



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU

INSTYTUT ANALIZY KONSTRUKCJI

ROZPRAWA DOKTORSKA

**ANALIZA DOŚWIADCZALNA, NUMERYCZNA
I TEORETYCZNA SKRĘCANYCH STATYCZNIE
PANELI WARSTWOWYCH O SZTYWNYCH
OKŁADZINACH I PODATNYM RDZENIU**

Experimental, numerical and theoretical analysis of statically twisted
sandwich panels with rigid facings and deformable core

MGR INŻ. SZYMON WOJCIECHOWSKI

Promotor: **dr hab. inż. Zbigniew POZORSKI, prof. PP**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Anna KNITTER-PIĄTKOWSKA**

Poznań, 2022

Pracą tą chciałbym serdecznie podziękować mojemu Promotorowi, Panu dr hab. inż. Zbigniewowi Pozorskiemu, prof. Politechniki Poznańskiej za ogromne wsparcie na każdym etapie prowadzonych prac nad dysertacją. Za wszelkie rady, przekazaną wiedzę, ale także życzliwość i możliwość swobodnego kontaktu.

Serdecznie dziękuję Promotorowi pomocniczemu, Pani dr inż. Annie Knitter-Piątkowskiej za opiekę i dbanie o precyzyjny kierunek pracy.

Ogromne wyrazy wdzięczności kieruję do mojej Żony Marty za ciągle wsparcie w najtrudniejszych chwilach, których nie było mało.

Dziękuję Rodzicom Dorocie i Krzysztofowi za wychowanie i ukształtowanie mojego charakteru oraz całej Rodzinie za wsparcie oraz nieustanną motywację.

Chciałbym podziękować zespołowi Międzyinstytutowego Laboratorium Konstrukcji Budowlanych, Instytutu Analizy Konstrukcji i Instytutu Budownictwa pod kierownictwem Pani dr inż. Justyny Grzymisławskiej za pomoc przy realizacji badań laboratoryjnych.

Dziękuję wszystkim tym, którzy każdym słowem, gestem i pozytywną energią pomogli mi dotrzeć do końca tej drogi.

Swoją rozprawę dedykuję osobie, dla której czas poświęcony nad pracami przy doktoracie, był czasem ograniczonego kontaktu z tatą...

Alicja, córeczko, tata wraca do domu !

Szymon Wojciechowski

Streszczenie

Panele warstwowe zakwalifikować można do szeroko pojętej grupy wyrobów kompozytowych. Dwie, relatywnie cienkie, zewnętrzne okładziny, które wykonane są z materiału o wysokiej wytrzymałości, połączone są ze sobą za pomocą relatywnie grubego rdzenia, który zazwyczaj jest wykonany z materiału o niskiej gęstości. W rezultacie otrzymywany jest element konstrukcyjny o doskonałej izolacyjności termicznej oraz wysokiej wytrzymałości, przy zachowaniu stosunkowo niskiej masy. W niniejszej rozprawie poddano rozważaniom stosowane powszechnie w budownictwie panele warstwowe o stalowych okładzinach i rdzeniu z pianki poliizocyjanurowej (PIR).

W pracy szczegółowo opisano budowę, właściwości oraz zastosowanie paneli warstwowych. Wyraźnie wskazano przypadki pojawiającego się obciążenia skręcającego panele warstwowe. Przedstawiono również znane teorie opisujące zachowanie paneli warstwowych poddanych tego typu obciążeniu. Podstawowym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest doświadczalna i numeryczna analiza paneli warstwowych poddanych skręcaniu oraz weryfikacja poprawności istniejących teorii opartych na prostych modelach belkowych (jednowymiarowych) opisujących odpowiedź mechaniczną (pola przemieszczeń i rozkład naprężeń wewnętrznych) skręcanych paneli warstwowych. Problem skręcania jest wciąż aktualny ze względu na duże różnice pomiędzy wynikami badań prezentowanymi w literaturze.

W rozprawie przedstawiono wyprowadzenia równań opisujących zachowanie skręcanych swobodnie i skrępowanie paneli warstwowych oraz wyznaczono wartości ich sztywności skrętnej GI_T i sztywności giętno-skrętnej EI_ω . W celu weryfikacji poprawności teorii opartych na modelach belkowych opisujących odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych, wykonano badania laboratoryjne skręcania swobodnego oraz skrępowanego elementów. Skonstruowano autorskie stanowisko badawcze do skręcania paneli warstwowych, za pomocą którego wyznaczono sztywność skrętą paneli warstwowych. W próbie skręcania mierzono względne przyrosty kąta obrotu na długości badanego elementu w odniesieniu do względnego przyrostu siły generującej obrót. W przeprowadzonych próbach skręcania skrępowanego do blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego zastosowano łączniki mechaniczne. W badaniach sprawdzano poziom blokady deplanacji stosując tego typu zamocowanie.

Wykonane badania materiałowe posłużyły do zbudowania odpowiednich modeli materiałowych opisujących zachowanie okładzin i rdzenia. Otrzymane z badań parametry materiałowe zostały wykorzystane do odzwierciedlenia pracy skręcanych paneli warstwowych za pomocą trójwymiarowych, bryłowo-powłokowych modeli numerycznych. Modele numeryczne skręcania swobodnego paneli warstwowych, pozwoliły wskazać teorię najlepiej opisującą to zjawisko. Modele numeryczne skręcania skrępowanego z zastosowaniem laboratoryjnych warunków podparcia wykazały niepełne ograniczenie możliwości spaczenia przekroju podporowego. W celu weryfikacji zachowania paneli warstwowych z pełną blokadą deplanacji przekroju poprzecznego wykonano analizy numeryczne, wprowadzając powierzchniowe warunki brzegowe w pełni ograniczające możliwość spaczenia przekroju podporowego. W przypadku tych modeli, w bliskim sąsiedztwie skrępowanego przekroju podporowego, zaobserwowano wyraźny wzrost wartości naprężeń normalnych i stycznych w okładzinach oraz spadek wartości naprężeń stycznych w rdzeniu skręcanego panelu warstwowego.

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają na wiarygodną ocenę stanu elementu warstwowego poddanego skręcaniu. Wiedza ta może być przydatna podczas projektowania lub diagnostyki paneli warstwowych.

Abstract

Sandwich panels can be classified as a broadly defined group of composite products. Two, relatively thin, outer facings, which are made of a high-strength material, are connected to each other by a relatively thick core, that is usually made of a low-density material. As a result, a structural element with excellent thermal insulation and high strength is obtained, while maintaining a relatively low weight. This dissertation discusses sandwich panels, commonly used in civil engineering, with steel facings and a polyisocyanurate (PIR) foam core.

The work describes in detail the structure, properties and application of sandwich panels. The cases of an occurring torsional load in sandwich structures are clearly indicated. Known theories describing the behavior of sandwich panels subjected to this type of load are also presented. The main goal of this dissertation is the experimental and numerical analysis of sandwich panels subjected to torsion and the validation of the existing theories based on simple beam models (one-dimensional) describing the mechanical response (displacement fields and internal stress distribution) of the twisted sandwich panels. The problem of torsion is still topical due to the significant discrepancies while comparing the various research results presented in the literature.

The dissertation presents the derivation of equations describing the behavior of sandwich panels subjected to free torsion and warping torsion. The values of their torsional stiffness GI_T and bending-torsional stiffness EI_ω were determined. In order to verify the accuracy of the theories based on beam models characterizing the mechanical response of the twisted sandwich panels, laboratory tests of free torsion and warping torsion of elements were performed. An original test stand for the torsion of sandwich panels was constructed which allowed the determination of the torsional stiffness of sandwich panels. In the torsion test, the relative increase of the angle of rotation along the length of the element was measured in relation to the relative increase of the force generating rotation. In the performed tests of warping torsion, mechanical connectors were used to block the deplanation of the support cross-section. The tests verified the level of deplanation blockade while applying this type of support elements.

The performed material tests were used to build appropriate material models describing the behavior of the facings and the core. The material parameters obtained from the tests were employed to reflect the work of the twisted sandwich panels while using three-dimensional, solid-shell numerical models. The numerical models of free

torsion of sandwich panels allowed to indicate the theory that best describes this phenomenon. The numerical models of warping torsion, with the laboratory support conditions, showed that there is a limited possibility of the support cross-section warping. In order to verify the behavior of sandwich panels with full cross-section deplanation blockade, numerical analyzes were performed, introducing surface boundary conditions, fully limiting the possibility of warping of the support cross-section. In the case of these models, in close proximity to the restrained support cross-section, a significant increase in the values of normal and shear stresses in the facings and a decrease in the value of shear stresses in the core of the twisted sandwich panel were observed.

The results of the analyzes carried out allow for a reliable assessment of the condition of the sandwich element subjected to torsion. This knowledge could be useful when designing or diagnosing the sandwich panels.

Spis treści

Spis treści.....	9
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	11
1. Wstęp.....	13
1.1. Motywacja	13
1.2. Cel i zakres pracy	13
1.3. Panele warstwowe – opis, właściwości, zastosowanie.....	17
1.4. Przegląd literatury	18
2. Podstawy teoretyczne	23
2.1. Rozwiązanie problemu skręcania swobodnego i skrępowanego.....	23
2.2. Sztywność skrętna	39
2.2.1 Teoria I – Paul Seide	39
2.2.2 Teoria II – Klaus Stamm / Horst Witte	43
2.2.3 Teoria III – Torsten Höglund	45
2.2.4 Porównanie teorii w zakresie sztywności skrętnej	47
2.3. Charakterystyki wycinkowe paneli warstwowych	48
2.4. Naprężenia wewnętrzne w panelu warstwowym	50
3. Badania laboratoryjne.....	53
3.1. Badania materiałowe	53
3.1.1 Moduł sprężystości podłużnej okładzin	53
3.1.2 Moduł sprężystości podłużnej rdzenia	65
3.1.3 Moduł ścinania rdzenia.....	82
3.2. Stanowisko badawcze do skręcania płyt warstwowych	101
3.2.1 Opis budowy stanowiska.....	106
3.2.2 Współczynniki tarcia łożyska ślizgowego i obrotowego	114
3.2.3 Opór łożyska.....	118
3.2.4 Sztywność stanowiska – określenie funkcji sztywności	122
3.2.5 Sztywność stanowiska – skręcanie paneli warstwowych.....	126
3.2.6 Badanie kalibracyjne	132
3.3. Badanie skręcania paneli warstwowych.....	142
3.3.1 Zestawienie próbek.....	143
3.3.2 Skręcanie swobodne – analiza przemieszczeń	147
3.3.3 Skręcanie swobodne – analiza naprężeń	161

Spis treści

3.3.4	Skręcanie skrępowane – analiza przemieszczeń.....	169
3.3.5	Skręcanie skrępowane – analiza naprężeń.....	173
3.3.6	Komentarz do zrealizowanych badań laboratoryjnych.....	176
4.	Analizy numeryczne.....	178
4.1.	Budowa modelu numerycznego.....	178
4.1.1	Warunki podparcia.....	179
4.1.2	Rozmiar i typ elementów skończonych.....	182
4.1.3	Model materiału.....	183
4.1.4	Parametry kontaktu.....	186
4.1.5	Obciążenie.....	188
4.2.	Analiza wrażliwości zmiany parametrów materiałowych.....	189
4.3.	Analiza zbieżności: rozmiar i rodzaj elementów skończonych.....	191
4.4.	Skręcanie swobodne.....	193
4.4.1	Kalibracja modelu z badaniem laboratoryjnym.....	193
4.4.2	Sztywność skrętna.....	195
4.4.3	Analiza naprężeń.....	198
4.4.4	Miejsca szczególne.....	202
4.5.	Skręcanie skrępowane.....	206
4.5.1	Analiza przemieszczeń.....	207
4.5.2	Analiza naprężeń.....	208
4.5.3	Miejsca szczególne.....	212
5.	Podsumowanie i wnioski.....	216
5.1.	Podsumowanie.....	216
5.2.	Wnioski.....	218
5.3.	Plan dalszych prac.....	221
	Literatura.....	223
	Spis rysunków.....	230
	Spis tabel.....	240
	Załączniki.....	242
	Załącznik A – pomiary próbek.....	242
	Załącznik B – wyniki badań materiałowych.....	284
	Załącznik C – wyniki badań skręcania paneli warstwowych.....	296

Wykaz ważniejszych oznaczeń

Oznaczenia łacińskie:

B	szerokość przekroju poprzecznego panelu warstwowego,
B_{ω}	giętno-skrętny bimoment,
e	odległość między środkami ciężkości okładzin panelu warstwowego,
E_i	moduł sprężystości podłużnej materiału po kierunku i ,
EI_{ω}	giętno-skrętna sztywność elementu,
$F(y, z)$	funkcja naprężeń Prandtla zmiennych y i z ,
G_{ij}	moduł ścinania materiału w płaszczyźnie ij ,
GI_T	sztywność skrętna elementu,
H^c	grubość rdzenia panelu warstwowego,
H	wysokość przekroju poprzecznego panelu warstwowego,
I_T	moment bezwładności przekroju poprzecznego na skręcanie,
I_{ω}	wycinkowy moment bezwładności przekroju poprzecznego,
M_S	całkowity moment skręcający,
$M_{S,V}$	moment skręcający skręcania swobodnego (de Saint-Venanta) ,
$M_{S,\omega}$	moment skręcający skręcania skrępowanego (Własowa) ,
S_{ω}	wycinkowy moment statyczny przekroju poprzecznego,
t^f	grubość okładzin panelu warstwowego,
ν	współczynnik Poissona materiału,
x, y, z	osie układu kartezjańskiego (współrzędne).

Oznaczenia greckie:

ε_i	odkształcenie podłużne po kierunku i ,
ε_{ij}	odkształcenie postaciowe w płaszczyźnie ij ,
θ	jednostkowy kąt skręcania elementu,
λ	giętno-skrętny współczynnik pręta,
σ_i	naprężenie normalne po kierunku i ,
τ_{ij}	naprężenie styczne w płaszczyźnie ij ,
φ	kąt skręcania przekroju poprzecznego,
$\psi(y, z)$	funkcja deplanacji przekroju poprzecznego zmiennych y i z ,
ω	współrzędna wycinkowa.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

Indeksy górne stosowane ogólnie:

- c rdzeń panelu warstwowego,
 f okładzina panelu warstwowego.

1. Wstęp

1.1. Motywacja

Motywację do podjęcia tematyki skręcania paneli warstwowych stanowiły znaczne różnice pomiędzy znanymi z literatury teoriami dotyczącymi odpowiedzi mechanicznej skręcanych elementów warstwowych. Znajdujące swoje praktyczne zastosowanie w budownictwie panele warstwowe nie doczekały się do tej pory kompleksowej weryfikacji tych teorii. Z inżynierskiego punktu widzenia potrzebne są proste modele obliczeniowe, które w zadowalający i bezpieczny sposób opiszą zachowanie skręcanych paneli warstwowych. Jest to istotne tym bardziej, że problem skręcania elementów konstrukcyjnych często budzi emocje oraz różne postawy – od ignorancji do przesadnej obawy. Codzienna praca w zakresie projektowania obiektów przemysłowych, w tym również projektowania obudowy obiektów z wykorzystaniem paneli warstwowych, uświadamia skalę stosowanych w praktyce uproszczeń, ale również ogromny potencjał nowych możliwości zastosowania struktur warstwowych. Prawidłowa ocena zjawiska skręcania jest istotna dla bezpiecznego i świadomego zastosowania paneli warstwowych w przypadku występowania złożonych warunków obciążenia i podparcia.

1.2. Cel i zakres pracy

Podstawowym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest doświadczalna i numeryczna analiza paneli warstwowych poddanych skręcaniu oraz weryfikacja poprawności istniejących teorii opartych na prostych modelach belkowych (jednowymiarowych) opisujących odpowiedź mechaniczną (pola przemieszczeń i rozkład naprężeń wewnętrznych) skręcanych paneli warstwowych. Przeprowadzenie badań laboratoryjnych wymaga opracowania oryginalnego stanowiska badawczego, na którym możliwe będzie swobodne i skrupowane skręcanie pełnowymiarowych paneli warstwowych. Aby uzyskać pełną informację o stanie mechanicznym skręcanych paneli, przewiduje się wykonanie analiz numerycznych złożonych modeli przestrzennych. Modele te wymagają dokładnego odzwierciedlenia rzeczywistych warunków brzegowych (podparcia i obciążenia). Konieczna jest również znajomość parametrów materiałowych. Z tego powodu rozprawa obejmuje również szeroki zakres badań materiałowych.

Dodatkowe cele są związane z wyjaśnieniem szczegółowych zagadnień dotyczących bezpośrednio lub pośrednio problemu skręcania:

Wstęp

- opracowanie stanowiska umożliwiającego badanie paneli warstwowych poddanych skręcaniu i wyznaczenie sztywności skrętnej panelu,
- porównanie rzeczywistego skrępowania panelu ze skrępowaniem teoretycznym,
- opracowanie metody analizy wyników badań materiałowych,
- wykazanie spójności pomiędzy wynikami tradycyjnych badań materiałowych rdzenia z wynikami uzyskanymi za pomocą optycznych pomiarów przemieszczeń.

Na początkowym etapie pracy nad rozprawą doktorską sformułowane zostały kluczowe pytania. Odpowiedzi na te pytania doprowadzą do osiągnięcia głównego celu rozprawy. Dla utrzymania zwartej formy rozprawy sformułowano zakres prac oraz tezy rozprawy.

Kluczowe pytania postawione w rozprawie doktorskiej

- W jaki sposób wyznaczać sztywność skrętną paneli warstwowych?
- W jaki sposób wyznaczać sztywność giętno-skrętną paneli warstwowych?
- Jaki przebieg oraz jakie wartości ekstremalne osiągają naprężenia normalne i styczne w okładzinach oraz styczne w rdzeniu panelu warstwowego podczas skręcania swobodnego i skrępowanego?
- W jaki sposób wyznaczać parametry materiałowe rdzenia i okładzin?
- Które parametry materiałowe mają istotny wpływ na zachowanie się skręcanych paneli warstwowych?
- Jak przyjęte warunki brzegowe wpływają na stan mechaniczny paneli warstwowych?

Szczegółowy zakres rozprawy doktorskiej

- Przegląd literatury

Przegląd literatury rozpoczęto od pozycji przedstawiających ogólny opis budowy paneli warstwowych. Przedstawiono podstawowe właściwości konstrukcji warstwowych oraz ich zastosowanie. Opisano początki stosowanej powszechnie w obliczeniach analitycznych klasycznej teorii paneli warstwowych (Ordinary Sandwich Panel Theory – OSAPT). Następnie przedstawione zostały pozycje literaturowe, w których podejmowano tematykę skręcania paneli warstwowych. Opisano rozwój teorii dotyczących wyznaczania sztywności skrętnej konstrukcji warstwowych, a także

przedstawiono stosowane modele analityczne i numeryczne. Przytoczono publikacje i raporty badawcze dotyczące realizowanych pełnoskalowych badań laboratoryjnych, w których analizowano zachowanie paneli warstwowych obciążonych skrętnie. W odniesieniu do przeprowadzonych badań zwrócono uwagę na zaobserwowane odstępstwa w zakresie warunków brzegowych podarcia i obciążenia od teorii skręcania swobodnego analizowanych laboratoryjnie próbek.

o Analiza teoretycznych modeli belkowych

Analizy teoretyczne modeli belkowych obejmowały obliczenia analityczne sztywności skrętnej oraz giętno-skrętnej paneli warstwowych. Następnie, stosując znane z literatury przedmiotu równania, wyznaczono wartości przemieszczeń skręcanych paneli. Wyznaczono rozkłady naprężeń normalnych i stycznych w okładzinach oraz stycznych w rdzeniu paneli warstwowych. Przeprowadzone analizy oraz przygotowane na ich podstawie wykresy i zestawienia tabelaryczne służyły na dalszym etapie prowadzonych prac do weryfikacji poprawności odpowiednich teorii, na bazie których zostały wykonane.

o Własne badania laboratoryjne.

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w Międzyinstytutowym Laboratorium Konstrukcji Budowlanych, Instytutu Analizy Konstrukcji i Instytutu Budownictwa, Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej. Zrealizowane badania, które szczegółowo opisano w kolejnych rozdziałach rozprawy można podzielić na trzy główne grupy:

- badania pilotażowe:

- skręcanie rury okrągłej: - 1 próbka,
- badanie modułu sprężystości podłużnej materiału rury okrągłej: - 2 próbki,

- badania skręcania paneli warstwowych:

- skręcanie swobodne paneli warstwowych: - 23 próbki,
- skręcanie skrępowane paneli warstwowych: - 23 próbki,

- badania materiałowe okładzin i rdzenia paneli warstwowych,

- moduł ścinania rdzenia panelu warstwowego: - 48 próbek,
- moduł sprężystości podłużnej rdzenia panelu warstwowego: - 144 próbki,
- moduł sprężystości podłużnej okładziny panelu warstwowego: - 24 próbki.

Wstęp

Przeznaczone do badań panele warstwowe zostały wykonane z płyt chłodniczych PIRTECH PWS-PIR-CH, o wysokościach przekroju poprzecznego równych 120 mm i 160 mm. Producentem paneli warstwowych jest firma Pruszyński Sp. z o.o. Do produkcji płyt CH120 i CH160 zastosowano blachy nieposiadające żadnego profilowania (gładkie okładziny), a wypełnienie paneli warstwowych wykonano z pianki poliizocyanurowej (PIR). Do realizacji badań skręcania paneli warstwowych wykorzystano autorskie stanowisko badawcze, za pomocą którego wymuszany jest kąt obrotu panelu warstwowego na jednym z jego końców. Badania materiałowe oraz badania pilotażowe zostały wykonane za pomocą aparatury dostępnej w laboratorium.

o Analiza numeryczna modeli bryłowo-powłokowych

Analizy numeryczne zostały przeprowadzone za pomocą oprogramowania SIMULIA ABAQUS. Dla jak najlepszego odzwierciedlenia rzeczywistej pracy skręcanych paneli warstwowych wszystkie modele numeryczne zostały wykonane jako trójwymiarowe, bryłowo-powłokowe. Parametry materiałowe wykorzystywane w modelowaniu elementów warstwowych były w pełni zgodne z tymi uzyskanymi z badań laboratoryjnych.

Tezy pracy

Określenie celu rozprawy doktorskiej oraz jasnych problemów badawczych pozwoliło na sformułowanie tez pracy. Tezy pracy przyjęto jak niżej:

- o *Możliwe jest skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego będzie określana sztywność skrętna panelu warstwowego w próbie swobodnego skręcania elementu.*
- o *Możliwe jest wyznaczenie prawidłowej odpowiedzi mechanicznej (pola przemieszczeń oraz rozkładu naprężeń wewnętrznych) panelu warstwowego, poddanego skręcaniu swobodnemu i skrępowanemu, za pomocą prostego modelu belkowego pod warunkiem znajomości sztywności skrętnej i giętno-skrętnej panelu.*

- *Odpowiednio skalibrowany bryłowo-powłokowy model numeryczny umożliwia pełne rozpoznanie lokalnych zjawisk, zachodzących w skręcanych swobodnie i skrępowanie panelach warstwowych.*

1.3. Panele warstwowe – opis, właściwości, zastosowanie

Panele warstwowe zakwalifikować można do szeroko pojętej grupy wyrobów kompozytowych. Dzięki wzajemnej współpracy przynajmniej dwóch różnych materiałów otrzymywany jest wyrób o nowych, zmodyfikowanych właściwościach ściśle związanych z najlepszymi cechami komponentów, z których został wykonany [59]. Niezależnie od budowy materiałowej paneli warstwowych, cała gama tych produktów cechuje się zbliżonymi zasadami opisującymi charakter ich pracy mechanicznej. Dwie, relatywnie cienkie, zewnętrzne okładziny, które wykonane są z materiału o wysokiej wytrzymałości, połączone są ze sobą za pomocą relatywnie grubego rdzenia, który wykonany jest najczęściej z materiału o niskiej gęstości i odpowiedniej sztywności w kierunku normalnym do powierzchni okładzin [28]. Dzięki swojej różnorodności w zakresie budowy materiałowej, panele warstwowe znajdują zastosowanie w branży budowlanej zarówno w zakresie konstrukcyjnym [23, 49, 68] jak i izolacyjności termicznej i akustycznej [53, 69], motoryzacyjnej i kosmicznej [8], morskiej [47] i wielu innych. W zależności od przeznaczenia, okładziny paneli warstwowych wykonywane są z takich materiałów jak: stal, aluminium, drewno i materiały drewnopochodne, tektura, tworzywa sztuczne, a także beton. Rdzeń paneli warstwowych wykonany jest najczęściej z: materiałów drewnopochodnych o niskiej gęstości (korek, balsa), pianek poliuretanowych, ekspandowanego i ekstrudowanego polistyrenu, wełny mineralnej lub metali lekkich. W poszukiwaniu nowych właściwości stosowane są także układy wielowarstwowe o złożonej budowie warstwowej rdzenia [3, 46, 50, 72, 83]. Intensywny rozwój konstrukcji warstwowych prowadzi także do analizy właściwości i możliwości zastosowania układów warstwowych o nietypowej budowie materiałowej [51]. W pracy [78] opisano panel warstwowy, w którym funkcję rdzenia pomiędzy dwiema stalowymi okładzinami stanowi wypełnienie mieszanką betonową.

W niniejszej rozprawie poddano rozważaniom stosowane powszechnie w budownictwie panele warstwowe o stalowych okładzinach i rdzeniu z pianki poliizocyjanurowej (PIR). Panele te wykorzystywane są głównie jako obudowy ścian i dachów obiektów przemysłowych, ale także do kształtowania przestrzeni użytkowej

wewnątrz budynków w postaci ścian działowych oraz sufitów podwieszonych. W zależności od zastosowania, okładziny paneli warstwowych mogą być gładkie lub mikro-profilowane (obudowy ścian), a także głęboko-profilowane (obudowy dachów). Swoją atrakcyjność, w praktycznym zastosowaniu inżynierskim, panele warstwowe zawdzięczają wysokiemu stosunkowi odporności na obciążenie zewnętrzne do ciężaru własnego elementu, bardzo dobrym właściwościom termoizolacyjnym i akustycznym oraz krótkim czasie potrzebnym na montaż obudowy z zastosowaniem tego produktu. Złożona budowa strukturalna niesie za sobą także słabe punkty paneli warstwowych związane z niedoskonałościami materiałów składowych gotowego panelu. Wymienić tutaj należy chociażby wrażliwość na lokalne obciążenia skupione, czy wrażliwość na lokalną utratę stateczności ściskanej okładziny [28, 59].

1.4. Przegląd literatury

Początki, mającej swoje inżynierskie zastosowanie, klasycznej teorii paneli warstwowych (Ordinary Sandwich Panel Theory – OSAPT) datuje się na okres po II Wojnie Światowej. W tym okresie następował największy rozkwit lotnictwa cywilnego, co wywierało pozytywny wpływ na rozwój konstrukcji warstwowych stosowanych przy budowie maszyn lotniczych. Powszechnie uznaje się, że autorem klasycznej teorii paneli warstwowych jest Nicholas John Hoff, który w swojej pracy [39] wyprowadził równania opisujące pracę izotropowego panelu warstwowego o grubych okładzinach. Opracowana teoria została rozpowszechniona w kolejnych latach w monografiach Plantema [54] oraz Allen [4]. Prace nad tematyką paneli warstwowych prowadził także Stamm i Witte [70], którzy w swojej monografii detalicznie przedstawili analizę statyczną warstwowych belek i płyt. Jeden z rozdziałów poświęcony jest także tematyce skręcania swobodnego elementów warstwowych. Do najaktualniejszych pozycji przedstawiających kompleksowo problematykę paneli warstwowych należą monografie Zenkert [82] i Vinson [77]. Na bazie przedstawionej klasycznej teorii paneli warstwowych (OSAPT) zbudowany jest także aktualnie obowiązujący dokument normatywny dotyczący samonośnych paneli warstwowych [N-5]. Ogromny wzrost popularności paneli warstwowych doprowadził do licznie pojawiających się w ostatnich latach prac naukowych dotyczących konstrukcji warstwowych w zakresie ich podstawowego zastosowania. Prowadzone są prace dotyczące odpowiedzi mechanicznej paneli warstwowych obciążonych prostopadle do swoich powierzchni w różnych warunkach podparcia [73, 74], a także dotyczące

szczegółowej budowy materiałowej i jej wpływu na lokalne i globalne zachowanie elementu warstwowego [17, 20, 56].

Mniejsza uwaga badaczy skupiona jest na zjawiskach mniej powszechnych, do których niewątpliwie można zaliczyć przypadek skręcania paneli warstwowych. W większości typowych przypadków zastosowania paneli warstwowych w budownictwie, efekt skręcania jest słusznie ignorowany. Nawet jeśli występują jakiegokolwiek mimośrodowe obciążenia, siły skręcające są bardzo małe i, z inżynierskiego punktu widzenia, nieistotne. Negatywne oddziaływanie sił skręcających może mieć jednak znaczenie w przypadku paneli warstwowych stosowanych jako obudowy ścian montowane w układzie poziomym, w których rdzenie są znacznych grubości. Im cięższa i bardziej oddalona jest zewnętrzna warstwa, tym skręcanie panelu warstwowego jest większe [58]. Skręcanie może być także generowane przez montowaną do obudowy z paneli warstwowych dodatkową elewację albo konstrukcję wsporczą pod różnego rodzaju urządzenia technologiczne. Tego typu mimośrodowe obciążenie generuje w elemencie oddziaływanie skrętne.

Tematyka skręcania konstrukcji warstwowych pojawia się w publikacjach naukowych od blisko 70 lat. Jedną z pierwszych prac naukowych był artykuł Seide [67] z 1956 roku, w którym autor rozważał skręcanie prostokątnych paneli warstwowych według teorii de Saint-Venanta oraz wyprowadził wyrażenie na ich sztywność skrętną. W pracy uwzględniono sztywność skrętną poszczególnych warstw panelu warstwowego oraz ich wzajemną współpracę. Ten sam problem analizował Cheng [13, 14], który przedstawił dwie analizy: rygorystyczną i uproszczoną. Ostatecznie uzyskano rozwiązanie oparte na analogii naprężeń Prandtla, co było zgodne z analizą de Saint-Venanta. W przedstawionej w 1974 roku monografii [70], Stamm i Witte przedstawili wyznaczenie wartości naprężeń stycznych wewnątrz panelu warstwowego oraz sztywność skrętną z różniczkowych równań równowagi zgodnych z teorią skręcania swobodnego. Istotną różnicą w odniesieniu do Seide [67] jest założenie, że w okładzinach paneli warstwowych występują tylko naprężenia styczne τ_{xy} , a w rdzeniu naprężenia styczne τ_{xz} . (oznaczenie naprężeń przedstawiono w rozdziale 2.2.2). Jest to konsekwencja przyjętego założenia dotyczącego obiegu naprężeń ścinających w przekroju. Dość podobne podejście, choć nieco uproszczone, zastosował Höglund [40], który analizował płyty warstwowe z dużymi otworami. W swojej pracy wyznaczył równanie na sztywność skrętną, sprowadzając przekrój warstwowy do przekroju zamkniętego, eliminując z pracy wewnętrzną część rdzenia. Höglund wyznaczył

szywność skrętną korzystając z formuły Bredta dla wyidealizowanego przekroju cienkościennego, uwzględniając przy tym różnice parametrów materiałowych rdzenia i okładzin za pomocą relacji modułów ścinania tych materiałów. Uproszczone równania na wyznaczenie sztywności skrętnej paneli warstwowych podaje w swojej monografii również Zenkert [82]. Przedstawia on równania w oparciu o wyprowadzenia teoretyczne Seide [67] zarówno z uwzględnieniem pracy rdzenia, jak i jego pominięciem. Istotne są jednak ograniczenia zakresu stosowania równań przedstawionych przez Zenkerta [82] do przypadku paneli warstwowych o stosunku szerokości do wysokości przekroju poprzecznego znacznie większym niż 10.

Prowadzone na przestrzeni ostatnich lat prace wskazują na trudność w znalezieniu odpowiedniego modelu opisującego zachowanie konstrukcji warstwowych poddanych obciążeniu skręcającemu. Trójwymiarowy stan naprężenia w skręcanym pręcie kompozytowym o przekroju prostokątnym opisał Ahmadi w pracy [2]. Równania opisujące prace elementu warstwowego wyprowadzone zostały w oparciu o zasadę minimalnej całkowitej energii potencjalnej. Sprężystą odpowiedź niejednorodnych belek ortotropowych o dowolnej budowie przekroju poprzecznego opisali Savoia i Tullini [66]. Wykorzystując funkcję naprężenia Prandtla, wyprowadzili wyrażenia do obliczenia rozkładu naprężeń ścinających, deplanacji przekroju poprzecznego i sztywności skrętnej. Rozszerzenie tego podejścia na przypadek bardzo cienkich kompozytowych przekrojów prostokątnych przedstawił Swanson w pracy [75]. Równanie analityczne sztywności skrętnej dla paneli warstwowych o cienkich, sztywnych okładzinach i grubym, podatnym rdzeniu w pracy [10] przedstawił Birsan wraz z zespołem. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analiz numerycznych Avilés, wraz z zespołem, przedstawił istotne wnioski dotyczące stosowanych przy obliczeniach analitycznych klasycznych teorii płyt. W pracach [5, 6, 7, 37] wykazano znaczne rozbieżności w odpowiedzi mechanicznej paneli warstwowych analizowanych analitycznie oraz laboratoryjnie i numerycznie z uwagi na pominięcie wpływu podatnego rdzenia na całkowite odkształcenia panelu warstwowego. Dużą wagę należy również przykładać do prawidłowego wyznaczania modułów ścinania materiałów wchodzących w skład panelu warstwowego [27, 31, 32]. W celu wykazania trafności opracowywanych teorii i przedstawionych rozwiązań, w wielu pracach wykorzystywane są badania eksperymentalne [45], a jeszcze częściej symulacje numeryczne [9, 48, 76]. Popularność zyskują także analizy optymalizacyjne dotyczące budowy obciążonych skrętnie paneli warstwowych. Świadczy to o rosnącym

zapotrzebowaniu na stosowanie konstrukcji warstwowych zapewniających sztywność skrętną całości konstrukcji. W pracy [81] została przedstawiona optymalizacja konstrukcji warstwowej przyjmując za kryterium optymalizacji minimum masy. Analiza oparta jest o wyprowadzoną przez Seide [67] sztywność skrętną oraz prace Whitney [79], Whitney i Kurtz [80], którzy modelowali i analizowali wielowarstwowe płyty anizotropowe. Przytoczone teorie opisujące problem skręcania paneli warstwowych zostały oparte na klasycznej teorii warstwowej, z założeniem jednorodności i izotropowości materiału rdzenia i okładzin.

