. Część wyników prowadzonych prac, zorientowanych głównie na aspekt właściwości materiałowych, a w szczególności:

- rezultaty badań współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału,
- wyznaczona zależność pomiędzy wytrzymałością i sztywnością, a wartością temperatury tworzywa przy ściskaniu,
- niektóre wnioski płynące z analizy porównawczej pasa o przekroju kołowym i płaskiego, szczególnie w aspekcie zmian strukturalnych i odpowiedzi na wymuszenie mechaniczne w warunkach zmiennej temperatury,

nie zostały do tej pory w pełni wykorzystane. W dalszej kolejności jednak, planuje się sfinalizowanie opisu procesu doczołowego zgrzewania według opracowanej metodyki, a w szczególności analizę kolejnych faz procesu: wysuwania gorącej płyty, doprasowania i chłodzenia złącza, w aspekcie doboru parametrów technologicznych tych operacji. Podstawą do tych działań, będą dotychczas wykonane prace badawczo-rozwojowe. Planowanym zwieńczeniem tych prac, będzie określenie wytrzymałości lub sztywności złącza, w porównaniu do takich samych parametrów, mierzonych dla litego materiału. Wnioski z tych badań zostaną odniesione do obserwacji z przeprowadzonych już prac badawczych – stanowiących o spodziewanych brakach zmiany właściwości mechanicznych złącza w wyniku obciążenia termomechanicznego przyłożonego do tego materiału. W tym celu należy opracować metodologię oceny jakości złącz zgrzewanych dla tych pasów – jak pokazały próby rozciągania litego materiału i wstępne podejście do rozciągania pasów zgrzewanych, problemem może być uzyskanie zerwania pasa (bądź złącza) na klasycznej maszynie wytrzymałościowej. Wynika to z faktu, że dotychczas przeprowadzone próby rozciągania litego pasa zakończyły się niepowodzeniem, na skutek kilkusetprocentowego wydłużenia materiału.

Podczas zgrzewania realizowanego w ramach badań eksploatacyjnych, wykonywanych z wykorzystaniem zaprojektowanego urządzenia, ujawniły się problemy ze zgrzewaniem szczególnie innych rodzajów tworzywa lub nawet tych samych, ale pochodzących od innych dostawców. Parametry technologiczne stosowane do jednego rodzaju pasa, nie zawsze skutkują poprawnym zgrzewaniem (np. dostatecznym uplastycznieniem lub brakiem wypływania materiału z obszaru roboczego) dla innego półproduktu, który jest wykonany pozornie z tego samego materiału, ale na przykład jest wyprodukowany przez inną firmę. Sugerowanym rozwiązaniem tego problemu, jest opracowanie metodologii szybkiej oceny określonych właściwości fizycznych materiału. Działanie to musi być możliwe do zrealizowania w warunkach przemysłowych, przez niedoświadczonego badacza (operatora maszyny zgrzewającej). Wyniki takiej oceny, na podstawie opracowanych matryc parametrów, mogłyby przyczynić się do podjęcia szybkiej decyzji operatora, w aspekcie doboru właściwych parametrów technologicznych zgrzewania. Przeprowadzone badania materiałowe, stanowią podstawę w kierunku szerszego rozpoznania jego właściwości, pod kątem opracowania takiej metodologii postępowania.

Podczas obserwacji pracy urządzenia zauważono również pewne problemy technologiczne związane z jego konstrukcją, które w miarę możliwości na bieżąco są poprawiane. Podstawowym problemem w tym

aspekcie jest duża podatność elastomerowego cięgna i wiążąca się z tym tendencja do samoczynnego zmieniania trajektorii ruchu oraz owijania się na poszczególnych podzespołach roboczych. Problem ten w pewnym zakresie został rozwiązany za pomocą układu napinania i odbioru pasa, zamontowanych po zbudowaniu pierwotnej wersji urządzenia (układy te nie były uwzględnione w pierwszej koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego). Pokazuje to również, jak ważną zaletę konstrukcyjną, w przypadku budowy takiego prototypu, stanowi modułowość i możliwość rekonfiguracji korpusu maszyny. Docelowo jednak, aby zapewnić pełną niezawodność tego rozwiązania technologicznego i brak konieczności nadzorowania pracy maszyny przez operatora, w planowanych dalszych pracach związanych z przygotowaniem kolejnego prototypu udoskonalonej maszyny, należy zmienić sposób dozowania pasa. Rozwiązanie obecne w tym prototypie, polegające na popychaniu pasa przez podajnik rolkowy w celu jego dozowania, musi zostać zastąpione przez układ kinematyczny realizujący ciągnięcie materiału. Pozwoli to również ograniczyć wpływ zmiany współczynnika tarcia materiału pasa w kontakcie z częściami maszyny wykonanymi ze stopów metali na sam proces dozowania. W obecnym rozwiązaniu zauważa się dużą zmienność zachowania się materiału pasa podczas poszczególnych faz procesu, w zależności od struktury jego powierzchni zewnętrznej oraz średnicy.

Literatura

- [1] Osiński Z. *Podstawy Konstrukcji Maszyn*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [2] Kijewski J., Miller A., Pawlicki K., Szolc T. *Maszynoznawstwo*, WSiP, Warszawa 1993.
- [3] Dudziak M. *Przekładnie cięgnowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [4] Krawiec P., Domek G. *Przekładnie cięgnowe z pasami klinowymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2019.
- [5] Rutkowski A. *Części maszyn*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1986.
- [6] Katalog firmy Chiorino, *Transmission Belts*, Chiorino S.p.A., Biella 2004.
- [7] Katalog firmy Bando, *Bando Power Transmission Belts – Product Design Manual*, Bando Chemical Industries Ltd., Osaka 2018.
- [8] Raczyk R. *Środki transportu bliskiego i magazynowania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
- [9] Źródło internetowe, *Fenner Drives – solutions for packaging applications*, <https://www.fenner-drives.com/packaging> (Dostęp: 04.06.2021 r.).
- [10] Katalog firmy Fenner Drives, *Power Transmission & Conveyor Belting*, Fenner Drives Inc., Mannheim 2020.
- [11] Katalog firmy BEHAbelt, *Product Catalogue 2019/2020*, BEHA Innovation GmbH, Glottertal 2019.
- [12] Katalog firmy Norddeutsche Seekablewerke, *NSW profile belts*, Norddeutsche Seekablewerke GmbH, Nordenham 2017.
- [13] Katalog firmy Mafdel, *Thermoweldable profiles*, Mafdel, Saint Georges d’Esperanche 2016.
- [14] Dietrich M. *Podstawy Konstrukcji Maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [15] Źródło internetowe, *Ravi Enterprise – PU Round Belts*, <https://www.ravibeltings.com/pu-round-belts.html> (Dostęp: 22.05.2021 r.).
- [16] Źródło internetowe, *Stiles Enterprises – Habiblu® Food Approved Round Belts*, https://www.stilesenterprises.com/belt_round_food_belts.html (Dostęp: 22.05.2021 r.).
- [17] Źródło internetowe, *Accurate Industrial – Conveying Solutions*, <https://accurateindustrial.com/products/timing-drive-belts/extruded-profiles/round-belts> (Dostęp: 06.04.2021 r.).
- [18] Katalog firmy Volta, *‘V’ & Round Profiles – Conveying Solutions*, Volta Belting Technology Ltd., Enschede 2021.
- [19] Źródło internetowe, *Gates – Round belts*, <https://www.gates.com/us/en/power-transmission/v-belts/round-belts.html> (Dostęp: 09.06.2021 r.).
- [20] Żuchowska D. *Polimery Konstrukcyjne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [21] Norma EN ISO 868:2003.
- [22] Sikora R. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [23] Żenkiewicz M. *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2002.

- [24] Kucharczyk W., Żurowski W. *Przetwórstwo tworzyw sztucznych dla mechaników*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2005.
- [25] Źródło internetowe, *KY-plastics*, <http://pl.ky-plastics.com> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [26] Źródło internetowe, *BOCO Extruders*, <https://www.boco-extruders.eu/> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [27] Źródło internetowe, *XZ BELT Drive technology*, <https://www.xzbelt-ltd.com> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [28] Sikora R. *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo ŻAK, Warszawa 1993.
- [29] Wałęsa K., Malujda I., Talaśka K. *Hot plate butt welding of thermoplastic drive belts*, *Journal of Mechanical and Transport Engineering* 2018, 70 (2), s. 73-90.
- [30] Domek G., Dudziak M. *Energy Dissipation in Timing Belts Made From Composite Materials*, *Advanced Materials Research* 2001, 189-193, s. 4414-4418.
- [31] Źródło internetowe, *Continental – miarka długości pasów*, <https://www.continental-engine-parts.com/eu/pl-PL/Aftermarket/Products/Measuring-and-Fitting-Tools/Measuring-Gauge> (Dostęp: 14.06.2021 r.).
- [32] Jasiulek P. *Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania*, Wydawnictwo KaBe S.C., Krosno 2006.
- [33] Klimpel A. *Spawanie i zgrzewanie tworzyw termoplastycznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [34] Klimpel A. *Technologie zgrzewania metali i tworzyw termoplastycznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [35] Grewell D., Benatar A. *Welding of plastics: Fundamentals and new developments*, *International Polymer Processing* 2007, 22 (1), s. 43-60.
- [36] Wilczyński K. *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [37] Amanat N., James N. L., McKenzie D. R. *Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices*, *Medical Engineering & Physics* 2010, 32 (7), s. 690-699.
- [38] Wałęsa K., Malujda I., Talaśka K. *Zgrzewanie termoplastycznych pasów ciągnowych metodą gorącej płyty*, *Przegląd Mechaniczny* 2018, 6, s. 23-27.
- [39] Jin H., Ruibin M., Xiang J., Xinxin S., Zinya Z. *Towards mechanical robust yet self-healing polyurethane elastomers via combination of dynamic main chain and dangling quadruple hydrogen bonds*, *Polymer* 2019, 183, 121912.
- [40] Yuegang L., Zhuo M., Yacheng W., Peibo L., Yize S. *Analysis and modeling of viscosity for aqueous Polyurethane dispersion as a function of shear rate, temperature and solid content*, *ACS Omega* 2020, 5, s. 26237-26244.
- [41] Dobrzański L. *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice 2002.
- [42] Wirpsza Z. *Poliuretany. Chemia, technologia, zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.

- [43] Qi H. J., Boyce M. C. *Stress-strain behaviour of thermoplastic polyurethanes*, *Mechanics of Materials* 2005, 37, s. 817-839.
- [44] Katalog firmy Optibelt, *Power Transmission – compact catalogue*, Optibelt GmbH, Höxter 2019.
- [45] Mokhtarzadeh A., Benatar A., Wu C. Y. *Comparison of hot plate, vibration, infrared and combined infrared with vibration welding of ASA*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2011, 1, s. 1793-1798.
- [46] Mokhtarzadeh A., Wu C. Y., Benatar A. *Comparison of hot plate and vibration welding of PMMA to Polycarbonate*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2008, 1, s. 851-855.
- [47] Mokhtarzadeh A., Wu C. Y., Benatar A. *Comparison of hot plate and vibration welding of PMMA to ABS*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2008, 1, s. 851-861.
- [48] Stokes V. K. *Comparison of vibration and hot-tool thermoplastic weld morphologies*, *Polymer Engineering and Science* 2003, 43 (9), s. 1575-1602.
- [49] Stokes V. K. *The vibration and hot-tool welding of Polyamides*, *Polymer Engineering and Science* 2001, 41 (8), s. 1427-1439.
- [50] Stokes V. K. *Hot-tool and vibration welding of Poly(vinyl chloride)*, *Journal of Vinyl Additive Technology* 2000, 6 (3), s. 158-165.
- [51] Stokes V. K. *The hot-tool and vibration welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*, *Polymer Engineering and Science* 1997, 37 (4), s. 692-701.
- [52] Krishnan C., Benatar A. *Analysis of residual stress in hot plate welded polycarbonate*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2004, 1, s. 1149-1153.
- [53] Patham B., Foss P. H. *Thermoplastic vibration welding: Review of process phenomenology and processing – structure – property interrelationships*, *Polymer Engineering and Science* 2011, 51 (1), s. 1-22.
- [54] Wałęsa K. *Projekt urządzenia mechatronicznego do zgrzewania pasów ciągnowych*, Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 2017.
- [55] Wałęsa K., Malujda I., Talaśka K. *Butt welding of round drive belts*, *Acta Mechanica et Automatica* 2018, 12 (2), s. 115-126.
- [56] Wałęsa K., Malujda I., Talaśka K. *Badania empiryczne termozgrzewalnych pasów o przekroju kołowym*, *Mechanik* 2018, 5-6, s. 443-446.
- [57] Wałęsa K., Mysiukiewicz O., Pietrzak M., Górecki J., Wilczyński D. *Preliminary research of the thermomechanical properties of the round drive belts*, *MATEC Web of Conferences* 2019, 254, 06007.
- [58] Wałęsa K., Malujda M., Górecki J., Wilczyński D. *The temperature distribution during heating in hot plate welding process*, *MATEC Web of Conferences* 2019, 254, 02033.
- [59] Wałęsa K., Malujda I., Górecki J. *Experimental research of the mechanical properties of the round drive belts made of thermoplastic elastomer*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020, 776 (1), 012107.