Zachowanie i właściwości mechaniczne zginanych paneli warstwowych o stalowych okładzinach i podatnym rdzeniu zostały dość dobrze rozpoznane i przedstawione w literaturze. Mimo to, weryfikacji eksperymentalnej wymaga ocena właściwości skrętnych paneli warstwowych stosowanych powszechnie w budownictwie. W ostatnich latach prace w tym zakresie prowadzone były przede wszystkim na Uniwersytecie Technicznym w Darmstadt. W pracy [11] Böttcher, analizując panele warstwowe z otworami, jeden z rozdziałów poświęcił na opis dostępnych w literaturze przedmiotu teorii, w oparciu o które możliwe jest wyznaczenie sztywności skrętnej elementu warstwowego. Tematyka ta została podjęta z uwagi na pojawiające się mimośrodowe obciążenia paneli warstwowych w przypadku wykonywania dużych otworów w ścianach osłonowych obiektów przemysłowych, wykonanych z zastosowaniem paneli warstwowych. Bez zastosowania dodatkowej podkonstrukcji, działające na krawędzi otworu obciążenie oddziałuje bezpośrednio na panele warstwowe. Temat skręcania rozwinęła Rädcl w pracy [63], która poza podobnym zestawieniem dostępnych w literaturze teorii opisała zrealizowane wraz z zespołem badania dotyczące laboratoryjnego wyznaczenia sztywności skrętnej paneli warstwowych. Szczegółowe informacje dotyczące badań zawierające opis procedury badawczej, a także pełne wyniki przedstawiono w raporcie [44]. Na podstawie zrealizowanych badań, w pracy [62] opisano rozbieżności występujące pomiędzy sztywnościami skrętnymi wyznaczonymi analitycznie, a tymi uzyskanymi z badań laboratoryjnych. W pracy [71] została detalicznie przedstawiona analiza numeryczna odpowiadająca zrealizowanemu programowi badań laboratoryjnych. Kompleksowe ujęcie tematu skręcania paneli warstwowych oraz pozostałych efektów wywołanych dużymi otworami w obudowie obiektu zostało przedstawione w raporcie [43]. Analizy numeryczne skręcania paneli warstwowych zostały także przedstawione w pracy [24]. Dodatkowej analizie poddane zostały zamki podłużne paneli warstwowych, na styku

których dochodzi do znacznych koncentracji naprężeń wywołanych przekazywaniem obciążenia na sąsiednie panele warstwowe. Zrealizowane badania [44, 62] oraz raport [43] stanowiły punkt odniesienia do przygotowania obowiązujących rekomendacji projektowych [22] dotyczących tematu skręcania paneli warstwowych.

W zależności od przyjętych warunków brzegowych obciążonych skrętnie paneli warstwowych, w analizowanych elementach pojawiają się efekty wywołane skręcaniem swobodnym oraz skrępowanym. Obciążenie widełkowo podpartego na obu końcach panelu warstwowego mimośrodową siłą skupioną w środku rozpiętości [44] odbiega od przypadku skręcania swobodnego. Analizę numeryczną panelu warstwowego podpartego i obciążonego w podobny sposób przedstawiono w pracy [57]. W pracy tej, w środkowym przekroju poprzecznym panelu warstwowego zaobserwowano wzrost naprężeń normalnych wywołany mimośrodowym obciążeniem. W artykule [61] badano wpływ warunków brzegowych obciążonego skrętnie panelu warstwowego na zachowanie elementu. Rozważano różne warunki podparcia jednoprzęsłowego panelu warstwowego obciążonego momentem skręcającym w środku jego rozpiętości, generowanym za pomocą poziomej lub pionowej pary sił.

Mając na uwadze wrażliwość przyjętych warunków brzegowych podparcia oraz obciążenia na zachowanie skręcanego panelu warstwowego, w niniejszej rozprawie bardzo dużą uwagę kładziono na ten aspekt. Zrealizowane badania laboratoryjne oraz analizy numeryczne, za pomocą których weryfikacji poddane zostały znane z literatury wyprowadzenia analityczne na sztywność skrętną paneli warstwowych, odzwierciedlały w możliwie dokładny sposób przypadek czystego skręcania z zapewnieniem swobody deplanacji przekroju poprzecznego na całej długości skręcanego elementu.

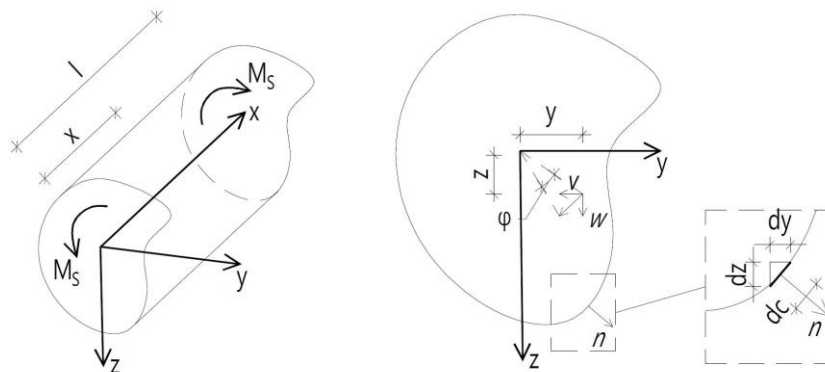
2. Podstawy teoretyczne

W niniejszym rozdziale przedstawiono teorie skręcania dla jednowymiarowego modelu pręta pryzmatycznego. Rozważania rozpoczęto od ogólnego przypadku pręta, przechodząc w dalszej kolejności do modelu belki warstwowej odpowiadającej budową analizowanym panelom warstwowym. W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostały analityczne wyprowadzenia problemu skręcania swobodnego oraz skrępowanego, które w przypadku paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu należą do zjawisk istotnych. Omówione zostały znane z literatury przedmiotu wyprowadzenia sztywności skrętej GI_T oraz giętno-skrętej EI_ω . W dalszej części rozprawy, na bazie opisanych teorii porównano wyniki uzyskane z obliczeń analitycznych, laboratoryjnych i numerycznych.

2.1. Rozwiązanie problemu skręcania swobodnego i skrępowanego

Teoria skręcania swobodnego (de Saint-Venanta) opisuje skręcanie jednorodnego, izotropowego, liniowo-sprężystego pręta pryzmatycznego (rys. 2.1). W teorii tej zakłada się, że rzut konturu przekroju poprzecznego na płaszczyznę prostopadłą do osi pręta pozostaje po skręceniu niezmienny, natomiast punkty leżące w płaszczyźnie przekroju mogą się swobodnie przemieszczać wzdłuż osi pręta [29, 33].

Przypadek czystego skręcania ma miejsce, gdy analizowany element obciążony jest na obu końcach przeciwnymi momentami skręcającymi M_S . W rozważaniach przyjęto prostokątny układ współrzędnych xyz , w którym oś x jest osią wzajemnych obrotów przekrojów poprzecznych pręta, a na płaszczyźnie yz znajduje się nieruchomy przekrój początkowy.



Rysunek 2.1. Jednorodny, izotropowy, liniowo-sprężysty pręt pryzmatyczny.

Pod wpływem działania zewnętrznego obciążenia skręcającego M_S , dwa oddalone od siebie o odległość x przekroje poprzeczne obracają się względem siebie wokół podłużnej osi pręta o kąt skręcania φ . W analizowanym przypadku skręcania swobodnego, jednostkowy kąt skręcania θ ma stałą na długości l wartość równą:

$$\theta = \frac{\varphi(l)}{l} = \frac{d\varphi}{dx}. \quad (2.1)$$

Do opisu składowych przemieszczeń u , v , w odpowiednio po kierunkach osi x , y , z obciążonego elementu wprowadzona została funkcja deplanacji $\psi(y, z)$, która w literaturze nazwana jest także funkcją de Saint-Venanta:

$$\begin{aligned} u &= \varphi' \cdot \psi(y, z), \\ v &= -\varphi' \cdot x \cdot z, \\ w &= \varphi' \cdot x \cdot y. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Korzystając ze związków geometrycznych opisanych, w sposób ogólny, równaniem:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.3)$$

poszczególne składowe tensora odkształceń można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_{yz} = 0, \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \cdot \varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - z \right), \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \cdot \varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + y \right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Wyrażając składowe tensora naprężeń przez odkształcenia (2.4) otrzymano:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = 0, \\ \tau_{xy} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{xy} = G \varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - z \right), \\ \tau_{xz} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{xz} = G \varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + y \right), \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdzie symbolem G oznaczono moduł ścinania izotropowego materiału pręta. Dla rozpatrywanego elementu, który pozbawiony jest wszelkich obciążeń objętościowych: $b_x = b_y = b_z = 0$ (pręt nieważki) równania różniczkowe równowagi przyjmują postać:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + b_x &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + b_y &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0.\end{aligned}\tag{2.6}$$

Z uwagi na fakt, że naprężenia styczne τ_{xy} i τ_{xz} nie są funkcjami zmiennej x , drugie i trzecie równanie (2.6) są spełnione tożsamościowo. Podstawiając do pierwszego równania (2.6) wyrażenia na naprężenia styczne τ_{xy} i τ_{xz} z równania (2.5) oraz dzieląc je stronami przez $G\varphi'$ otrzymano równanie różniczkowe na funkcję deplanacji:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0.\tag{2.7}$$

W celu wyznaczenia naprężeń stycznych τ_{xy} i τ_{xz} wprowadzono nową funkcję F zmiennych y i z spełniającą tożsamościowo pierwsze równanie równowagi (2.6):

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \frac{\partial F}{\partial z}, \\ \tau_{xz} &= -\frac{\partial F}{\partial y}.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Wprowadzona funkcja $F(y, z)$ nazywana jest w literaturze funkcją naprężeń Prandtla. Równanie problemu skręcania swobodnego otrzymano porównując ze sobą wyrażenia na naprężenia styczne τ_{xy} i τ_{xz} (2.5) oraz (2.8), w których pomiędzy funkcjami deplanacji i naprężeń zachodzą następujące relacje:

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial z} &= G\varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - z \right), \\ -\frac{\partial F}{\partial y} &= G\varphi' \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + y \right).\end{aligned}\tag{2.9}$$

Różniczkując pierwsze równanie (2.9) względem zmiennej z oraz drugie równanie (2.9) względem zmiennej y otrzymano:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} &= G\varphi' \cdot \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial z} - 1\right), \\ -\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= G\varphi' \cdot \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial y} + 1\right).\end{aligned}\tag{2.10}$$

Bazując na równaniu harmonicznym na funkcję deplanacji (2.7) wiadomo, że wszystkie pochodne cząstkowe drugiego rzędu funkcji $\psi(y, z)$ są ciągłe w każdym punkcie oraz że pomiędzy nimi zachodzi równość:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial y} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial z}.\tag{2.11}$$

Korzystając z powyższego oraz odejmując stronami równania (2.10) otrzymano równanie różniczkowe funkcji naprężeń w postaci:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = -2G\varphi'.\tag{2.12}$$

Przyjmując, że na powierzchni bocznej pręta nie ma obciążeń zewnętrznych, warunki brzegowe odpowiadające równaniu (2.12) zapisano w postaci:

$$\begin{aligned}\sigma_x \cdot \cos(n, x) + \tau_{yx} \cdot \cos(n, y) + \tau_{zx} \cdot \cos(n, z) &= 0, \\ \tau_{xy} \cdot \cos(n, x) + \sigma_y \cdot \cos(n, y) + \tau_{zy} \cdot \cos(n, z) &= 0, \\ \tau_{xz} \cdot \cos(n, x) + \tau_{yz} \cdot \cos(n, y) + \sigma_z \cdot \cos(n, z) &= 0,\end{aligned}\tag{2.13}$$

gdzie symbolem n oznaczono wektor normalny do powierzchni konturu pręta (rys. 2.1). Posługując się parametrami geometrycznymi, w których symbolem c oznaczono współrzędną krzywoliniową konturu pręta, kosinusy kierunkowe zapisano w postaci:

$$\begin{aligned}
\cos(n, x) &= 0, \\
\cos(n, y) &= \frac{dz}{dc}, \\
\cos(n, z) &= -\frac{dy}{dc},
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Podstawiając równania (2.14) i (2.8) do (2.13) a następnie eliminując z równania zerowe składowe naprężeń (2.5) otrzymano:

$$\frac{\partial F}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dc} + \frac{\partial F}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dc} = \frac{dF}{dc} = 0. \tag{2.15}$$

Warunek (2.15) jest poszukiwanym warunkiem brzegowym funkcji naprężeń $F(y, z)$. Funkcja naprężeń na brzegu przekroju powinna mieć stałą wartość. W celu wyznaczenia finalnej postaci na równowagę sił zewnętrznych i wewnętrznych w układzie, wygodnie jest przyjąć ją równą zero ($F_c = 0$). Równowaga układu sprowadza się ostatecznie do par sił o momencie M_S określonym równaniem:

$$\begin{aligned}
M_S &= \iint (\tau_{xz} \cdot y - \tau_{xy} \cdot z) dydz = \\
&- \iint \left(\frac{\partial F}{\partial y} \cdot y \right) dydz - \iint \left(\frac{\partial F}{\partial z} \cdot z \right) dydz.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Po wykonaniu całkowania przez części otrzymano:

$$M_S = 2 \iint F(y, z) dydz. \tag{2.17}$$

Dla przekroju poprzecznego pręta o spójnym konturze, korzystając z równania różniczkowego funkcji naprężeń (2.12) możliwe jest precyzyjne zdefiniowanie funkcji naprężeń $F(y, z)$, która na brzegu pręta będzie spełniała równanie równowagi (2.15). Podstawiając tę funkcję do równania (2.17), po wykonaniu całkowania oraz podstawieniu dodatkowych zmiennych, równanie problemu skręcania można przedstawić w postaci:

$$M_S = GI_T \varphi'. \tag{2.18}$$

W równaniu (2.18) symbolem I_T oznaczono moment bezwładności przekroju poprzecznego na skręcanie. Człon GI_T nazywany jest sztywnością skrętną elementu, która określa wielkość momentu skręcającego M_S jaka jest potrzebna, aby na jednostce długości skręcić przekrój poprzeczny pręta o wartość kąta równą 1 radian.

Wyrowadzona zależność (2.18) stanowi podstawę do dalszych rozważań dotyczących skręcania paneli warstwowych obliczanych analitycznie za pomocą jednowymiarowego modelu belki. Problemатyczne okazuje się jednak określenie sztywności skrętniej GI_T belki warstwowej. W znanej literaturze przedmiotu wyróżnić można trzy główne teorie, na podstawie których można wyznaczyć sztywność skrętną elementu warstwowego. Teorie te zostały przedstawione i porównane ze sobą w rozdziale 2.2.

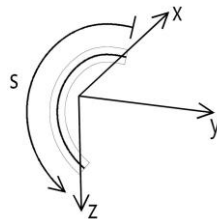
W praktyce spotkać można wiele przypadków, w których czyste skręcanie swobodne nie występuje. W sytuacji, gdy na długości skręcanego pręta niektóre przekroje poprzeczne nie mogą ulegać swobodnej deplanacji, poza naprężeniami stycznymi pojawiają się także podłużne naprężenia normalne. Spowodowane jest to nierównomiernymi zmianami długości włókien podłużnych pręta w przedziale między dwoma sąsiednimi przekrojami [29]. W tych przypadkach swoje zastosowanie znajduje teoria skręcania skrępowanego. W praktyce, efekty pochodzące od tego typu skręcania istotne są tylko w przekrojach cienkościennych [33]. Pomimo litej budowy przekroju poprzecznego analizowanych paneli warstwowych, z uwagi na znaczną różnicę sztywności podłużnej (po kierunku osi x) rdzenia i okładzin, elementy te można traktować jako przekroje cienkościenne zbudowane z wzajemnie współpracujących ze sobą okładzin.

W ogólnym przypadku całkowity efekt skręcania elementu obciążonego momentem skręcającym można rozłożyć na dwa składniki. Część zewnętrznego obciążenia skrętnego jest przenoszona na długości elementu w postaci czystego skręcania (teoria skręcania de Saint-Venanta) powodując deplanację przekroju poprzecznego i wystąpienie tylko naprężeń stycznych w elemencie. Druga część tego obciążenia związana jest ze skręcaniem skrępowanym (teoria skręcania Własowa). Odpowiada ona za pojawienie się w elemencie naprężeń normalnych, które to z kolei powodują wystąpienie dodatkowych naprężeń stycznych w przekroju poprzecznym [36, 64]. Powyższe stwierdzenie można zapisać za pomocą następującego równania:

$$M_S = M_{S,V} + M_{S,\omega}, \quad (2.19)$$

gdzie symbolem $M_{S,V}$ oznaczono część całkowitego momentu skręcającego M_S związaną z teorią skręcania swobodnego oraz symbolem $M_{S,\omega}$ oznaczono część momentu skręcającego M_S związaną z teorią skręcania skrępowanego. Po wyprowadzeniu zależności opisujących przypadek skręcania swobodnego, w dalszej części rozdziału przedstawiono wyprowadzenie równań opisujących przypadek skręcania skrępowanego pręta cienkościennego.

Rozważaniu poddano środkową warstwę przekroju cienkościennego o osi podłużnej pokrywającej się z osią x prostokątnego układu współrzędnych [30]. Stosowane w dalszej części rozdziału współrzędne x oraz s oznaczają odpowiednio współrzędną poprzecznego przekroju pręta oraz współrzędną łukową dowolnego punktu linii środkowej przekroju, mierzoną wzdłuż tej linii od jednego z punktów skrajnych (rys. 2.2.). W teorii Własowa zakłada się, że rzut konturu poprzecznego przekroju pręta cienkościennego na płaszczyznę normalną do jego osi nie zmienia swego kształtu wskutek odkształcenia towarzyszącego skręcaniu skrępowanemu oraz, że w środkowej warstwie ścianki analizowanego elementu kąty odkształcenia postaciowego γ_{xs} są równe zero [30].



Rysunek 2.2. Współrzędne pręta cienkościennego.

Korzystając ze związków geometrycznych, oznaczając składowe przemieszczenia po kierunkach osi x i s odpowiednio symbolami u i p , odkształcenia γ_{xs} wyrażono za pomocą poniższej zależności:

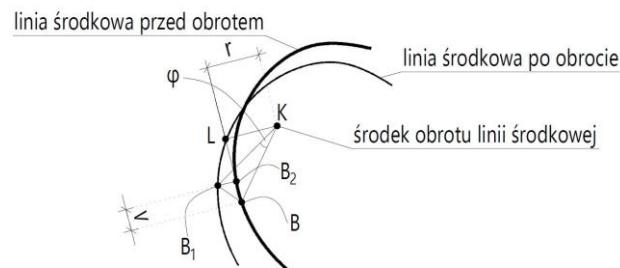
$$\gamma_{xs} = 2 \cdot \varepsilon_{xs} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.20)$$

Uwzględniając założenie zaproponowane przez Własowa dotyczące zerowych wartości odkształcenia postaciowego γ_{xs} w środkowej warstwie ścianki przekroju poprzecznego, równanie (2.20) sprowadzono do postaci:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.21)$$

Na podstawie zależności geometrycznych linii środkowej przekroju poprzecznego przed i po odkształceniu (po obrocie przekroju względem punktu K o kąt φ), przemieszczenie v w kierunku s (rys. 2.3) można zapisać w postaci:

$$v = r \cdot \varphi. \quad (2.22)$$



Rysunek 2.3. Obrót linii środkowej pręta cienkościennego o kąt φ .

Odpowiednie punkty i symbole zastosowane na rys. 2.3 oznaczają:

- punkt B – punkt przekroju pręta cienkościennego przed obrotem linii środkowej,
- punkt B_1 – zmiana położenia punktu B po obrocie linii środkowej o kąt φ ,
- punkt B_2 – rzut punktu B_1 na styczną do linii środkowej w punkcie B ,
- r – wysokość trójkąta o podstawie v (BB_2) i wierzchołku w punkcie obrotu K .

Po podstawieniu równania (2.22) do równania (2.21) oraz obustronnym pomnożeniu przez ds otrzymano:

$$\frac{\partial u}{\partial s} ds = -\varphi' d\omega, \quad (2.23)$$

gdzie $d\omega = r \cdot ds$ (patrz równanie (2.26)). Po obustronnym scałkowaniu równania (2.23) otrzymano:

$$u = -\varphi' \omega + f(x). \quad (2.24)$$

Zapisując równanie na odkształcenie ε_x po kierunku osi x w postaci przyrostu przemieszczenia ∂u względem długości odniesienia ∂x otrzymano:

$$\varepsilon_x = -\varphi'' \omega + f'(x). \quad (2.25)$$

W powyższym równaniu symbolem ω oznaczono współrzędną wycinkową dowolnego punktu linii środkowej, względem dowolnego punktu – bieguna przekroju porzecznego:

$$\omega = \int_{s_0}^s r \cdot ds, \quad (2.26)$$

gdzie symbolem s_0 oznaczono współrzędną łukową punktu, dla którego przyjęto wartość współrzędnej wycinkowej równą 0, symbolem r oznaczono wysokość trójkąta o wierzchołku w przyjętym biegunie przekroju poprzecznego i podstawie ds będącej częścią linii środkowej przekroju. Użyta w równaniu (2.25) funkcja $f(x)$ jest pewną stałą całkowania, która w dalszym rozważaniu przy odpowiednim doborze punktu początkowego współrzędnej wycinkowej będzie mogła zostać pominięta, stąd nie ma konieczności jej precyzyjnego wyznaczenia.

Przyjmując, że na grubości ścianki przekroju poprzecznego naprężenia normalne σ_x oraz σ_s mają stałą wartość, związki fizyczne na odkształcenia ε_x oraz ε_s przyjmują postać:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \sigma_s), \\ \varepsilon_s &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_s - \nu \sigma_x), \end{aligned} \quad (2.27)$$

gdzie symbolem E oznaczono moduł sprężystości podłużnej, a symbolem ν współczynnik Poissona materiału pręta. Korzystając z założenia Własowa o nieodkształcalności konturu, odkształcenia ε_s przyjmują wartości zerowe, a związki fizyczne na naprężenia normalne σ_x oraz σ_s przyjmują postać:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \nu\sigma_x, \\ \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \varepsilon_x.\end{aligned}\tag{2.28}$$

Wprowadzając nową zmienną E^* równą ilorazowi modułu sprężystości podłużnej E i wyrażenia $(1 - \nu^2)$ oraz podstawiając do drugiego równania (2.28) równanie (2.25) otrzymano:

$$\sigma_x = -E^*[\varphi''\omega - f'(x)].\tag{2.29}$$

Sumując po kierunku osi x wszystkie elementarne siły normalne do przekroju oraz zakładając brak sił zewnętrznych po tym samym kierunku otrzymano równanie:

$$\int_A \sigma_x dA = -E^* \cdot \left[\int_A \varphi''\omega dA - \int_A f'(x)dA \right] = 0,\tag{2.30}$$

które można sprowadzić do postaci:

$$f'(x) = \frac{\varphi''}{A} \int_A \omega dA.\tag{2.31}$$

Obierając biegun współrzędnych wycinkowych w środku ścinania przekroju poprzecznego prawa część równania (2.31) przyjmuje wartość zerowe, z uwagi na zerowanie się wycinkowego momentu statycznego:

$$S_\omega = \int_A \omega dA = 0.\tag{2.32}$$

Równanie (2.29) upraszcza się do postaci:

$$\sigma_x = -E^*\varphi''\omega.\tag{2.33}$$

Pozostałe warunki równowagi (sumy momentów elementarnych sił normalnych względem osi y i z) pozostają spełnione z uwagi na zerowanie się (jak w równaniu 2.31) wycinkowych linowych momentów statycznych [30]. Ostatecznie po przemnożeniu

elementarnych sił $\sigma_x dA$ przez współrzędną wycinkową ω i po scałkowaniu po całym przekroju pręta otrzymano równanie na giętno-skrętny bimoment B_ω :

$$B_\omega = \int_A \sigma_x \omega dA. \quad (2.34)$$

Po podstawieniu do równania (2.34) równania (2.33) otrzymano:

$$B_\omega = -E^* I_\omega \varphi'', \quad (2.35)$$

gdzie

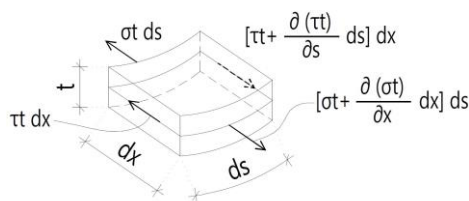
$$I_\omega = \int_A \omega^2 dA. \quad (2.36)$$

Zastosowany w równaniach (2.35, 2.36) symbol I_ω oznacza wycinkowy moment bezwładności przekroju cienkościennego. Podstawiając do równania (2.33) za symbol σ_x symbol σ_ω oraz porównując ze sobą równania (2.33) i (2.35) otrzymano:

$$\sigma_\omega = \frac{B_\omega}{I_\omega} \cdot \omega. \quad (2.37)$$

Budowa równania (2.37) opisująca wycinkowe naprężenia normalne σ_ω jest analogiczna do budowy równań na naprężenia normalne przy zginaniu belek w płaszczyźnie symetrii. Zapisując równanie równowagi sił działających na ścianki wyciętego fragmentu przekroju cienkościennego o grubości t (rys. 2.4), przy pominięciu sił masowych rzutując siły na oś x otrzymano równanie różniczkowe równowagi:

$$\frac{\partial \tau_\omega t}{\partial s} + \frac{\partial \sigma_\omega t}{\partial x} = 0. \quad (2.38)$$



Rysunek 2.4. Zapis sił działających na wycięty fragment pręta cienkościennego.

Po scałkowaniu równania (2.38) względem s w granicach od 0 do s otrzymano:

$$\tau_{\omega} t = - \int_0^s \frac{\partial \sigma_{\omega} t}{\partial x} ds. \quad (2.39)$$

Podstawiając równanie (2.33) do równania (2.39) otrzymano:

$$\tau_{\omega} t = E^* \varphi''' \int_0^s \omega t ds. \quad (2.40)$$

Wprowadzając wielkość statycznego wycinkowego momentu części przekroju zawartej między początkowym punktem skrajnym przekroju, a punktem o współrzędnej łukowej s oznaczoną symbolem S_{ω}^0 , a opisaną równaniem:

$$S_{\omega}^0 = \int_0^s \omega t ds, \quad (2.41)$$

otrzymano równanie na naprężenia styczne τ_{ω} w postaci:

$$\tau_{\omega} = E^* \varphi''' \frac{S_{\omega}^0}{t}. \quad (2.42)$$

Sumując elementarne siły styczne $\tau_{\omega} t ds$ względem przyjętego bieguna można wyznaczyć giętno-skrętny moment M_{ω} [30], który ostatecznie przyjmuje postać:

$$M_{\omega} = -E^* I_{\omega} \varphi'''. \quad (2.43)$$

Porównując ze sobą równania (2.42) i (2.43), równanie na naprężenia styczne τ_{ω} można przedstawić w postaci:

$$\tau_{\omega} = - \frac{M_{\omega} \cdot S_{\omega}^0}{I_{\omega} \cdot t}. \quad (2.44)$$

Człon $E I_{\omega}$ pojawiający się w równaniu (2.43)) nazywany jest sztywnością giętno-skrętną elementu, która dla analizowanych w rozprawie przekrojów poprzecznych paneli warstwowych zostanie opisana w rozdziale 2.3.

Podstawiając do równania na całkowity moment skręcający M_S (2.19) równanie na moment skręcania swobodnego $M_{S,V}$ (2.18) oraz równanie na giętno-skrętny moment $M_{S,\omega}$ (2.43) otrzymano równanie różniczkowe funkcji kąta obrotu przekroju poprzecznego elementu φ :

$$M_S = GI_T \varphi' - E^* I_\omega \varphi'''. \quad (2.45)$$

Różniczkując obustronnie równanie (2.45) względem x oraz zakładając, że na długości pręta może działać obciążenie $m_S(x)$ ($m_S(x) = -dM_S/dx$), otrzymano:

$$m_S(x) = -GI_T \varphi'' + E^* I_\omega \varphi^{IV}. \quad (2.46)$$

Wprowadzając dodatkową stałą nazywaną w literaturze giętno-skrętnym współczynnikiem pręta cienkościennego:

$$\lambda^2 = \frac{GI_T}{E^* I_\omega}, \quad \lambda \neq 0, \quad (2.47)$$

otrzymano następujące równanie różniczkowe, w którym niewiadomą jest funkcja kąta obrotu pręta $\varphi(x)$:

$$\frac{m_S(x)}{E^* I_\omega} = -\lambda^2 \varphi'' + \varphi^{IV}. \quad (2.48)$$

Rozwiązanie równania różniczkowego (2.48) składa się z całki ogólnej φ_0 oraz całki szczególnej φ_1 , która zależy od rozkładu momentu skręcającego $m_S(x)$ na długości elementu:

$$\varphi(x) = C_1 \cdot \sinh(\lambda x) + C_2 \cdot \cosh(\lambda x) + C_3 \cdot x + C_4 + \varphi_1(x), \quad (2.49)$$

gdzie symbolami C_1, C_2, C_3, C_4 oznaczono stałe całkowania zależne od warunków brzegowych analizowanego układu.

Stałe całkowania równania (2.49) można wyznaczyć z warunków brzegowych określonych dla pręta w rozpatrywanym przedziale. W tab. 2.1 zestawiono wybrane

warunki brzegowe przedziału pręta oraz odpowiadające im założenia dotyczące zachowania analizowanego elementu.

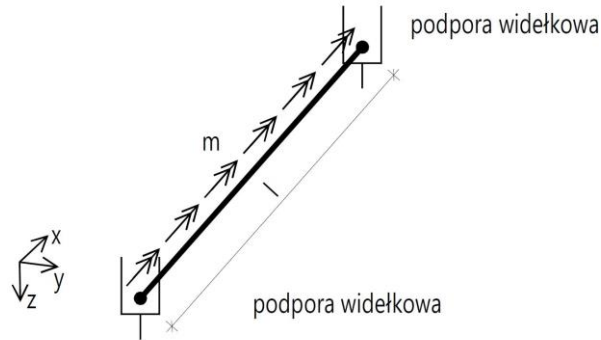
Tabela 2.1. Zestawienie warunków brzegowych skrajnych przekrojów pręta.

podpora widelkowa	$\varphi = 0$ $B_{\omega} = 0 \rightarrow \varphi'' = 0$
pełne utwierdzenie	$\varphi = 0$ $u = 0 \rightarrow \varphi' = 0$
swobodny koniec	$B_{\omega} = 0 \rightarrow \varphi'' = 0$ $M_S = 0 \rightarrow \varphi''' - \lambda^2 \varphi' = 0$
zachowanie ciągłości	$\varphi^L = \varphi^P$ $u^L = u^P \rightarrow \varphi'^L = \varphi'^P$
moment skupiony	$B_{\omega} = 0 \rightarrow \varphi'' = 0$ $M_S \neq 0 \rightarrow \varphi''' - \lambda^2 \varphi' = -\frac{M_S}{EI_{\omega}}$

Na podstawie przedstawionych w tab. 2.1 danych oraz równania różniczkowego (2.48) poniżej przedstawiono równania funkcji kąta obrotu φ , momentu skręcania swobodnego $M_{S,V}$, giętno-skrętnego momentu $M_{S,\omega}$ oraz giętno-skrętnego bimomentu B_{ω} dla najbardziej typowych schematów statycznych belek jednoprzęsłowych. Schematy statyczne zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 2.5 – 2.7, natomiast wyżej wymienione funkcje w tab. 2.2 – 2.4.

Schemat statyczny I:

- dwustronna podpora widełkowa, belka obciążona równomiernie na długości l momentem skręcającym o wartości m (rys. 2.5).



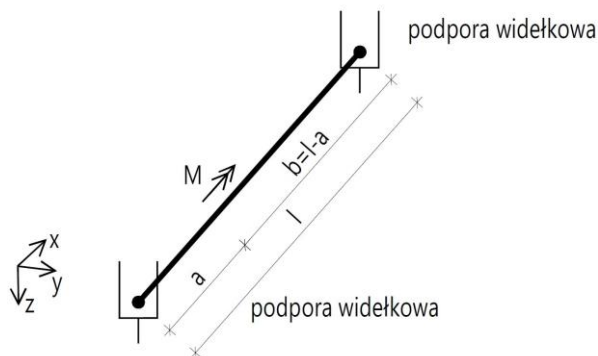
Rysunek 2.5. Schemat statyczny I.

Tabela 2.2. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny I.

$\varphi(x) = \frac{m}{\lambda^4 E^* I_\omega} \frac{[1 - \cosh(\lambda l)]}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda x) + \frac{m}{\lambda^4 E^* I_\omega} \cosh(\lambda x) + \frac{ml}{2\lambda^2 E^* I_\omega} x - \frac{m}{\lambda^4 E^* I_\omega} - \frac{m}{2\lambda^2 E^* I_\omega} x^2$
$M_{S,V}(x) = \frac{m}{\lambda} \frac{[1 - \cosh(\lambda l)]}{\sinh(\lambda l)} \cosh(\lambda x) + \frac{m}{\lambda} \sinh(\lambda x) + \frac{ml}{2} - mx$
$M_{S,\omega}(x) = -\frac{m}{\lambda} \frac{[1 - \cosh(\lambda l)]}{\sinh(\lambda l)} \cosh(\lambda x) - \frac{m}{\lambda} \sinh(\lambda x)$
$B_\omega(x) = -\frac{m}{\lambda^2} \frac{[1 - \cosh(\lambda l)]}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda x) - \frac{m}{\lambda^2} \cosh(\lambda x) + \frac{m}{\lambda^2}$

Schemat statyczny II:

- dwustronna podpora widełkowa, belka obciążona w odległości a od jednej z podpór skupionym momentem skręcającym o wartości M (rys. 2.6).



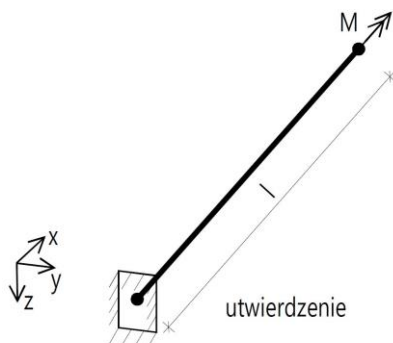
Rysunek 2.6. Schemat statyczny II.

Tabela 2.3. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny II.

$\varphi^{0-a}(x) = \frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) - \cosh(\lambda a) \right] \sinh(\lambda x) + \frac{l-a}{l} \frac{M}{\lambda^2 E^* I_\omega} x$
$\varphi^{a-l}(x) = \frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) \right] \sinh(\lambda x) - \frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \sinh(\lambda a) \cosh(\lambda x) - \frac{a}{l} \frac{M}{\lambda^2 E^* I_\omega} x + \frac{Ma}{\lambda^2 E^* I_\omega}$
$M_{S,V}^{0-a}(x) = M \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) - \cosh(\lambda a) \right] \cosh(\lambda x) + \frac{l-a}{l} M$
$M_{S,V}^{a-l}(x) = M \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) \right] \cosh(\lambda x) - M \sinh(\lambda a) \sinh(\lambda x) - \frac{a}{l} M$
$M_{S,\omega}^{0-a}(x) = -M \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) - \cosh(\lambda a) \right] \cosh(\lambda x)$
$M_{S,\omega}^{a-l}(x) = -M \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) \right] \cosh(\lambda x) + M \sinh(\lambda a) \sinh(\lambda x)$
$B_\omega^{0-a}(x) = -\frac{M}{\lambda} \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) - \cosh(\lambda a) \right] \sinh(\lambda x)$
$B_\omega^{a-l}(x) = -\frac{M}{\lambda} \left[\frac{\cosh(\lambda l)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda a) \right] \sinh(\lambda x) + \frac{M}{\lambda} \sinh(\lambda a) \cosh(\lambda x)$

Schemat statyczny III:

- jednostronne utwierdzenie, belka obciążona na końcu skupionym momentem skręcającym o wartości M (rys. 2.7).



Rysunek 2.7. Schemat statyczny III.

Tabela 2.4. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny III.

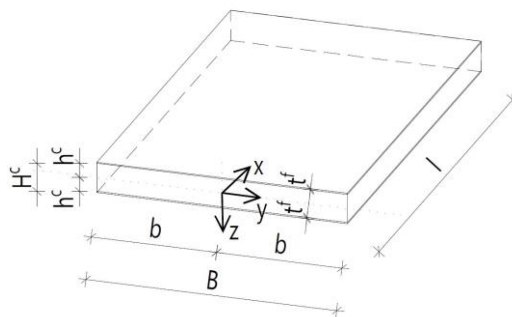
$\varphi(x) = -\frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \sinh(\lambda x) + \frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \left[\frac{\sinh(\lambda l)}{\cosh(\lambda l)} \right] \cosh(\lambda x) + \frac{M}{\lambda^2 E^* I_\omega} x - \frac{M}{\lambda^3 E^* I_\omega} \left[\frac{\sinh(\lambda l)}{\cosh(\lambda l)} \right]$
$M_{S,V}(x) = -M \cosh(\lambda x) + M \left[\frac{\sinh(\lambda l)}{\cosh(\lambda l)} \right] \sinh(\lambda x) + M$
$M_{S,\omega}(x) = M \cosh(\lambda x) - M \left[\frac{\sinh(\lambda l)}{\cosh(\lambda l)} \right] \sinh(\lambda x)$
$B_\omega(x) = \frac{M}{\lambda} \sinh(\lambda x) - \frac{M}{\lambda} \left[\frac{\sinh(\lambda l)}{\cosh(\lambda l)} \right] \cosh(\lambda x)$

2.2. Sztywność skrętna

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe założenia oraz równania pozwalające wyznaczyć sztywność skrętną GI_T paneli warstwowych. Rozważaniu poddane zostały znane z literatury teorie, które różnią się między sobą założeniami oraz wartościami obliczonych sztywności skrętnych. Na końcu rozdziału, dla wszystkich analizowanych w pracy przekrojów poprzecznych paneli warstwowych, przedstawiono porównanie wyników sztywności skrętnych GI_T obliczonych za pomocą poszczególnych teorii.

2.2.1 Teoria I – Paul Seide

Pierwszą znaną z literatury teorią opisującą sposób wyznaczania sztywności skrętniej GI_T paneli warstwowych jest przedstawiona w 1956 roku teoria [67], której autorem jest Paul Seide. W publikacji [67] przedstawione są trzy podejścia obliczeniowe, które w zależności od złożoności finalnej postaci równania opisującego sztywność skrętną różnią się między sobą konkretnymi założeniami dotyczącymi możliwości ich stosowania. Wszystkie przedstawione podejścia obliczeniowe odniesiono do oznaczeń budowy przekroju poprzecznego przedstawionego na rys. 2.8.



Rysunek 2.8. Budowa panelu warstwowego – Seide [6].

Symbolem b oznaczono połowę szerokości całkowitej B przekroju poprzecznego panelu warstwowego, symbolem h^c oznaczono połowę grubości całkowitej rdzenia H^c , natomiast symbolem t^f oznaczono grubość okładzin.

W pierwszym podejściu obliczeniowym przedstawionym w pracy [67] zastosowano sztywność skrętną jak dla izotropowej płyty o szerokości B i grubości $(2h^c + 2t^f)$:

$$GI_T = \frac{1}{3}GB(2h^c + 2t^f)^3, \quad (2.50)$$

gdzie symbolem G oznaczono moduł ścinania izotropowego materiału płyty. Dla poprawności stosowania równania (2.50) należy spełnić warunki geometryczne dotyczące budowy płyty: stosunek szerokości B do całkowitej grubości ($2h^c + 2t^f$) powinien być większy niż 10 oraz stosunek długości płyty l do szerokości płyty B powinien być większy niż 4.

Spełniając warunki geometryczne oraz zakładając, że o sztywności skrętnej płyty warstwowej decydują zewnętrzne okładziny o równej grubości t^f (moduł ścinania materiału rdzenia G^c jest pomijalnie mały w porównaniu z modułem ścinania materiału okładzin G^f), równanie na sztywność skrętną GI_T przyjmuje postać:

$$GI_T = \frac{1}{3}G^f B[(2h^c + 2t^f)^3 - (2h^c)^3] = \frac{8}{3}G^f (t^f)^3 B \left[\left(1 + \frac{h^c}{t^f}\right)^3 - \left(\frac{h^c}{t^f}\right)^3 \right]. \quad (2.51)$$

Drugie podejście obliczeniowe opisane w [67] bazuje na teorii de Saint-Venanta, zgodnie z którą muszą być spełnione warunki równowagi naprężeń wewnątrz skręcanego panelu warstwowego (por. równanie 2.6). Seide [6] uwzględnia wystąpienie naprężeń stycznych τ_{xy} i τ_{xz} zarówno w rdzeniu jak i okładzinach panelu warstwowego. Z uwagi na symetryczną budowę analizowanego elementu (rys. 2.8), do spełnienia warunku równowagi (2.6) zostały przyjęte funkcja naprężeń dla rdzenia $F^c(y, z)$ i dla okładzin $F^f(y, z)$, dla których:

$$\begin{aligned} \tau_{xy}^c &= \frac{\partial F^c}{\partial z}, & \tau_{xz}^c &= -\frac{\partial F^c}{\partial y}, \\ \tau_{xy}^f &= \frac{\partial F^f}{\partial z}, & \tau_{xz}^f &= -\frac{\partial F^f}{\partial y}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Przyjęte funkcje naprężeń opisujące stan naprężenia w przekroju poprzecznym panelu warstwowego powinny spełniać następujące warunki brzegowe:

- naprężenia styczne w rdzeniu τ_{xy}^c oraz okładzinach τ_{xy}^f , na powierzchniach zewnętrznych o współrzędnych $y = \pm b$, przyjmują wartości zerowe,
- naprężenia styczne w okładzinach τ_{xz}^f , na powierzchniach zewnętrznych o współrzędnych $z = \pm (h^c + t^f)$, przyjmują wartości zerowe,
- naprężenia styczne w rdzeniu τ_{xz}^c oraz okładzinach τ_{xz}^f , na powierzchniach styku pomiędzy warstwami, o współrzędnych $z = \pm h^c$, przyjmują równe wartości,

- przemieszczenia podłużne (wzdłuż osi x) punktów wewnętrznych rdzenia i okładzin, na powierzchniach styku pomiędzy warstwami, o współrzędnych $z = \pm h^c$, przyjmują równe wartości.

Rozwiązanie równań różniczkowych skręcania swobodnego, przy spełnieniu powyższych warunków brzegowych prowadzi do otrzymania następujących funkcji naprężeń:

$$\begin{aligned} F^c &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} Y_n^c(z) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right), \\ F^f &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} Y_n^f(z) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right). \end{aligned} \quad (2.53)$$

Użyte w równaniach (2.53) szeregi zostały przyjęte przez Seide [67] w postaci:

$$\begin{aligned} Y_n^c(z) &= A_n \cdot \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi z}{2b}\right) + \frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} \cdot G_{xz}^c b^2 \theta, \\ Y_n^f(z) &= B_n \cdot \cosh\left(\frac{n\pi z}{2b}\right) + C_n \cdot \sinh\left(\frac{n\pi z}{2b}\right) + \frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} \cdot G^f b^2 \theta, \end{aligned} \quad (2.54)$$

gdzie symbolem G_{xy}^c oznaczono moduł ścinania rdzenia w płaszczyźnie xy , symbolem G_{xz}^c oznaczono moduł ścinania rdzenia w płaszczyźnie xz , symbolem G^f oznaczono moduł ścinania okładziny, a symbolem θ oznaczono jednostkowy kąt skręcania panelu warstwowego oraz:

$$A_n = \frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} G^f b^2 \theta \cdot \frac{\left(1 - \frac{G_{xz}^c}{G^f}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) - 1}{\left[\sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \frac{G^f}{G_{xz}^c} \sinh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) + \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) \right]}, \quad (2.55a)$$

$$B_n = \frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} G^f b^2 \theta \cdot \frac{\left\{ \begin{aligned} &\left[\sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \sinh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \left[\frac{G^f}{G_{xz}^c} \sinh\left(\frac{n\pi h^c}{2b}\right) \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(1 - \frac{G^f}{G_{xz}^c}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi(h^c + t^f)}{2b}\right) \right] \right] \\ &- \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi h^c}{2b}\right) \end{aligned} \right\}}{\left[\sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \frac{G^f}{G_{xz}^c} \sinh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) + \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) \right]}, \quad (2.55b)$$

$$C_n = -\frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} G^f b^2 \theta \cdot \frac{\left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \left[\frac{G^f}{G_{xz}^c} \cdot \cosh\left(\frac{n\pi h^c}{2b}\right) \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{G^f}{G_{xz}^c}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi(h^c + t^f)}{2b}\right) \right] \\ & - \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi h^c}{2b}\right) \end{aligned} \right\}}{\left[\begin{aligned} & \sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \frac{G^f}{G_{xz}^c} \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) \\ & + \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right) \end{aligned} \right]} \quad (2.55c)$$

Przyjmując funkcje naprężeń określone równaniem (2.53) oraz wyrażając sztywność skrętną GI_T za pomocą momentu skręcającego i funkcji naprężeń (równanie 2.17), po spełnieniu warunków brzegowych na wolnym od naprężeń obszarze zewnętrznym panelu warstwowego, ostateczny wzór na sztywność skrętną ma postać:

$$GI_T = \frac{1}{3} G_{xy}^c (2h^c)^3 (2b) \left[\begin{aligned} & 1 - \frac{192}{\pi^5} \sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{h^c}{b} \\ & \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \tanh\left(\frac{n\pi}{2} \sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \frac{b}{h^c}\right) \end{aligned} \right] \\ + 2 \cdot \left\{ \frac{1}{3} G^f (t^f)^3 (2b) \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{t^f}{b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \tanh\left(\frac{n\pi}{2} \frac{b}{t^f}\right) \right] \right\} \quad (2.56) \\ + \frac{64}{\pi^5} G^f (2b)^4 \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \left\{ \frac{\left[\sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) + \tanh\left(\frac{n\pi t^f}{4b}\right) \right]^2}{\frac{G^f}{G_{xz}^c} \sqrt{\frac{G_{xz}^c}{G_{xy}^c}} \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi h^c}{2b}\right) + \coth\left(\frac{n\pi t^f}{2b}\right)} \right\}.$$

Pierwszy oraz drugi człon równania (2.56) określa odpowiednio sztywność skrętną ortotropowego rdzenia oraz sumę sztywności skrętnych dwóch izotropowych okładzin pracujących niezależnie. Trzeci człon równania (2.56) odgrywa największe znaczenie w całkowitej wartości sztywności skrętniej i określa efekt współpracy pomiędzy rdzeniem i okładzinami panelu warstwowego.

Trzecie podejście obliczeniowe Seide [67] oparte jest na wyprowadzonym równaniu sztywności skrętniej układu warstwowego dla przypadku ogólnego (2.56). Przy założeniu nieskończonej szerokości B panelu warstwowego, równanie (2.56) sprowadza się do postaci:

$$GI_T = \frac{8}{3} G^f (t^f)^3 B \left[\left(1 + \frac{h^c}{t^f} \right)^3 + \left(\frac{G_{xy}^c}{G^f} - 1 \right) \left(\frac{h^c}{t^f} \right)^3 \right]. \quad (2.57)$$

Równanie (2.57) przybiera postać podobną do równania (2.51), ale zawiera dodatkowy człon uwzględniający pracę rdzenia panelu warstwowego. W podsumowaniu swojej pracy [67], na przykładzie obliczeniowym, Seide wykazał, że atrakcyjne swoją prostotą równania (2.57) oraz (2.51) są niespójne dla płyt o zbyt małym stosunku szerokości do wysokości przekroju poprzecznego. Przy stosunku szerokości B do wysokości H równym 10 różnice w wynikach przekraczają 40%. W rozdziale 2.2.4 przedstawione zostaną wyniki sztywności skrętnych analizowanych w pracy paneli warstwowych z zastosowaniem wszystkich trzech przedstawionych podejść obliczeniowych.

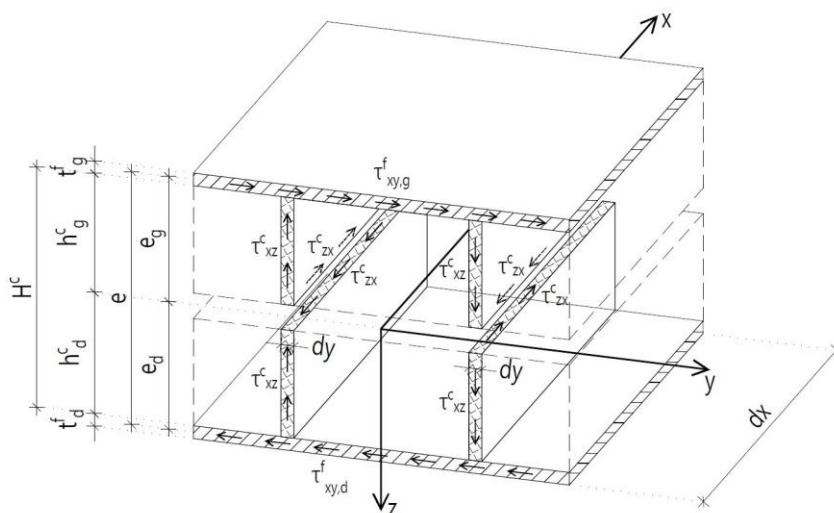
Równania (2.57) oraz (2.51) zostały także przedstawione w wydanej w 1997 roku zbiorowej pracy [82] dotyczącej płyt warstwowych, w której Zenkert przedstawił równania na sztywność skrętną analizowanych za pomocą modeli belkowych paneli warstwowych.

2.2.2 Teoria II – Klaus Stamm / Horst Witte

Kolejna teoria opisująca sposób wyznaczania sztywności skrętniej GI_T paneli warstwowych została przedstawiona w 1974 roku w monografii [70] przez Stamma i Witte. Przyjęte w pracy założenia, zgodne z teorią skręcania swobodnego de Saint-Venatna, zakładają, że:

- materiał okładzin i rdzenia paneli warstwowych jest liniowo-sprężysty,
- okładziny paneli warstwowych są płaskie, wzajemnie równoległe oraz cienkie, co przekłada się na ich znikomą sztywność skrętną oraz stały na grubości okładzin przepływ naprężeń stycznych τ_{xy}^f (rys. 2.9),
- rdzeń paneli warstwowych, w przeciwieństwie do okładzin jest podatny, co przekłada się na pomijalny jego wpływ w przenoszeniu naprężeń stycznych τ_{xy}^c ,
- rdzeń paneli warstwowych przenosi naprężenia styczne τ_{xz}^c , co przekłada się na zamknięty przepływ naprężeń stycznych wywołanych skręcaniem wewnątrz przekroju poprzecznego (rys. 2.9).

Omówione w niniejszym rozdziale wyprowadzenie równania na sztywność skrętną oraz użyte w nim symbole odnoszą się bezpośrednio do oznaczeń budowy przekroju poprzecznego przedstawionego na rys. 2.9 [70]. Stosowane w wyprowadzeniu symbole G_{xz}^c oraz G^f oznaczają moduł ścinania materiału odpowiednio rdzenia w płaszczyźnie xz i okładzin panelu warstwowego.

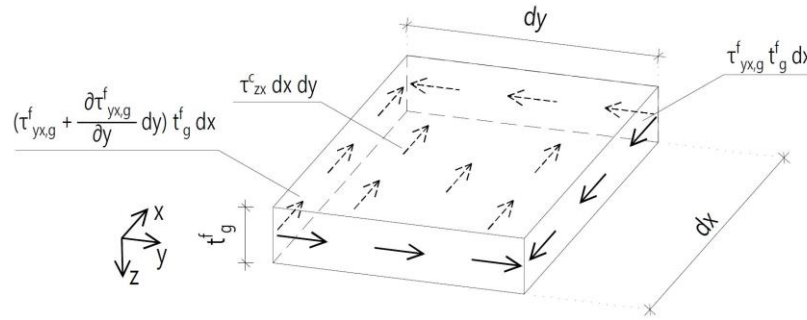


Rysunek 2.9. Budowa panelu warstwowego – Stamm i Witte [8].

Na podstawie założenia o nieprzenoszeniu przez rdzeń panelu warstwowego naprężeń stycznych τ_{xy}^f podzielono go na wąskie paski o szerokości dy , które mogą pracować względem siebie niezależnie. Wyprowadzenie równania sztywności skrętnej przeprowadzone przez Stamma i Witte [70] polega na myślowym rozcięciu panelu warstwowego na dwie części płaszczyzną xy o współrzędnej $z = 0$. Po obrocie oddalonego o odległość dx przekroju poprzecznego o kąt $d\varphi$ na skutek skręcania swobodnego obie rozcięte części uległyby spaceniu. Ze względu na brak możliwości wystąpienia skokowej różnicy przemieszczeń pomiędzy myślowo rozciętymi fragmentami panelu warstwowego, wewnątrz rdzenia, na płaszczyźnie cięcia pojawiają się naprężenia styczne τ_{zx}^c , które zapewniają ciągłość materiału rdzenia. Poza równowagą myślowo rozciętych części panelu warstwowego w pracy [70] wykorzystano także geometryczne zależności deplanacji zamkniętego przekroju cienkościennego skręcanego swobodnie elementu.

Zapisując równanie równowagi wyciętego fragmentu górnej okładziny (rys. 2.10), dla którego przy braku obciążenia na zewnętrznej powierzchni panelu warstwowego przyrost naprężeń stycznych $\tau_{yx,g}^f$ wewnątrz okładziny równoważony jest przez naprężenia styczne τ_{zx}^c wewnątrz rdzenia, otrzymano równanie opisujące relację naprężeń stycznych wewnątrz panelu warstwowego:

$$\frac{\partial \tau_{yx,g}^f}{\partial y} dy t_g^f dx + \tau_{zx}^c dx dy = 0. \quad (2.58)$$



Rysunek 2.10. Fragment górnej okładziny – zapis równania równowagi [8].

Na podstawie opisanych zależności geometrycznych, związków fizycznych dla materiałów liniowo-sprężystych oraz równania równowagi (2.58) uzyskano równanie różniczkowe funkcji naprężeń stycznych τ_{xz}^c wewnątrz rdzenia panelu warstwowego:

$$\tau_{xz}^c'' - k^2 \tau_{xz}^c = 0, \quad (2.59)$$

gdzie

$$k^2 = \frac{G_{xz}^c}{G^f} \cdot \frac{t_d^f + t_g^f}{H^c t_d^f t_g^f}. \quad (2.60)$$

Podstawienie rozwiązania równania różniczkowego (2.59) do równania (2.58) prowadzi do wyznaczenia równań na naprężenia styczne w skręcanym panelu warstwowym. Po podstawieniu do równania równowagi naprężeń wewnętrznych zamkniętego przekroju cienkościennego i obciążenia zewnętrznego, wyrażenie na sztywność skrętną GI_T przedstawiono w postaci [70]:

$$GI_T = G^f \cdot 4e^2 B \frac{t_d^f t_g^f}{t_d^f + t_g^f} \left(1 - \frac{\tanh\left(\frac{kB}{2}\right)}{\frac{kB}{2}} \right). \quad (2.61)$$

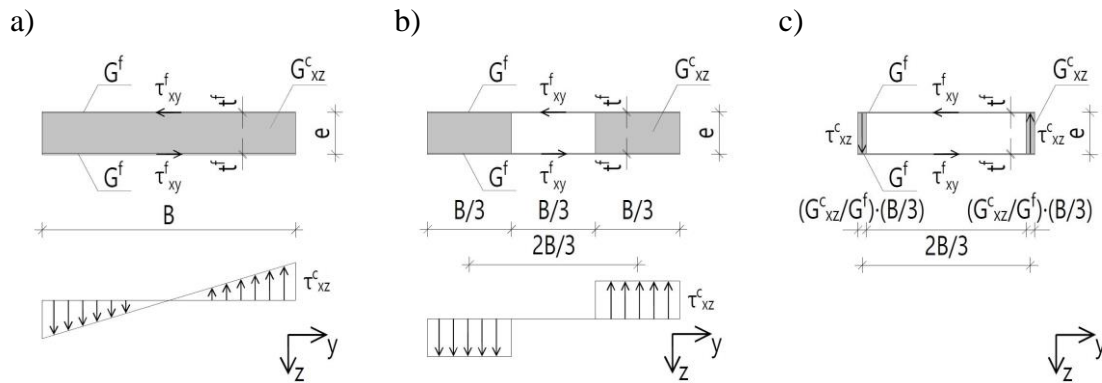
2.2.3 Teoria III – Torsten Höglund

Ostatnią przedstawioną w pracy teorią opisującą sposób wyznaczania sztywności skrętniej GI_T paneli warstwowych jest przedstawiona w 1986 roku teoria autorstwa Höglunda [40]. W pracy [40] przedstawione jest podejście obliczeniowe, w którym sztywność skrętna GI_T jest wyznaczona przy wykorzystaniu formuły Bredta dla wyidealizowanego przekroju cienkościennego.

Höglund [40], na podstawie przeprowadzonych badań skręcania oraz zginania ze skręcaniem panelu warstwowego, w celu skalibrowania wyników laboratoryjnych

z obliczeniami analitycznymi przyjął, że skręcany panel warstwowy pracuje jak zamknięty przekrój cienkościenny, w którym:

- okładziny panelu warstwowego, o module ścinania G^f stanowią półkę górną i dolną przekroju poprzecznego (rys. 2.11a),
- wewnętrzna część rdzenia panelu warstwowego o szerokości równej $B/3$ nie bierze udziału w pracy elementu (rys. 2.11b),
- zewnętrzne części rdzenia panelu warstwowego o szerokościach $B/3$ i module ścinania G_{xz}^c można sprowadzić do szerokości $(G_{xz}^c/G^f) \cdot (B/3)$ (rys. 2.11c).



Rysunek 2.11. Budowa panelu warstwowego – Höglund [9]: a) budowa przekroju poprzecznego, b) niepracująca wewnętrzna część rdzenia, c) sprowadzona szerokość pracującej części rdzenia.

Spełniając powyższe założenia, korzystając z formuły Bredta:

$$I_T = \frac{4 \cdot A_0^2}{\oint \frac{1}{t} ds}, \quad (2.62)$$

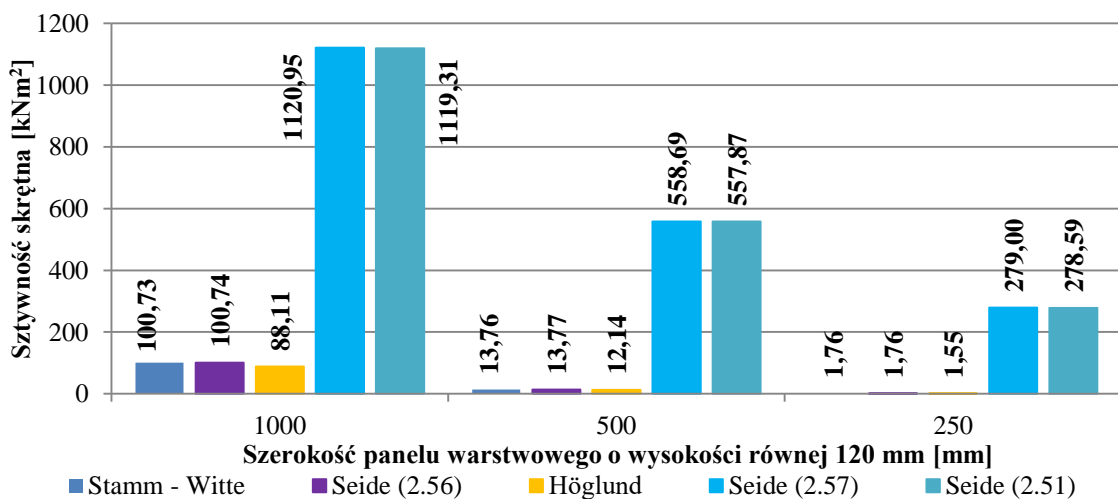
gdzie symbolem A_0 oznaczono pole powierzchni ograniczone linią środkową ścianki przekroju cienkościennego, a mianownik to całka po obwodzie linii środkowej ścianki przekroju z odwrotności grubości ścianki t , otrzymano równanie na sztywność skrętną panelu warstwowego w postaci:

$$GI_T = \frac{4 \cdot \left(\frac{2B}{3}\right)^2 \cdot (e)^2}{2 \cdot \left(\frac{2B}{3G^f t^f} + \frac{3e}{G_{xz}^c B}\right)}, \quad (2.63)$$

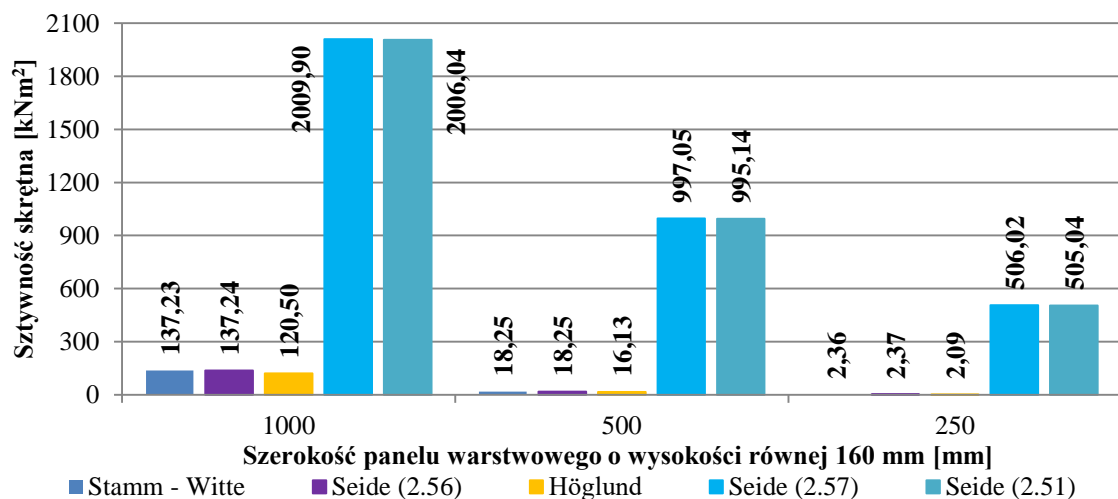
2.2.4 Porównanie teorii w zakresie sztywności skrętej

W ramach przeprowadzonych badań w zakresie skręcania paneli warstwowych analizie poddano panele o zróżnicowanej budowie przekroju poprzecznego. Analizowano elementy o całkowitej wysokości (rdzeń wraz z okładzinami) równej: 120 mm i 160 mm oraz szerokości równej: 1000 mm, 500 mm i 250 mm. Szczegółowy opis próbek przeznaczonych do realizacji pełnego programu badań opisano w rozdziale 3.3.1. Dane geometryczne próbek, na bazie których wykonano obliczenia analityczne sztywności skrętej paneli warstwowych umieszczono w Załączniku A, w tab. A.1-A.2.

Obliczone analitycznie sztywności skrętej GI_T przedstawiono za pomocą wykresów słupkowych na rys. 2.12, 2.13, odpowiednio dla paneli warstwowych o wysokościach 120 mm i 160 mm.



Rysunek 2.12. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 120$ mm.



Rysunek 2.13. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 160$ mm.

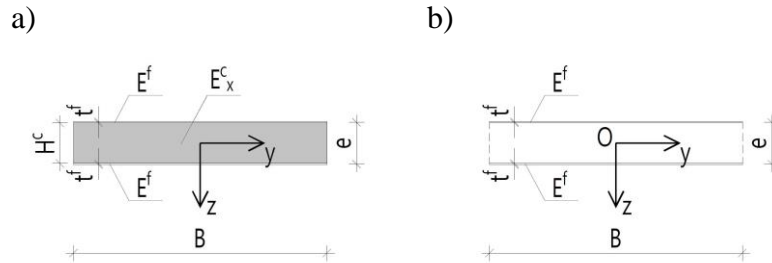
Wartości sztywności skrętnych wyznaczone zgodnie z teorią Seide za pomocą uproszczonych równań (2.57) oraz (2.51), odpowiednio z uwzględnieniem oraz pominięciem wpływu rdzenia na wartość sztywności skrętnej panelu warstwowego, wyraźnie odbiegają od pozostałych wyników. Należy jednak podkreślić, że powyższe równania zgodnie z komentarzem autora [67] podają niedokładne wyniki sztywności skrętnych już przy stosunku szerokości B do wysokości H przekroju poprzecznego paneli warstwowych równym 10. Dla omawianych próbek stosunek ten mieści się w zakresie od 8,33 dla panelu warstwowego o wysokości równej 120 mm i szerokości równej 1000 mm do 1,56 dla panelu warstwowego o wysokości równej 160 mm i szerokości równej 250 mm. Wartym podkreślenia jest fakt, że im mniejsza wartość stosunku B/H przekroju poprzecznego panelu warstwowego, tym wartości sztywności skrętnych wyznaczone równaniami (2.57) oraz (2.51) bardziej odbiegają od pozostałych wyników.

Stosując równanie ogólne (2.56) wyprowadzone przez Seide oraz równanie (2.61) przedstawione przez Stamma i Witte uzyskano praktycznie te same wartości sztywności skrętnych dla wszystkich analizowanych paneli warstwowych. Sztywność skrętna wyznaczona za pomocą równania (2.63) wyprowadzonego przez Höglunda jest mniejsza od dwóch pozostałych o około 12% dla wszystkich analizowanych próbek. Przedstawione powyżej wyniki obliczeń analitycznych porównano z wynikami otrzymanymi z badań laboratoryjnych i analiz numerycznych w rozdziale 4.4.2.

2.3. Charakterystyki wycinkowe paneli warstwowych

Analizowane w rozprawie panele warstwowe składają się ze sztywnych, stalowych okładzin zewnętrznych oraz relatywnie podatnego rdzenia wykonanego z pianki poliizocyanurowej (PIR). Szczegółowy opis budowy paneli warstwowych przedstawiono w rozdziale 3.3. Relacja modułu sprężystości podłużnej w kierunku x materiału okładzin i rdzenia, po którym pojawiają się wywołane skręcaniem skrępowanym naprężenia normalne σ_x przekracza 50 000. Szczegółowe badania opisujące charakterystyki materiałowe opisano w rozdziale 3.1. Z uwagi na znaczną różnicę sztywności rdzenia i okładzin, panele warstwowe można traktować jako przekroje cienkościenne zbudowane z wzajemnie współpracujących ze sobą okładzin (z pominięciem rdzenia). Pomimo tego, że rdzeń analizowanych paneli warstwowych nie bierze bezpośredniego udziału w przenoszeniu przez skręcany skrępowanie element naprężeń normalnych σ_x , odgrywa znaczącą rolę w zapewnieniu wzajemnej współpracy

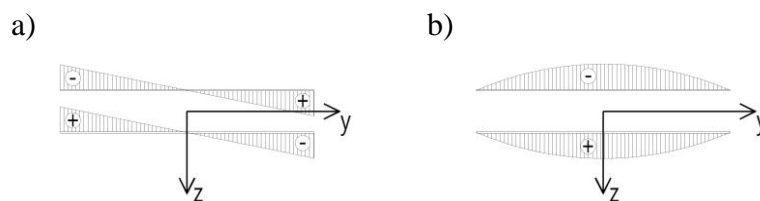
zewnątrznych okładzin. Omówione uproszczenie budowy przekroju poprzecznego panelu warstwowego w ujęciu analizy skręcania skrępowanego przedstawiono na rys. 2.14.



Rysunek 2.14. Budowa panelu warstwowego – sztywność giętno-skrętna:

a) przekrój poprzeczny panelu warstwowego, b) przekrój zastępczy.