- [60] Wałęsa K., Malujda I., Wilczyński D. *Experimental research of the thermoplastic belt plasticizing process in the hot plate welding*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 776 (1), 012011.
- [61] Wałęsa K., Malujda I., Talaśka K., Wilczyński D. *Process analysis of the hot plate welding of drive belts*, Acta Mechanica et Automatica 2020, 14 (2), s. 84-90.
- [62] Wałęsa K., Malujda I., Wilczyński D. *Shaping the parameters of cylindrical belt surface in the joint area*, Acta Mechanica et Automatica 2020, 13 (4), 255-261.
- [63] Wałęsa K., Biszczanik A., Malujda I., Wilczyński D. *Assumptions for modelling of the hot plate welding process considering the automatic welding machine design*, Machine Modelling and Simulation 2020 Conference Proceedings (w procesie wydawniczym).
- [64] Wałęsa K., Wrzesińska A., Dobrosielska M., Talaśka K., Wilczyński D. *Comparative analysis of polyurethane drive belts with different cross-section using thermomechanical tests for modelling the hot plate welding process*, Materials 2021, 14 (14), 3826.
- [65] Wałęsa K., Talaśka K., Wilczyński D., Górecki J., Wojtkowiak D. *Experimental approach to modeling of the plasticizing operation in the hot plate welding process*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2021, 22 (1), 16.
- [66] Wałęsa K., Talaśka K., Wilczyński D. *Designing of the electromechanical drive for automated hot plate welder using load optimization with genetic algorithm*, Materials 2022, 15 (5), 1787.
- [67] Katalog firmy Rothenberger, *Rothenberger – pipetool technologies at work*, Rothenberger Polska, Warszawa 2017.
- [68] Stokes V. K. *Joining Methods for Plastics and Plastics Composites: An Overview*, Polymer Engineering and Science 1989, 29 (19), s. 1310-1324.
- [69] Watson M. N., Murch M. G. *Recent developments in hot plate welding of thermoplastics*, Polymer Engineering and Science 1989, 29 (19), s. 1382-1386.
- [70] Źródło internetowe, *EXTOL – Improving plastics products: Hot plate welding*, <https://www.extolinc.com/technology/hot-plate-welding> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [71] Źródło internetowe, *EMERSON – Hot Plate Plastic Welding*, <https://www.emerson.com/pl-pl/automation/welding-assembly-cleaning/hot-plate-plastic-welding> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [72] Źródło internetowe, *CORRENGG – Hot Plate Welder*, <https://corengg.com/about-hot-plate-welder> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [73] Katalog firmy Forward Technology, *Hot plate welders*, Forward Technology, Cocato 2002.
- [74] Źródło internetowe, *CHINA.KAER – plastic welding machine manufacturer*, <http://www.cnplastic-welding.com/applications.html> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [75] Źródło internetowe, *Vimal Industrial System – Hot Plate Welding*, <https://www.vimalgroup.co.in/index.php/hotplate-welding> (Dostęp: 11.12.2021 r.).
- [76] Potente H., Schneiders J., Bornemann M. *Theoretical model for the one-dimensional temperature and stress calculation of simple hot plate welded geometries*, Macromolecular Materials and Engineering 2002, 287 (11), s. 843-853.

- [77] Gruin I. *Materiały Polimerowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [78] Ciszewski A., Radomski T. *Materiały konstrukcyjne w budowie maszyn*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1989.
- [79] Ashby M. F., Jones D. R. H. *Materiały inżynierskie 2: kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [80] Madej M., Ozimina D. *Tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010.
- [81] Pielichowski J., Puszyński A. *Technologia tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [82] BASF Polyurethanes GmbH, *Thermoplastic Polyurethane Elastomers TPU: Elastollan® – Processing Recommendations*, BASF, Lemförde 2011.
- [83] BASF Polyurethanes GmbH, *Thermoplastic Polyurethane Elastomers TPU: Elastollan® – Material Properties*, BASF, Ludwigshafen 2017.
- [84] Parasiewicz W., Rzymiski W. M. *Elastomery i przemysł gumowy*, Instytut Przemysłu Gumowego Stomil, Łódź 2006.
- [85] Ashby M., Shercliff H., Cebon D. *Inżynieria materiałowa tom 1*, Wydawnictwo Galaktyka Sp. z o.o., Łódź 2011.
- [86] Heneczkowski M., Oleksy M. *Technologia przetwórstwa tworzyw sztucznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
- [87] Yingzhu W., Weiang L., Junwen H., Chaohua P., Hongchao W., Conghui Y., Guorong Ch., Birong Z., Lizong D. *Simplification of hyperelastic constitutive model and finite element analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers*, Macromolecular Theory and Simulations 2020, 29, 2000009.
- [88] BEHAbelt, *FZ01 Guide clamp and Multi TC welding instrument – Instruction Manual*, BEHA Innovation GmbH, Glottertal 2009.
- [89] Wilczyński K. *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- [90] Dziubiński M., Kijański T., Sęk J. *Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2014.
- [91] Stabik J. *Wybrane problem reologii uplastycznionych polimerów napelnionych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [92] Boyce M. C., Kear K., Socrate S., Shaw K. *Deformation of thermoplastic vulcanizates*, Journal of Mechanics and Physics of Solids 2001, 49, s. 1073-1098.
- [93] Drozdov A. D., Christiansen J. C. *Constitutive equations for the nonlinear viscoelastic and viscoplastic behaviour of thermoplastic elastomers*, International Journal of Engineering Science 2006, 44, s. 205-226.
- [94] Sanhita D., Shubhankar R. Ch., Debasish R. *A constitutive model for thermoplastics based on two temperatures*, European Journal of Mechanics –A/Solids 2018, 72, s. 440-451.

- [95] Lambert-Diani J., Rey C. *New phenomenological behaviour laws for rubbers and thermoplastic elastomers*, European Journal of Mechanics – A/Solids 1999, 18, s. 1027-1043.
- [96] Kukla M., Warguła Ł., Talaśka K., Wojtkowiak D. *Magnetorheological elastomer stress relaxation behaviour during compression: experiment and modelling*, Materials 2020, 13 (21), 4795.
- [97] Kukla M. *Modelling selected mechanical properties of magnetorheological elastomers*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 776 (1), 012079.
- [98] Eberlein R., Pasięka L., Rizos D. *Validation of advanced constitutive models for accurate FE modelling of TPU*, Advanced Materials Letters 2019, 10 (12), s. 893-898.
- [99] Henze O. *Increasing of the end-use temperature of TPU products*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2005, 1, s. 3616-3319.
- [100] Yildirim E., Yurtsever M., Wilkes G. L., Yilgör I. *Effect of intersegmental interactions on the morphology of segmented polyurethanes with mixed soft segments: A coarse-grained simulation study*, Polymer 2016, 90, s. 204-214.
- [101] Wright K. J., Ding R., *Styrenic block copolymers for thermoplastic polyurethane modification*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2010, 1, s. 827-830.
- [102] Hamed N., Hassanajili S., Sajedi M. T. *An investigation of mechanical properties of polyurethane nanocomposites with various silicas: experimental study and modeling of Finite Deformation Response*, Silicon 2018, 10, s. 1243-1255.
- [103] Perko L., Friesenbichler W., Obendauf W., Buchebner V., Chaloupka G. *Elongational viscosity of rubber compounds and improving corresponding models*, Advances in Production Engineering & Management 2013, 8 (2), s. 126-133.
- [104] Menard K. P., Menard N. R. *Dynamic Mechanical Analysis in the analysis of polymers and rubbers*, w: Encyclopedia of Polymer Science and Technology 2015, John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2015.
- [105] Knitter M., Dobrzyńska-Mizera M. *Mechanical properties of isotactic polypropylene modified with thermoplastic potato starch*, Mechanics of Composite Materials 2015, 51 (2), s. 245-252.
- [106] Krawiec P., Róžański L., Czarnecka-Komorowska D., Warguła Ł. *Evaluation of the thermal stability and surface characteristics of Thermoplastic Polyurethane V-Belt*, Materials 2020, 13 (7), 1502.
- [107] Krawiec P., Warguła Ł., Małozieć D., Kaczmarczyk P., Dziechciarz A., Czarnecka-Komorowska D. *The toxicological testing and thermal decomposition of drive and transport belts made of thermoplastic multilayer polymer materials*, Polymers 2020, 12 (10), 2232.
- [108] Oliveira M. J., Duarte F. M., Tchalamov. D., Cunha A. M. *Hot plate welding of glass reinforced polypropylene*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2001, 1, s.1251-1255.
- [109] Wu C. Y., Mokhtarzadeh A., Rhew M., Benatar A. *Heated tool welding of thermoplastic Polyolefins (TPO)*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2001, 1, s. 1083-1087.
- [110] Węglowska A., Pietras A. *Influence of the welding parameters on the structure and mechanical properties of vibration welded joints of dissimilar grades of nylons*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2012, 12, s. 196-204.

- [111] Riahi M., Kooshayan K., Ghanati M. F. *Analysis of effect of pressure and heat on mechanical characteristics of butt fusion welding of polyethylene pipes*, Polymer – Plastics Technology and Engineering 2011, 50 (9), s. 907-915.
- [112] Potente H., Brüßel A. *Welding behaviour of filled and reinforced thermoplastics with hot plate welding*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 1998, 1, s. 1062-1066.
- [113] Stokes V. K. *A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 1: Polycarbonate*, Polymer 1999, 40 (23), s. 6235-6263.
- [114] Stokes V. K. *A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 2: Unfilled and glass-tilled poly(butylene terephthalate)*, Polymer 2000, 41 (11), s. 4317-4343.
- [115] Stokes V. K. *A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 3: Polyetherimide*, Polymer 2001, 42 (2), s. 775-792.
- [116] Stokes V. K., Conway K. R. *A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 4: Weld strength data for several blends*, Polymer 2001, 42 (17), s. 7477-7493.
- [117] Norma PN-EN ISO 527-1:2012.
- [118] Norma PN-EN ISO 527-2:2012.
- [119] Norma PN-EN ISO 1183-1:2006.
- [120] Norma PN-EN ISO 868:2005.
- [121] Norma PN-EN ISO 604:2006.
- [122] Broniewicz T., Iwasiewicz A., Kapko J., Placzek W. *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
- [123] Norma PN-80/C-04246.
- [124] Wiśniewski S., Wiśniewski T. *Wymiana ciepła*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [125] Karta katalogowa kalorymetru DSC204 F1, *Differential Scanning Calorimetry DSC 204 F1 Phoenix[®]*, NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb 2015.
- [126] Przygocki W. *Metody fizyczne badań polimerów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1990.
- [127] Norma DIN 51007.
- [128] Karta katalogowa reometru rotacyjnego MCR 302, *The Modular Compact Rheometer series MCR*, Anton Paar GmbH, Graz 2021.
- [129] Urbaniak M. *Glass transition temperature-temperature property (TgTP) diagram for EPY[®] epoxy system*, Polimery 2008, 53 (7-8), s. 537-543.
- [130] Norma ASTM D 7028-07.
- [131] Norma ISO 6721-2.
- [132] Norma ASTM D4065.
- [133] Karta katalogowa aparatu do termogravimetrii TG 209 F1 libra[®], *TG 209 F1 Libra[®] Thermogravimetric Analysis – TGA: Method, Technique and Applications*, NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb 2016.

- [134] Kart katalogowa spektrometru FT-IR Nicolet iS50, *Thermo Scientific Nicolet iS50 FT-IR Spectrometer*, Thermo Fisher Scientific Inc., Madison 2012.
- [135] Basfar A. A. *Hardness measurements of silicone rubber and polyurethane rubber cured by ionizing radiation*, *Radiation Physics and Chemistry* 1997, 50 (6), s. 607-610.
- [136] Kaltzakorta O., Wäsche R., Hartelt M., Aginagalde A., Tato W. *Influence of polymer filler on tribological properties of thermoplastic polyurethane under oscillating sliding conditions against cast iron*, *Tribology Letters* 2012, 48 (2), s. 209-216.
- [137] Xiong J., Zheng Z., Qin X., Li M., Li H., Wang X. *The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite*, *Carbon* 2006, 44 (13), s. 2701-2707.
- [138] Mondal S., Hu J. L. *Thermal degradation study of functionalized MWNT reinforced segmented polyurethane membrane*, *Journal of Elastomer & Plasticst* 2006, 38 (3), s. 261-271.
- [139] Xia H., Song M. *Preparation and characterization of polyurethane-carbon nanotube composites*, *Soft Matter* 2005, 1 (5), s. 386-394.
- [140] Abdul Hadi N. H. N., Ismail H., Abdullah M. K., Shuib R. K. *Influence of matrix viscosity on the dynamic mechanical performance of magnetorheological elastomers*, *Journal of Applied Polymer Science* 2020, 137 (13), 48492.
- [141] Shoaib M., Bahadur A., Iqbal S., Rahman M. S. U., Ahmed S., Shabir G., Javaid M. A. *Relationship of hard segment concentration in polyurethane-urea elastomers with mechanical, thermal and drug release properties*, *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 2017, 37, s. 88-96.
- [142] Korley L. S. T. J., Liff S. M., Kumar N., McKinley G. H., Hammond P. T. *Preferential association of segment blocks in polyurethane nanocomposites*, *Macromolecules* 2006, 39 (20), s. 7030-7036.
- [143] Buffa F., Abraham G. A., Grady B. P., Resasco D. *Effect of nanotube functionalization on the properties of single-walled carbon nanotube/polyurethane composites*, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 2007, 45 (4), s. 490-501.
- [144] Lima A. M. F., de Castro V. G., Borges R. S., Silva G. G. *Electrical Conductivity and Thermal Properties of Functionalized Carbon Nanotubes/Polyurethane Composites*, *Polímeros* 2012, 22 (2), s. 117-124.
- [145] Bajsić E. G., Pustak A., Šmit I., Leskovac M. *Blends of thermoplastic polyurethane and polypropylene. II: Thermal and morphological behaviour*, *Journal of Applied Polymer Science* 2010, 117 (3), s. 1378-1384.
- [146] Sandomierski M., Okulus Z., Voelkel A. *Active diazonium-modified zeolite fillers for methacrylate-based composites*, *Composite Interfaces* 2019, 26 (7), s. 643-647.
- [147] Singh N. K., Lesser A. J. *Low CTE thermoplastic and crosslinked elastomers*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2010, 1, s. 389-394.
- [148] Paszkowski M., Kowalewski P., Leśniewski T. *Badania właściwości reologicznych smarów plastycznych zagęszczanych 12-Hydrostearynianem litu w zakresie liniowej i nieliniowej lepkości*, *Tribologia* 2012, 4, s. 183-194.

- [149] Ahmad Z., Ansell M. P., Smadley D. *Thermal properties of epoxy-based adhesive reinforced with nano- and micro-particles for in-situ timber bonding*, International Journal of Engineering & Technology 2013, 10 (2), s. 32-38.
- [150] Shokoochi S., Naderi G., Kharazmkia M., Ghoreishy M. H. *Hyperelastic model analysis of stress-strain behaviour in polybutadiene/ethylene-propylene diene terpolymer nanocomposites*, Journal of Vinyl and Additive Technology 2017, 23 (1), s. 21-27.
- [151] Yahiaoui M., Denape J., Paris J. Y., Ural A. G., Alcalá N., Martínez F. J. *Wear dynamics of a TPU/steel contact under reciprocal sliding*, Wear 2014, 315 (1-2), s. 103-114.
- [152] Martínez F. J., Canales M., Alcalá N., Jiménez M. A., Yahiaoui M., Ural A. G., Paris J. Y., Delbé K., Denape J. *Analysis of wear mechanism in TPU-steel contact pair by means of long stroke tribometer tests*, Conference LubMat'12 June 6-8 2012, Bilbao 2012.
- [153] Baghaei B., Skrifvars M., Rissanen M., Ramamoorthy S. K. *Mechanical and thermal characterization of compression moulded polylactic acid natural fiber composites reinforced with hemp and lyocell fibers*, Journal of Applied Polymer Science 2014, 131 (15), 40534.
- [154] Wunderlich B. *The basics of thermal analysis*, w: Turi E. A., *Thermal characterization of polymeric materials*, Elsevier, New Jersey 1981, s. 91-234.
- [155] Mettler Toledo, *TA Applications Handbook Elastomer Volume 1*. Mettler Toledo, Schwerzenbach 2002, s. 11-21.
- [156] Źródło internetowe, *Intertek – Dynamic Mechanical Analysis*, <https://www.intertek.com/polymers/testlopedia/dynamic-mechanical-analysis> (Dostęp: 31.05.2020 r.).
- [157] Kiljański T. *Metody pomiaru właściwości sprężysto-lepkich*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2014, 53 (5), s. 344-346.
- [158] Nieh J. Y., Ni J., Lee J. *Hot plate welding of Polypropylene. Part II: process simulation*, Polymer Engineering and Science 1998, 38 (7), s. 1133-1141.
- [159] Poslinski A. J., Stokes V. K. *Steady melting of rectangular thermoplastic bars induced by hot contacting surfaces*, Polymer Engineering and Science 1992, 32 (16), s. 1147-1162.
- [160] Sopade P. A., Halley P., Bhandari B., D'Arcy B., Doebler C., Caffin N. *Application of the Williams-Landel-Fery model to the viscosity-temperature relationship of Australian honeys*, Journal of Food Engineering 2002, 56, s. 67-75.
- [161] Lei W., Fang C., Zhou X., Cheng Y., Yang R., Liu D. *Morphology and thermal properties of polyurethane elastomer based on representative structural chain extenders*, Thermochemica Acta 2017, 653, s. 116-125.
- [162] Evers F., Schöppner V., Lakemeyer P. *The influence on welding processes on the weld strength of flame-retardant materials*, Welding in the World 2016, 61, s. 161-170.
- [163] Poopat B., Benatar A. *Gas-assisted non-contact hot plate welding on HDPE*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2002, 1, s. 879-884.
- [164] Friedrich N., Hoffschlag R., Schöppner V., Schnieders J., Gövert S. *Cycletime reduction by forced air cooling for hot plate welding*, Welding in the World 2012, 56 (3-4), s. 101-107.

- [165] Cocard M., Grozav I., Iacob M., Caneparu A. *Establishing the optimum welding procedure for PE 100 polyethylene pipelines using the Response Surface Design*, *Materiale Plastice* 2009, 46 (4), s. 452-457.
- [166] Potente H. *Zur Theorie des Heizelement-Stumpfschweißens*, *Kunststoffe* 1977, 2, s. 98-102.
- [167] Gehde M., Bevan L., Ehrenstein G. W. *Analysis of the deformation of polypropylene hot-tool butt welds*, *Polymer Engineering and Science* 1992, 32 (9), s. 586-592.
- [168] Liu S. J., Cheng H. F. *The influence of interface geometry on the joint strengths of hot plate welded composites*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2010, 29 (4), s. 497-509.
- [169] Patent EP1068064, *Hot plate welding system*, 1999.
- [170] Patent EP0965439, *Verfahren und Vorrichtung zum Stumpfschweissen von Rohren aus thermoplastischem Kunststoff*, 1999.
- [171] Stokes V. K. *Experiments on the hot-tool welding of three dissimilar thermoplastics*, *Polymer* 1998, 39 (12), s. 2469-2477.
- [172] Stokes V. K. *Toward a weld-strength data base for hot-tool welding of thermoplastics*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 1995, 1, s. 1280-1284.
- [173] Troughton M. *Handbook of Plastics Joining: A practical guide*, *Plastic Design Library*, New York 1997.
- [174] Źródło internetowe, *Starkline – V-Belts*, <https://moltech.eu/v-belts-157> (Dostęp: 27.01.2022 r.).
- [175] Źródło internetowe, *STARKLINE belt production*, <https://youtu.be/OEXA1pxK5bE> (Dostęp: 27.01.2022 r.).
- [176] Lin T. T., Staicovici S., Benatar A. *Non-contact hot plate welding of polypropylene*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 1996, s. 1, 1260-1263.
- [177] Steiert T. *Technologie zgrzewania tworzyw sztucznych promieniami podczerwonymi - technika i obszary zastosowań*, w: *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 3/98, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 1998.
- [178] Potente H., Schnieders J. *Stress cracking caused by hot plate welding – Theoretical analyses*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2005, 3, s. 216-220.
- [179] Wübbecke A., Schöppner V., Geißler B., Schmidt M., Magnier A., Wu T., Niendorf T., Jakob F., Heim H. P. *Investigation of residual stresses in Polypropylene using hot plate welding*, *Welding in the World* 2020, 64, s. 1671-1680.
- [180] Potente H., Brüßel A. *Investigations into increasing weld strength through the use of profiled hot plates*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 1997, 1, s. 1233-1237.
- [181] Potente H., Tappe P. *Scale-up laws in heated tool butt welding of HDPE and PP*, *Polymer Engineering and Science* 1989, 29 (23), s. 1642-1648.
- [182] Potente H., Natrop J. *Computer-Aided optimization of the parameters of heated-tool butt welding*, *Polymer Engineering and Science* 1989, 29 (23), s. 1649-1654.
- [183] Potente H., Schöppner V., Hoffschlag R., Gövert S., Schnieders J. *In-line process optimization of hot-tool welding using innovative actuation concept*, *Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings* 2009, 1, s. 745-749.

- [184] Schnieders J., Büssing M., Potente H. *High speed hot plate welding*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2006, 1, s. 2216-2220.
- [185] Nonhof C. J. *Optimization of hot plate welding for series and mass production*, Polymer Engineering and Science 1996, 36 (9), s. 1184-1195.
- [186] Poopat B., Wu C. Y., Benatar A., Park J. B. *Optimization of contact hot plate welding of HDPE*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 1999, 1, s. 1386-1390.
- [187] Sojiphan K., Benatar A. *Finite element prediction of residual stress formation in hot plate welded polycarbonate*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2009, 1, s. 757-766.
- [188] Oliveira M. J., Bernardo C. A., Hemsley D. A. *Morphology and mechanical behaviour of Polypropylene hot plate welds*, Polymer Engineering and Science 2004, 41 (11), s. 1913-1922.
- [189] Baudrit B., Bogdanovic M., Heidemeyer P., Bastian M. *Hot plate welding of wood plastic composites based on Polyvinylchloride and Polypropylene*, Annual Technical Conference – ANTEC: Conference Proceedings 2011, 1, s. 1812-1820.
- [190] Amancio-Filho S. T., Dos Santos J. F. *Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends*, Polymer Engineering and Science 2009, 49 (8), s. 1461-1476.
- [191] Wood A. S. *The butt-fusion welding of polymers*, Chemical Engineering Science 1993, 48 (17), s. 3071-3082.
- [192] Yoo J. H., Choi S., Nam J., Ahn K. H., Oh J. S. *Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow in the butt-fusion welding process*, Korea-Australia Rheology Journal 2017, 29 (1), s. 37-49.
- [193] Ezekoye O. A., Lowman C. D., Fahey M. T., Hulme-Lowe A. G. *Polymer weld strength predictions using a thermal and polymer chain diffusion analysis*, Polymer Engineering and Science 1998, 38 (6), s. 976-991.
- [194] Lee B. Y., Kim J. S., Lee S. Y., Kim Y. K. *Butt-welding technology for double walled Polyethylene pipe*, Materials & Design 2012, 35, s. 626-632.
- [195] Savija I., Culham J. R., Yovanovich M. M. *Effective thermophysical properties of thermal interface materials: part I— definitions and models*, Proceedings of the ASME International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition 2003, 2, s. 189-200.
- [196] Kim G., Kim T., Jeong S. *A study on thermal characteristics according to thermal contact resistance in hot plate welding process*, International Symposium on Industrial Electronics – Conference Proceedings 2009, s. 1990-1995.
- [197] Myers T. G., Mitchell S. L., Muchatibaya G. *Unsteady contact melting of a rectangular cross-section material on a flat plate*, Physics of Fluids 2008, 20, 103101.
- [198] Carslaw H. S., Jeager J. C. *Conduction of heat in solids*, At the Clarendon Press, Oxford 1959.
- [199] Dassault Systèmes, *Isight 4.0, Getting Started Guide*, Dassault Systèmes, Carry 2009.
- [200] Staniszewski B. *Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1980.
- [201] Kostowski E. *Przepływ ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.