Dla omawianych paneli warstwowych środek ciężkości, środek ścinania oraz główny punkt zerowy, względem którego wyznaczane są główne współrzędne wycinkowe przekroju poprzecznego, znajdują się w tym samym punkcie, oznaczonym na rys. 2.14b symbolem O . Dla przyjętego przekroju zastępczego, o szerokości całkowitej B , grubościach okładzin t^f oraz odległości między środkami ciężkości okładzin e , wyznaczono rozkład głównej współrzędnej wycinkowej (równanie (2.26), rys. 2.15a) oraz wycinkowego momentu statycznego (równanie (2.32), rys. 2.15b).



Rysunek 2.15. Charakterystyki wycinkowe panelu warstwowego:

a) główna współrzędna wycinkowa, b) wycinkowy moment statyczny.

Ekstremalne wartości głównej współrzędnej wycinkowej określone są równaniem:

$$\omega = \frac{B \cdot e}{4}, \quad (2.64)$$

z kolei ekstremalne wartości wycinkowego momentu statycznego przyjmują postać:

$$S_{\omega} = \frac{B^2 \cdot e \cdot t^f}{16}. \quad (2.65)$$

Korzystając z równania (2.36) wartość wycinkowego momentu bezwładności przekroju zastępczego określona jest równaniem:

$$I_{\omega} = \frac{B^3 \cdot e^2 \cdot t}{24}. \quad (2.66)$$

2.4. Naprężenia wewnętrzne w panelu warstwowym

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną równania za pomocą, których możliwe jest wyznaczenie wartości naprężeń wewnętrznych w panelach warstwowych skręcanych swobodnie i skrępowanie. Wartości naprężeń stycznych wewnątrz okładzin τ_{xy}^f oraz naprężeń stycznych wewnątrz rdzenia τ_{xz}^c , pochodzące od efektu skręcania swobodnego, zostały wyznaczone w oparciu o teorie Stamma i Witte [70] oraz Seide [67]. Wartości naprężeń wewnątrz okładzin: stycznych τ_{xy}^f oraz normalnych σ_x^f , pochodzące od efektu skręcania skrępowanego, zostały wyznaczone w oparciu o wyprowadzenie równań skręcania skrępowanego przedstawionych w rozdziale 2.1.

W ogólnym przypadku skręcania, całkowity moment skręcający element M_S należy rozdzielić na efekty pochodzące od skręcania swobodnego oraz skrępowanego zgodnie z równaniem różniczkowym (2.45). Następnie znając wartości momentu skręcania swobodnego $M_{S,V}$ oraz skręcania skrępowanego $M_{S,\omega}$ możliwe jest wyznaczenie wartości naprężeń wewnętrznych za pomocą niżej przedstawionych równań. Użyte w równaniach symbole dotyczące budowy przekroju poprzecznego panelu warstwowego są zgodne z oznaczeniami przedstawionymi na rys. 2.14.

Korzystając z wyprowadzeń Stamma i Witte [70], wartości naprężeń stycznych wewnątrz okładzin τ_{xy}^f o równych grubościach t^f można wyznaczyć za pomocą następującego równania:

$$\tau_{xy}^f = \frac{\cosh\left(\frac{kB}{2}\right) - \cosh(ky)}{\cosh\left(\frac{kB}{2}\right) - \frac{kB}{2}} \cdot \frac{M_{S,V}}{2eBt^f}. \quad (2.67)$$

Rozkład naprężeń stycznych wewnątrz rdzenia τ_{xz}^c wyznaczyć można z równania:

$$\tau_{xz}^c = \frac{k \sinh(ky)}{\cosh\left(\frac{kB}{2}\right) - \frac{kB}{2}} \cdot \frac{M_{S,V}}{2eB}. \quad (2.68)$$

Korzystając z wyprowadzeń Seide [67], wartości naprężeń stycznych wewnątrz okładzin τ_{xy}^f o równych grubościach t^f można wyznaczyć za pomocą następującego równania:

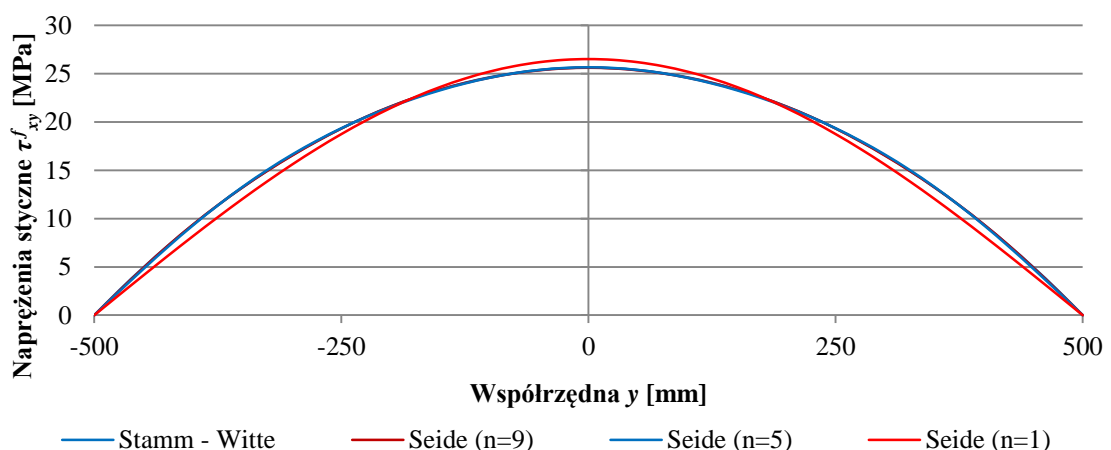
$$\tau_{xy}^f = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \left[B_n \cdot \left(\frac{n\pi}{B}\right) \cdot \sinh\left(\frac{n\pi z}{B}\right) + C_n \cdot \left(\frac{n\pi}{B}\right) \cdot \cosh\left(\frac{n\pi z}{B}\right) \right] \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{B}\right). \quad (2.69)$$

Rozkład naprężeń stycznych wewnątrz rdzenia τ_{xz}^c wyznaczyć można z równania:

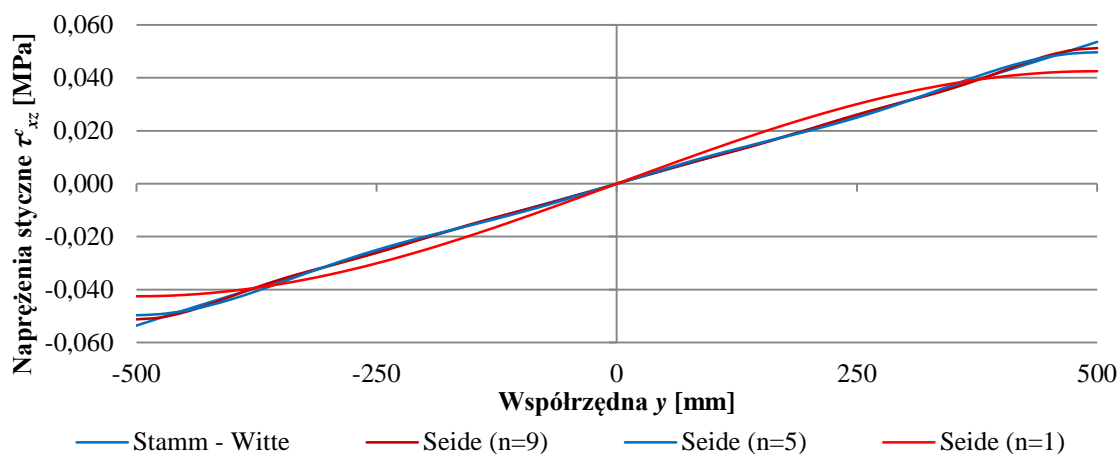
$$\tau_{xz}^c = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \left[A_n \cdot \cosh\left(\sqrt{\frac{G_{xy}^c}{G_{xz}^c}} \frac{n\pi z}{B}\right) + \frac{32 \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3 \pi^3} \cdot G_{xz}^c \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left(\frac{M_{S,V}}{GI_T}\right) \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{B}\right) \cdot \left(\frac{n\pi}{B}\right). \quad (2.70)$$

Wykorzystane w równaniach (2.69, 2.70) szeregi A_n , B_n , C_n zostały wcześniej opisane w rozdziale 2.2.1. Sztywność skrętną GI_T wykorzystaną w równaniu (2.70) należy wyznaczać z równania (2.56).

W celu zobrazowania relacji pomiędzy powyższymi równaniami, na rys. 2.16 oraz rys. 2.17 przedstawiono rozkład naprężeń stycznych wewnątrz okładziny τ_{xy}^f oraz naprężeń stycznych wewnątrz rdzenia τ_{xz}^c panelu warstwowego. Wartości naprężeń wyznaczono w przekroju poprzecznym, w którym wartość przekrojowego momentu skręcania swobodnego $M_{S,V}$ równa jest 2,10 kNm. Do obliczeń przyjęto: szerokość panelu warstwowego równą 1000 mm, całkowitą wysokość panelu warstwowego równą 120,43 mm oraz grubości okładzin równe 0,51 mm. Parametry te odpowiadają opisanej w dalszej części rozprawy próbce SP_120_4100_1_1 (rozdział 3.3.1).



Rysunek 2.16. Przebieg naprężenia stycznych w okładzinie τ_{xy}^f , w przekroju poprzecznym.



Rysunek 2.17. Przebieg naprężenia stycznych w rdzeniu τ_{xz}^c w przekroju poprzecznym.

Przedstawione wykresy obrazują dużą zgodność pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonymi za pomocą równań zaproponowanych przez Stamma i Witte [70] z równaniami wyprowadzonymi na podstawie zaproponowanych przez Seide [67] funkcji naprężeń dla rdzenia i okładzin paneli warstwowych. Doskonałą zgodność pomiędzy analizowanymi wartościami naprężeń można osiągnąć już przy uwzględnieniu trzech składników ($n = 1, 3, 5$) szeregów równań Seide [67]. Wyznaczając przebieg naprężeń stycznych w oparciu o równania (2.69-2.70), przy uwzględnieniu tylko pierwszego składnika szeregu, zaobserwować można niewielkie odchyłki między wyznaczonymi wartościami naprężeń. W dalszej części rozprawy, jako wyznaczone analitycznie wartości naprężeń stycznych, przyjmowane będą naprężenia obliczone w oparciu o teorię Stamma i Witte [70], z uwagi na mniejszą złożoność opisujących je równań.

Wartości naprężeń normalnych wewnątrz okładzin σ_x^f o równych grubościach t^f przyjmują wartości:

$$\sigma_x^f = \frac{B_\omega}{I_\omega} \cdot \omega. \quad (2.71)$$

Rozkład naprężeń stycznych wewnątrz okładzin τ_{xy}^f o równych grubościach t^f wyznaczyć można z równania:

$$\tau_{xy}^f = -\frac{M_{S,\omega} \cdot S_\omega}{I_\omega \cdot t^f}. \quad (2.72)$$

3. Badania laboratoryjne

3.1. Badania materiałowe

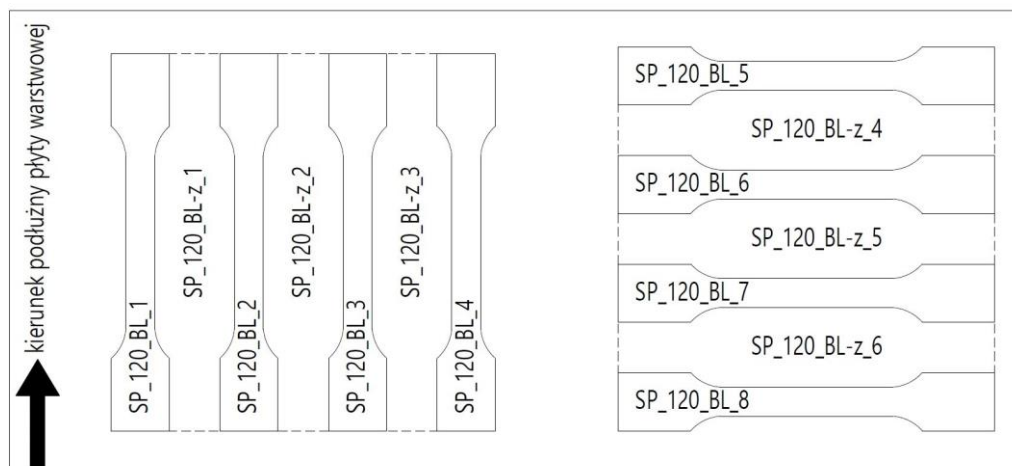
W ramach przeprowadzonych badań materiałowych wyznaczono:

- moduły sprężystości podłużnej okładzin E^f ,
- moduły sprężystości podłużnej rdzenia E_x^c , E_y^c , E_{x45}^c oraz E_z^c ,
- moduły ścinania rdzenia G_{xz}^c oraz G_{yz}^c .

Wyznaczone wielkości zostały wykorzystane do budowy modeli materiałów w przeprowadzonych analizach numerycznych, które omówiono w rozdziale 4.

3.1.1 Moduł sprężystości podłużnej okładzin

Badanie modułu sprężystości podłużnej okładzin zostało wykonane na próbkach wycinanych z arkuszy blach dostarczonych przez producenta płyt warstwowych. Dostarczono cztery arkusze wraz z atestami (producent blach – TATA Steel) o szerokości równej 700 mm i długości równej 350 mm. Arkusze blach zostały wycięte przed procesem produkcji płyt warstwowych. Wykonano je z kręgów blach, przeznaczonych na dolną i górną okładzinę płyty CH120 i CH160. Na każdy dostarczony arkusz blachy naniesiono jednoznacznie opis, związany z jego pochodzeniem oraz kierunek produkcji płyt warstwowych, zgodny z kierunkiem podłużnym płyty. Wymiary dostarczonych arkuszy zostały tak dobrane, aby była możliwość wycięcia z nich wiosełek do badań laboratoryjnych zarówno w kierunku podłużnym jak i poprzecznym do kierunku produkcji płyt warstwowych. Ułożenie próbek (wiosełek) na arkuszu blachy wraz z ich nazewnictwem pokazano przykładowo na rys. 3.1.



Rysunek 3.1. Ułożenie oraz nazewnictwo próbek na arkuszu blachy dolnej okładziny płyty CH120.

Bazując na otrzymanych wraz z arkuszami blach atestach, jednoznacznie stwierdzono, że dla wszystkich arkuszy:

- grubość nominalna (grubość materiału podstawowego blachy wraz z metaliczną powłoką antykorozyjną) określona zgodnie z [N-1] równa jest 0,47 mm (+ 0,03 mm, – 0,03 mm),
- zabezpieczenie antykorozyjne wykonano w postaci powlekanej ogniowo w sposób ciągły powłoki cynku o oznaczeniu powłoki Z200 zgodnie z [N-2],
- strona dekoracyjna płyty została pokryta powłoką organiczną o oznaczeniu SP25, a strona spodnia powłoką organiczną o oznaczeniu SP7 zgodnie z [N-3].

Ponadto stwierdzono, że stalowy rdzeń arkuszy pochodzących z górnych okładzin płyt CH120 i CH160 oraz dolnych okładzin płyt CH120 został wykonany z blach z tego samego przetopu oraz procesu walcowania. Rdzeń stalowy arkusza pochodzącego z dolnych okładzin płyt CH160 został wykonany z blach z odrębnego przetopu i procesu walcowania. Mając powyższe na uwadze, zdecydowano o wycięciu wiosełek do badań laboratoryjnych z dolnych okładzin płyt CH120 i CH160. W ten sposób uzyskano wyniki modułu sprężystości okładzin wszystkich analizowanych płyt warstwowych. Wiosełka pochodzące z tych arkuszy rozciągane były bez wykonywania na nich żadnych dodatkowych zabiegów. Dodatkowo wycięto także wiosełka z arkusza pochodzącego z górnych okładzin płyt CH120, z których następnie została usunięta powłoka organiczna. Taki zabieg miał na celu zbadanie wpływu występowania warstw organicznych na wartości otrzymanych modułów sprężystości podłużnej. Sposób zdejmowania warstw organicznych z próbek okładzin został szczegółowo opisany w dalszej części rozdziału. Próbki do badań modułu sprężystości bez zdejmowanych warstw organicznych oznaczono zgodnie z poniżej przedstawionym nazewnictwem (nazwa próbki – pochodzenie próbki, kierunek wycinania próbki):

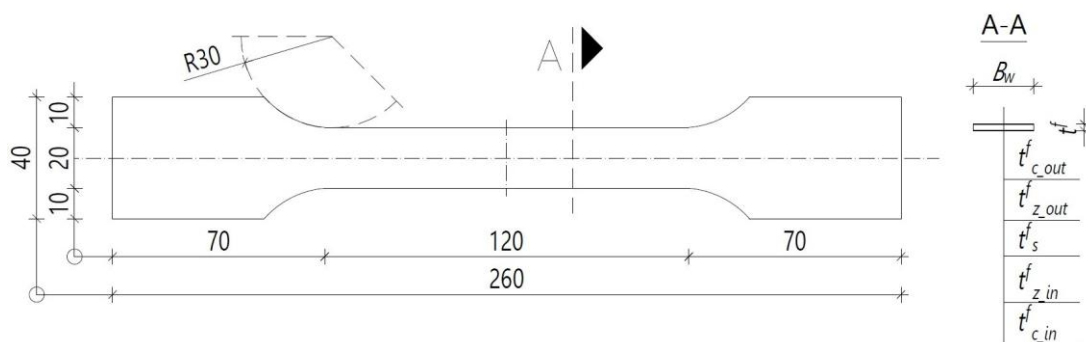
- SP_120_BL_1 / SP_120_BL_4 – okładzina CH120, kierunek podłużny (rys. 3.1),
- SP_120_BL_5 / SP_120_BL_8 – okładzina CH120, kierunek poprzeczny (rys. 3.1),
- SP_160_BL_1 / SP_160_BL_4 – okładzina CH160, kierunek podłużny,
- SP_160_BL_5 / SP_160_BL_8 – okładzina CH160, kierunek poprzeczny.

Próbki do badań modułu sprężystości z usuniętymi warstwami organicznymi zostały oznaczone zgodnie z poniżej przedstawionym nazewnictwem (nazwa próbki – pochodzenie próbki, kierunek wycinania próbki):

- SP_120_BL_9 / SP_120_BL_12 – okładzina CH120, kierunek podłużny,
- SP_120_BL_13 / SP_120_BL_16 – okładzina CH120, kierunek poprzeczny.

Dodatkowe próbki, z których usuwana była warstwa organiczna do prowadzenia dalszych pomiarów, a oznaczone zgodnie z poniżej przedstawionym nazewnictwem (nazwa próbki – pochodzenie próbki, kierunek wycinania próbki):

- SP_120_BL-z_1 / SP_120_BL-z_3 – okładzina CH120, kierunek podłużny (rys. 3.1),
 - SP_120_BL-z_4 / SP_120_BL-z_6 – okładzina CH120, kierunek poprzeczny (rys. 3.1),
 - SP_160_BL-z_1 / SP_160_BL-z_3 – okładzina CH160, kierunek podłużny,
 - SP_160_BL-z_4 / SP_160_BL-z_6 – okładzina CH160, kierunek poprzeczny,
- wycięto w celu określenia grubości poszczególnych warstw próbek okładzin z warstwami organicznymi.



Rysunek 3.2. Próbką laboratoryjna okładziny.

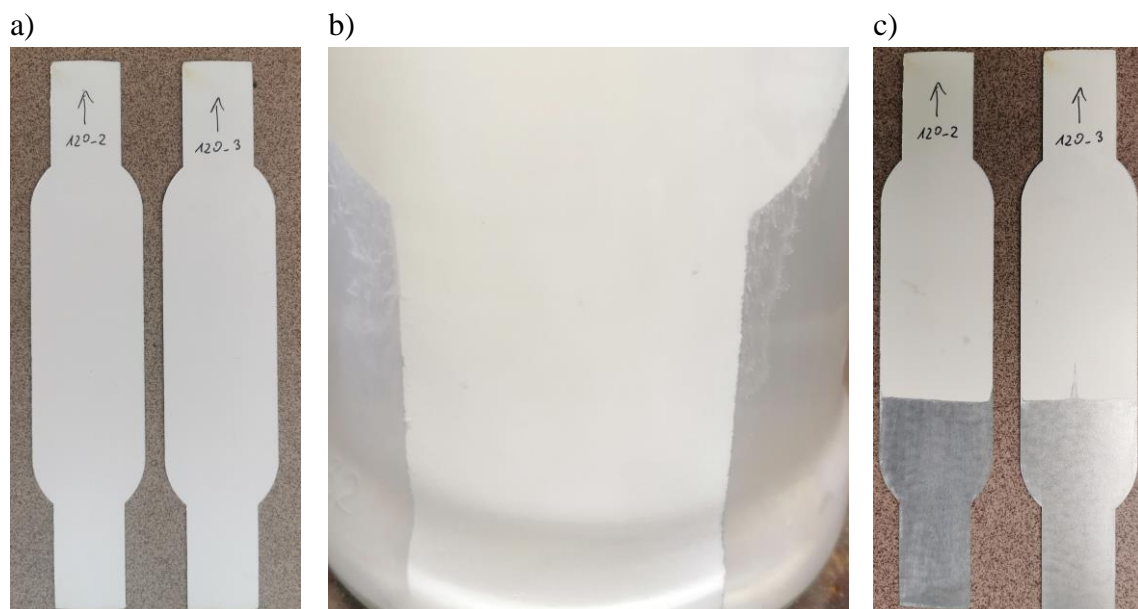
Na rys. 3.2 został przedstawiony szczegółowo gabaryt wiosełka przeznaczonego do badań modułu sprężystości okładzin. Na tym samym rysunku, na przekroju A-A została oznaczona mierzona w laboratorium szerokość wiosełka B_w oraz warstwowa budowa okładziny, gdzie odpowiednimi symbolami oznaczono:

- $t_{c,out}^f$ – warstwa organiczna zewnętrzna (zgodnie z atestem: COLORCOAT PE25 o deklarowanej grubości równej $25 \mu\text{m}$),
- $t_{z,out}^f$ – warstwa antykorozyjna zewnętrzna (zgodnie z atestem: blacha powlekana ogniowo powłoką cynkową),
- t_s^f – warstwa stalowego rdzenia okładziny,
- $t_{z,in}^f$ – warstwa antykorozyjna wewnętrzna (zgodnie z atestem: blacha powlekana ogniowo powłoką cynkową),
- $t_{c,in}^f$ – warstwa organiczna wewnętrzna (zgodnie z atestem: COLORCOAT PR7 o deklarowanej grubości równej $7-12 \mu\text{m}$).

Szerokość próbek B_w była mierzona w wewnętrznej części próbki, w czterech punktach równo rozmieszczonych po długości, za pomocą suwmiarki elektronicznej. Na podstawie dokonanych pomiarów dla każdej próbki, określona została wartość średnia

szerokości próbki. Grubość całkowita próbek była mierzona za pomocą mikrometru DIGI-MET. Pomiar grubości warstw skrajnych, do stalowego rdzenia mierzono za pomocą powłokomierza ultradźwiękowego Mini Test 720. Należy podkreślić, że pomiar dokonywany powłokomierzem ultradźwiękowym zawierał informację o sumarycznej grubości warstwy organicznej i antykorozyjnej. Szczegółowy przebieg pomiaru grubości poszczególnych warstw okładzin płyt warstwowych wykonano zgodnie z poniżej przedstawionym schematem postępowania:

- 1) z próbek SP_120_BL-z_1 / SP_120_BL-z_6 oraz SP_160_BL-z_1 / SP_160_BL-z_6 za pomocą środka chemicznego SCALPIK L300, przez ich zanurzenie w roztworze na czas około 15 minut, a następnie obfite spłukanie wodą usunięto zewnętrzną i wewnętrzną powłokę organiczną (rys. 3.3),



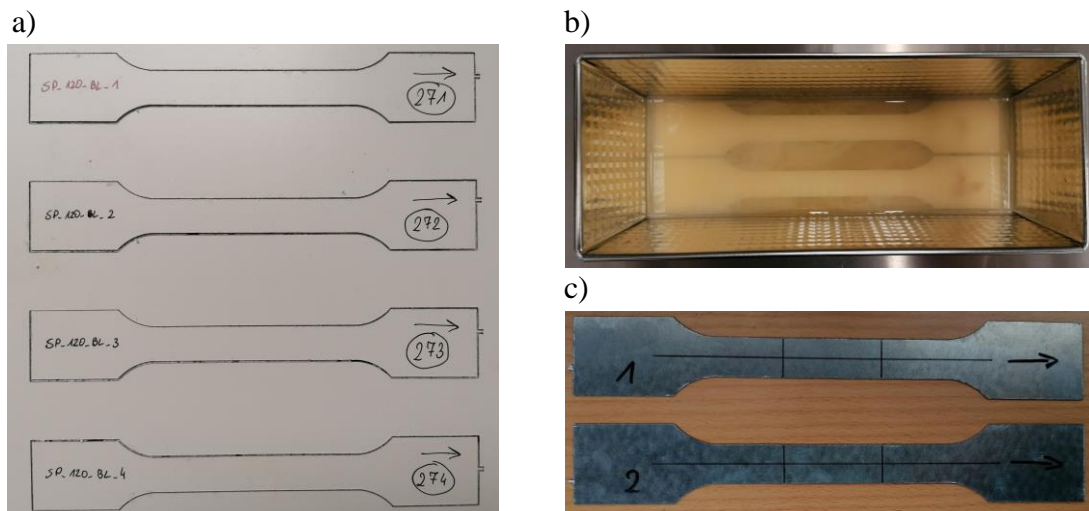
Rysunek 3.3. Próbkę do pomiaru grubości warstwy antykorozyjnej: a) przed,

b) w trakcie (zanurzenie próbki w szklanym naczyniu), c) po procesie usuwania warstwy organicznej.

- 2) po usunięciu warstw organicznych za pomocą powłokomierza ultradźwiękowego, w dwunastu punktach, równomiernie rozmieszczonych po długości próbki, dokonano odczytu grubości warstwy antykorozyjnej zarówno od strony zewnętrznej jak i wewnętrznej próbki,
- 3) na podstawie uzyskanych odczytów obliczono średnią grubość warstw antykorozyjnych, szczegółowe dane dotyczące poszczególnych pomiarów przedstawiono w Załączniku A, w tab. A.3-A.4,

- 4) obliczając średnie wartości otrzymanych wyników, przyjęto grubość warstwy antykorozyjnej dla poszczególnych grup próbek i powierzchni jak niżej:
- próbki okładzin CH120, powierzchnia zewnętrzna: $t_{z_out}^f = 0,025$ mm,
 - próbki okładzin CH120, powierzchnia wewnętrzna: $t_{z_in}^f = 0,028$ mm,
 - próbki okładzin CH160, powierzchnia zewnętrzna: $t_{z_out}^f = 0,027$ mm,
 - próbki okładzin CH160, powierzchnia wewnętrzna: $t_{z_in}^f = 0,025$ mm,
- 5) na próbkach SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8 oraz SP_160_BL_1 / SP_160_BL_8 za pomocą powłokomierza ultradźwiękowego, w ośmiu punktach równomiernie rozmieszczonych po długości próbki, dokonano odczytu sumarycznej grubości warstw antykorozyjnej i organicznej zarówno od strony zewnętrznej jak i wewnętrznej próbki,
- 6) na podstawie uzyskanych odczytów oraz wyznaczonej grubości warstwy antykorozyjnej, obliczono średnią grubość warstw organicznych od strony zewnętrznej oraz wewnętrznej,
- 7) grubość rdzenia stalowego określono odejmując od grubości całkowitej próbek mierzonej mikrometrem, wartości grubości warstw mierzonych powłokomierzem ultradźwiękowym.

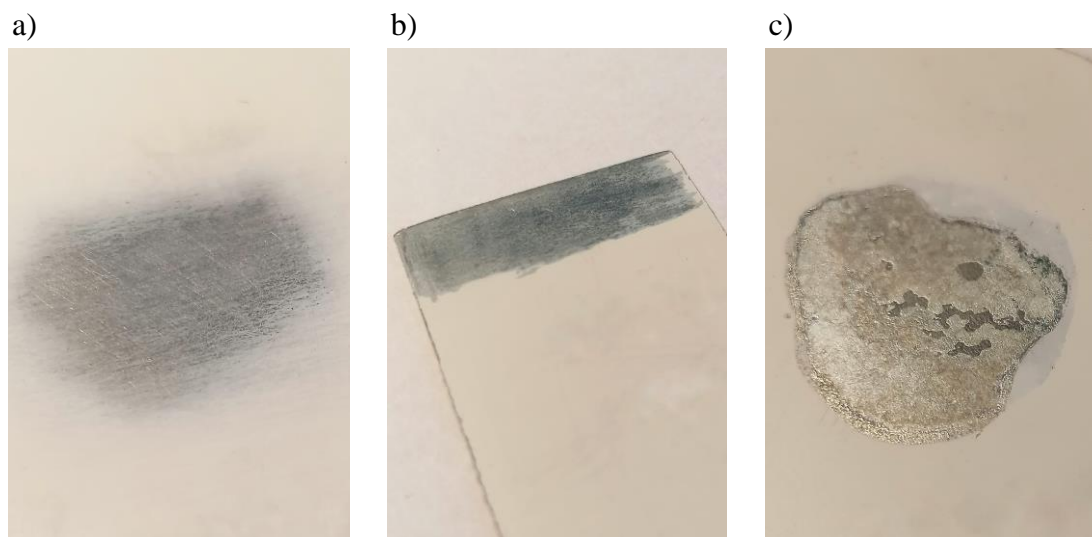
Na przedstawionych na rys. 3.4 zdjęciach pokazano sposób usuwania chemicznie warstw organicznych z próbek SP_120_BL_9 / SP_120_BL_16. Dokonując na próbkach pomiaru grubości całkowitej mikrometrem oraz warstw antykorozyjnych powłokomierzem ultradźwiękowym (po uprzednim usunięciu z próbek warstw organicznych), wyznaczono grubości poszczególnych warstw tych próbek.



Rysunek 3.4. Próbki laboratoryjne okładzin: a) po wycięciu gabarytu z arkusza blachy, b) w trakcie procesu usuwania warstw organicznych, c) po usunięciu warstw organicznych.

Przed zastosowaniem środka chemicznego SCALPIK L300 przeprowadzono szereg testów w poszukiwaniu odpowiedniej metody do usuwania z próbek okładzin warstw organicznych. Do najważniejszych zaliczyć można:

- metodę mechaniczną, w ramach której warstwy organiczne usuwano za pomocą drobnoziarnistego papieru ściernego (rys. 3.5a),
- metodę chemiczną z zastosowaniem acetonu, w ramach której usuwanie warstw organicznych za pomocą papieru ściernego zostało poprzedzone zanurzeniem próbki w acetonie (rys. 3.5b),
- metodę chemiczną z zastosowaniem kwasu lutowniczego, w ramach której warstwy organiczne usuwano poprzez zanurzenie próbki w kwasie lutowniczym (rys. 3.5c).



Rysunek 3.5. Proces usuwania warstw organicznych: a) metoda mechaniczna, b) metoda chemiczna - aceton, c) metoda chemiczna - kwas lutowniczy.

Odczytywane za pomocą powłokomierza ultradźwiękowego grubości warstw antykorozyjnych (po usunięciu warstw organicznych), na wszystkich próbkach osiągały zbliżone wartości. Wyboru właściwej metody dokonano kierując się możliwościami jej praktycznego stosowania. Metody mechaniczna oraz chemiczna z zastosowaniem acetonu wymagały czasochłonnej obróbki próbki i nadawały się do miejscowego usuwania warstw organicznych z okładziny. Metoda chemiczna z zastosowaniem kwasu lutowniczego jest bardzo wrażliwa na czas kontaktu próbki ze środkiem chemicznym (po usunięciu warstwy organicznej kwas lutowniczy wchodził miejscowo w reakcję z cynkową warstwą antykorozyjną). Wybrana do stosowania metoda chemiczna z zastosowaniem środka SCALPIK L300 charakteryzuje się prostotą w aplikacji oraz

stabilnością uzyskiwanych wyników (środek SCALPIK L300 rozpuszcza warstwy organiczne, ale nie wchodzi w reakcje z cynkową warstwą antykorozyjną).

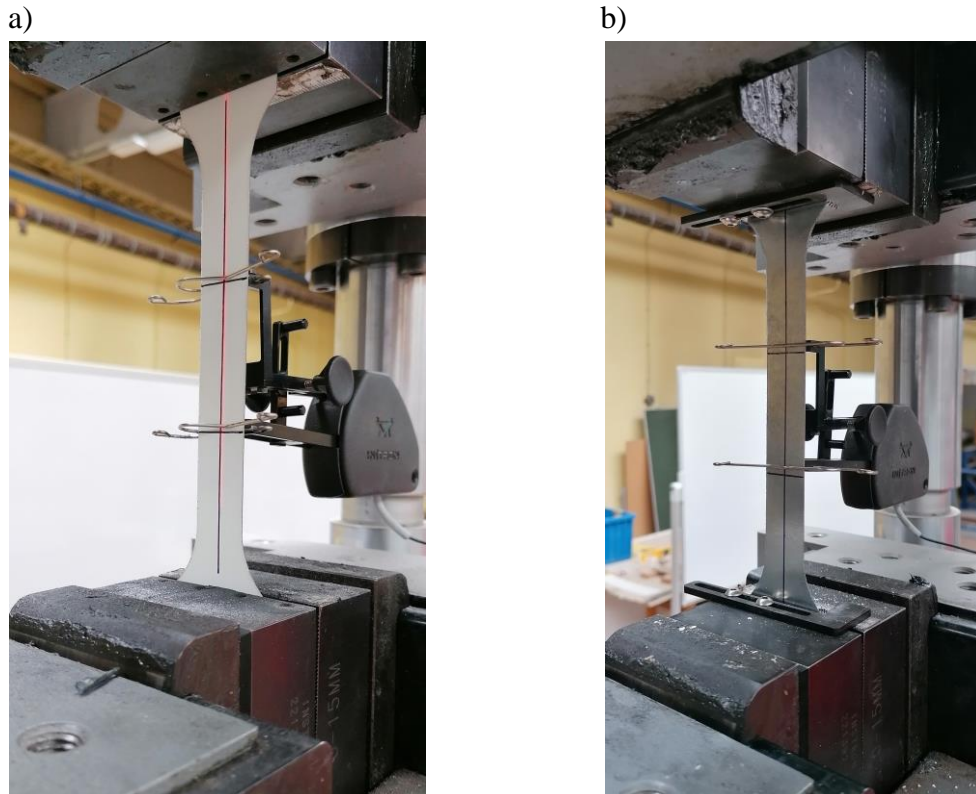
Uśrednione grubości poszczególnych warstw dla wszystkich grup próbek przedstawiono w tab. 3.1. Szczegółowe dane dotyczące każdej próbki przedstawiono w Załączniku A, w tab. A5-A7.