- [202] Taler J., Duda P. *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [203] Parihar S. K., Wright N. T. *Thermal contact resistance at elastomer to metal interfaces*, International Communications in Heat and Mass Transfer 1997, 24 (8), s. 1083-1092.
- [204] Benada A., Derdouri A., Lamontagne M., Simard Y., *Analysis of thermal contact resistance between polymer and mold injection molding*, Applied Thermal Engineering 2004, 24, s. 2029-2040.
- [205] Gogół W. *Wymiana ciepła – tablice i wykresy*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976.
- [206] Źródło internetowe, *Wartości współczynnika przejmowania ciepła dla różnych nośników ciepła i typów konwekcji*, <http://if.pk.edu.pl/tabele/wPrzeJC.htm> (Dostęp: 27.02.2022 r.).
- [207] Wałęsa K., Wilczyński D., Talaśka K., Górecki J. *Przyrząd i metoda do usuwania wypłytki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Patent RP przyznany 02.03.2022 r., na podstawie zgłoszenia patentowego P.430823 z dnia 06.08.2019 r. (oczekuje na publikację WUP).
- [208] Wałęsa K., Wilczyński D., Talaśka K., Malujda I., Fierek A. *Przyrząd i metoda do usuwania wypłytki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Patent RP przyznany 02.03.2022 r., na podstawie zgłoszenia patentowego P.430824 z dnia 06.08.2019 r. (oczekuje na publikację WUP).
- [209] Wałęsa K., Wilczyński D., Talaśka K., Wojtkowiak D. *Przyrząd i metoda do usuwania wypłytki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Patent RP przyznany 09.03.2022 r., na podstawie zgłoszenia patentowego P.430827 z dnia 06.08.2019 r. (oczekuje na publikację WUP).
- [210] Katalog firmy Volta, *Welding and Fabrication Tools – Conveying Solutions*, Volta Belting Technology Ltd., Enschede 2014.
- [211] Karta katalogowa zgrzewarki GF 400, *GF 400 – Butt fusion machine for construction site*, Georg Fischer Omicron S.r.l., Caselle di Selvazzano 2017.
- [212] Patent WO2011157563, *Verfahren und Vorrichtung zum Stumpfschweissen von Rohren aus thermoplastischem Kunststoff*, 2011.
- [213] Patent WO2010060962, *Process for butt welding of polypropylene*, 2010.
- [214] Patent WO9615898, *Vorrichtung zum Stumpfschweissen von Rohren aus thermoplastischem Kunststoff*, 1996.
- [215] Patent WO03070452, *Method and device for butt welding polyethylene pipes and/or fittings*, 2003.
- [216] Patent EP1114714, *Procédé de soudage bout à bout à élément chauffant flottant et dispositif correspondant*, 2000.
- [217] Patent PL171331, *Sposób selektywnego zgrzewania doczołowego dwóch części z tworzywa sztucznego zaopatrzonych w kod identyfikacyjny, za pomocą sterowanej automatycznie zgrzewarki elektrycznej*, 1995.
- [218] Patent EP1110702, *Schweißkopf für das Heizelementschweißen*, 1999.
- [219] Patent EP0198709, *Butt welding machine*, 1986.
- [220] Patent EP1063045, *Installation de soudage par étincelage*, 2000.

- [221] Wałęsa K., Górecki J., Talaśka K., Wilczyński D. *Moduł łączenia urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Zgłoszenie patentowe nr P.434317 z dnia 15.06.2020.
- [222] Wałęsa K., Górecki J., Talaśka K., Wilczyński D. *Urządzenie do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Zgłoszenie patentowe nr P.434318 z dnia 15.06.2020.
- [223] Wałęsa K., Górecki J., Talaśka K., Wilczyński D. *Moduł dozowania urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Zgłoszenie patentowe nr P.434319 z dnia 15.06.2020.
- [224] Wałęsa K., Górecki J., Wojtkowiak D., Wilczyński D., Talaśka K. *Zespół prowadzenia i odbioru pasa zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Zgłoszenie patentowe nr P.436474 z dnia 23.12.2020.
- [225] Nanotec, *Product Catalog*, Nanotec, Feldkirchen 2018.
- [226] KTR, *Drive technology*, KTR, Rhiene 2021.
- [227] Hiwin, *Ballscrews. Technical information*, Hiwin, Taichung 2018.
- [228] PMI, *Linear guideway*, PMI, Taichung City 2018.
- [229] Al-Dwairi A., Al-Nawafleh M. A., Al-Lubani S. E., Al-Ghatian F. M. *Lagrangian modeling and analysis of the dynamics of frictional winding mechanisms*, *Multibody System Dynamics* 2011, 26, s. 175-190.
- [230] Hendzel Z., Rykała Ł. *Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind*, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 2017, 22 (1), s. 81-99.
- [231] Rohani B., Yazicioglu Y., Mutlu M., Ogucu O., Akgul E., Saranlı A. *Lagrangian based mathematical modeling and experimental validation of a planar stabilized platform for mobile systems*, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 2014, 259, s. 955-964.

Spis tabel

- Tab. 1.** Wartości przeciętne charakterystycznych parametrów użytkowych wybranych rodzajów przekładni mechanicznych
- Tab. 2.** Najczęściej stosowane geometrie okrągłych pasów ciągnowych
- Tab. 3.** Pasy okrągłe dostępne w ofercie wiodących producentów rozwiązań dla pasowych układów napędowych i transportujących
- Tab. 4.** Przykładowe wartości parametrów użytkowych pasów okrągłych BEHAbelt
- Tab. 5.** Wybrane właściwości pasa o przekroju kołowym wykonanego z elastomeru termoplastycznego TPU C85A wykorzystywanego w badaniach
- Tab. 6.** Parametry badań rozciągania materiału pasa
- Tab. 7.** Parametry badań ściskania materiału pasa w standardowej temperaturze otoczenia
- Tab. 8.** Parametry badań ścinania materiału pasa w standardowej temperaturze otoczenia
- Tab. 9.** Parametry badań ściskania materiału pasa w warunkach zmiennej temperatury
- Tab. 10.** Parametry badań wstępnych w kierunku rozpoznania przemian fazowych w materiale pasa, przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC
- Tab. 11.** Parametry badań porównawczych pasa o przekroju kołowym (próbka typu A) oraz pasa płaskiego (próbka typu B) przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC
- Tab. 12.** Parametry badań przeprowadzonych w celu wyznaczenia ciepła właściwego materiału C_p dla pasa o przekroju kołowym (próbka typu A) oraz pasa płaskiego (próbka typu B), przeprowadzonych na kalorymetrze skaningowym DSC
- Tab. 13.** Wymiary próbek wykorzystywanych do badań dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA
- Tab. 14.** Badania dynamicznej analizy termomechanicznej w warunkach stałej temperatury
- Tab. 15.** Badania dynamicznej analizy termomechanicznej w warunkach zmiennej temperatury
- Tab. 16.** Parametry porównawczych badań termograwimetrycznych
- Tab. 17.** Parametry badania współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc}
- Tab. 18.** Wyniki badań gęstości oraz twardości materiału pasów
- Tab. 19.** Wyznaczone wartości modułu sprężystości wzdłużnej przy rozciąganiu
- Tab. 20.** Wyznaczone wartości modułu proporcjonalności przy ściskaniu
- Tab. 21.** Wyznaczone wartości modułu sprężystości poprzecznej przy ścinaniu
- Tab. 22.** Wyznaczone wartości współczynnika Poissona
- Tab. 23.** Wartości temperatury zeszklenia T_g segmentów miękkich i twardych poliuretanu, a także temperatury występowania dodatkowego efektu endotermicznego T_{mp} dla badanych próbek
- Tab. 24.** Wyniki analizy ciepła właściwego: ciepło właściwe próbki A (C_{pA}), ciepło właściwe próbki B (C_{pB}) oraz różnice w wartościach pomiędzy obiema próbkami δC_p
- Tab. 25.** Wartości składowych modułu sprężystości poprzecznej: zachowawczej G' , stratności G'' , a także lepkości dynamicznej η oraz współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta$ oznaczone w temperaturze pokojowej T_{DMTA1}
- Tab. 26.** Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{G'}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie składowej zachowawczej G' z wartościami tej składowej odczytanymi przy $T_g^{SS_{G'}}$
- Tab. 27.** Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{G''}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie składowej stratności G'' z wartościami tej składowej odczytanymi przy $T_g^{SS_{G''}}$
- Tab. 28.** Wartości temperatury zeszklenia miękkich segmentów $T_g^{SS_{\delta}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie maksymalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{MAX}$ z wartościami tego współczynnika odczytanymi przy $T_g^{SS_{\delta}}$
- Tab. 29.** Wartości temperatury zeszklenia twardych segmentów $T_g^{HS_{\delta}}$ oznaczone w badaniu DMTA na podstawie minimalnej wartości współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{MIN}$ z wartościami tego współczynnika odczytanymi przy $T_g^{HS_{\delta}}$

Tab. 30. Wyniki analizy termograwimetrycznej dla obu badanych próbek

Tab. 31. Parametry wstępnych badań eksperymentalnych uplastyczniania materiału pasa

Tab. 32. Parametry badań eksperymentalnych uplastyczniania materiału pasa z pomiarem wartości temperatury

Tab. 33. Charakterystyki uśrednionej siły uplastyczniania F_{pl} pasa o średnicy $d = 12$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 2, 4, 8, 12 i 16 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$, w zależności od czasu t_{pl} uplastyczniania oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – etap wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – etap zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastyczniania v_{pl}

Tab. 34. Charakterystyki uśrednionej siły uplastyczniania F_{pl} pasa o średnicy $d = 18$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 2, 4, 8, 12 i 16 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$, w zależności od czasu t_{pl} uplastyczniania oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – faza wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – faza zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastyczniania v_{pl}

Tab. 35. Wybrane charakterystyki uśrednionej siły uplastyczniania F_{pl} pasa o średnicy $d = 15$ mm z prędkością v_{pl} o wartościach 6, 8 i 10 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$, dla temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$, w zależności od czasu t_{pl} uplastyczniania oraz przemieszczenia końcówki pasa s_{pl} względem gorącej płyty: *I* – faza wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , *II* – faza zmiennego przebiegu siły F_{pl} w zależności od prędkości uplastyczniania v_{pl}

Tab. 36. Wyniki porównania pomiędzy wstępnie wyznaczonymi wartościami siły uplastyczniającej z otrzymanego modelu F_{pl_mod} , a wynikami badań eksperymentalnych F_{pl_exp} , a także wartościami siły uplastyczniającej obliczonymi na podstawie skorygowanego modelu $F_{pl_mod_c}$ dla kilku, losowo wybranych punktów kontrolnych s_i

Tab. 37. Wyniki optymalizacji parametrów technologicznych procesu zgrzewania doczołowego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA

Tab. 38. Wstępnie przyjęte parametry do badań rozkładu temperatury w nagrzewanym pasie podczas wstępnego etapu uplastyczniania materiału

Tab. 39. Wartości grubości warstwy uplastycznionej a_{pl} dla trzech przypadków kontaktowego przewodzenia ciepła

Tab. 40. Wstępnie przyjęte parametry do badań rozkładu temperatury w nagrzewanym pasie podczas wstępnego etapu uplastyczniania materiału

Tab. 41. Ważniejsze parametry przyjęte do obliczeń siły technologicznej potrzebnej do ścinania wypływki po zgrzewaniu doczołowym pasów ciągnowych

Tab. 42. Wyniki obliczeń analitycznych i badań empirycznych jednostronnego ścinania wypływki

Tab. 43. Wymiary zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, dotyczące modułu chwytaka przesuwnego oraz grzewczego do obliczeń zapotrzebowania mocy

Tab. 44. Wyniki obliczeń zapotrzebowania na moc silnika elektrycznego podstawowego układu napędowego urządzenia dla przypadku zgrzewania trzech różnych średnic pasa

Spis rysunków

Rys. 1. Ogólna klasyfikacja przekładni mechanicznych

Rys. 2. Schematyczne przedstawienie przekładni cięgnowej

Rys. 3. Klasyfikacja najbardziej rozpowszechnionych w przemyśle odmian przekładni cięgnowych

Rys. 4. Klasyfikacja przenośników pasowych

Rys. 5. Schemat funkcjonalny przenośnika pasowego: 1 – koło czynne (napędowe), 2 – koło bierne (napędzane, napinające), 3 – cięgno (pas lub zespół pasów), 4 – transportowany ładunek, 5 – rolka podporowa (krążnik), 6 – układ napinający cięgno

Rys. 6. Przykład przekładni pasowej z pasem okrągłym, ilustrujący łatwość zmiany płaszczyzny, w której umieszczone są kolejne napędzane koła

Rys. 7. Współpraca pasa o przekroju kołowym z typowymi przeznaczonymi dla nich kołami pasowymi a) koło z rowkiem zaokrąglonym, b) koło z rowkiem trapezowym (klinowym), c) koło gładkie

Rys. 8. Rozwiązania przenośników pasowych z pasami o przekroju kołowym: a) współpraca pasa o przekroju kołowym z gładkim krążnikiem, b) wkładki ustalające wspomagające właściwe prowadzenie pasa na gładkich rolkach

Rys. 9. Przekładnia pasowa z pasem okrągłym, służąca do przekazywania niewielkiej mocy, w przypadku braku możliwości równoległego usytuowania osi wałów

Rys. 10. Przenośnik pasowy zastosowany do transportu lekkich produktów w przemyśle spożywczym

Rys. 11. Przenośnik z pasem okrągłym z funkcjonalnością obracania transportowanych produktów, dzięki zróżnicowaniu prędkości liniowych poszczególnych cięgien

Rys. 12. Układ napędowy z pasem okrągłym, pełniącym jednocześnie funkcję transportującą i napędową na przykładzie linii transportu sera

Rys. 13. Układ napędowy z pasem okrągłym, pełniącym jednocześnie funkcję transportującą i napędową na przykładzie linii produkcyjnej żarówek

Rys. 14. Idea przebiegu procesu produkcji pasa cięgnowego: a) granulaty poliuretanowe barwiony na czarno, b) wyciarcie ślimakowe, c) półprodukt w formie pasa poliuretanowego nawiniętego na szpulę, d) gotowy produkt w formie pasa cięgnowego o zamkniętym obwodzie

Rys. 15. Uproszczony algorytm procesu produkcji pasa cięgnowego: I – pierwszy etap procesu produkcyjnego pasa, II – drugi etap procesu produkcyjnego pasa

Rys. 16. Pas okrągły przed i po wykonaniu połączenia: a) pas przed połączeniem, b) orientacja zakończeń względem siebie w celu wykonania połączenia, c) pas po złączeniu; d – średnica pasa, n – naddatek na straty materiału podczas wykonania połączenia, L_o – zakładana długość końcowa, L_c – długość początkowa, D_o – średnica pętli utworzona przez zamknięty obwód pasa, F_{t1} – poosiowa siła technologiczna potrzebna do wykonania połączenia

Rys. 17. Pomiar długości pasa o zamkniętym obwodzie za pomocą dedykowanego przymiara z liniałem prostym

Rys. 18. Ogólny podział częściściej stosowanych metod łączenia tworzyw sztucznych

Rys. 19. Wybrane, najczęściej stosowane metody spajania tworzyw sztucznych, sklasyfikowane ze względu na sposób dostarczania energii cieplnej do obszaru złącza

Rys. 20. Zgrzewanie doczołowe tarciove prętów: a) tarcie suche w obszarze złącza, b) tarcie płynne w obszarze złącza, c) krzepnięcie zgrzeiny; 1 – pręt ruchomy, 2 – pręt nieruchomy, 3 – uchwyt, F_{d1} – siła docisku wstępnego, F_{d2} – siła docisku spęczania, n_{z1} – prędkość obrotowa ruchomego pręta

Rys. 21. Elementy złączne z serii FBN firmy BEHAbelt: a) grupa elementów złącznych dla różnych średnic, b) zamontowany element złączny w pasie o przekroju pierścieniowym

Rys. 22. Złącze do pasów Eagle SureConnect firmy Fenner Drives

Rys. 23. Zgrzewarka wibracyjna ręczna firmy Optibelt: 1 – zgrzewany pas, 2 – szczęka ruchoma, 3 – szczęka stała

Rys. 24. Zgrzewanie doczołowe pasów metodą gorącej płyty: a) uproszczony schemat nagrzewania, b) praktyczna realizacja nagrzewania pasa poliuretanowego, c) zgrzany pas poliuretanowy; 1 – płyta grzewcza, 2 – końcówki pasa, 3 – uchwyt końcówek pasa; F_{t1} – poosiowa siła technologiczna przyłożona podczas nagrzewania pasa

Rys. 25. Zgrzewanie zakładkowe pasów cięgnowych: a) schemat funkcjonalny, b) rzeczywista operacja zgrzewania, c) zgrzany pas z widoczną spoiną; 1 – kształtowa płyta grzejna, 2 – końcówki pasa, 3 – matryca; F_{t1} – siła docisku poosiowego, F_{t2} – siła docisku promieniowego

Rys. 26. Algorytm wykonywania zgrzewanego połączenia doczołowego pasa napędowego lub transportującego z określeniem zaplanowanego zakresu prac

Rys. 27. Przykładowe schematy organizacji przestrzennej jednostek monomerycznych w podstawowych rodzajach łańcuchów polimerowych: a) łańcuch liniowy, nierozgałęziony, b) łańcuch nieznacznie rozgałęziony, c) łańcuch rozgałęziony – usieciowany

Rys. 28. Przykładowe struktury łańcuchów makrocząsteczek w typowych polimerach: a) typowy łańcuch polimeru termoplastycznego, b) typowy łańcuch elastomeru – nieznacznie usieciowanego, c) typowy łańcuch polimeru usieciowanego – duroplastu; 1 – łańcuch monomerowy, 2 – wiązanie sieciujące (kowalencyjne)

Rys. 29. Przykładowe struktury łańcuchów makrocząsteczek w typowych polimerach: a) typowy łańcuch polimeru termoplastycznego, b) typowy łańcuch elastomeru – nieznacznie usieciowanego, c) typowy łańcuch polimeru usieciowanego – duroplastu; 1 – łańcuch monomerowy, 2 – wiązanie sieciujące (kowalencyjne)

Rys. 30. Struktura makrocząsteczek polimeru częściowo krystalicznego: 1 – obszar uporządkowanych makrocząsteczek (krystaliczny), 2 – obszar nieuporządkowanych makrocząsteczek (amorficzny)

Rys. 31. Stany fizykochemiczne polimerów i ich położenie na osi temperatury wraz z temperaturami charakterystycznych przemian: a) faza amorficzna, b) faza krystaliczna; A, B, C i D – stany fizykochemiczne z punktu widzenia użytkowego: A – stan szklisty, A_1 – stan kruchy sprężysty, A_2 – stan kruchy z wymuszoną elastycznością, B – stan wysokoelastyczny (lepko-sprężysty), C – stan ciekły, D – stan stały; X, Y i Z – stany fizykochemiczne z punktu widzenia przetwórczego: X – stan stały, Y – stan plastyczny, Z – stan ciekły; T_{kr} – temperatura przemiany kruchej, T_g – temperatura zeszklenia, T_u – temperatura uplastycznienia, T_{pp} – temperatura plastycznego płynięcia, T_t – temperatura topnienia, T_d – temperatura degradacji termicznej materiału, T – temperatura (ogólnie)

Rys. 32. Zmiana struktury oraz właściwości polimerów termoplastycznych wraz ze zmianą wartości temperatury: a) postać struktury makrocząsteczek w zależności od wartości temperatury i stopnia uporządkowania łańcuchów polimerowych, b) moduł sprężystości polimeru amorficznego w zależności od wartości temperatury

Rys. 33. Schemat struktury poliuretanów termoplastycznych: 1 – segment sztywny, 2 – segment giętki, 3 – wiązanie sieciujące

Rys. 34. Przykładowy pomiar gęstości materiału pasa ciągnowego, próbka na szalce umieszczonej w powietrzu: 1 – waga laboratoryjna, 2 – szalka umieszczona w powietrzu, 3 – szalka umieszczona w wodzie, 4 – statyw, 5 – próbka

Rys. 35. Przykładowy pomiar twardości Shore’a za pomocą twardościomierza Bareiss HP: 1 – twardościomierz, 2 – pas poliuretanowy, 3 – czop pomiarowy

Rys. 36. Stanowisko badawcze podczas rozciągania próbki wiasełkowej oraz przykładowa próbka pobrana z pasa płaskiego: 1 – ruchoma szczeka maszyny MTS, 2 – nieruchoma szczeka maszyny MTS, 3 – próbka wiasełkowa

Rys. 37. Stanowisko badawcze podczas ściskania pasów: a) ściskanie osiowe próbki o średnicy $d = 18$ mm b) ściskanie osiowe próbki o średnicy $d = 4$ mm; 1 – talerz dociskający do małych próbek, 2 – płyta podporowa wahlowa, 3 – talerz dociskający do próbek o większej średnicy, 4 – próbka

Rys. 38. Stanowisko badawcze ścinania pasów: 1 – ostrze ruchome, 2 – podpory, 3 – próbka, 4 – przeciwostre

Rys. 39. Stanowisko do badań właściwości termomechanicznych pasów ciągnowych z maszyną wytrzymałościową MTS Insight 50 i komorą klimatyczną podczas badań: 1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – komora klimatyczna, 3 – sterownik komory klimatycznej, 4 – talerz dociskający, 5 – talerz podpierający, 6 – czujnik temperatury, 7 – próbka przed badaniem

Rys. 40. Uchwyt do ściskania próbek z najważniejszymi wymiarami podcięcia walcowego: a) uchwyt po frezowaniu, b) postać geometryczna

Rys. 41. Wyniki analizy nagrzewania próbki do kondycjonowania: a) rozkład temperatury na przekroju poprzecznym próbki po czasie kondycjonowania $t_k = 40$ minut podczas nagrzewania do 150°C , b) wykres średniej wartości temperatury $T_{k,avg}$ oraz współczynnika δT_k

Rys. 42. Wymiary próbki do badań ściskania i rozszerzalności termicznej; A – płaszczyzny pomiaru średnicy, B – płaszczyzny pomiaru wysokości

Rys. 43. Próbka pasa podczas badania dynamicznej analizy termomechanicznej: a) stan przed rozpoczęciem badania, b) stan po zakończeniu badania wykonanego w zbyt wysokiej temperaturze – próbka nadmiernie odkształcona; 1 – prostopadłościenna próbka, 2 – uchwyt górny obrotowy, 3 – uchwyt dolny stały

Rys. 44. Badania współczynnika dyfuzyjności cieplnej a_{dc} dla próbki typu B pobranej z pasa płaskiego: 1 – próbka, 2 – ogniwa termoelektryczne, 3 – płytowy element grzejny, 4 – dociskacz; e_{dc} – znana odległość pomiędzy ogniwami termoelektrycznymi, \dot{Q}_{3-1} – strumień cieplny przekazywany w wyniku kontaktowego przewodzenia ciepła pomiędzy elementem grzejnym, a próbka

Rys. 45. Uśrednione charakterystyki rozciągania badanych próbek pasów poliuretanowych: A_{1R} – próbka pasa o przekroju kołowym i średnicy $d_r = 4$ mm, A_{2R} – próbka pasa o przekroju kołowym i średnicy $d_r = 12$ mm, B_R – próbka pasa płaskiego

Rys. 46. Uśrednione charakterystyki ściskania badanych próbek walcowych o średnicy $d_{c1} = 4$ mm (A_{1C}) oraz $d_{c1} = 18$ mm (A_{2C})