Tabela 3.1. Zestawienie uśrednionych grubości poszczególnych warstw próbek okładzin.

	B_w [mm]	t^f [mm]	t^f_{sz} [mm]	t^f_s [mm]	$t^f_{z_out}$ [mm]	$t^f_{z_in}$ [mm]	$t^f_{c_out}$ [mm]	$t^f_{c_in}$ [mm]	t^f_{out} [mm]	t^f_{in} [mm]
SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8	19,96	0,510	0,474	0,420	0,025	0,028	0,028	0,008	0,053	0,036
SP_160_BL_1 / SP_160_BL_8	19,96	0,510	0,473	0,422	0,027	0,025	0,027	0,009	0,054	0,034
SP_120_BL_9 / SP_120_BL_16	19,94	0,473	0,473	0,422	0,026	0,025	0,000	0,000	0,026	0,025

Zastosowane w tab. 3.1 oznaczenia przyjęto zgodnie ze wcześniejszym opisem. Dodatkowo symbolami t^f_{sz} , t^f_{out} , t^f_{in} oznaczono sumaryczne grubości odpowiednio: rdzenia stalowego i warstw antykorozyjnych, zewnętrznej warstwy organicznej i zewnętrznej warstwy antykorozyjnej oraz wewnętrznej warstwy organicznej i wewnętrznej warstwy antykorozyjnej. Symbolem t^f oznaczono całkowitą grubość mierzonej próbki.

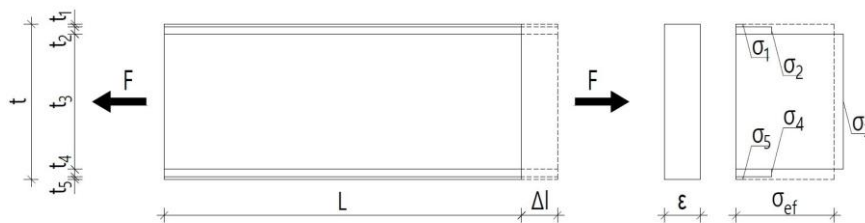
Próba wytrzymałościowa rozciągania stali, z której określano moduł sprężystości podłużnej badanych próbek, została wykonana zgodnie z normą [N-4], na maszynie wytrzymałościowej INSTRON SATEC 300 DX, z siłomierzem klasy 0,5 w zakresie sił do 300 kN. Do osiągnięcia odkształcenia sprężystego próbki na poziomie 0,2% tempo badania sterowane było przyrastającym naprężeniem na poziomie 6,0 MPa/s. Po osiągnięciu odkształcenia sprężystego próbki równego 0,2% zmieniano sterowanie tempem badania na sterowanie przemieszczeniem trawersy maszyny na poziomie 0,3 mm/s. W pierwszym etapie badania (sterowanie naprężeniem) wartości wydłużenia próbki odczytywane były za pomocą ekstensometru INSTRON o bazie pomiarowej równej 50 mm. Po osiągnięciu odkształcenia sprężystego próbki równego 0,2% ekstensometr był zdejmowany, a dalsza rejestracja wydłużenia próbki odczytywana była z trawersy maszyny wytrzymałościowej. Próbie rozciągania poddano próbki bez usuwanych warstw organicznych (rys. 3.6a) oraz z usuniętymi warstwami organicznymi (rys. 3.6b).



Rysunek 3.6. Próba wytrzymałościowa rozciągania okładzin:

- a) próbki oryginalne bez usuwanych warstw organicznych,
- b) próbki po usunięciu warstw organicznych.

Zachowanie próbki o budowie warstwowej, poddanej próbie jednoosiowego rozciągania, przedstawiono schematycznie na rys. 3.7. Całkowita grubość próbki t jest sumą grubości poszczególnych warstw t_i (dla badanych okładzin $i = 5$). Rozciągana jednoosiowo próbka o długości początkowej L , pod wpływem obciążenia siłą o wartości F , ulegnie wydłużeniu o wartość równą Δl .



Rysunek 3.7. Jednoosiowe rozciąganie próbki o budowie warstwowej.

Odształcenie próbki ε jest równe odkształceniom poszczególnych warstw próbki ε_i , co można zapisać za pomocą poniższej zależności:

$$\varepsilon = \varepsilon_i = \frac{\Delta l}{L}. \quad (3.1)$$

Wartości naprężeń normalnych w poszczególnych warstwach próbki σ_i można wyznaczyć stosując prawo Hooke'a:

$$\sigma_i = E_i \cdot \varepsilon_i, \quad (3.2)$$

gdzie symbolem E_i oznaczono moduł sprężystości podłużnej materiału i -tej warstwy. Dla próbki o budowie warstwowej, przedstawionej na rys. 3.7 można określić wartość efektywnych naprężeń normalnych σ_{ef} stosując średnią ważoną wartości naprężeń z poszczególnych warstw, w której wagą będzie grubość warstwy:

$$\sigma_{ef} = \frac{\sum \sigma_i \cdot t_i}{\sum t_i}. \quad (3.3)$$

Wyznaczane w pracy moduły sprężystości będą zawsze skojarzone z konkretną budową warstwową próbki, dla których będą sporządzane odpowiednie relacje naprężeń efektywnych w próbce do odkształceń próbki.

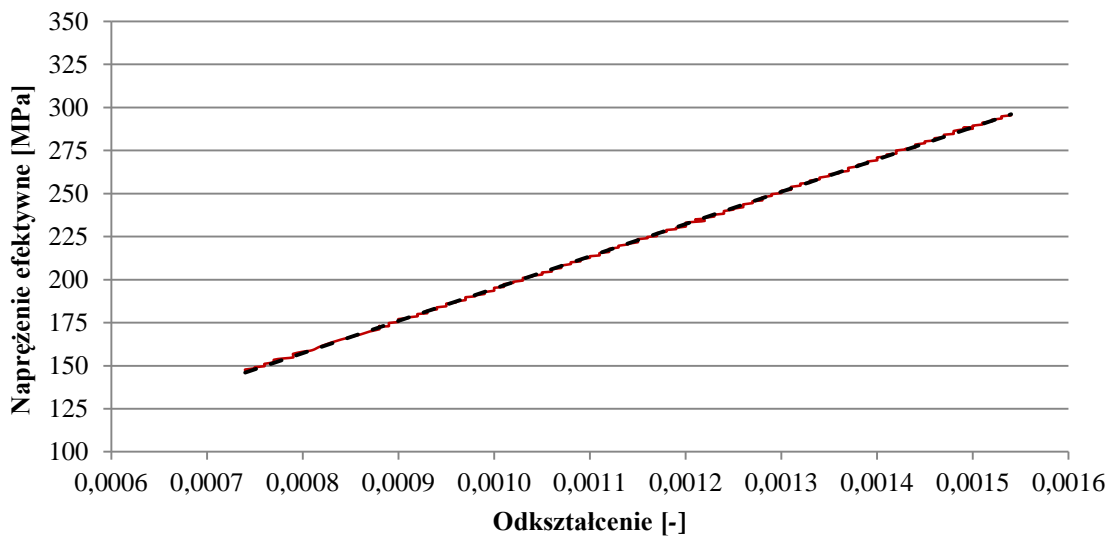
Dla każdej z przeprowadzonych prób wytrzymałościowych w celu określenia modułu sprężystości próbek, rejestrowana była relacja siły do wydłużenia próbki. Na podstawie odczytywanej siły, obliczane były średnie naprężenia w próbce, o pełnej grubości badanej próbki (3.4) oraz próbki bez warstw organicznych (3.5). Wartości naprężeń efektywnych w próbce okładziny zawierającej warstwy organiczne $\sigma_{t,f}^f$ wyznaczano dzieląc siłę F , działającą na próbkę, przez iloczyn szerokości próbki B_w oraz całkowitej grubości próbki t^f , zgodnie z poniższą zależnością:

$$\sigma_{t,f}^f = \frac{F}{B_w \cdot t^f}. \quad (3.4)$$

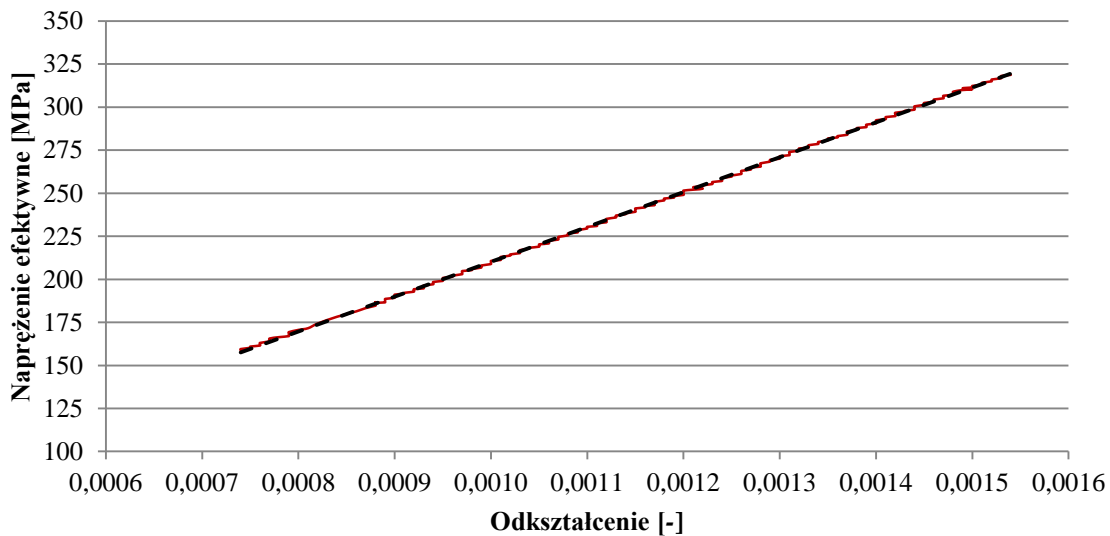
Wartości naprężeń efektywnych w próbce okładziny bez warstw organicznych $\sigma_{t,sz}^f$ wyznaczano dzieląc siłę F , działającą na próbkę, przez iloczyn szerokości próbki B_w oraz sumy grubości warstwy rdzenia stalowego i warstw antykorozyjnych t_{sz}^f , zgodnie z poniższą zależnością:

$$\sigma_{t,sz}^f = \frac{F}{B_w \cdot t_{sz}^f}. \quad (3.5)$$

Opierając się o odczytywane wydłużenie próbki, znając bazę ekstensometru, obliczano odkształcenie próbki. Efektywny moduł sprężystości próbek określany był z liniowej części wykresu naprężenie efektywne - odkształcenie, z zakresu sił od 1,5 kN do 3,0 kN. Na rys. 3.8 oraz rys. 3.9 przedstawiono przykładowe relacje naprężenie efektywne - odkształcenie dla próbki SP_120_BL_1. Na wykresach linią czerwoną oznaczony jest bezpośredni zapis wyników uzyskanych z maszyny wytrzymałościowej, przerywaną linią czarną naniesiona jest liniowa linia trendu próby.



Rysunek 3.8. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbki SP_120_BL_1 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne + warstwy organiczne).



Rysunek 3.9. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbki SP_120_BL_1 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne).

Dla każdego z przygotowanych wykresów wyznaczono liniową linię trendu, której tangens kąta pochylenia równy jest wartości modułu sprężystości. Dla próbki SP_120_BL_1 otrzymano wartość modułu sprężystości odniesioną do całkowitej grubości próbki $E_{t,f}^f$ równą 187,63 GPa, ze współczynnikiem determinacji dla równania regresji równym 0,9997. Z tego samego badania, dla grubości próbki równej sumie grubości warstwy rdzenia stalowego i warstw antykorozyjnych otrzymano wartość modułu sprężystości $E_{t,sz}^f$ równą 202,45 GPa, ze współczynnikiem determinacji dla równania regresji równym 0,9997. W trakcie wykonywanych analiz nie zauważono wyraźnej różnicy między modułami sprężystości próbek wyciętych w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym do kierunku produkcji płyt warstwowych. Z tego względu wartości średnie obliczano dla całej próby złożonej z ośmiu próbek, bez podziału wyników na kierunek podłużny i poprzeczny. Średnie wartości modułów sprężystości dla okładzin płyt CH120 oraz CH160 zestawiono w tab. 3.2.

Tabela 3.2. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej próbek okładzin.

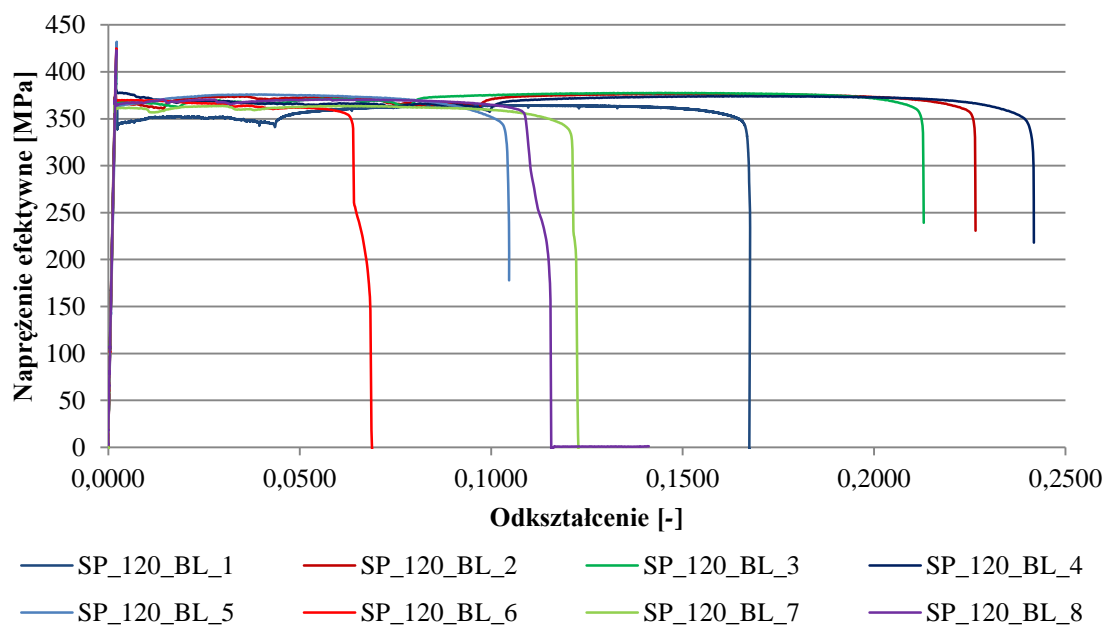
	$E_{t,f}^f$			$E_{t,sz}^f$		
	Wartość średnia \bar{x} [GPa]	Odchylenie standardowe s [GPa]	Wsp. zmienności v [-]	Wartość średnia \bar{x} [GPa]	Odchylenie standardowe s [GPa]	Wsp. zmienności v [-]
SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8	195,05	6,98	0,036	209,91	7,36	0,035
SP_160_BL_1 / SP_160_BL_8	197,77	4,59	0,023	213,08	4,68	0,022
SP_120_BL_9 / SP_120_BL_16	203,15	9,68	0,048	203,15	9,68	0,048

Próbki SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8 (rozciągane bez usuwania warstw organicznych - rys. 3.6a) oraz SP_120_BL_9 / SP_120_BL_16 (rozciągane po usunięciu warstw organicznych - rys. 3.6b) zostały wykonane z blach z tego samego przetopu oraz procesu walcowania. Wyniki obliczonych z tych prób modułów sprężystości mogą być porównywane ze sobą w sposób bezpośredni (próbki wykonane z tego samego materiału). Na bazie przedstawionych w tab. 3.2 wartości modułów sprężystości widać, że wartość otrzymana dla próbek SP_120_BL_9-16 (203,15 GPa) znajduje się pomiędzy wartościami modułów obliczonymi dla próbek SP_120_BL_1-8 odpowiednio bez pominięcia (195,05 GPa) i z pominięciem warstw organicznych (209,91 GPa). Z uwagi na fakt, że różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami

modułów sprężystości mieszczą się w granicach obliczonych odchyłeń standardowych, nie można jednoznacznie stwierdzić, że warstwy organiczne nie mają żadnego wpływu na obliczone wartości modułu sprężystości i , że warstwy te można po prostu pominąć.

W prowadzonych badaniach mających na celu wyznaczenie wartości modułu sprężystości należy obliczane wyniki odnosić zawsze do odpowiedniej grubości próbki, mając na uwadze, że jej warstwowa budowa może mieć istotny wpływ na otrzymywane wartości modułu sprężystości podłużnej.

Wszystkie szczegółowe wyniki z prowadzonych analiz dla poszczególnych próbek zestawiono w Załączniku B, w tab. B.1. Pełną relację naprężenie efektywne - odkształcenie, aż do osiągnięcia zniszczenia, wyznaczoną dla próbek o całkowitej grubości, dla próbek SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8 przedstawiono poglądowo na rys. 3.10. Wykres obrazuje duże podobieństwo w zachowaniu się rozciąganych próbek zarówno w zakresie sprężystym, jak i plastycznym. Po osiągnięciu granicy plastyczności rozciągnięte próbki ulegają dalej wydłużeniu plastycznemu bez wyraźnego wzmocnienia materiału.

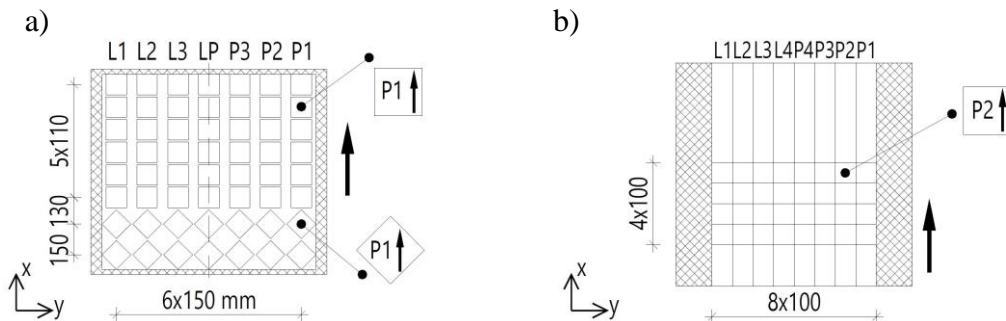


Rysunek 3.10. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbek SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne + warstwy organiczne).

Do dalszych prac związanych z numerycznym modelowaniem paneli warstwowych wykorzystywano całkowitą grubość okładzin (wraz z warstwami organicznymi) oraz moduł sprężystości podłużnej wyznaczony dla takiego układu warstw.

3.1.2 Moduł sprężystości podłużnej rdzenia

Badanie modułu sprężystości podłużnej rdzenia paneli warstwowych zostało wykonane na próbkach dostarczonych przez producenta płyt warstwowych. Po zakończonym procesie produkcji, pełne płyty warstwowe zostały pocięte na próbki do badań za pomocą specjalistycznej piły taśmowej. Próbki do badań modułu sprężystości zostały wycięte w kształcie prostopadłościanu foremnego o wymiarach kwadratowej podstawy równych 100×100 mm oraz wysokości równej wysokości płyty warstwowej, z której próbki zostały wycięte. Przygotowane zostały próbki zarówno z płyt CH120, jak i płyt CH160. W zakresie budowy warstwowej, dostarczone przez producenta próbki nie były poddawane dodatkowej obróbce – okładziny paneli warstwowych były oryginalnie połączone z rdzeniem. W celu określenia pełnej charakterystyki materiałowej rdzenia paneli warstwowych, w zakresie modułów sprężystości podłużnej, próbki zostały poddane ścisaniu oraz rozciąganiu we wszystkich trzech kierunkach: x , y , z prostokątnego układu współrzędnych (rys. 3.11). W celu weryfikacji wpływu okładzin na wartość modułu sprężystości rdzenia E_z^c , badaniu po kierunku osi z poddano próbki z odciętymi okładzinami (rys. 3.11a) oraz bez odcinania okładzin (rys. 3.11b).



Rysunek 3.11. Ułożenie próbek względem płyty warstwowej, przeznaczonych do badań: a) z odciętą okładziną, b) bez odcinania okładziny, (strzałką oznaczono kierunek produkcji płyt warstwowych).

Wysokość badanych po kierunku osi z próbek bez odcinania okładzin wynosiła około 120 mm i 160 mm, natomiast po odcięciu okładzin odpowiednio około 110 mm i 150 mm. Próbki przeznaczone do badania w pozostałych kierunkach posiadały wysokość równą około 100 mm. Badaniu poddawano środkową część prostopadłościennej próbki, odcinając symetrycznie równą część górną i dolną oryginalnej próbki. Dodatkowo w celu pośredniego określenia modułu ścinania G_{xy}^c , którego nie wyznaczano bezpośrednio w próbie ścinania beleczek warstwowych (rozdział 3.1.3), określono moduł sprężystości podłużnej próbek obróconych o 45°

względem podłużnej osi x , wyznaczając moduł sprężystości E_{x45}^c . Szczegółowy opis pośredniego wyznaczenia modułu ścinania G_{xy}^c na podstawie wyników modułów sprężystości przedstawiono w rozdziale 4.1.3 opisującym budowę modelu materiałowego rdzenia zastosowanego w przeprowadzonych analizach numerycznych.

Przedstawione na rys. 3.11 próbki zostały poddane próbie wytrzymałościowej osiowego ściskania i rozciągania, w celu wyznaczenia:

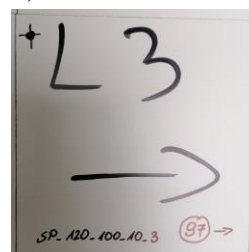
- modułu sprężystości podłużnej po kierunku osi x , przy ściskaniu $E_{x,C}^c$ i rozciąganiu $E_{x,T}^c$, po odcięciu okładzin (wysokość próbki około 100 mm) – rys. 3.11a,
 - modułu sprężystości podłużnej po kierunku obróconym względem osi x o kąt 45° , przy ściskaniu $E_{x45,C}^c$ i rozciąganiu $E_{x45,T}^c$, po odcięciu okładzin (wysokość próbki około 100 mm) – rys. 3.11a,
 - modułu sprężystości podłużnej po kierunku osi y , przy ściskaniu $E_{y,C}^c$ i rozciąganiu $E_{y,T}^c$, po odcięciu okładzin (wysokość próbki około 100 mm) – rys. 3.11a,
 - modułu sprężystości podłużnej po kierunku osi z , przy ściskaniu $E_{z,C}^c$ i rozciąganiu $E_{z,T}^c$, po odcięciu okładzin (wysokość próbki około 110 mm i 150 mm) – rys. 3.11a,
 - modułu sprężystości podłużnej po kierunku osi z , przy ściskaniu $E_{z0,C}^c$ i rozciąganiu $E_{z0,T}^c$, bez odcinania okładzin (wysokość próbki około 120 mm i 160 mm) – rys. 3.11b.
- Łącznie przebadane zostały 144 próbki: 72 próbki wycięte z paneli warstwowych CH120 oraz 72 próbki wycięte z paneli CH160.

Zgodnie z ustaleniami z producentem płyt warstwowych, każda dostarczona próbka została jednoznacznie opisana. Opis naniesiony był zawsze na zewnętrzną powierzchnię próbki, tożsamą z zewnętrzną powierzchnią płyty warstwowej, z której była wycinana. Na każdej próbce oznaczono strzałką kierunek produkcji płyt warstwowych. Dodatkowo zadbano, aby numeracja próbki odzwierciedlała położenie próbki względem szerokości płyty, z której została wycięta. Numerację próbek wykonano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.11. Każdej próbce dostarczonej do laboratorium przypisana została dodatkowa nazwa, ściśle związana z odpowiednim kierunkiem badania próbki (rys. 3.12).

a)



b)



c)



Rysunek 3.12. Próbkę przeznaczony do badań modułu sprężystości: a) schemat cięcia zgodny z rys. 3.11a, b) opis przykładowej próbki, c) schemat cięcia zgodny z rys. 3.11b.

W celu uproszczenia zapisu nazwy próbki, poza jej pełną nazwą, każdej próbce została przypisana dodatkowa nazwa skrócona. Szczegółowe zestawienie poddanych badaniom próbek wyciętych z płyt warstwowych CH120 oraz CH160 przedstawiono w postaci tabelarycznej odpowiednio w tabelach tab. 3.3 oraz tab. 3.4.

Tabela 3.3. Zestawienie próbek do badań modułu sprężystości – płyta warstwowa CH120.

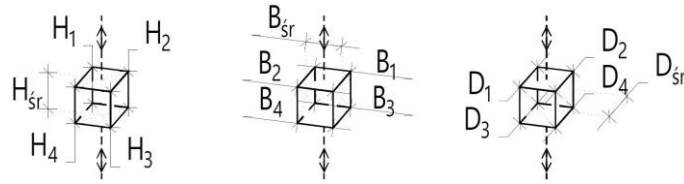
Pochodzenie próbki	Kierunek badania	Rodzaj badania	Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki
CH120 rys. 3.11b	z	rozciąganie	SP_120_100_10_1 / SP_120_100_10_8	SP_95 / SP_102
		ściskanie	SP_120_100_11_1 / SP_120_100_11_8	SP_103 / SP_110
CH120 rys. 3.11a	z	rozciąganie	SP_120_100_13_1 / SP_120_100_13_7	SP_119 / SP_125
		ściskanie	SP_120_100_14_1 / SP_120_100_14_7	SP_126 / SP_132
CH120 rys. 3.11a	x	rozciąganie	SP_120_100_15_1 / SP_120_100_15_7	SP_133 / SP_139
		ściskanie	SP_120_100_16_1 / SP_120_100_16_7	SP_140 / SP_146
CH120 rys. 3.11a	y	rozciąganie	SP_120_100_17_1 / SP_120_100_17_7	SP_147 / SP_153
		ściskanie	SP_120_100_18_1 / SP_120_100_18_7	SP_154 / SP_160
CH120 rys. 3.11a	x45	rozciąganie	SP_120_100_19_1 / SP_120_100_19_7	SP_161 / SP_167
		ściskanie	SP_120_100_20_1 / SP_120_100_20_7	SP_168 / SP_174

Tabela 3.4. Zestawienie próbek do badań modułu sprężystości – płyta warstwowa CH160.

Pochodzenie próbki	Kierunek badania	Rodzaj badania	Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki
CH160 rys. 3.11b	z	rozciąganie	SP_160_100_9_1 / SP_160_100_9_8	SP_183 / SP_190
		ściskanie	SP_160_100_10_1 / SP_160_100_10_8	SP_191 / SP_198
CH160 rys. 3.11a	z	rozciąganie	SP_160_100_13_1 / SP_160_100_13_7	SP_215 / SP_221
		ściskanie	SP_160_100_14_1 / SP_160_100_14_7	SP_222 / SP_228
CH160 rys. 3.11a	x	rozciąganie	SP_160_100_15_1 / SP_160_100_15_7	SP_229 / SP_235
		ściskanie	SP_160_100_16_1 / SP_160_100_16_7	SP_236 / SP_242
CH160 rys. 3.11a	y	rozciąganie	SP_160_100_17_1 / SP_160_100_17_7	SP_243 / SP_249
		ściskanie	SP_160_100_18_1 / SP_160_100_18_7	SP_250 / SP_256
CH160 rys. 3.11a	x45	rozciąganie	SP_160_100_19_1 / SP_160_100_19_7	SP_257 / SP_263
		ściskanie	SP_160_100_20_1 / SP_160_100_20_7	SP_264 / SP_270

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych, pomierzono dokładnie każdą ze 144 próbek. Do pomiaru wykorzystano suwmiarkę elektroniczną, za pomocą której mierzono (rys. 3.13):

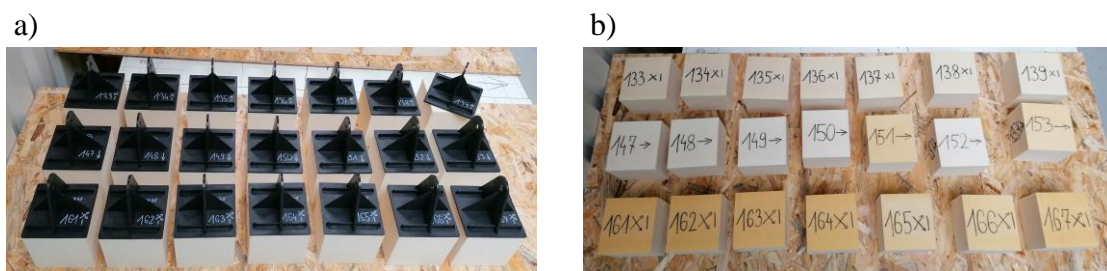
- wysokości H_i próbki (po kierunku działania obciążenia) wzdłuż czterech krawędzi prostopadłościennego gabarytu oraz wysokość H_{sr} w środkowej części próbki,
- szerokości B_i próbki wzdłuż czterech krawędzi prostopadłościennego gabarytu oraz szerokość B_{sr} w środkowej części próbki,
- grubości D_i próbki wzdłuż czterech krawędzi prostopadłościennego gabarytu oraz grubość D_{sr} w środkowej części próbki.



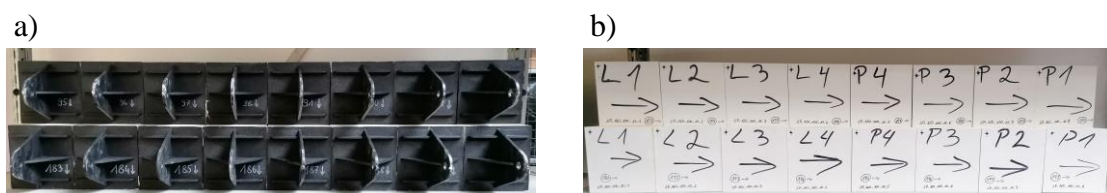
Rysunek 3.13. Schemat pomiaru geometrii próbek.

Wartości wypadkowe pomierzonych parametrów geometrycznych przyjęto jako średnią arytmetyczną pomiaru w środkowej części próbki oraz średniej arytmetycznej z pomiarów wzdłuż czterech krawędzi prostopadłościennego gabarytu. Dodatkowo próbki przeznaczone do laboratoryjnej próby ściskania zważono i określono dla nich gęstość materiału rdzenia. Szczegółowe dane dotyczące wymiarów wszystkich próbek zestawiono w Załączniku A, w tab.A.10-A.12.

Precyzyjnie opisane oraz pomierzone próbki przeznaczone do laboratoryjnej próby ściskania nie wymagały wykonywania żadnych prac dodatkowych przed rozpoczęcie badania. Próbki przeznaczone do wykonania próby rozciągania wymagały doklejenia do próbek specjalnych uchwytów, za które próbka była łapana w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Do tego celu wykorzystano dedykowane podciągacze laboratoryjne PL100 produkcji firmy PARPLAST. Mocowanie podciągaczy do próbek rdzenia wykonano przy użyciu dwuskładnikowego kleju na bazie poliuretanu Macroplast UK 8309 firmy Teroson. Poglądowo próbki w trakcie przygotowywania do badań przedstawiono na rys. 3.14. Gotowe do badania próbki przedstawiono na rys. 3.15.

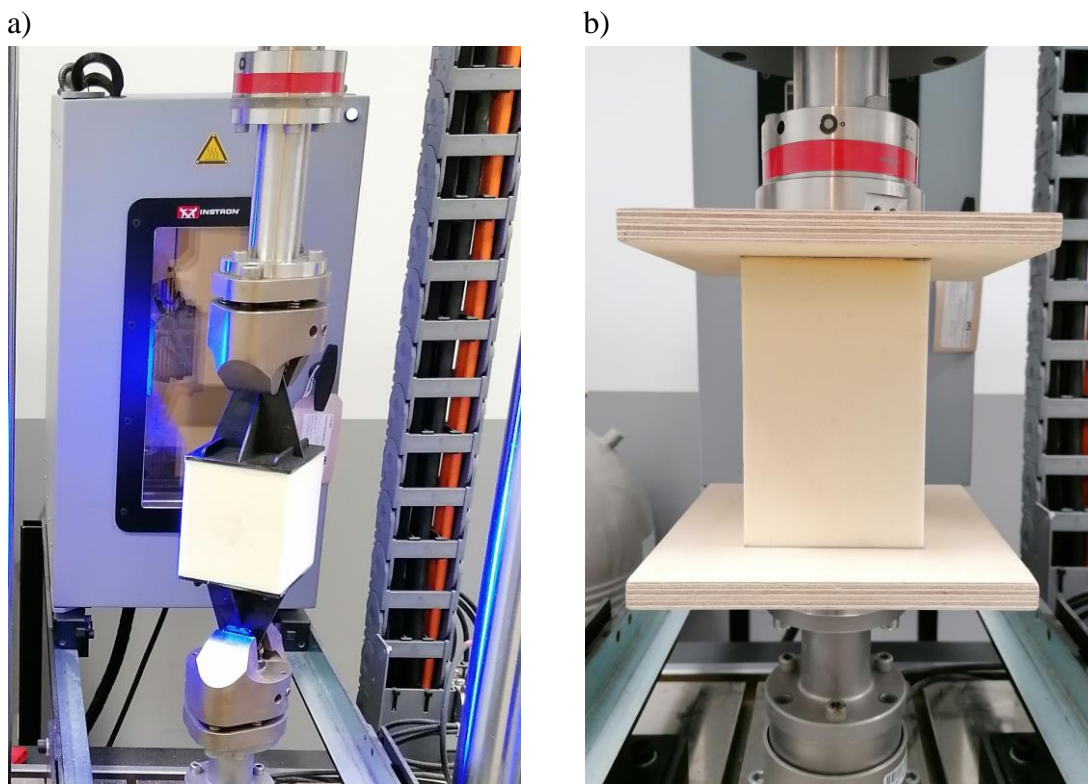


Rysunek 3.14. Próbki w trakcie przygotowania do badania: a) rozciągania, b) ściskania.