Rys. 47. Uśredniona zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym τ_i , a kątem ścinania γ_i dla pasa o przekroju kołowym i dwóch prędkości ścinania v_i

Rys. 48. Uśredniona zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym τ_i , a kątem ścinania γ_i dla pasa płaskiego o przekroju prostokątnym i dwóch prędkości ścinania v_i

Rys. 49. Uśrednione charakterystyki ściskania osiowego materiału pasa w warunkach zmiennej temperatury T_{c2} o wartościach: 25°C, 40°C, 55°C, 70°C, 85°C, 100°C, 125°C, 150°C oraz 175°C, dla ściskania do odkształcenia granicznego $\varepsilon_{cmax2} = 0,3$ z prędkością $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (oznaczenie próbki E) oraz do odkształcenia granicznego $\varepsilon_{cmax1} = 0,6$ z prędkością $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (oznaczenie próbki S)

Rys. 50. Uśrednione wartości naprężenia maksymalnego σ_{c2max1} w zależności od wartości temperatury ściskania T_{c2} przy ściskaniu do odkształcenia $\varepsilon_{c2,max1} = 0,6$

Rys. 51. Uśrednione wartości maksymalnego naprężenia ściskającego σ_{c2max2} przy wartości odkształcenia ε_{c2max2} dla dwóch wartości prędkości ściskania

Rys. 52. Zależność średniej różnicy procentowej $\delta\sigma_c$ pomiędzy naprężeniami ściskającymi σ_c dla dwóch prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ od odkształcenia ε_c , przy różnych wartościach temperatury T_{c2} ściskanej próbki

Rys. 53. Metodyka wyznaczania modułu proporcjonalności E_c przy ściskaniu

Rys. 54. Zależność modułu sprężystości wzdłużnej E_c oraz różnicy pomiędzy wyznaczonymi modułami δE_c od wartości temperatury próbki T dla dwóch prędkości ściskania $v_{c2} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ oraz $v_{c2} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 55. Zależność uśrednionego modułu proporcjonalności przy ściskaniu wyznaczonego w sposób empiryczny E_{c_emp} oraz modułu ekstrapolowanego E_{c_ext}

Rys. 56. Zależność współczynnika rozszerzalności termicznej α od temperatury: w kierunku promieniowym α_p oraz osiowym α_o

Rys. 57. Przykładowy przebieg nagrzewania (A) i ochładzania (B) próbki podczas wstępnego badania materiału pasa metodą kalorymetrii różnicowej DSC

Rys. 58. Charakterystyki uzyskane z drugiego etapu badań różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC w pełnym zakresie wartości temperatury badania (a) oraz w przybliżeniu na przedział odpowiadający wartościom temperatury zgrzewania T_z (b); 1n – pierwszy cykl nagrzewania, 2n – drugi cykl nagrzewania

Rys. 59. Zależność ciepła właściwego C_p od wartości temperatury T wyznaczona na podstawie badania DSC

Rys. 60. Wyznaczanie zakresu temperatury dla testu DMTA w warunkach zmiennej jej wartości: a) wynik analizy w zakresie wartości temperatury od -100°C do 210°C, b) wyznaczenie punktu przecięcia wartości składowej zachowawczej G'_{DMTA2} i stratności G''_{DMTA2} modułu sprężystości poprzecznej materiału G

Rys. 61. Charakterystyki modułu zachowawczego G'_{DMTA2} w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury (a) i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_G}$ (b)

Rys. 62. Charakterystyki składowej stratności G''_{DMTA2} w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} dla obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_G}$

Rys. 63. Charakterystyki współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{DMTA2}$ w zależności od wartości temperatury T_{DMTA2} dla obu rodzajów próbek, dla trzech cykli zmiany wartości temperatury i metodyka wyznaczania temperatury zeszklenia miękkich segmentów poliuretanu $T_g^{SS_\delta}$

Rys. 64. Charakterystyka uśrednionych składowych modułu sprężystości poprzecznej G : zachowawczej G'_{avg} oraz stratności G''_{avg} , a także uśrednionego współczynnika stratności mechanicznej $\tan \delta_{avg}$ w zależności od temperatury materiału T

Rys. 65. Charakterystyka zmienności kąta odkształcenia poprzecznego γ i prędkości odkształcenia γ' w zależności od czasu trwania badania DMTA t_{DMTA2}

Rys. 66. Charakterystyka zmiany uśrednionej lepkości dynamicznej materiału pasa η : $\eta_{\text{exp_avg}}$ – wartość wyznaczona eksperymentalnie, $\eta_{\text{mod_avg}}$ – wartość modelowa będąca ekstrapolowaną krzywą lepkości wyznaczonej na podstawie eksperymentu

Rys. 67. Charakterystyki termogravimetryczne wykonane w atmosferze przepływającego gazu: powietrza (a) i azotu (b) oraz derywatograficzne w dziedzinie wartości temperatury podczas badania T_{TGA} w atmosferze przepływającego gazu: powietrza (c) i azotu (d)

Rys. 68. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z obu rodzajów pasa, wykonane podczas badania spektrofotometrycznego

Rys. 69. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z pasa o przekroju kołowym (próbka typu A), przed i po badaniu DMTA

Rys. 70. Spektrum absorpcji dla materiału próbek pasa ciągnowego pobranych z pasa płaskiego (próbka typu B), przed i po badaniu DMTA

Rys. 71. Ogólny przebieg operacji zgrzewania doczołowego pasa metodą gorącej płyty

Rys. 72. Wyrównywanie powierzchni czołowej pasa na gorącej płycie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta; F_w – siła docisku podczas wyrównywania powierzchni pasa na gorącej płycie, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia materiału pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane od pasa na drodze radiacji, Q_{r3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane od pasa na drodze konwekcji, Q_{c3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze konwekcji

Rys. 73. Nagrzewanie pasa na gorącej płycie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta; F_n – siła docisku materiału do gorącej płyty podczas nagrzewania, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{r3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane od pasa na drodze konwekcji, Q_{c3} – ciepło oddane od gorącej płyty na drodze konwekcji

Rys. 74. Wycofanie gorącej płyty z obszaru roboczego: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem, a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

Rys. 75. Docisnięcie (doprasowanie) końcówek pasa do siebie: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; F_{dp} – siła doprasowania końcówek pasa, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury powyżej temperatury otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem, a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

Rys. 76. Schematyczny przebieg relacji pomiędzy łańcuchami makrocząsteczek podczas zgrzewania doczołowego w fazie doprasowania materiału: a) początek operacji z widoczną płaszczyzną podziału pomiędzy zgrzewanymi elementami, b) początek reakcji chemicznych i interakcji fizycznych między makrocząsteczkami, c) całkowite połączenie elementów, makrocząsteczki są ze sobą splecione oraz połączone chemicznie, płaszczyzna podziału zanika

Rys. 77. Chłodzenie złącza: 1a i 1b – końcówki pasa, 2a i 2b – uchwyty; F_{ch} – siła docisku podczas chłodzenia złącza, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odległość rozgrzana do temperatury powyżej temperatury otoczenia; Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału pasa, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

Rys. 78. Zależność poosiowej siły technologicznej F_{t1} od czasu trwania procesu t_p podczas zgrzewania doczołowego: Etapy: I – wyrównanie powierzchni czołowej pasa, II – nagrzewanie, III – wycofywanie urządzenia grzewczego, IV – doprasowanie, V – właściwe łączenie i chłodzenie złącza; F_{t1} – poosiowa siła technologiczna przyjmująca wartości: F_w – podczas wyrównania, F_n – podczas nagrzewania, F_{dp} – w czasie łączenia (doprasowania); t_p – czas trwania całego procesu, składowe: t_w – wyrównania, t_n – nagrzewania, t_{wp} – wycofywania urządzenia grzewczego, t_{dp} – ponownego wzrostu siły docisku, t_{ch} – właściwego łączenia i chłodzenia złącza

Rys. 79. Nadtapianie materiału wraz z oczekiwanym rozkładem temperatury w czasie: 1 – element zgrzewany (np. pas), 2 – uchwyt, 3 – gorąca płyta; T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, n_w – naddatek

materiału przeznaczony na wyrównywanie powierzchni elementu zgrzewanego, n_{pl} – naddatek materiału przewidziany na uplastycznienie (nadtopienie) na gorącej płycie, F_{t1} – poosiowa siła technologiczna, t – wartość czasu technologicznego nagrzewania z wyrównaniem: $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$

Rys. 80. Schemat przebiegu nagrzewania przedmiotu gorącą płytą z wykorzystaniem regulowanych ograniczników ruchu: n – naddatek na wykonanie połączenia, F_{t1} – poosiowa siła technologiczna; 1a i 1b – końcówki zgrzewanego elementu, 2a i 2b – uchwyty, 3 – gorąca płyta, 4a i 4b – regulowane ograniczniki

Rys. 81. Doczołowe, ręczne łączenie pasa ciągnowego: a) montaż pasa w uchwytach, b) ustalenie odległości pomiędzy powierzchniami czołowymi pasa, c) umieszczenie gorącej płyty urządzenia grzewczego pomiędzy zakończeniami pasa, d) dociśnięcie końcówek pasa do siebie w celu wykonania ich połączenia, e) usunięcie wypłytki powstałej po procesie; 1 – pas, 2 – uchwyt końcówek pasa, 3 – urządzenie grzewcze, 4 – szczypce do usuwania wypłytki

Rys. 82. Proces zgrzewania doczołowego pasa realizowany z wykorzystaniem zmodyfikowanego, 4-fazowego cyklu: a) uplastycznianie materiału, b) wycofanie gorącej płyty: 1a – ruchoma końcówka pasa, 1b – nieruchoma końcówka pasa, 2a – ruchomy uchwyt pasa, 2b – nieruchomy uchwyt pasa, 3 – gorąca płyta; v_{pl} – prędkość przemieszczania się pasa podczas uplastyczniania, F_{pl} – siła uplastyczniająca, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem, Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{r3} – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji, Q_{c3} – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze konwekcji

Rys. 82. c.d. Proces zgrzewania doczołowego pasa realizowany z wykorzystaniem zmodyfikowanego, 4-fazowego cyklu: c) doprasowanie końcówek, d) chłodzenie złącza: 1a – ruchoma końcówka pasa, 1b – nieruchoma końcówka pasa, 2a – ruchomy uchwyt pasa, 2b – nieruchomy uchwyt pasa; v_{dp} – prędkość przemieszczania się pasa podczas doprasowania, F_{dp} – siła doprasowania, v_{ch} – prędkość przemieszczania się pasa podczas chłodzenia, F_{ch} – siła docisku podczas chłodzenia, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastycznienia pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia; Q_{p1-2} – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem, Q_{p1} – ciepło przewodzone wewnątrz materiału, Q_{r1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji, Q_{c1} – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji

Rys. 83. Cyklogram procesu technologicznego zgrzewania pasów, wg opracowanej metodyki: I – uplastycznianie materiału, II – wycofywanie urządzenia grzewczego, III – doprasowanie, IV – właściwe łączenie i chłodzenie złącza; v_p – prędkość technologiczna, przyjmująca wartości: v_{pl} – podczas uplastyczniania, v_{wp} – podczas wycofywania urządzenia grzewczego, v_{dp} – podczas doprasowania, v_c – podczas chłodzenia złącza; t_p – czas trwania całego procesu, składowe: t_{pl} – uplastyczniania, t_{wp} – wysuwania elementu grzejjego, t_{dp} – doprasowania złącza, t_{ch} – właściwego łączenia i chłodzenia złącza

Rys. 84. Schemat wstępnych badań empirycznych uplastyczniania pasa na gorącej płycie: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – gorąca płyta, 4 – podkładka termoizolacyjna; d – średnica pasa, h_{upl} – długość próbki, a_{upl} – wysunięcie próbki z uchwytu, v_{i_upl} – prędkość wstępna, v_{pl} – prędkość uplastyczniania