Rysunek 3.15. Próbki przygotowane do badania: a) rozciągania, b) ściskania.

Badanie modułu sprężystości rdzenia płyty warstwowej zostało wykonane zgodnie z załącznikami A.1 oraz A.2 normy [N-5] odpowiednio przy rozciąganiu oraz ściskaniu. Próbki rdzenia poddano próbie statycznego obciążenia osiowego w maszynie wytrzymałościowej INSTRON ELEKTROPULS E10000, z siłomierzem klasy 0,5 w zakresie sił do 10 kN. Tempo badania (zarówno w próbie rozciągania jak i ściskania) sterowane było przemieszczeniem trawersy maszyny wytrzymałościowej na poziomie 2% wysokości próbki na minutę. Dla badanych próbek tempo badania mieściło się w zakresie od 2,0 mm/min do 3,2 mm/min. W przypadku rozciągania próba laboratoryjna prowadzona była do momentu zniszczenia próbki, z kolei w przypadku ściskania do momentu osiągnięcia odkształcenia ściskającego na poziomie 15%. Dla każdej próby laboratoryjnej sporządzony został wykres relacji obciążenia próbki do przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej. Bazując na liniowej części otrzymanych wykresów wyznaczano moduł sprężystości podłużnej próbki. Na rys. 3.16 przedstawiono umieszczone w maszynie wytrzymałościowej próbki poddane próbie statycznego rozciągania (rys. 3.16a) oraz ściskania (rys. 3.16b). Widoczne na rys. 3.16b podkładki ze sklejkki zastosowano w celu zapewnienia równomiernego obciążenia próbki.



Rysunek 3.16. Próbki umieszczone w maszynie wytrzymałościowej w laboratoryjnej próbie:
a) rozciągania, b) ściskania.

Wartość modułu sprężystości podłużnej rdzenia panelu warstwowego E^c wyrazić można poprzez relację przyrostu naprężenia podłużnego wewnątrz próbki $\Delta\sigma^c$ do przyrostu odkształcenia podłużnego $\Delta\varepsilon^c$, za pomocą równania:

$$E^c = \frac{\Delta\sigma^c}{\Delta\varepsilon^c}. \quad (3.6)$$

Wyrażając przyrost naprężenia wewnątrz próbki $\Delta\sigma^c$ poprzez iloraz przyrostu siły obciążającej próbkę ΔF i pola obciążonego przekroju poprzecznego A^c oraz przyrost odkształcenia podłużnego $\Delta\varepsilon^c$ poprzez iloraz przyrostu wydłużenia (skrócenia) próbki Δl i wymiaru początkowego próbki L^c otrzymano:

$$E^c = \frac{\frac{\Delta F}{A^c}}{\frac{\Delta l}{L^c}} = \frac{\Delta F \cdot L^c}{A^c \cdot \Delta l}. \quad (3.7)$$

Wymiar początkowy próbki w kierunku działania obciążenia L^c oraz pole obciążonego przekroju poprzecznego A^c są wartościami stałymi dla danej próby laboratoryjnej. Analizując zapis wyników otrzymanych bezpośrednio z maszyny wytrzymałościowej należy mieć na uwadze, że o ile wartość przyrostu siły obciążającej próbkę ΔF jest wielkością bezpośrednio oddziałującą na próbkę o tyle przyrost wydłużenia (skrócenia) próbki Δl jest wielkością złożoną [34], którą można zapisać za pomocą równania:

$$\Delta l = \Delta l^c + \Delta l^m. \quad (3.8)$$

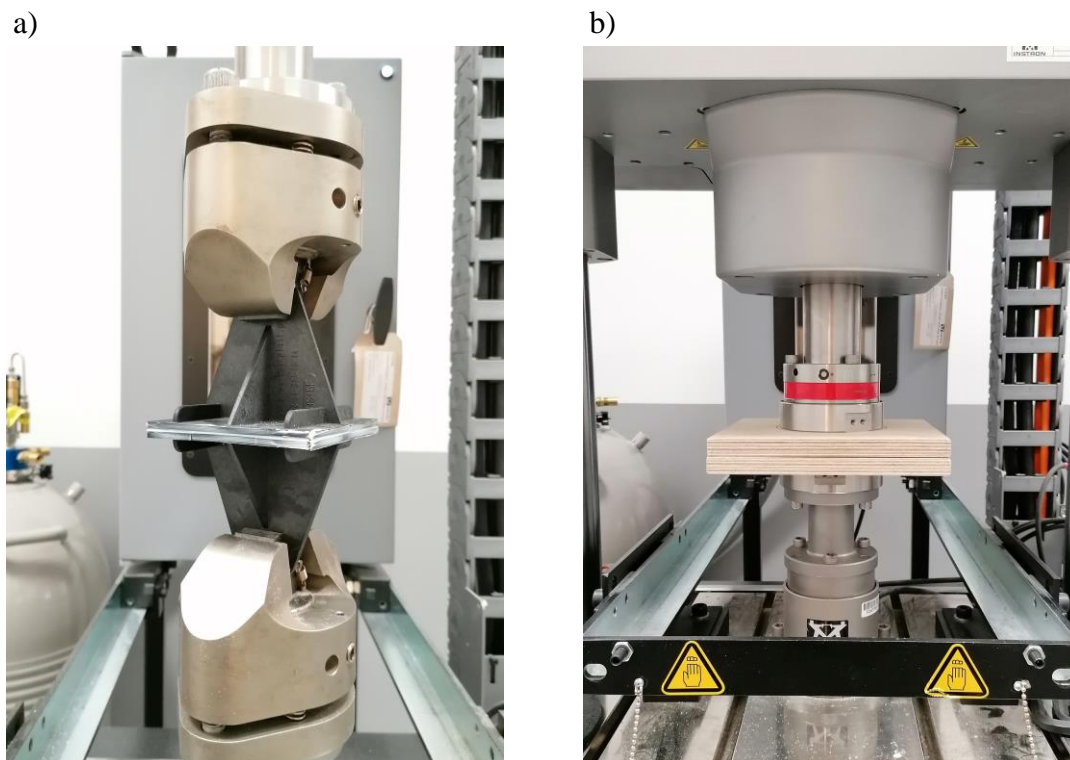
Na całkowite wydłużenie (skrócenie) próbki Δl odczytane bezpośrednio jako przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej składa się rzeczywiste wydłużenie (skrócenie) próbki Δl^c oraz wydłużenie (skrócenie) układu mocującego próbkę Δl^m . Przy nieskończonej sztywnej budowie układu mocującego, wartość wydłużenia (skrócenia) układu osiągałaby wartość równą zero. Skutkowałoby to możliwością stosowania równania (3.7) do wyznaczania modułu sprężystości podłużnej próbki bezpośrednio z zapisu przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej w funkcji obciążenia próbki. Sztywność układu mocującego próbkę jest jednak ograniczona, co przekłada się na konieczność uwzględnienia wpływu odkształcenia

układu mocującego na całkowite odkształcenie próbki wyznaczone w oparciu o przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej.

W celu uwzględnienia wpływu układu mocującego próbkę na wartość wyznaczanych modułów sprężystości podłużnych próbek wykonano próby laboratoryjne, w których została określona relacja siły obciążającej układ mocujący do jego wydłużenia lub skrócenia, w zależności od zwrotu działania siły. Za pomocą wyznaczonych relacji możliwe było określenie rzeczywistego wydłużenia (skrócenia) próbki w funkcji jej obciążenia za pomocą przekształconego równania (3.8) do postaci:

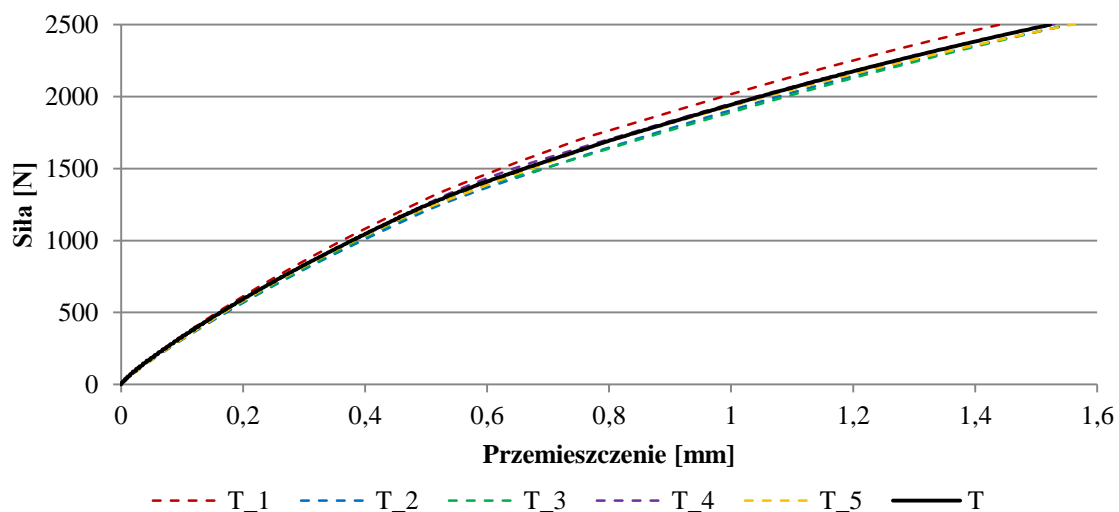
$$\Delta l^c(\Delta F) = \Delta l(\Delta F) - \Delta l^m(\Delta F), \quad (3.9)$$

w którym za pomocą symbolu ΔF podkreślono, że wszystkie wydłużenia (skrócenia) składowych równania (3.9) są zmiennymi funkcji przyrostu siły obciążającej próbkę. Na rys. 3.17 przedstawiono umieszczone w maszynie wytrzymałościowej układy mocujące próbki poddane próbie statycznego rozciągania (rys. 3.17a) oraz ściskania (rys. 3.17b).



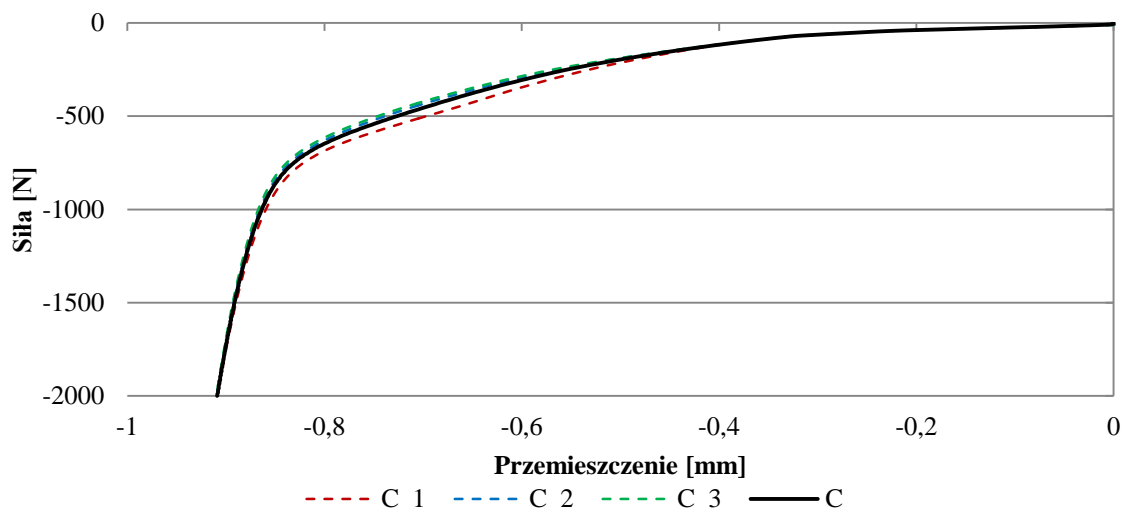
Rysunek 3.17. Układ mocujący próbkę w laboratoryjnej próbie:
a) rozciągania, b) ściskania.

Układ mocujący próbkę rdzenia poddaną statycznej próbie rozciągania składa się z dwóch podciągaczy laboratoryjnych PL100 sklejonych ze sobą za pomocą kleju dwuskładnikowego Macroplast UK 8309 zamocowanych w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Przeprowadzono pięć prób statycznego rozciągania układu, dla których sporządzono wykresy relacji obciążenia układu do przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej. W przeprowadzonych próbach tempo badania sterowane było przemieszczeniem trawersy maszyny wytrzymałościowej na poziomie 3,2 mm/min. Próbkę rozciągania prowadzono do momentu osiągnięcia przez maszynę wytrzymałościową siły na poziomie 2,5 kN. Na rys. 3.18 przedstawiono zbiorczo wyniki ze wszystkich pięciu prób, wraz z naniesioną czarną linią ciągłą wartością średnią z uzyskanych wyników.



Rysunek 3.18. Relacja obciążenie układu – przemieszczenie trawersy w próbie rozciągania.

W podobny sposób określona została relacja obciążenia układu mocującego próbkę do przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej w próbie statycznego ściskania układu. Układ mocujący próbkę rdzenia poddaną statycznej próbie ściskania składa się z dwóch sklejek o grubościach 18 mm umieszczonych na talerzach maszyn wytrzymałościowej. Przeprowadzono trzy próby statycznego ściskania układu. W przeprowadzonych próbach tempo badania sterowane było przemieszczeniem trawersy maszyny wytrzymałościowej na poziomie 3,2 mm/min. Próbkę ściskania prowadzono do momentu osiągnięcia przez maszynę wytrzymałościową siły na poziomie 2,0 kN. Na rys. 3.19 przedstawiono zbiorczo wyniki ze wszystkich trzech prób, wraz z naniesioną czarną linią ciągłą wartością średnią z uzyskanych wyników.

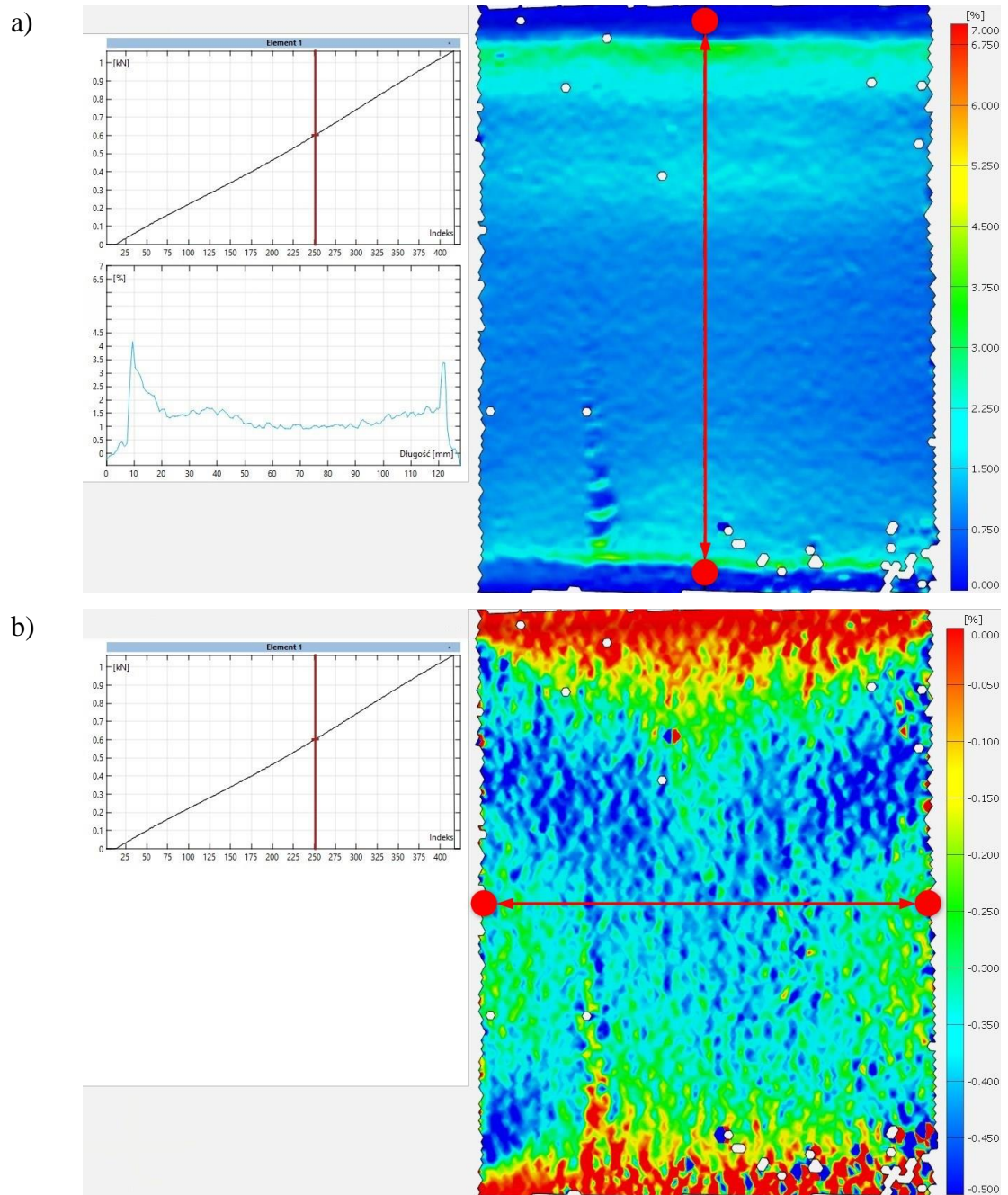


Rysunek 3.19. Relacja obciążenie układu – przemieszczenie trawersy w próbie ściskania.

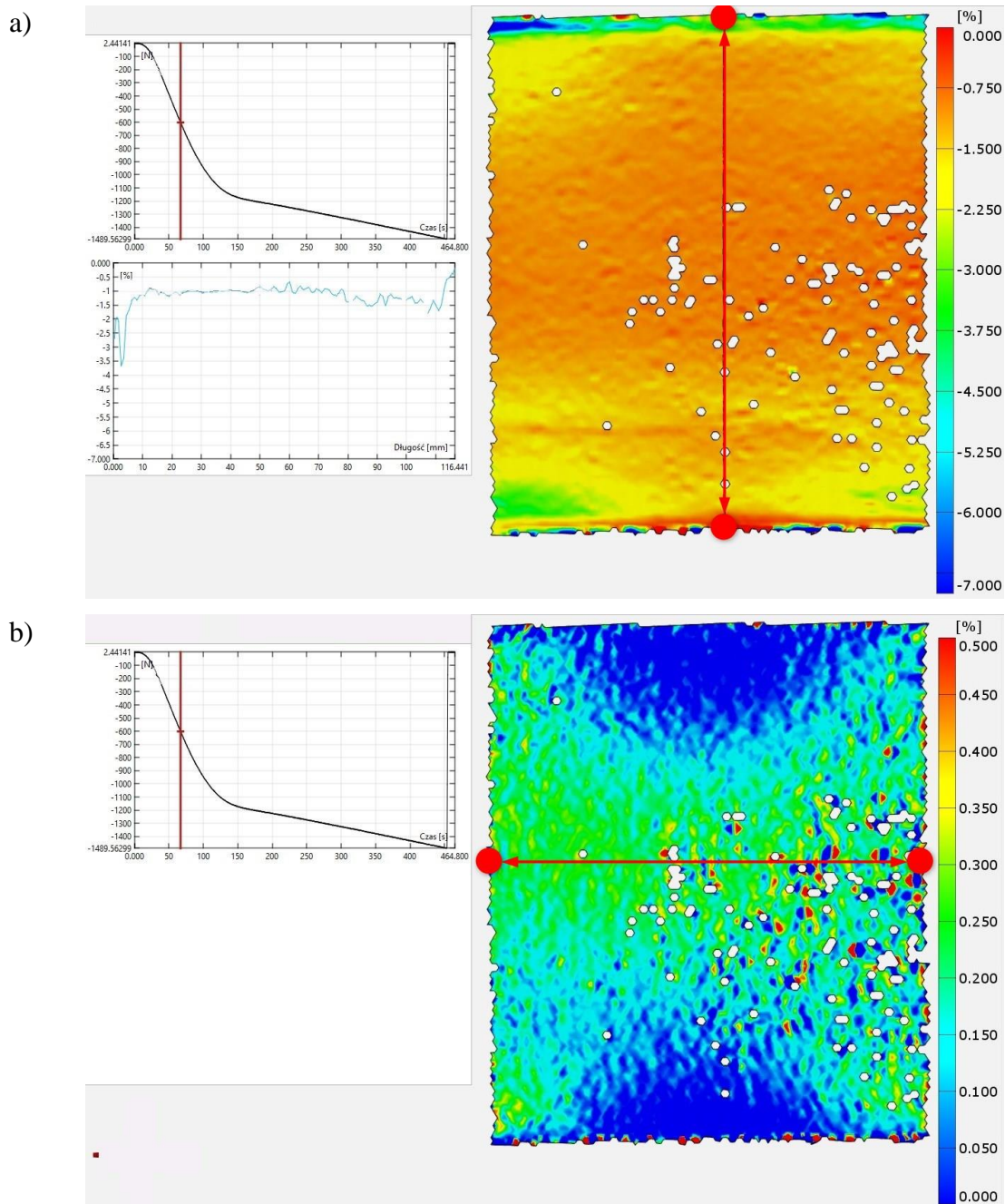
W celu weryfikacji poprawności stosowania opisanej metody uwzględniania podatności układu mocującego badanej próbki na wartość modułu sprężystości podłużnej rdzenia, wykonano analizę porównawczą wyników otrzymanych z tej metody z wynikami otrzymanymi za pomocą optycznych pomiarów przemieszczeń z wykorzystaniem aparatury ARAMIS 6M. Próbie weryfikacyjnej poddano po 15 próbek rozciąganych i ściskanych po kierunku osi z (po siedem próbek z odciętymi okładzinami i po osiem próbek bez odcinania okładzin). Dodatkowo, dla badanych za pomocą aparatury ARAMIS 6M próbek, wyznaczony został współczynnik Poissona ν_{zy}^c , określający relację odkształcenia po kierunku obciążenia ε_z^c oraz odkształcenia analizowanej powierzchni w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia ε_y^c [42]. Analizę danych zapisanych z prób laboratoryjnych wykonano w oprogramowaniu GOM Correlate 2020 [35]. Na rys. 3.20 przedstawiono przykładowe mapy odkształceń rozciąganej próbki SP_97, natomiast na rys. 3.21 mapy odkształceń ściskanej próbki SP_102.

Na analizowanych w oprogramowaniu GOM Correlate powierzchniach próbek, wyznaczano cztery punkty pomiarowe: w połowie szerokości poziomych krawędzi oraz w połowie wysokości pionowych krawędzi. Punkty pomiarowe zostały poglądowo pokazane na mapach odkształceń (rys. 3.20 i rys. 3.21). W trakcie trwania obciążenia mierzono zmianę odległości pomiędzy punktami pomiarowymi w kierunku obciążenia (kierunek osi z) oraz w kierunku prostopadłym do obciążenia (kierunek osi y). Zmiana odległości pomiędzy punktami odniesiona do odległości początkowej (próbka nieobciążona) posłużyła do wyznaczenia odkształceń wypadkowych próbki ε_z^c oraz ε_y^c .

W celu zobrazowania zmiany odkształcenia ε_z^c na wysokości próbki, na mapach odkształcenia po kierunku działania obciążenia wykonano przekrój pionowy przy sile 600 N. Wykres przedstawiający zmianę odkształcenia ε_z^c na wysokości próbki przedstawiono pod wykresem siły obciążającej próbkę, po lewej stronie od map odkształceń ε_z^c . Zarówno w przypadku próbki rozciąganej (rys. 3.20a) jak i ściskanej (rys. 3.21a) widać wzrost odkształcenia ε_z^c na końcach próbki.



Rysunek 3.20. Mapa odkształcenia rozciąganej próbki SP_97 obciążonej siłą 600 N: a) ε_z^c , b) ε_y^c ,
(wymiary nieobciążonej próbki po kierunku obciążenia równy 119,15 mm).



Rysunek 3.21. Mapa odkształcenia ściskanej próbki SP_103 obciążonej siłą 600 N: a) ϵ_z , b) ϵ_y ,
(wymiar nieobciążonej próbki po kierunku obciążenia równy 119,73 mm).

Przykładową weryfikację poprawności opisaną metodologią wyznaczania modułu sprężystości podłużnej materiał rdzenia pokazano na przykładzie rozciąganej próbki SP_122 (rys. 3.22) oraz ściskanej próbki SP_129 (rys. 3.23). Na przedstawionych na rys. 3.22 oraz rys. 3.23 wykresach obrazujących relację naprężenia do odkształcenia próbki (uzyskaną na podstawie odniesienia wyników uzyskanych z maszyny wytrzymałościowej do wymiarów próbki nieobciążonej) zilustrowano za pomocą:

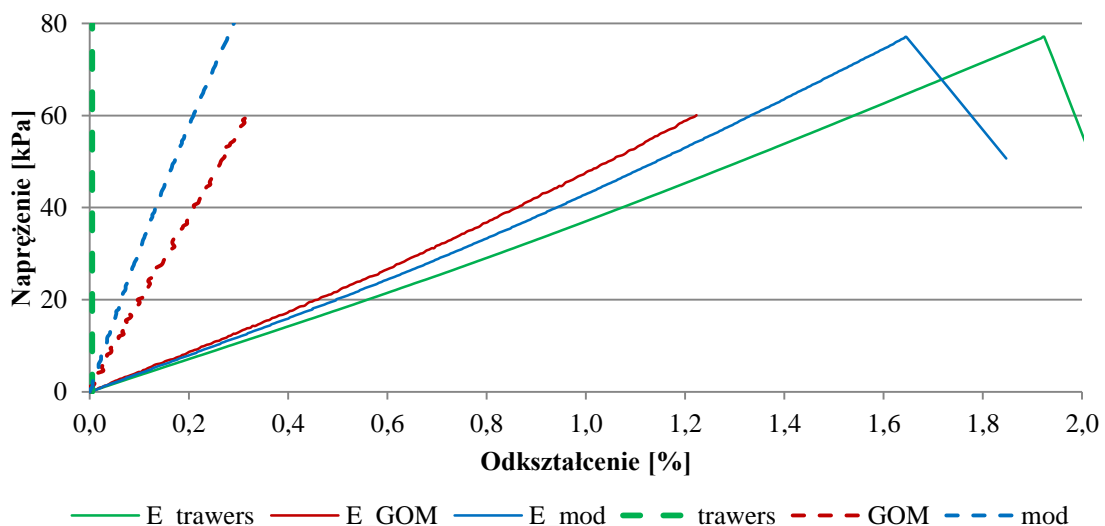
- zielonej linii ciągłej – wyniki zapisane z trawersy maszyny wytrzymałościowej,

- czerwonej linii ciągłej – wyniki otrzymane z analizy optycznych pomiarów odkształceń,
- niebieskiej linii ciągłej – wyniki otrzymane z opisaney metody – pomiar z trawersy maszyny wytrzymałościowej skorygowany o uwzględnienie podatności układu mocującego próbkę.

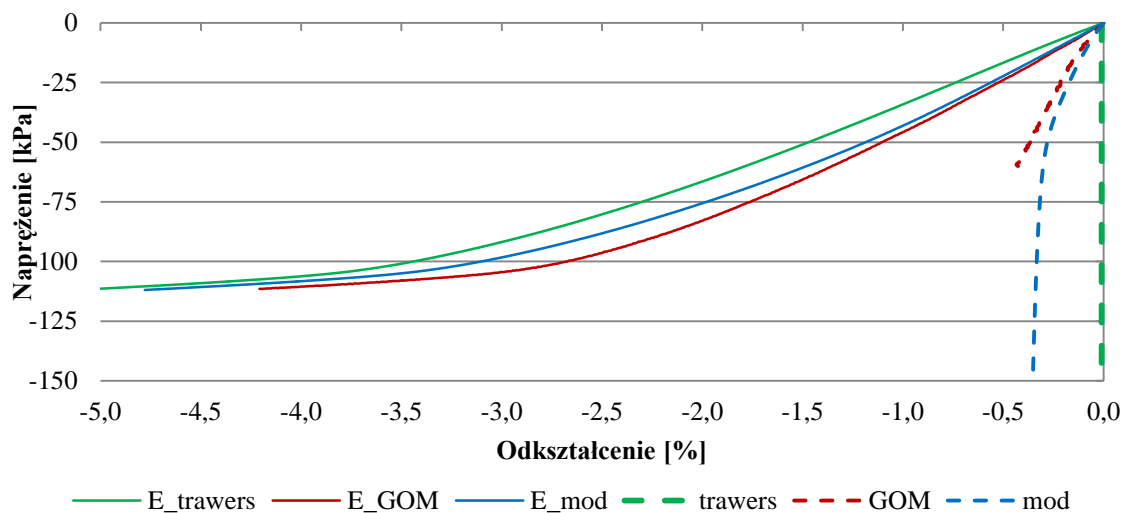
Liniami przerywanymi oznaczono wyniki opisujące zachowanie układu mocującego uzyskane w następujący sposób, dla:

- trawersy o nieskończonej sztywności zakładając, że wyniki zapisane bezpośrednio z maszyny wytrzymałościowej stanowią podstawę do wyznaczania modułu sprężystości badanej próbki (linia zielona przerywana),
- układu mocującego próbkę z analiz w oprogramowaniu GOM, odejmując od siebie wyniki zapisane bezpośrednio z trawersy maszyny wytrzymałościowej i te uzyskane z analiz optycznych pomiarów odkształceń (linia czerwona przerywana),
- układu mocującego próbkę z próby wytrzymałościowej, w której obciążano wydzielony układ mocujący próbkę zgodnie ze wcześniejszym opisem – przeniesienie danych z rys. 3.18 oraz rys. 3.19 (linia niebieska przerywana).

Przedstawione wykresy obrazują słuszność uwzględniania podatności układu mocującego próbki na wartość wyznaczanego modułu sprężystości badanego materiału. Pomimo dużej podatności materiału rdzenia, nie można założyć, że sztywność układu mocującego jest nieskończona w relacji do sztywności badanej próbki.



Rysunek 3.22. Relacja naprężenie – odkształcenie przy rozciąganiu rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi z.



Rysunek 3.23. Relacja napężenie – odkształcenie przy ścisnaniu rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi z.

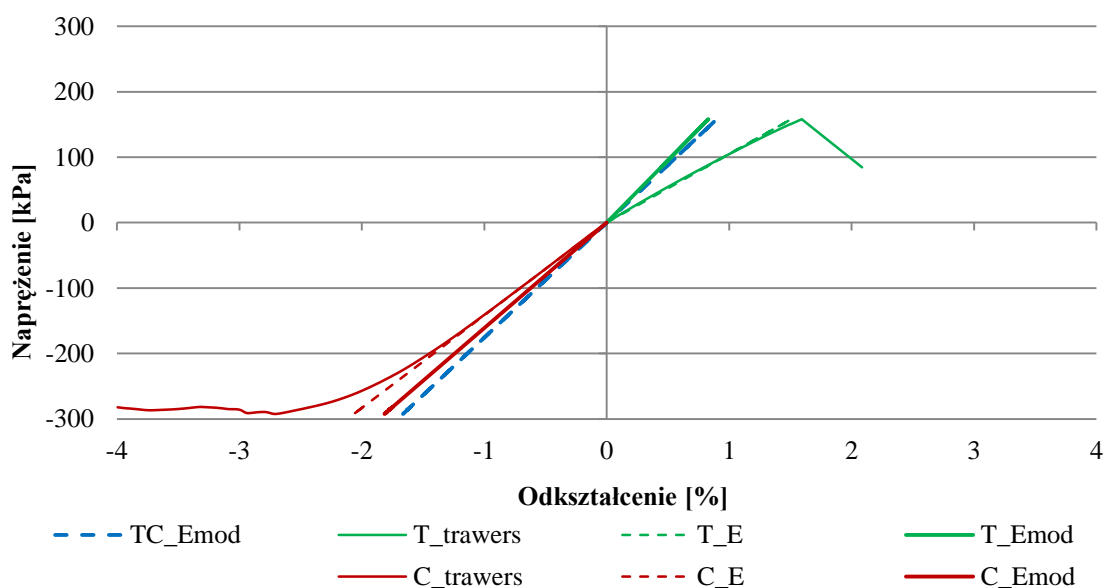
Zarówno w przypadku rozciągania, jak i ścisnania otrzymamy wzrost wartości modułu sprężystości badanego materiału w przypadku zastosowania opisanego w niniejszym rozdziale metody oraz metody opartej na optycznych pomiarach odkształceń w odniesieniu do wyznaczonego modułu sprężystości bezpośrednio z wyników z maszyny wytrzymałościowej. W przypadku analizy ścisnania (rys. 3.23) zaobserwować można bardzo dużą zgodność wyników uzyskanych z metody opisanego w niniejszym rozdziale oraz metody opartej na optycznych pomiarach odkształceń. Wyniki dla przypadku rozciągania (rys. 3.22) odpowiadają sobie w mniejszym stopniu, z uwagi na inne warunki przyczepności kleju mocującego między sobą dwa uchwyty, a kleju mocującego uchwyt do badanej próbki rdzenia. Niemniej, wszystkie przedstawione wyniki obrazują poprawność zaproponowanej metody wyznaczania modułu sprężystości rdzenia z uwzględnieniem podatności układu mocującego próbkę, a w obliczu dużego skomplikowania i czasochłonności analiz opartych na optycznych pomiarach odkształceń omawiana metoda została wybrana do wyznaczania modułu sprężystości dla pozostałych próbek. Przedstawiona na powyższym przykładzie weryfikacja stosowanych metod została potwierdzona na wszystkich 30, przebadanych z zastosowaniem metody opartej na optycznych pomiarach odkształceń, próbkach.

Na podstawie dokonanych pomiarów odkształceń wypadkowych próbki ε_z^c oraz ε_y^c , w tab. 3.5 zestawiono wyniki wyznaczonych współczynników Poissona $\nu_{zy}^c = -\varepsilon_y^c / \varepsilon_z^c$ [42] dla rozciąganych i ścisnanych po kierunku osi z próbek z odciętą okładziną. Szczegółowe dane dotyczące każdej zbadanej próbki zestawiono w Załączniku B, w tab. B.3.