Rys. 85. Schemat uszczegółowionych badań empirycznych uplastyczniania pasa na gorącej płycie: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – gorąca płyta, 4 – podkładka termoizolacyjna, 5.1...5.2...5.3 – kolejne czujniki temperatury (termopary); d – średnica pasa, h_{upl} – długość próbki, a_{upl} – wysunięcie próbki z uchwytu, p_{t1} – odległość pomiędzy gorącą płytą, a pierwszym czujnikiem temperatury, p_{t2} – odległość pomiędzy pierwszym, a drugim czujnikiem temperatury, p_{t3} – odległość pomiędzy drugim, a trzecim czujnikiem temperatury, v_{i_upl} – prędkość wstępna, v_{pl} – prędkość uplastyczniania

Rys. 86. Stanowisko badawcze podczas uplastyczniania materiału pasa: 1 – walcowa próbka pasa, 2 – uchwyt próbki, 3 – urządzenie grzewcze z gorącą płytą, 4 – podkładka termoizolacyjna, 5 – jeden z czujników temperatury (termopara), 6 – dodatkowy czujnik siły, 7 – szczeka maszyny wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN

Rys. 87. Przykładowa charakterystyka przedstawiająca zależność siły uplastyczniającej materiał pasa F_{pl} w zależności od przemieszczenia podczas uplastyczniania s_{pl} oraz czasu trwania tej operacji t_{pl} dla pasa o średnicy $d = 18$ mm i prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 4 \frac{mm}{min}$; fazy: 0 – eliminacja wstępnej odległości pomiędzy gorącą płytą, a próbką, I – faza powtarzalnego, liniowego wzrostu siły uplastyczniającej F_{pl} , II – faza powtarzalnego, nieliniowego spadku wartości siły uplastyczniającej

Rys. 88. Charakterystyka zmiany siły uplastyczniania pasa F_{pl} w funkcji przemieszczenia próbki pasa względem gorącej płyty s_{pl} : I – stan ustalony uplastyczniania, II – stan nieustalony uplastyczniania, F_{pl} – siła potrzebna do uplastyczniania materiału, t_{pl} – czas uplastyczniania, s_{pl} – przemieszczenie pasa względem gorącej płyty, v_{pl} – prędkość uplastyczniania, v_{pli} – poszczególne grupy prędkości uplastyczniania, T_p – wartość temperatury gorącej płyty, $c_1...c_4$ – współczynniki funkcji opisujących uplastycznianie, α_i – kąt nachylenia części proporcjonalnej zależności w I fazie

Rys. 89. Próbki po badaniach uplastyczniania na gorącej płycie pasa o średnicy $d = 12$ mm: v_{pl} – prędkość uplastyczniania, 1 – obszar wypływu, 2 – rdzeń pasa

Rys. 90. Metodyka wyznaczania wartości czasu przejścia pomiędzy kolejnymi fazami uplastyczniania: t_{pl} – czas uplastyczniania, F_{pl} – siła uplastyczniania, s_{pl} – przemieszczenie przy uplastycznianiu, t_{I-II} – czas przy zmianie fazy uplastyczniania, s_{I-II} – przemieszczenie przy zmianie fazy uplastyczniania; I – uplastycznianie ustalone, II – uplastycznianie niestalone

Rys. 91. Charakterystyka czasu t_{I-II} przejścia pomiędzy kolejnymi fazami uplastyczniania w funkcji prędkości tej operacji v_{pl} dla obu średnic badanych we wstępnym etapie, a także względnej różnicy δt_{I-II} pomiędzy wartościami tego parametru określonej w tej samej dziedzinie: $t_{I-II_{12_exp}}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, wyznaczona eksperymentalnie, $t_{I-II_{12_mod}}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, wyznaczona z modelu matematycznego, $t_{I-II_{12_pr}}$ – wartość czasu do zmiany fazy dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, przewidywana dla innych prędkości uplastyczniania v_{pl} (analogiczne oznaczenia dla pasa o średnicy $d = 18$ mm oraz dla względnej różnicy δt_{I-II} pomiędzy obydwojema rodzajami pasa)

Rys. 92. Przykładowa rzeczywista charakterystyka uplastyczniania materiału pasa $F_{pl}(s)$ z oznaczonym sposobem badania monotoniczności funkcji w zakresie niestalonego uplastyczniania tworzywa: $F_{pl1} \dots F_{pl5}$ – wartości siły uplastyczniającej w poszczególnych punktach kontrolnych, s_0 – wartość początkowa przemieszczenia (granica rozpoczęcia niestalonego uplastyczniania), $s_1 \dots s_5$ – współrzędne punktów kontrolnych, Δs – zakres przedziału przemieszczenia podlegający analizie, $a_1 \dots a_5$ – współczynniki kierunkowe prostych aproksymujących, $b_1 \dots b_5$ – współczynniki stałe prostych aproksymujących, $\beta_1 \dots \beta_5$ – kąt nachylenia stycznych w punktach pomiarowych $s_1 \dots s_5$

Rys. 93. Przykładowa zależność pomiędzy współczynnikami a_i oraz b_i , a także przemieszczeniem podczas uplastyczniania s dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ gorącą płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$

Rys. 94. Przykładowa zależność pomiędzy wartościami współczynników a_{sa} , b_{sa} , a_{sb} , oraz b_{sb} , a prędkością uplastyczniania materiału pasa v_{pl} , dla cięgna o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$

Rys. 95. Przykładowa zależność pomiędzy współczynnikami: a_{vasa} , b_{vasa} , a_{vbsa} , b_{vbsa} , a_{vasb} , b_{vasb} , a_{vbbs} oraz b_{vbbs} , a wartością temperatury gorącej płyty T_p , dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 96. Przykładowe charakterystyki uplastyczniania materiału $F_{pl}(s)$ w aspekcie porównania przebiegu wartości siły uplastyczniającej wyznaczonej z opracowanego modelu (F_{pl_mod}) i uzyskanej z badań (F_{pl_exp}) dla: a) pasa o średnicy $d = 12$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; b) pasa o średnicy $d = 18$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 97. Przykładowa funkcja korekcyjna przedstawiająca zależność procentowego błędu opracowanego modelu δF_{mod} dla pasa o średnicy $d = 12$ mm, uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ płytą rozgrzaną do temperatury o wartości $T_p = 285^\circ\text{C}$

Rys. 98. Przykładowe charakterystyki uplastyczniania materiału $F_{pl}(s)$ w aspekcie porównania przebiegu wartości siły uplastyczniającej wyznaczonej z opracowanego, skorygowanego modelu ($F_{pl_mod_c}$) i uzyskanej z badań (F_{pl_exp}) dla: a) pasa o średnicy $d = 12$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; b) pasa o średnicy $d = 18$ mm, wartości temperatury gorącej płyty $T_p = 285^\circ\text{C}$ oraz prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 99. Przykładowy widok prezentujący połączenie pomiędzy poszczególnymi parametrami modułu optymalizacji w oprogramowaniu Simulia Isight i arkusza kalkulacyjnego MS Excel

Rys. 100. Przykładowa mapa rozmieszczenia punktów obliczeniowych podczas obliczeń z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA, w postaci korelacji pomiędzy otrzymywanymi wartościami siły uplastyczniającej F_{pli} w poszczególnych punktach kontrolnych, w funkcji prędkości uplastyczniania v_{pl} , przy stałej wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz średnicy pasa $d = 18$ mm

Rys. 101. Przykładowe wyniki optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA dla pasa o średnicy $d = 18$ mm, w formie powierzchni wyznaczonej przez wartości siły uplastyczniającej F_{pl} w zależności od wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz prędkości uplastyczniania v_{pl}

Rys. 102. Przykładowe wyniki optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA dla pasa o średnicy $d = 18$ mm, w formie powierzchni wyznaczonej przez wartości funkcji kontrolnej δF_{pl} w zależności od wartości temperatury gorącej płyty T_p oraz prędkości uplastyczniania v_{pl}

Rys. 103. Porównanie nagrzewania wyrównanej i niewyrównanej powierzchni pasa: 1 – pas, 2 – uchwyt pasa, 3 – gorąca płyta, A – pustki (wypełnione przez rozgrzany gaz), B – punkty kontaktu pomiędzy niewyrównaną powierzchnią,

a gorącą płytą; Q_{p3-1} – ciepło przewodzone w wyniku przewodzenia kontaktowego, Q_{r3} – ciepło przenoszone przez promieniowanie, Q_{c3} – ciepło przenoszone drogą konwekcji; T_z – temperatura zgrzewania, T_p – temperatura gorącej płyty, ΔT – różnica temperatury

Rys. 104. Widok zdyskretyzowanego modelu MES: 1 – pas, 2 – gorąca płyta

Rys. 105. Zależności pomiędzy temperaturą T i odległością rozgrzaną a_n , dla różnych wartości czasu t przy idealnej kontaktowej przewodności: MES_ t – wyniki uzyskane z modelu numerycznego, A_ t – wyniki analityczne

Rys. 106. Charakterystyka względnej różnicy wartości temperatury δT_{A-M} w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n), dla czterech wartości czasu nagrzewania t

Rys. 107. Zależność pomiędzy temperaturą T i odległością rozgrzaną a_n , dla różnych wartości czasu nagrzewania i trzech modeli kontaktu: t_{ID} – kontakt idealny, t_{SR} – kontaktowy opór cieplny na początku procesu nagrzewania, t_{WR} – kontaktowy opór cieplny podczas całego nagrzewania

Rys. 108. Korelacja pomiędzy grubością warstwy uplastycznionej a_{pl} i czasem nagrzewania t , przy wartości temperatury uplastyczniania $T_{upl} = 210^\circ\text{C}$: WR – kontaktowy opór cieplny obecny przez cały czas nagrzewania, SR – kontaktowy opór cieplny obecny tylko w początkowej fazie, ID – nagrzewanie bez kontaktowego oporu cieplnego

Rys. 109. Zmiany postaci wyplýwki podczas uplastyczniania wraz z orientacyjnym określeniem chwilowej średnicy pasa d_{upl} dla różnych wartości czasu uplastyczniania t_{upl} dla pasa o średnicy wyjściowej $d = 17,96$ mm, uplastycznianego gorącą płytą o temperaturze $T_p = 299,7^\circ\text{C}$ z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 110. Rozkład temperatury T_{pl} podczas uplastyczniania materiału pasa w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n) dla pasa o średnicy $d = 18$ mm uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ na gorącej płycie o temperaturze $T_p = 300^\circ\text{C}$, wyznaczony w sposób analityczny i eksperymentalnie w trzech punktach pomiarowych, po przemieszczeniu $s_{pl} = 2,8$ mm

Rys. 111. Rozkład temperatury T_{pl} podczas uplastyczniania materiału pasa w funkcji współrzędnej x (odległość propagacji temperatury a_n) dla pasa o średnicy $d = 15$ mm uplastycznianego z prędkością $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ na gorącej płycie o temperaturze $T_p = 285^\circ\text{C}$, wyznaczony w sposób analityczny i eksperymentalnie w trzech punktach pomiarowych, po przemieszczeniu $s_{pl} = 2$ mm

Rys. 112. Uplastycznianie pasa podczas zgrzewania doczołowego: a) schemat i oczekiwany rozkład temperatury w osi pasa, b) rozkład temperatury podczas uplastyczniania dla efektywnych parametrów technologicznych (T_{pl_eff} i v_{pl_eff}) i trzech średnic pasa d (12 mm, 15 mm i 18 mm): 1 – nieruchoma końcówka pasa, 2 – uchwyt, 3 – gorąca płyta; v_{pl} – prędkość uplastyczniania, T_p – temperatura gorącej płyty, T_z – temperatura zgrzewania, T_o – temperatura otoczenia, a_{pl} – odległość uplastyczniania pasa, a_n – odcinek rozgrzany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia, h_l – odległość wysunięcia pasa z uchwytu, a_{pl_min} – minimalna odległość uplastyczniania dla temperatury T_{u_min} , x – współrzędna zorientowana wzdłuż osi pasa, T – temperatura (ogólnie)

Rys. 113. Zależność pomiędzy naprężeniem przy uplastycznianiu σ_{pl} , a średnicą pasa d , dla uplastyczniania wykonanego z wykorzystaniem parametrów zapewniających efektywny przebieg tej operacji i trzech średnic pasa (na podstawie wartości $F_{pl_eff_mod_c}$)

Rys. 114. Zależność pomiędzy odległością rozgrzaną do temperatury uplastyczniania a_{pl} , a średnicą pasa d , dla uplastyczniania wykonanego z wykorzystaniem parametrów zapewniających efektywny przebieg tej operacji

Rys. 115. Sposób postępowania podczas doboru prędkości uplastyczniania v_{pl} dla założonej średnicy pasa d oraz określonej temperatury gorącej płyty T_p zapewniającej uplastycznianie efektywne

Rys. 116. Sposób postępowania podczas doboru temperatury gorącej płyty T_p dla założonej średnicy pasa d oraz określonej prędkości uplastyczniania v_{pl} zapewniającej uplastycznianie efektywne

Rys. 117. Wyniki doboru efektywnej prędkości uplastyczniania v_{pl} dla sześciu średnic pasa d przy założeniu stałej temperatury gorącej płyty $T_p = 280^\circ\text{C}$

Rys. 118. Wyniki doboru efektywnej temperatury gorącej płyty T_p dla sześciu średnic pasa d przy założeniu stałej prędkości uplastyczniania $v_{pl} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Rys. 119. Końcowe formowanie wyplýwki podczas doprasowania złącza: 1 – zakończenia pasa, 2 – uchwyty, 3 – wyplýwka; F_{dp} – siła docisku pasa w końcowej fazie zgrzewania, d – średnica pasa, D_w – średnica zewnętrzna wyplýwki

Rys. 120. Jednostronne ścinanie wyplýwki z jej podparciem: a) siły oddziałujące na wyplýwkę, b) schemat przykładu realizacji takiej metody, A – pas, B – wyplýwka, 1 – tulejka ścinająca, 2 – płytka podpierająca; F_T – siły ścinające wyplýwkę, F_P – siły reakcji płytki podpierającej

Rys. 121. Rysunki wykonawcze ostrzy wykorzystanych w badaniach ścinania wyplýwki

Rys. 122. Badania empiryczne ścinania wyplýwki: a) stanowisko badawcze, b) próbki zgrzanych pasów: 1 – uchwyt maszyny wytrzymałościowej, 2 – płyta podporowa z otworami, 3 – talerz podpierający, 4 – ostrze (tulejka ścinająca), 5 – pas, 6 – wyplýwka

Rys. 123. Wymiary przyjęte do obliczeń analitycznych: φ_s – kąt pochylenia ścianki ostrza, D_z – średnica zewnętrzna tulejki tnącej, D_0 – średnica otworu tulejki tnącej, d – średnica zewnętrzna pasa, D_M – średnica otworu w podporze, g_w – grubość wyplýwki, F_T – siła niezbędna do ścięcia wyplýwki, l_T – długość powierzchni kontaktu pasa z ostrzem

Rys. 124. Zależność pomiędzy wektorami sił podczas ścinania wyplýwki: 1 – ostrze, 2 – wyplýwka, 3 – pas; F_T – siła technologiczna ścinania wyplýwki, F_{T_r} – składowa siły ścinania pochodząca od rozciągania wyplýwki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T_1} – składowa siły pochodząca od tarcia wyplýwki na powierzchni stożkowej ostrza, F_{T_2} – składowa pochodząca od tarcia pasa wewnątrz otworu ostrza, F_r – jednostkowa siła rozciągająca wyplýwkę, φ_s – kąt pochylenia ścianki ostrza, p_1 – nacisk powierzchniowy wyplýwki na powierzchnię ostrza, T_1 – sumaryczna siła tarcia na powierzchni ostrza, pomiędzy wyplýwką, a stożkową powierzchnią ostrza, T_2 – sumaryczna siła tarcia pomiędzy powierzchnią pasa, a otworem w ostrzu

Rys. 125. Wyniki badań empirycznych (F_{T_exp}) oraz obliczeń analitycznych (F_{T_emp}) siły potrzebnej do ścięcia wyplýwki F_T w zależności od kąta wierzchołkowego ostrza φ

Rys. 126. Schemat koncepcyjny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych metodą gorącej płyty: a) rzut od boku – widok na płaszczyznę XY prostopadłą do posadzki w miejscu planowanego ustawienia maszyny, b) rzut od góry – widok na płaszczyznę XZ równoległą do posadzki w miejscu planowanego ustawienia maszyny: P – pas, 1 – rolka z pasem, 2 – podajnik rolkowy, 3 – nożowy zespół tnący, 4 – nóż, 5 – chwytak nieruchomy, 6 – szczęki chwytaka nieruchomego, 7 – chwytak ruchomy, 8 – szczęki chwytaka ruchomego, 9 – zespół grzewczy, 10 – gorąca płyta; $s_1 \dots s_5$ – przemieszczenie liniowe, $\varphi_1 \dots \varphi_3$ – przemieszczenie kątowe

Rys. 127. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od przodu, od strony szafy sterującej: A – rama główna, B – moduł dozujący, C – moduł chwytaka nieprzesuwnego, D – moduł chwytaka przesuwnego, E – moduł grzewczy, F – moduł napinający, G – moduł wydający, H – układ sterujący, P – rolka z pasem

Rys. 128. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od przodu, od strony rolki z pasem: A – rama główna, B – moduł dozujący, D – moduł chwytaka przesuwnego, F – moduł napinający, G – moduł wydający, H – układ sterujący, P – rolka z pasem

Rys. 129. Model 3D przedstawiający widok ogólny zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących podczas dozowania materiału – widok od tyłu, od strony rolki z pasem: A – rama główna, B – moduł dozujący, C – moduł chwytaka nieprzesuwnego, D – moduł chwytaka przesuwnego, E – moduł grzewczy, H – układ sterujący, P – rolka z pasem

Rys. 130. Widok ogólny ramy głównej zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego wraz z podstawowym elektromechanicznym układem napędowym

Rys. 131. Widok ogólny zintegrowanego modułu dozującego od strony układu cięcia pasa

Rys. 132. Widok ogólny zintegrowanego modułu dozującego od strony rolki z pasem

Rys. 133. Przekrój przez główną oś pomocniczego napędu elektromechanicznego napędzającego zintegrowany moduł dozujący, w płaszczyźnie prostopadłej do osi dozowanego pasa

Rys. 134. Przekrój przez główną oś pomocniczego napędu elektromechanicznego napędzającego zintegrowany moduł dozujący, w płaszczyźnie równoległej do osi dozowanego pasa

Rys. 135. Widok ogólny zespołu cięcia pasa zabudowany na zintegrowanym module dozującym: a) stan przed wykonaniem cięcia pasa, b) stan po ucięciu pasa

Rys. 136. Widok ogólny modułu chwytaka nieprzesuwnego zintegrowanego z modułem wydającym pas – stan podczas przygotowywania pasa do operacji zgrzewania doczołowego

Rys. 137. Widok ogólny modułu chwytaka nieprzesuwnego zintegrowanego z modułem wydającym pas – stan po odbiorze pasa po wykonaniu operacji zgrzewania doczołowego

Rys. 138. Przekrój przez główną oś obrotu kluczowych komponentów roboczych modułu chwytaka nieprzesuwnego, bez modułu wydającego pas

Rys. 139. Widok ogólny modułu chwytaka przesuwnego – widok od strony podstawowego układu napędowego zautomatyzowanej zgrzewarki doczołowego

Rys. 140. Widok ogólny modułu chwytaka przesuwnego – widok od strony odbierania pasa

Rys. 141. Przekrój przez główną oś obrotu elementów roboczych modułu chwytaka przesuwne, w płaszczyźnie prostopadłej do osi zgrzewanego pasa

Rys. 142. Przekrój przez główną oś obrotu elementów roboczych modułu chwytaka przesuwne, w płaszczyźnie leżącej na osi zgrzewanego pasa

Rys. 143. Widok ogólny modułu grzewczego z modułem napinającym od strony modułu chwytaka przesuwne, w przypadku wysuniętej płyty grzewczej

Rys. 144. Widok ogólny modułu grzewczego z modułem napinającym od strony modułu chwytaka nieprzesuwne, w przypadku schowanej płyty grzewczej

Rys. 145. Widok modułu napinającego w dwóch możliwych stanach pracy: a) napinacz opuszczony, b) napinacz podniesiony

Rys. 146. Widok ogólny na wybrane komponenty elektropneumatycznego układu sterującego zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego: a) widok ogólny urządzenia z szafą sterującą, b) widok na skrzynię połączeniową zlokalizowaną na korpusie maszyny, c) widok na wyłącznik bezpieczeństwa, d) widok na wyłączniki szafy sterującej, e) ekran główny programu sterującego urządzeniem, f) ekran ustawiania podstawowych parametrów pracy

Rys. 147. Wyposażenie szafy sterowniczej elektropneumatycznego układu sterującego zautomatyzowanego urządzenia zgrzewającego, z wyszczególnieniem najważniejszych elementów

Rys. 148. Widok na płytę z elektropneumatycznymi podzespołami sterującymi zautomatyzowanym urządzeniem zgrzewającym, z wyszczególnieniem najważniejszych elementów

Rys. 149. Widok na zespół chwytaków podczas wydawania pasa przez moduł dozujący, w początkowej fazie operacji przygotowania pasa do zgrzewania

Rys. 150. Widok na zespół chwytaków podczas zaciskania pasa przez elementy modułu chwytaka przesuwne po jego wydaniu w odpowiedniej ilości przez moduł dozujący, w początkowej fazie operacji przygotowania pasa do zgrzewania

Rys. 151. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w początkowej fazie pobierania pasa przez moduł chwytaka przesuwne i jego napinanie przez moduł napinający

Rys. 152. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w końcowej fazie pobierania pasa przez moduł chwytaka przesuwne i ochronę przez moduł napinający przed owijaniem się pasa na innych elementach urządzenia, dla przypadku przygotowywania pasa dłuższego niż skok roboczy modułu chwytaka przesuwne

Rys. 153. Widok ogólny na zautomatyzowane urządzenie zgrzewające w fazie obrotu chwytaków, po pobraniu odpowiedniej ilości pasa, jego ucięciu, a także zabezpieczeniu przez moduł wydający

Rys. 154. Widok na zespół chwytaków podczas uplastyczniania pasa na gorącej płycie

Rys. 155. Widok na zespół chwytaków podczas doprasowania końcówek pasa

Rys. 156. Widok na moduł odbierający podczas wydawania pasa po procesie zgrzewania

Rys. 157. Zautomatyzowane urządzenie zgrzewające podczas zgrzewania poliestrowego pasa: a) widok ogólny podczas dozowania pasa, b) zbliżenie na zespół zgrzewający podczas uplastyczniania materiału

Rys. 158. Podstawowy elektromechaniczny układ napędowy zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów napędowych i transportujących: a) fotografia układu napędowego zamontowanego we wdrożonym urządzeniu, b) kinematyczny schemat strukturalny z oznaczeniem kluczowych komponentów, c) kinematyczny schemat strukturalny z oznaczeniem podstawowych wielkości mechanicznych charakteryzujących jego pracę

Rys. 159. Widok poziomy w płaszczyźnie równoległej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwne, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, F_{pl} – siła uplastyczniająca, $l_1...l_6$ – poszczególne wartości długości, $h_1...h_5$ – poszczególne wartości wysokości

Rys. 160. Widok pionowy w płaszczyźnie prostopadłej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwne, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, $h_1...h_5$ – poszczególne wartości wysokości, $w_1...w_5$ – poszczególne wartości szerokości

Rys. 161. Przekrój poziomy w płaszczyźnie równoległej do szyn profilowych prowadnic liniowych podczas uplastyczniania pasa, z oznaczeniem podstawowych wielkości niezbędnych do określenia stanu obciążenia: m_{chp} – położenie środka ciężkości modułu chwytaka przesuwne, m_{mg} – położenie środka ciężkości modułu grzewczego, $l_1...l_6$ – poszczególne wartości wysokości, $w_1...w_5$ – poszczególne wartości szerokości, F_{n1} – siła napędowa modułu chwytaka przesuwne, F_{n2} – siła napędowa modułu grzewczego

Rys. 162. Cyklogram procesu zgrzewania doczołowego z ilustracją realnego procesu uplastyczniania pasa; fazy procesu: a) uplastycznianie materiału, b) wysuwanie gorącej płyty, c) doprasowanie materiału, d) chłodzenie złącza; v – prędkość przemieszczania się pasa, v_{pl} – prędkość podczas uplastyczniania, v_{dp} – prędkość podczas doprasowywania, t_p – czas trwania procesu, a_1 – odległość początkowa pomiędzy gorącą płytą, a pasem; 1 – pas, 2 – gorąca płyta