Tabela 3.5. Współczynnik Poissona ν_{zy}^c materiału rdzenia.

		Wartość średnia \bar{x} [-]	Odchylenie standardowe s [-]	Wsp. zmienności v [-]		Wartość średnia \bar{x} [-]
SP_120	$\nu_{zy,T}^c$	0,32	0,01	0,036	ν_{zy}^c	0,28
	$\nu_{zy,C}^c$	0,23	0,02	0,066		

Na podstawie przedstawionej w niniejszym rozdziale metody, dla wszystkich zbadanych próbek wyznaczono wartość modułu sprężystości podłużnej. Na przykładzie rozciąganych i ściskanych po kierunku osi x próbek rdzenia omówiono proces wyznaczania wyniku modułu sprężystości materiału stosowanego w dalszej części rozprawy do budowy modelu materiałowego rdzenia. Na wykresie na rys. 3.24 przedstawiono relację naprężenia do odkształcenia próbki w pełnym zakresie jej pracy (rozciąganie próbki SP_133 oraz ściskanie próbki SP_140). Kolorem zielonym oznaczono wyniki uzyskane ze statycznej próby rozciągania próbek, kolorem czerwonym wyniki uzyskane ze statycznej próby ściskania próbek. Cienką linią ciągłą oznaczono wyniki otrzymane bezpośrednio z maszyny wytrzymałościowej, cienką linią przerywaną oznaczono liniową część krzywej. Grubą linią ciągłą oznaczono wyniki otrzymane z przedstawionej w niniejszym rozdziale metody uwzględniania podatności układu mocującego próbkę. Niebieską linią przerywaną oznaczono relację naprężenie – odkształcenie dla średniej wartości modułu sprężystości wyznaczonej z próby rozciągania i ściskania.

Rysunek 3.24. Relacja naprężenie – odkształcenie rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi x .

Przedstawiony wykres obrazuje znaczną różnicę pomiędzy modułem sprężystości wyznaczonym bezpośrednio z maszyny wytrzymałościowej i metody opisanej w niniejszym rozdziale. W przypadku modułu sprężystości przy rozciąganiu różnica ta jest na poziomie 79%, natomiast w przypadku ściskania na poziomie 14%. Wzrost wartości modułów sprężystości podłużnej przy zastosowaniu optycznego pomiaru przemieszczeń względem bezpośredniej analizy wyników otrzymanych z maszyny wytrzymałościowej podobnie zaobserwowano w pracy [6.6]. Z uwagi na fakt, że wyniki modułu sprężystości przy rozciąganiu i przy ściskaniu są tego samego rzędu wielkości, a różnice między wartościami są relatywnie niskie, w budowie modeli materiałowych zastosowano średnią arytmetyczną modułu w danym kierunku z osiągniętych wyników przy rozciąganiu i ściskaniu.

Jako podsumowanie prowadzonych prac, poniżej, w tab. 3.6, zestawiono średnie wartości modułów sprężystości rdzenia analizowanych próbek. Szczegółowe dane dotyczące każdej zbadanej próbki zestawiono w Załączniku B, w tab. B.2.

Tabela 3.6. Zestawienie modułów sprężystości rdzenia.

		Wartość średnia \bar{x} [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Wsp. zmienności v [-]			Wartość średnia \bar{x} [MPa]
SP_120	$E_{z0,T}^c$	4,19	0,14	0,03	E_{z0}^c		4,38
	$E_{z0,C}^c$	4,56	0,16	0,03			
	$E_{z,T}^c$	4,13	0,09	0,02	E_z^c		4,20
	$E_{z,C}^c$	4,26	0,09	0,02			
	$E_{x,T}^c$	18,44	0,52	0,03	E_x^c		16,84
	$E_{x,C}^c$	15,24	1,23	0,08			
	$E_{y,T}^c$	6,36	0,19	0,03	E_y^c		5,93
	$E_{y,C}^c$	5,49	0,19	0,03			
	$E_{x45,T}^c$	6,26	0,16	0,03	E_{x45}^c		5,93
	$E_{x45,C}^c$	5,60	0,08	0,01			

Tabela 3.6-cd. Zestawienie modułów sprężystości rdzenia.

		Wartość średnia \bar{x} [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Wsp. zmienności v [-]		Wartość średnia \bar{x} [MPa]
SP_160	$E_{z0,T}^c$	4,27	0,26	0,06	E_{z0}^c	4,17
	$E_{z0,C}^c$	4,07	0,34	0,08		
	$E_{z,T}^c$	4,15	0,14	0,03	E_z^c	4,14
	$E_{z,C}^c$	4,12	0,17	0,04		
	$E_{x,T}^c$	19,03	0,42	0,02	E_x^c	17,60
	$E_{x,C}^c$	16,16	0,40	0,03		
	$E_{y,T}^c$	5,73	0,23	0,04	E_y^c	5,65
	$E_{y,C}^c$	5,57	0,08	0,01		
	$E_{x45,T}^c$	6,26	0,16	0,03	E_{x45}^c	5,93
	$E_{x45,C}^c$	5,60	0,08	0,01		

Na podstawie średnich wartości modułów sprężystości podłużnej po kierunku osi z próbek z odciętą okładziną E_z^c i bez odciętej okładziny E_{z0}^c , można stwierdzić, że wpływ okładziny na wyznaczoną wartość modułu sprężystości jest znikomy. Różnice w wynikach nie przekraczają 4% zarówno dla próbek pochodzących z płyt CH120, jak i CH160. Warte podkreślenia jest także podobieństwo wartości modułów sprężystości wyznaczanych w tych samych kierunkach dla próbek pochodzących z płyt o różnej wysokości. Pomiedzy wynikami modułów sprężystości wyznaczanych po kierunkach x , y oraz z różnice nie przekraczają odpowiednio 2%, 5% oraz 5%.

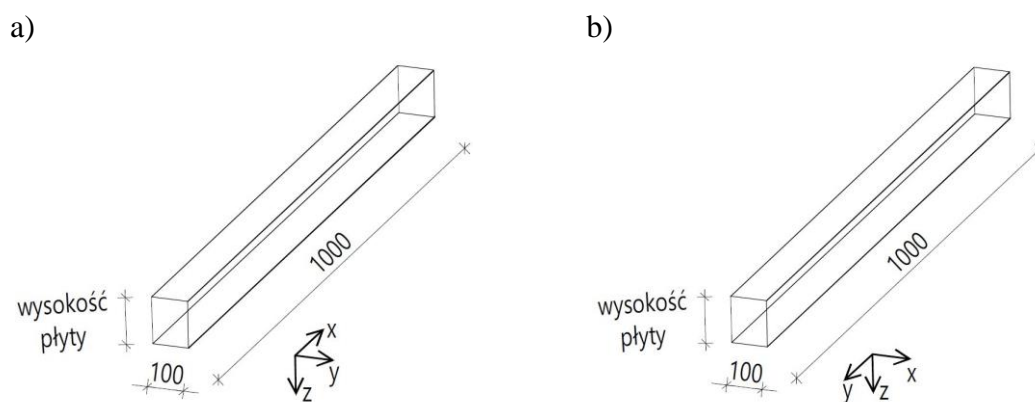
Na podstawie zważonych próbek przeznaczonych do badania ściskania, po odcięciu od nich okładzin wyznaczono gęstość rdzenia paneli warstwowych płyt SP120 oraz SP160. Średnie wartości wyników zestawiono w tab. 3.7. Szczegółowe dane dotyczące każdej zważonej próbki zestawiono w Załączniku B, w tab. B.4.

Tabela 3.7. Gęstość rdzenia paneli warstwowych.

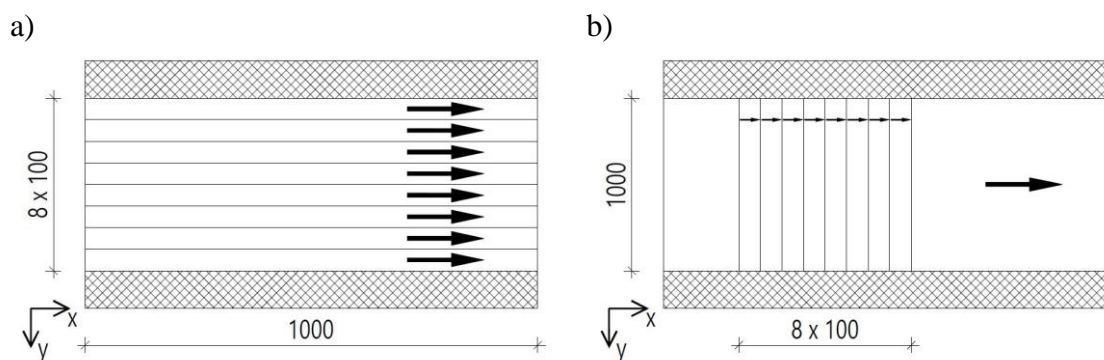
	Wartość średnia \bar{x} [kg/m ³]	Odchylenie standardowe s [kg/m ³]	Wsp. zmienności v [-]
SP_120	37,08	0,19	0,005
SP_160	38,48	0,21	0,005

3.1.3 Moduł ścinania rdzenia

Badanie modułu ścinania rdzenia zostało wykonane na próbkach dostarczonych przez producenta płyt warstwowych. Po zakończonym procesie produkcji, płyty zostały pocięte na próbki do badań za pomocą specjalistycznej piły tarczowej. Gabaryty próbek miały kształt beleczek warstwowych o płaskich okładzinach. Belecзки do badania modułu ścinania rdzenia zostały wycięte wzdłuż (rys. 3.25a) i w poprzek (rys. 3.25b) kierunku podłużnego płyt warstwowych. Przygotowano próbki zarówno z płyt CH120, jak i płyt CH160. Rozmieszczenie próbek względem pełnej szerokości płyty warstwowej pokazano na rys. 3.26.



Rysunek 3.25. Belecзка warstwowa do badania modułu ścinania rdzenia: a) w kierunku podłużnym płyty, b) w kierunku poprzecznym płyty, (oś x zgodna z kierunkiem produkcji płyt warstwowych).

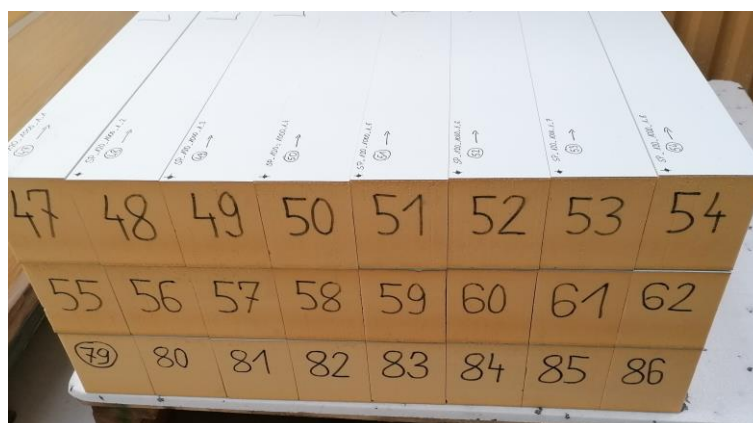


Rysunek 3.26. Ułożenie próbek względem płyty warstwowej: a) w kierunku podłużnym płyty, b) w kierunku poprzecznym płyty, (strzałką oznaczono kierunek produkcji płyt warstwowych).

W kierunku podłużnym wycięto osiem beleczek (rys. 3.26a) równomiernie rozłożonych po pełnej szerokości płyty warstwowej. Łącznie do badania modułu ścinania w kierunku podłużnym G_{xz}^c przygotowano 16 próbek (dwa rzędy próbek po osiem beleczek w rzędzie) z każdej płyty warstwowej (razem 32 próbki). W pierwszej kolejności z płyt warstwowych zostały odcięte boczne zamki podłużne, aby

przeznaczone do badań beleczki były wolne od zaburzeń geometrycznych. W kierunku poprzecznym, z każdej płyty warstwowej wycięto osiem beleczek (rys. 3.26b). Łącznie do badania modułu ścinania w kierunku poprzecznym G_{yz}^c przygotowano 16 próbek. Beleczki wycięto z wewnętrznej części płyty.

Zgodnie z ustaleniami z producentem płyt warstwowych, każda dostarczona beleczka została jednoznacznie opisana. Opis naniesiony był zawsze na zewnętrzną powierzchnię beleczki, tożsamą z zewnętrzną powierzchnią płyty warstwowej, z której była wycinana. Na każdej beleczce oznaczony strzałką był także kierunek produkcji płyt warstwowych. Dodatkowo zadbano, aby numeracja próbki odzwierciedlała położenie beleczki względem szerokości płyty, z której została wycięta. Numerację beleczek rozpoczynano od lewej strony, będąc skierowanym zgodnie z kierunkiem produkcji płyt. Przykładowo opis beleczek wycinanych w kierunku podłużnym, z płyty CH120 pokazano na rys. 3.27.



Rysunek 3.27. Przykładowy opis beleczek warstwowych.

Próbki do badań modułu ścinania oznaczono zgodnie z poniżej przedstawionym nazewnictwem (nazwa próbki – pochodzenie próbki, kierunek wycinania próbki):

- SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_1_8 – płyta CH120, kierunek podłużny,
- SP_120_1000_2_1 / SP_120_1000_2_8 – płyta CH120, kierunek podłużny,
- SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_1_8 – płyta CH160, kierunek podłużny,
- SP_160_1000_2_1 / SP_160_1000_2_8 – płyta CH160, kierunek podłużny,
- SP_120_100_1_1 / SP_120_100_8_1 – płyta CH120, kierunek poprzeczny,
- SP_160_100_1_1 / SP_160_100_8_1 – płyta CH160, kierunek poprzeczny.

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych, każda z 48 próbek została dokładnie pomierzona. Pomiaru długości próbki dokonano za pomocą miary taśmowej. Do pomiaru pozostałych wymiarów wykorzystano suwmiarkę elektroniczną, za pomocą której mierzono:

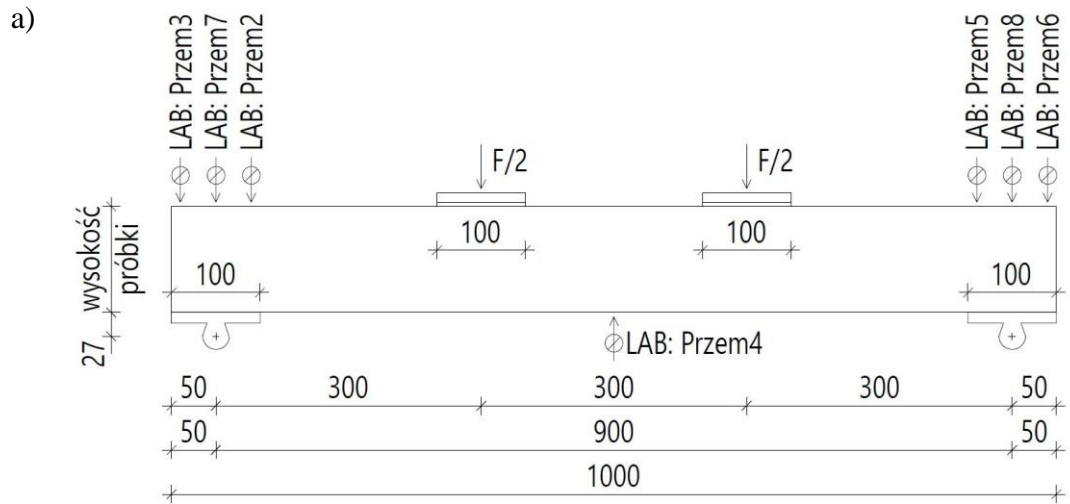
- szerokość próbki na powierzchni wewnętrznej, w trzech punktach po długości beleczki,
- szerokość próbki na powierzchni zewnętrznej, w trzech punktach po długości beleczki,
- wysokość próbki, w trzech punktach po długości beleczki.

Obliczenia wartości średnich szerokości i wysokości próbki, wykonano zgodnie z poniższym opisem:

- w przypadku szerokości, była to średnia arytmetyczna z sześciu pomiarów dokonanych łącznie na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej próbki,
- w przypadku wysokości (z uwagi na wybrzuszenie próbki w środku jej rozpiętości), była to średnia arytmetyczna z pomiaru wysokości w środku rozpiętości próbki oraz średniej arytmetycznej z pomiarów wysokości próbki na jej końcach.

Szczegółowe dane dotyczące wymiarów wszystkich próbek zestawiono w Załączniku A, w tab. A.8-A.9.

W literaturze opisanych jest wiele sposobów na laboratoryjne określenie modułu ścinania rdzenia paneli warstwowych [18, 19]. W niniejszej rozprawie zastosowano podejście zgodne z załącznikiem A.3 normy [N-5]. Beleczki warstwowe były poddawane próbie czteropunktowego zginania, podczas której w sposób ciągły była rejestrowana siła obciążająca stanowisko badawcze oraz przemieszczenia konkretnych punktów na długości zginanej beleczki. Lokalizacja czujników przemieszczeń została opisana w dalszej części rozdziału. Do pomiaru siły wykorzystano siłomierz 1-C2/50KN klasy 0,1 w zakresie sił do 50,0 kN. Przemieszczenia mierzono za pomocą czujników indukcyjnych 1-WA/50MM-T oraz 1-WA/100MM-T o zakresie znamionowym odpowiednio 50 mm i 100 mm. Dane gromadzone były za pomocą systemu akwizycji danych MGCplus. Przyjęta do badania modułu ścinania geometria beleczek została tak dobrana, aby w trakcie badania doszło do schematu zniszczenia próbki związanego ze ścięciem rdzenia. Na rys. 3.28a przedstawiono schematycznie stanowisko badawcze wraz ze wskazaniem położenia czujników przemieszczeń oraz ich nazewnictwem. Rysunek 3.28b przedstawia rzeczywistą budowę stanowiska do badania modułu ścinania rdzenia.



Rysunek 3.28. Stanowisko badawcze do badania modułu ścinania rdzenia płyt warstwowych:

a) schemat stanowiska, b) rzeczywista budowa stanowiska.

Doprecyzowując powyższy opis oraz rys. 3.28 należy dodać, że:

- czujniki o nazwach *Przem7* oraz *Przem8* mierzyły przemieszczenia punktów zlokalizowanych na górnej okładzinie względem podpory obrotowej (czujniki zamocowane były do obrotowej podpory, w trakcie badania obracały się wraz z podporą), znajdujących się w odległościach 50 mm od końców próbki,

Badania laboratoryjne

- czujniki o nazwach *Przem3* oraz *Przem6* mierzyły przemieszczenia punktów zlokalizowanych na górnej okładzinie (czujniki zamocowane były na zewnętrznych, niezwiązanych ze stanowiskiem badawczym punktach stałych), znajdujących się w odległościach 10 mm od końców próbki,
- czujniki o nazwach *Przem2* oraz *Przem5* mierzyły przemieszczenia punktów zlokalizowanych na górnej okładzinie (czujniki zamocowane były na zewnętrznych, niezwiązanych ze stanowiskiem badawczym punktach stałych), znajdujących się w odległościach 90 mm od końców próbki,
- czujnik o nazwie *Przem4* mierzył przemieszczenia punktu zlokalizowanego na dolnej okładzinie (czujnik zamocowany był na zewnętrznym, niezwiązanym ze stanowiskiem badawczym punktem stałym), znajdującego się w środku rozpiętości próbki.

W trakcie prowadzonych badań laboratoryjnych przykładano bardzo dużą wagę do odpowiedniego umieszczania badanych próbek w stanowisku. Badania rozpoczęto od próbek SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_1_8, które ustawiono w stanowisku zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29a, nazwanym ustawieniem oryginalnym I. Z uwagi na fakt, że wszystkie badane próbki uległy ścięciu od strony zgodnej z kierunkiem produkcji płyt warstwowych, poddano to zjawisko pod dodatkowe rozważanie. Zastanawiano się czy kierunek produkcji płyt warstwowych ma wpływ na schemat zniszczenia badanej próbki? Z tego względu kolejne osiem próbek: SP_120_1000_2_1 / SP_120_1000_2_8 ustawiono w stanowisku zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29b, nazwanym ustawieniem obróconym (lewo/prawo). Podobnie, wszystkie próbki uległy ścięciu od strony zgodnej z kierunkiem produkcji płyt warstwowych. Lokalizacja płaszczyzny ścinania próbek względem kierunku produkcji została schematycznie pokazana linią przerywaną na rys. 3.29a oraz 3.29b. W taki sam sposób przebadano belecзки warstwowe wycinane w kierunku podłużnym do produkcji płyt warstwowych z płyt CH160. Belecзки SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_1_8 ustawiano w stanowisku badawczym zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29a, natomiast belecзки SP_160_1000_2_1 / SP_160_1000_2_8 ustawiono w stanowisku badawczym zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29b. W przypadku badania beleczek wyciętych z płyt CH160 uzyskano ten sam efekt – próbki uległy ścięciu od strony zgodnej z kierunkiem produkcji płyt warstwowych. Z uwagi na fakt uzyskania pełnej zgodności zaobserwowanego zjawiska na próbie 32 beleczek, uznano tę zależność za wiarygodną.

Dowiedziano w ten sposób, że stanowisko badawcze działa symetrycznie (nie zaburza wyników jeśli chodzi o propagację schematu zniszczenia) oraz, że kierunek produkcji płyt warstwowych ma znaczenie na lokalizację zniszczenia próbek. Do ścięcia rdzenia dochodziło zawsze od strony zgodnej z kierunkiem produkcji płyt warstwowych. Badając beleczki wycinane w kierunku poprzecznym do produkcji płyt warstwowych zdecydowano sprawdzić, jaki wpływ na schemat zniszczenia beleczek warstwowych ma obciążanie odpowiednio zewnętrznej lub wewnętrznej okładziny (zmiana ustawienia próbki w stanowisku w układzie góra/dół).

Połowę beleczek SP_120_100_1_1 / SP_120_100_8_1 oraz połowę SP_160_100_1_1 / SP_160_100_8_1 ustawiono w stanowisku zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29c, nazwanym ustawieniem oryginalnym II. Drugą połowę beleczek ustawiono w stanowisku zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.29d, nazwanym ustawieniem obróconym (góra/dół). Podobnie zaobserwowano bardzo wyraźną zgodność uzyskiwanych schematów zniszczenia beleczek, w zależności od odpowiedniego umieszczenia próbki w stanowisku. Próbki badane w schemacie oryginalnym II uległy zniszczeniu na skutek odspojenia się obciążanej (w tym przypadku zewnętrznej) okładziny beleczki. W przypadku próbek badanych w schemacie odwróconym (góra/dół), dochodziło do wgniecia stalowych blaszek obciążających beleczkę w rdzeń okładziny, bez wyraźnego zniszczenia próbki. Z analiz tych jasno wynika, że sposób umieszczenia beleczek warstwowych w stanowisku badawczym podczas próby czteropunktowego zginania, na bazie którego określa się moduł ścinania rdzenia, ma bardzo duże znaczenie na formę zniszczenia badanych próbek. W tej części rozdziału analizie poddano jakościową formę zniszczenia próbek uwzględniając sposób umieszczenia próbki w stanowisku badawczym. W dalszej jego części analizę tę przeprowadzono w zakresie ilościowym, pokazując w jaki sposób umieszczenie próbki w stanowisku wpływa na wartości obliczanych w badaniu modułów ścinania rdzenia.



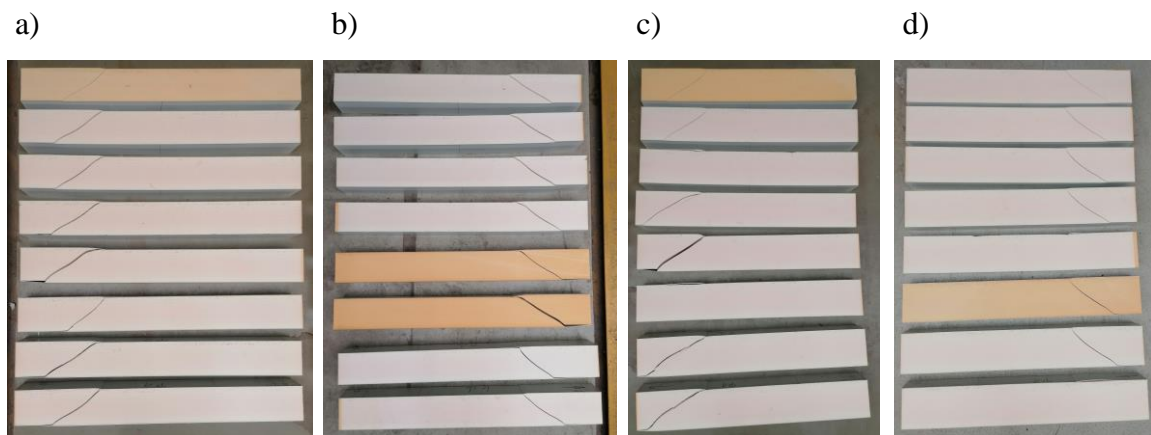


Rysunek 3.29. Ustawienie próbki w stanowisku przy badaniu modułu ścinania :

- a) G_{xz}^c – ustawienie oryginalne I, b) G_{xz}^c – ustawienie obrócone (lewo/prawo),
 c) G_{yz}^c – ustawienie oryginalne II, d) G_{yz}^c – ustawienie obrócone (górze/dół).

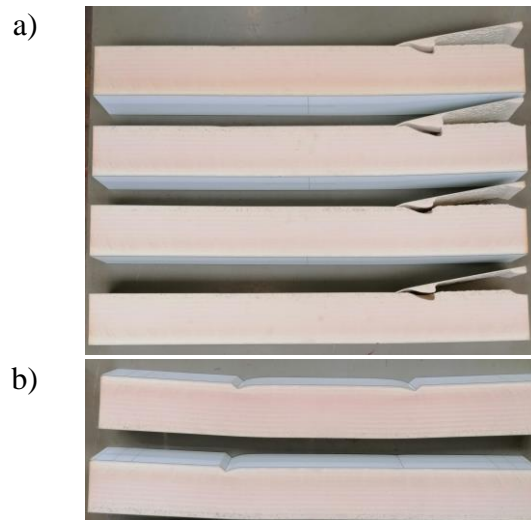
Podsumowując, w trakcie prowadzonych badań laboratoryjnych zaobserwowano trzy formy zniszczenia beleczek warstwowych – osiągnięcie końca badania:

- ścięcie rdzenia beleczki – rys. 3.30,
- odspojenie obciążanej okładziny od rdzenia – rys. 3.31a,
- wgniecenie stalowych blaszek obciążających w rdzeń okładziny, bez wyraźnego zniszczenia próbki – rys. 3.31b.



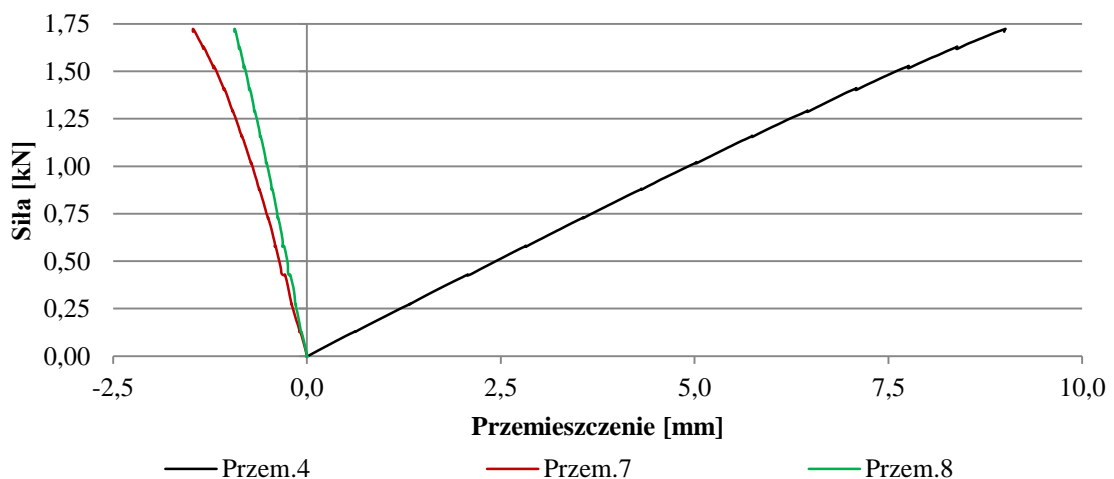
Rysunek 3.30. Postać zniszczenia beleczek warstwowych wycinanych wzdłuż kierunku podłużnego płyt:

- a) beleczki CH120, ustawienie oryginalne I, b) beleczki CH120, ustawienie obrócone (lewo/prawo),
 c) beleczki CH160, ustawienie oryginalne I, d) beleczki CH160, ustawienie obrócone (lewo/prawo).



Rysunek 3.31. Postać zniszczenia beleczek warstwowych wycinanych w poprzek kierunku podłużnego płyty: a) beleczki CH120, ustawienie oryginalne II, b) beleczki CH120, ustawienie obrócone (górną/dół).

Moduł ścinania rdzenia G^c obliczano bazując na liniowej części wykresu przedstawiającego relację siła - przemieszczenie, wykonywanego dla każdej badanej próbki. Przykładowy wykres dla próbki SP_120_1000_1_1 przedstawiono poniżej na rys. 3.32. Linia czarną oznaczono przyrastające ugięcie obciążanej belki, w środku jej rozpiętości, mierzone na dolnej okładzinie. Liniami czerwoną i zieloną oznaczono wgniecenie próbki na podporach, mierzone na górnej okładzinie, w odległości 50 mm od końców próbki. W wielu pracach [16, 60] jednoznacznie wskazano, że wpływ wgniecenia obciążanej beleczki na podporach, na całkowitą wartość ugięcia jest znaczny i nie może zostać pominięty przy analitycznych obliczeniach modułu ścinania rdzenia beleczki warstwowej. Poniżej wpływ ten został przedstawiony liczbowo na przykładzie próbki SP_120_1000_1_1.



Rysunek 3.32. Zapis relacji siła - przemieszczenie próbki SP_120_1000_1_1.

Wyznaczenie modułu ścinania rdzenia według normy [N-5] polega na laboratoryjnym pomiarze ugięcia obciążanej belki, w środku jej rozpiętości. Następnie, od mierzonego ugięcia należy odjąć analitycznie obliczone ugięcie wywołane efektem zginania belki. Zakładając, że pozostała część ugięcia wywołana jest efektem ścinania, możliwe jest wyznaczenie nieznanego modułu ścinania. Zgodnie z tym założeniem, całkowite ugięcie próbki jest sumą ugięcia pochodzącego od efektu zginania i ścinania, co zapisać można za pomocą poniższej zależności:

$$\Delta w = \Delta w_M + \Delta w_V, \quad (3.10)$$

gdzie:

- Δw oznaczono całkowity przyrost ugięcia wywołany przyrostem obciążenia ΔF ,
- Δw_M oznaczono przyrost ugięcia pochodzący od efektu zginania belki wywołany przyrostem obciążenia ΔF ,
- Δw_V oznaczono przyrost ugięcia pochodzący od efektu ścinania belki wywołany przyrostem obciążenia ΔF .

Stosując się do zaleceń [16, 60], należy dodatkowo uwzględnić, że na mierzone wartości ugięcia w środku rozpiętości belki, wpływ ma także wgniecenie belki na obu podporach. Średnią wartość wgniecenia beleczki na podporach można zapisać jak niżej:

$$\Delta w_R = \frac{\Delta w_{R,l} + \Delta w_{R,p}}{2}, \quad (3.11)$$

gdzie:

- Δw_R oznaczono średnią wartość wgniecenia beleczki na podporach,
- $\Delta w_{R,l}$, $\Delta w_{R,p}$ oznaczono wartości wgniecenia beleczki na podporze odpowiednio lewej i prawej.

Uwzględniając powyższe, równanie (3.10) należy zmodyfikować do poniższej formy:

$$\Delta w = \Delta w_M + \Delta w_V + \Delta w_R, \quad (3.12)$$

W przypadku czteropunktowego zginania, ugięcie wywołane efektem zginania oblicza się za pomocą poniższej zależności:

$$\Delta w_M = \frac{\Delta F \cdot L^3}{56,34 \cdot B_s}, \quad (3.13)$$

gdzie:

- ΔF oznaczono przyrost obciążenia działającego na badaną próbkę,
- L oznaczono rozpiętość badanej próbki w osiach podpór,
- B_s oznaczono sztywność giętą badanej próbki.

Jedyną nieznaną zmienną w równaniu (3.4) jest sztywność giętą belki warstwowej, którą oblicza się jak niżej:

$$B_s = \frac{E_{t,fg}^f \cdot A_g^f \cdot E_{t,fd}^f \cdot A_d^f}{E_{t,fg}^f \cdot A_g^f + E_{t,fd}^f \cdot A_d^f} \cdot e^2, \quad (3.14)$$

gdzie:

- $E_{t,fg}^f$, $E_{t,fd}^f$ oznacza moduł sprężystości podłużnej odpowiednio górnej i dolnej okładziny z uwzględnieniem wszystkich jej warstw (stal / cynk / powłoki organiczne),
- A_g^f , A_d^f oznacza pole przekroju odpowiednio górnej i dolnej okładziny z uwzględnieniem wszystkich jej warstw (stal / cynk / powłoki organiczne),
- e oznacza wymiar pomiędzy środkami ciężkości okładzin badanej beleczki warstwowej.

Wymiar pomiędzy środkami ciężkości okładzin można zapisać za pomocą:

$$e = H - \frac{t_g^f + t_d^f}{2}, \quad (3.15)$$

gdzie:

- H oznacza całkowitą wysokość próbki (rdzenia wraz z okładzinami),
- t_g^f , t_d^f oznacza grubość odpowiednio górnej i dolnej okładziny beleczki warstwowej z uwzględnieniem wszystkich jej warstw (stal / cynk / powłoki organiczne).

Po wyliczeniu wszystkich przedstawionych wyżej zmiennych, wartość modułu ścinania rdzenia można obliczyć za pomocą poniższego równania:

$$G^c = \frac{\Delta F \cdot L}{6 \cdot B \cdot H^c \cdot \Delta w_V}, \quad (3.16)$$

gdzie:

- B oznacza szerokość badanej próbki,
- H^c oznacza wysokość rdzenia badanej próbki.

Wysokość rdzenia badanej próbki można zapisać za pomocą:

$$H^c = H - (t_g^f + t_d^f). \quad (3.17)$$

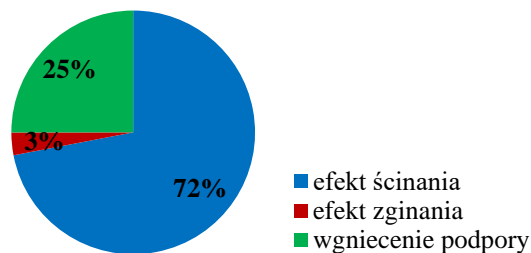
Wartość wyznaczonego tym tokiem postępowania modułu ścinania rdzenia dla próbki SP_120_1000_1_1 równa jest 2,93 MPa. Należy w tym miejscu zauważyć, jak istotny wpływ na obliczony wynik ma wgniecenia próbki na podporze. Gdyby równanie (3.12) przybrało postać:

$$\Delta w = \Delta w_V, \quad (3.18)$$

co oznaczałoby założenie, że całkowite ugięcie jest efektem ścinania beleczki, wartość modułu ścinania rdzenia z analizowanego przykładu byłaby równa 2,11 MPa. Dodając do równania (3.18) ugięcie wywołane efektem zginania – zakładając że całkowite ugięcie belki ma postać:

$$\Delta w = \Delta w_M + \Delta w_V, \quad (3.19)$$

moduł ścinania osiągnąłby wartość 2,17 MPa (wzrost o niecałe 3 %). Uwzględnienie dodatkowego wgniecenia na podporze powoduje wzrost modułu ścinania do wartości 2,93 MPa (wzrost o 35 %). Wyżej przytoczone wartości liczbowe pokazują, że efekt wgniecenia na podporze nie może być ignorowany. Na rys. 3.33 pokazano procentowy udział poszczególnych składników ugięcia na wartość ugięcia całkowitego próbki.



Rysunek 3.33. Procentowy udział składników ugięcia na wartość ugięcia całkowitego próbki SP_120_1000_1_1.

Jako podsumowanie, poniżej, w tab. 3.8 oraz tab. 3.9, zestawiono średnie wartości modułów ścinania rdzenia dla analizowanych próbek. Dodatkowo, wyniki dla każdej grupy próbek zostały przedstawione na wykresach na rys. 3.34-3.37. Szczegółowe dane, które przedstawiono na wykresach, w formie tabelarycznej zestawiono w Załączniku B, w tab. B.5-B.6.

Tabela 3.8. Zestawienie modułów ścinania rdzenia G_{xz}^c .

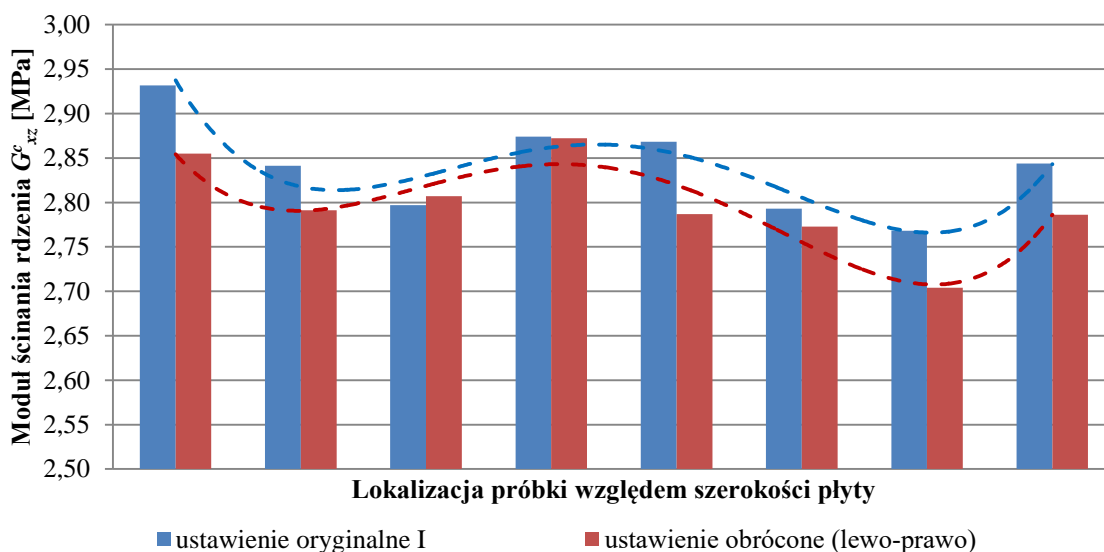
	G_{xz}^c		
	Wartość średnia \bar{x} [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Wsp. zmienności v [-]
SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_2_8	2,82	0,055	0,020
SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_2_8	2,81	0,065	0,023

Tabela 3.9. Zestawienie modułów ścinania rdzenia G_{yz}^c .

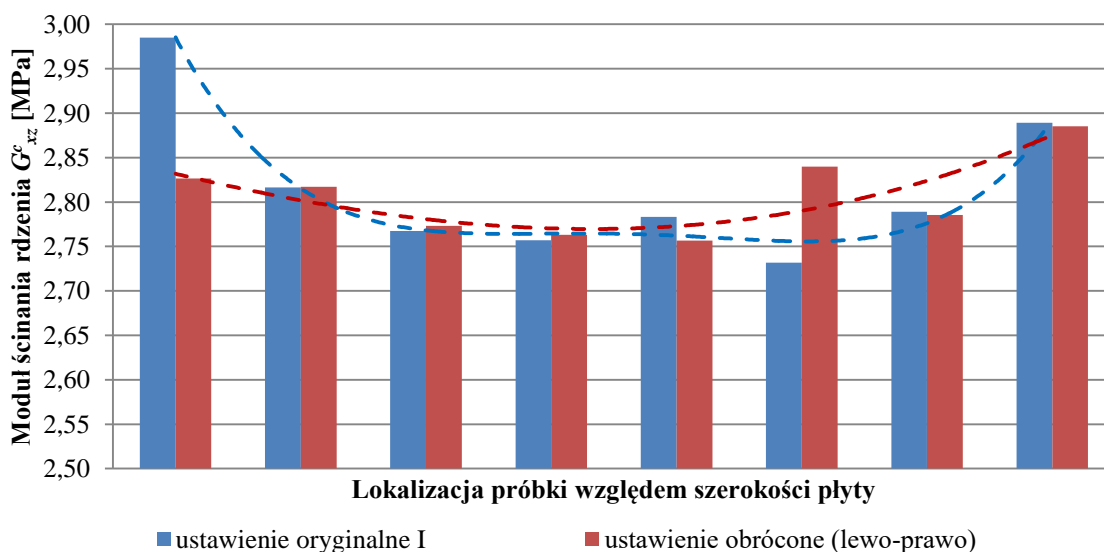
	G_{yz}^c		
	Wartość średnia \bar{x} [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Wsp. zmienności v [-]
SP_120_100_1_1 / SP_120_100_4_1	1,81	0,047	0,026
SP_160_100_1_1 / SP_160_100_4_1	1,77	0,016	0,009

Wykresy przedstawione na rys. 3.34 i rys. 3.35 przedstawiają wartości modułu ścinania rdzenia G_{xz}^c z 8 badanych próbek rozmieszczonych po szerokości płyty odpowiednio dla płyty CH120 oraz płyty CH160. Kolorem niebieskim oznaczono próbki, które umieszczane były w stanowisku w układzie oryginalnym I, kolorem czerwonym próbki,

które zostały obrócone. Liniami przerywanymi naniesiono na wykresy linie trendu obrazujące zachowanie serii danych przedstawione za pomocą wielomianu czwartego stopnia. Wartością argumentu wielomianu opisującego linie trendu na wykresach jest przyrastający numer próbki (od 1 do 8), zgodny z ułożeniem próbek po szerokości płyty warstwowej. Analizując dane z wykresów, można zauważyć wzrost wartości modułów ścinania dla próbek wycinanych ze skrajnych obszarów płyt warstwowych. Jednocześnie dla płyty CH120 widać dodatkowo zwiększenie wartości badanych modułów w środku szerokości płyty.



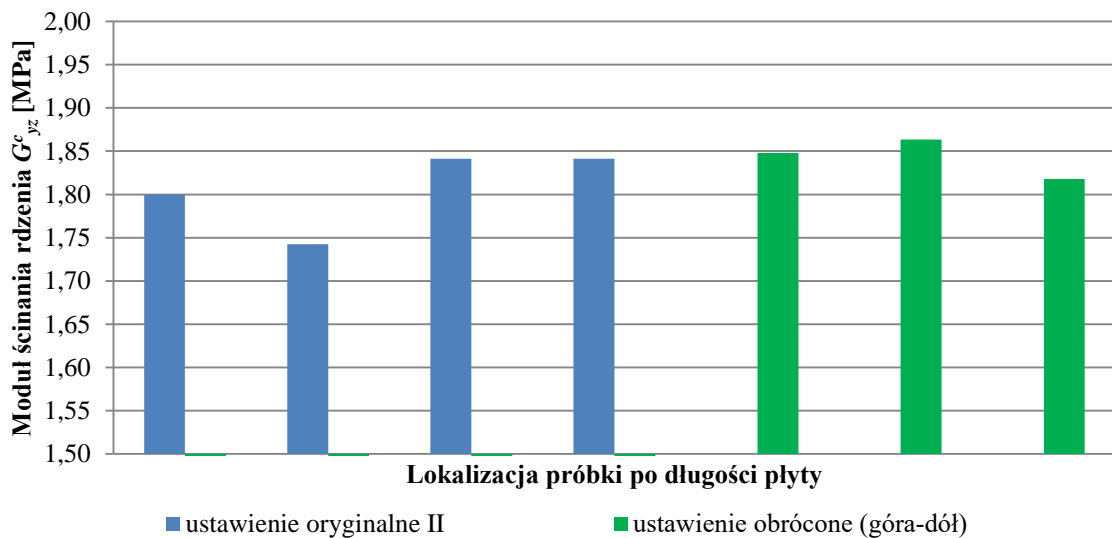
Rysunek 3.34. Moduł ścinania rdzenia G^c_{xz} próbek: SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_2_8.



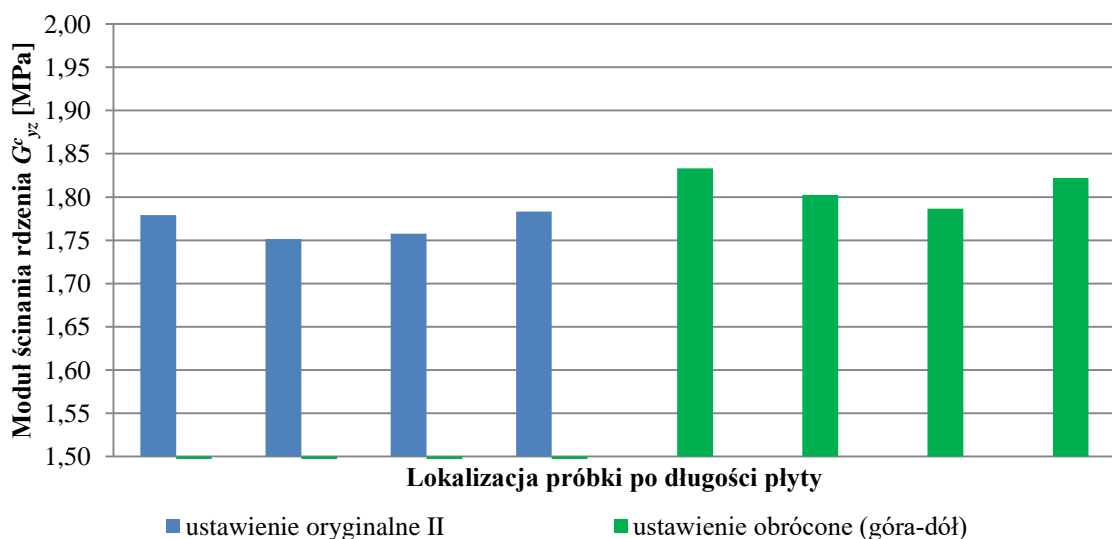
Rysunek 3.35. Moduł ścinania rdzenia G^c_{xz} próbek: SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_2_8.

Należy także zaznaczyć, że ułożenie próbki w stanowisku badawczym w sposób oryginalny I oraz obrócony (lewo/prawo) nie wpływa wyraźnie na otrzymywane wartości modułu ścinania rdzenia G_{xz}^c .

Wykresy przedstawione na rys. 3.36 i rys. 3.37 przedstawiają wartości modułu ścinania rdzenia G_{yz}^c z badanych próbek odpowiednio dla płyty CH120 oraz płyty CH160. Kolorem niebieskim oznaczono próbki, które umieszczane były w stanowisku w układzie oryginalnym II, kolorem zielonym próbki, które zostały obrócone. Analizując dane z wykresów można zaobserwować stabilność wyników wartości modułów ścinania rdzenia G_{yz}^c , o czym dodatkowo świadczyć mogą niskie wartości obliczonego odchylenia standardowego całych prób.



Rysunek 3.36 Moduł ścinania rdzenia G_{yz}^c próbek: SP_120_100_1_1 / SP_120_100_7_1.



Rysunek 3.37 Moduł ścinania rdzenia G_{yz}^c próbek: SP_160_100_1_1 / SP_160_100_8_1.

Podkreślić warto fakt, że ułożenie próbki w stanowisku badawczym w sposób oryginalny II oraz obrocony (górze/dół) nie wpływa wyraźnie na otrzymywane wartości modułu ścinania rdzenia.

Dodatkowo, w trakcie prowadzonych prac, dla części próbek określano wartość wytrzymałości rdzenia na ścinanie, zgodnie z poniższym równaniem:

$$f_v^c = k_v \cdot \frac{F_u}{2 \cdot B \cdot e}, \quad (3.20)$$

gdzie:

- F_u oznaczono siłę niszczącą, tożsamą z osiągnięciem przez próbkę zniszczenia w postaci ścicia rdzenia,
- k_v oznaczono współczynnik redukcyjny zależny od materiału rdzenia (dla pianki poliuretanowej równy 1,0).

Przy określaniu wartości siły niszczącej F_u do wartości siły zapisywanej z trwającej próby, przy której próbki ulegały zniszczeniu, dodawano połowę ciężaru własnego próbki oraz połowę masy przyrządu generującego obciążenie. Masę próbki wyznaczano indywidualnie dla każdej próbki na podstawie jej gabarytów oraz gęstości materiałów składowych. Gęstość rdzenia przyjmowano zgodnie z danymi z rozdziału 3.1.2. Gęstość okładzin przyjmowano równą 7285 kg/m^3 (uwzględnienie warstwowej budowy okładziny – podana wartość gęstości jest wypadkową gęstością okładziny). Na sumaryczną masę przyrządu badawczego równą $19\,376,6$ gramów składa się:

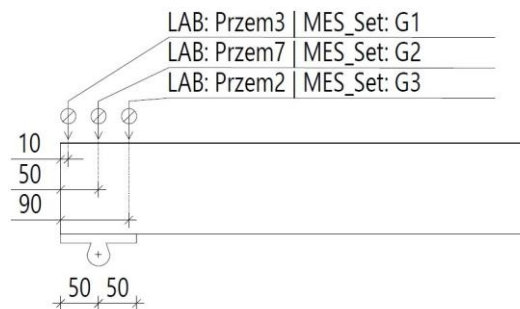
- siłownik o masie równej $9258,4$ g,
- trawers o masie równej $7322,2$ g,
- blachy, gumy dociskowe oraz talerz siłownika o łącznej masie $2796,0$ g.

Poniżej, w tab. 3.10, zestawiono średnie wytrzymałości rdzenia na ścinanie dla próbek wyciętych w kierunku podłużnym do kierunku produkcji płyt warstwowych. W badaniach beleczek wyciętych w kierunku poprzecznym do kierunku produkcji płyt warstwowych nie osiągnięto postaci zniszczenia w formie ścicia rdzenia. Szczegółowe wyniki dla każdej indywidualnej próbki przedstawiono w Załączniku B, w tab. B.7.

Tabela 3.10. Zestawienie wytrzymałości rdzenia na ścianie $f_{v,xz}^c$.

	$f_{v,xz}^c$		
	Wartość średnia \bar{x} [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Wsp. zmienności v [-]
SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_2_8	87,68	2,659	0,030
SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_2_8	74,78	2,071	0,028

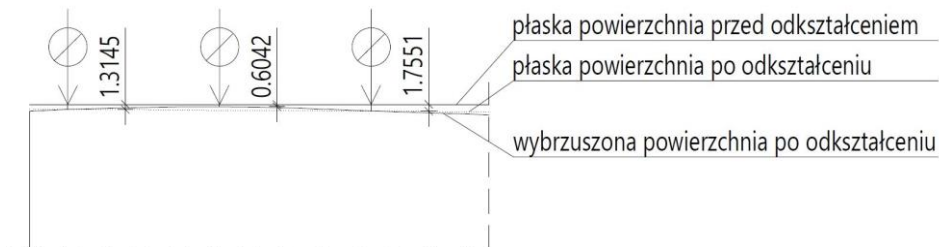
W trakcie prowadzonych badań laboratoryjnych, poza zapisem przemieszczeń w środku rozpiętości beleczki oraz przemieszczeń w osiach podpór (odzwierciedlających wgniecenie rdzenia na podporze), dokonywano także zapisu przemieszczeń na krawędziach podpór (rys. 3.28a oraz opis pod rysunkiem). Dodatkowo rozmieszczenie czujników przemieszczeń na lewej podporze beleczki warstwowej pokazano szczegółowo poniżej na rys. 3.38.



Rysunek 3.38. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na podporze.

Z uwagi na fakt zamontowania czujnika *Przem7* na podporze obrotowej i obrót czujnika wraz z obrotem podpory w trakcie trwania badania, wartość przemieszczenia odczytywana z tego czujnika jest interpretowana bezpośrednio jako wartość wgniecenia rdzenia na podporze. Na wartości przemieszczeń odczytywanych z czujników *Przem3* oraz *Przem2* składa się efekt wgniecenia rdzenia beleczki na podporze oraz obrót podpory. Przy założeniu zachowania płaskości powierzchni górnej okładziny beleczki warstwowej, obliczając średnią arytmetyczną wartość przemieszczenia z czujników *Przem3* i *Przem2* spodziewano się otrzymać pośrednio wgniecenie na podporze zbliżone do tego odczytywanego bezpośrednio z czujnika *Przem7*. Uzyskano jednak duże rozbieżności wartości wgniecenia rdzenia na podporze pomiędzy obiema

metodami obliczeń. Z tego powodu wykonano graficzną interpretację zachowania się beleczki warstwowej na podporze, co zostało przedstawione na rys. 3.39.

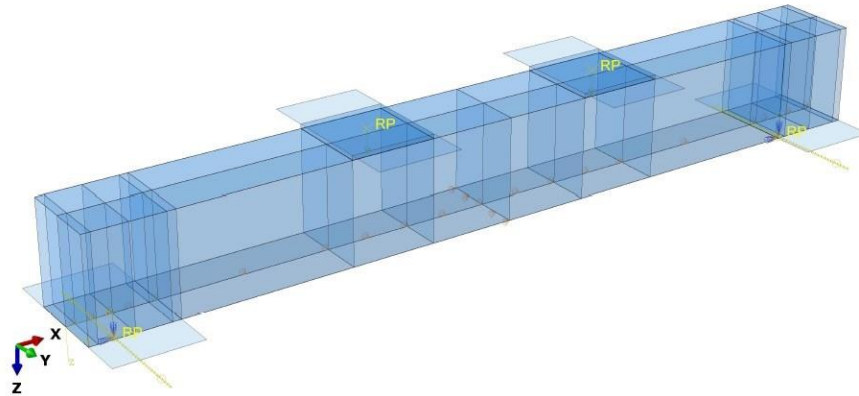


Rysunek 3.39. Odkształcenie powierzchni górnej beleczki na podporze.

Powyższa graficzna interpretacja przedstawia wartości przemieszczeń odczytanych z czujników przy sile obciążającej stanowisko równej 1,0 kN. Na rysunku widać, że górna powierzchnia beleczki warstwowej (górna okładzina) nie pozostaje płaska i ulega wybrzuszeniu. Z uwagi na fakt, że wybrzuszenie ma charakter nieliniowy, a w badaniach laboratoryjnych nie stosowano dodatkowych technik pomiarowych, które pomogłyby doprecyzować zaobserwowane zjawisko, do dalszych prac, przy określaniu modułu ścinania rdzenia przyjmowano wartości wgniecenia na podporze odczytywane bezpośrednio z czujnika z osi podpory. Podobnie zostało to wykonywane wcześniej przez innych badaczy [16, 18].

W celu weryfikacji poprawności przeprowadzonego procesu laboratoryjnego określania modułu ścinania rdzenia, dla części badanych próbek przygotowano modele numeryczne, odzwierciedlające przebieg badania. Poniżej przedstawiono przykładową weryfikację próbki SP_120_1000_1_1 bazującą na analizie wartości przemieszczeń konkretnych punktów, umieszczonych na beleczce warstwowej. Model numeryczny, w zakresie budowy elementu warstwowego, został przygotowany w pełnej zgodności z opisem zawartym w rozdziale 4, gdzie opisano szczegółowo budowę modeli stosowanych do odzwierciedlenia pracy skręcanych paneli warstwowych. Poniżej przedstawiono parametry modeli numerycznych kluczowe dla analizy zginanych czteropunktowo beleczek warstwowych:

- warunki brzegowe (rys. 3.40):
 - pomiędzy dolną okładziną, a przegubowymi, sztywnymi podporami zastosowano kontakt, ze współczynnikiem tarcia μ równym 0,30,
 - wzdłuż podłużnej krawędzi środkowej, dolnej okładziny zablokowano możliwość przemieszczenia poziomego w kierunku osi y ,
 - wzdłuż poprzecznej krawędzi środkowej, dolnej okładziny zablokowano możliwość przemieszczenia poziomego w kierunku osi x ,



Rysunek 3.40. Warunki brzegowe podparcia modelu zginanej beleczki warstwowej.

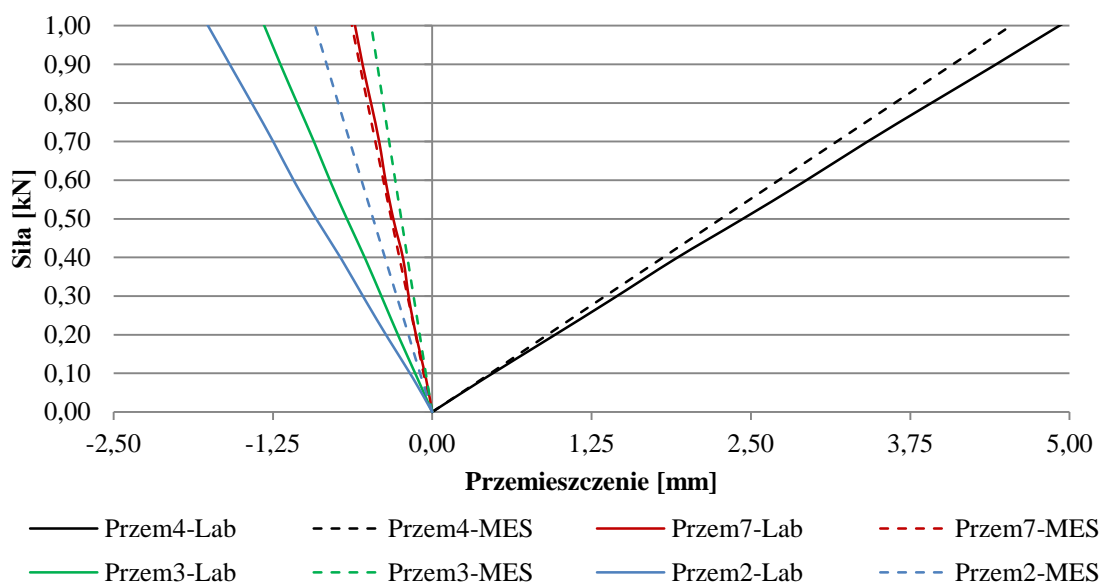
- rozmiar elementów skończonych:
 - rozmiar elementów skończonych rdzenia oraz okładzin przyjęto równy 10 mm,
- model materiałów beleczki warstwowej:
 - okładziny beleczki warstwowej zamodelowane jako materiał jednorodny o efektywnym module sprężystości $E_{t,f}^f$ równym 195,05 GPa (tab. 3.2) oraz współczynnika Poissona równym 0,30,
 - rdzeń beleczki warstwowej zamodelowany jako materiał jednorodny definiowany za pomocą stałych inżynierskich zgodnie z równaniem (3.21):

$$\begin{aligned}
 E_x^c &= 16,84 \text{ MPa}, & v_{xy}^c &= 0,68, & G_{xy}^c &= 2,93, \\
 E_y^c &= 5,93 \text{ MPa}, & v_{yz}^c &= 0,29, & G_{yz}^c &= 2,93, \\
 E_z^c &= 4,20 \text{ MPa}, & v_{zx}^c &= 0,37, & G_{zx}^c &= 2,93.
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Dodatkowego komentarza wymagają przyjęte wartości parametrów materiałowych rdzenia beleczki warstwowej (3.21):

- moduły sprężystości rdzenia zostały przyjęte zgodnie z rozdziałem 3.1.2, jako średnie arytmetyczne z modułów sprężystości przy ściskaniu i rozciągania materiału rdzenia (tab. 3.6),
- współczynniki Poissona założono zgodnie z wyjaśnieniem przedstawionym w rozdziale 4.1.3 (równanie 4.3),
- moduły ścinania rdzenia zostały przyjęte na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych dla modelowanej próbki SP_120_1000_1_1 (założono stałą wartość modułu ścinania we wszystkich płaszczyznach z uwagi na analizowany model ścinania próbki).

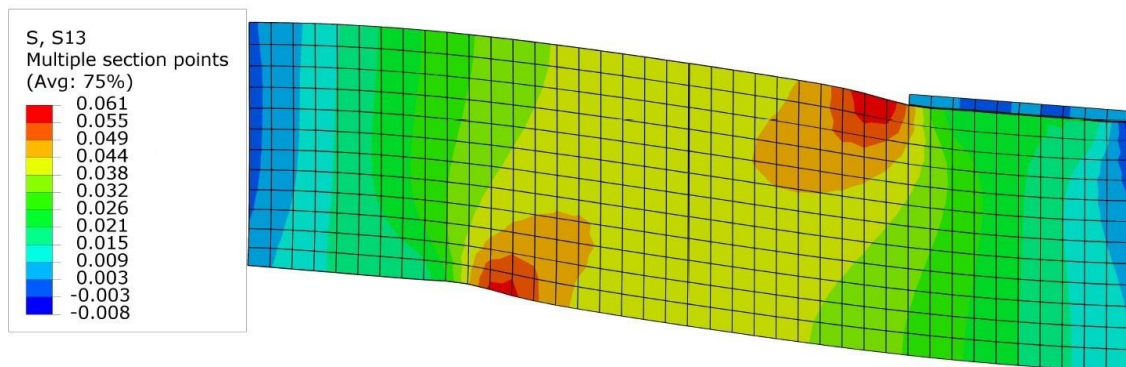
Na rys. 3.41 przedstawiono wykres relacji siła - przemieszczenie dla charakterystycznych punktów, w których umieszczone były czujniki podczas badań laboratoryjnych. Liniami ciągłymi przedstawiono wyniki z badania laboratoryjnego, liniami przerywanymi wyniki z modelu numerycznego.



Rysunek 3.41. Zapis relacji siła - przemieszczenie próbki SP_120_1000_1_1 – wraz z wynikami z analizy numerycznej.

Przygotowany model numeryczny, w zadowalającym stopniu, odzwierciedla globalne zachowanie zginanej czteropunktowo beleczki warstwowej. Ugięcie przęsła belki oraz wgniecenie na podporze odczytywane z czujnika *Przem7* na dużym poziomie zgodności pokrywają się z wynikami z analizy numerycznej. Analizowany model numeryczny nie

odzwierciedla w dobry sposób lokalnego zachowania belki warstwowej, które było mierzone w laboratorium. Odczytane z modelu numerycznego wartości przemieszczeń *Przem3* oraz *Przem2* przyjmują znacznie mniejsze wartości, niż ma to miejsce w rzeczywistości. Różnice te można wyjaśnić faktem zastosowania jednorodnego modelu materiału rdzenia, który w rzeczywistości jest materiałem o znacznej niejednorodności [15, 38]. Do analizy globalnego zachowania zginanej beleczki jest to jednak model wystarczający. Wartym podkreślenia jest fakt, zaobserwowanego w modelu numerycznym efektu wybrzuszenia górnej okładziny w obrębie podpory. W celu lepszego jego zobrazowania na rys. 3.42 przedstawiono przeskalowany 10-krotnie widok zdeformowanej beleczki warstwowej po obciążeniu jej siłą 1,0 kN. Na poniższym rysunku, na podstawie rozkładu naprężeń stycznych w rdzeniu τ_{xz}^f widać początek propagacji schematu zniszczenia beleczki przy ścinaniu, który jest zgodny z przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi. Propagacja mechanizmu ścięcia beleczki warstwowej rozpoczyna się na krawędziach podpory i blaszki obciążającej badany element [55].

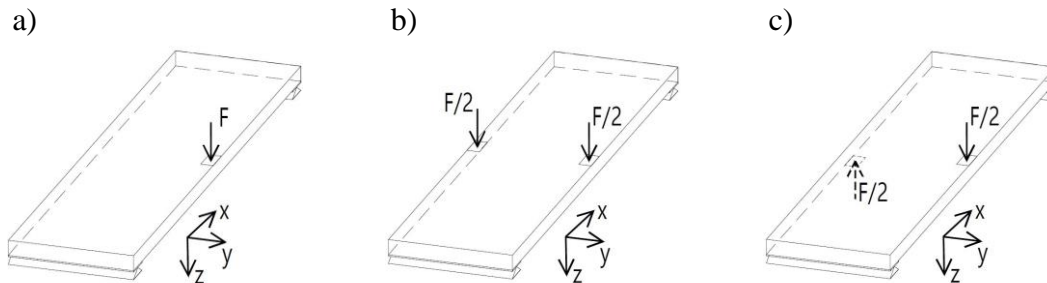


Rysunek 3.42. Mapa naprężeń stycznych τ_{xz}^f w beleczce warstwowej – skala widoku 10:1.

3.2. Stanowisko badawcze do skręcania płyt warstwowych

Badania laboratoryjne pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych przyczyniają się w istotny sposób do wzbogacenia wiedzy na temat ich zachowania, w rzeczywistych warunkach stosowania. Choć często kosztowne, stanowią nieodzowną pomoc w analizach skomplikowanych zagadnień. Realizowane są zarówno takie badania, które odzwierciedlają zachowanie elementów w rzeczywistych warunkach brzegowych podparcia oraz obciążenia, ale także takie, w których warunki te mają odzwierciedlić poczynione założenia teoretyczne. Przyjęcie do analiz rzeczywistych warunków brzegowych może prowadzić do trudności w prawidłowej interpretacji wyników.

Skręcanie panelu warstwowego, uproszczonego w analizie teoretycznej do modelu belki, można zrealizować poprzez mimośrodowe obciążenie elementu swobodnie podpartego na obu końcach [44]. Schemat takiego obciążenia panelu warstwowego przedstawiono na rys. 3.43a.



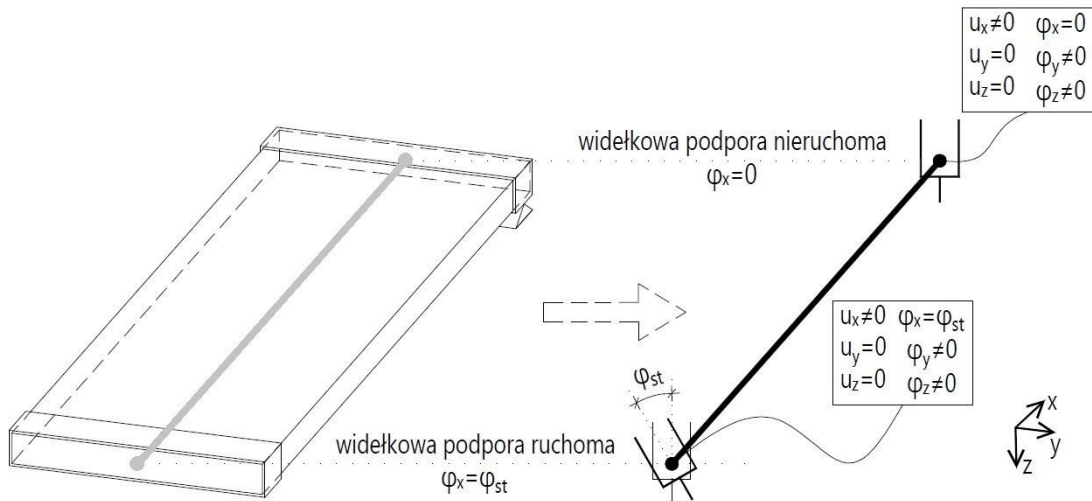
Rysunek 3.43. Obciążony mimośrodowo panel warstwowo:

a) zginanie i skręcanie, b) „czyste” zginanie, c) „czyste” skręcanie.

W przypadku takiego badania, obciążony element warstwowy w dużym uproszczeniu zostanie poddany globalnemu zginaniu (rys. 3.43b) oraz skręcaniu (rys. 3.43c). Pomierzona w laboratorium odpowiedź mechaniczna obciążonej mimośrodowo płyty warstwowej (rys. 3.43a) będzie zawierała w sobie sumę efektów pochodzących od zginania i skręcania.

W realizowanych badaniach laboratoryjnych zdecydowano się na zastosowanie takich warunków brzegowych podparcia i obciążenia, które w możliwie czysty sposób odzwierciedlą zachowanie skręcanej płyty warstwowej. Przedstawione poniżej warunki brzegowe odnoszą się do stosowanych w analizach teoretycznych modeli belkowych, za pomocą których odzwierciedlona jest analitycznie praca skręcanych paneli warstwowych. Realizację teoretycznych warunków brzegowych w warunkach laboratoryjnych i analizach numerycznych omówiono w kolejnych rozdziałach rozprawy. Do analizy skręcania swobodnego przyjęto schemat statyczny przedstawiony na rys. 3.44, w którym:

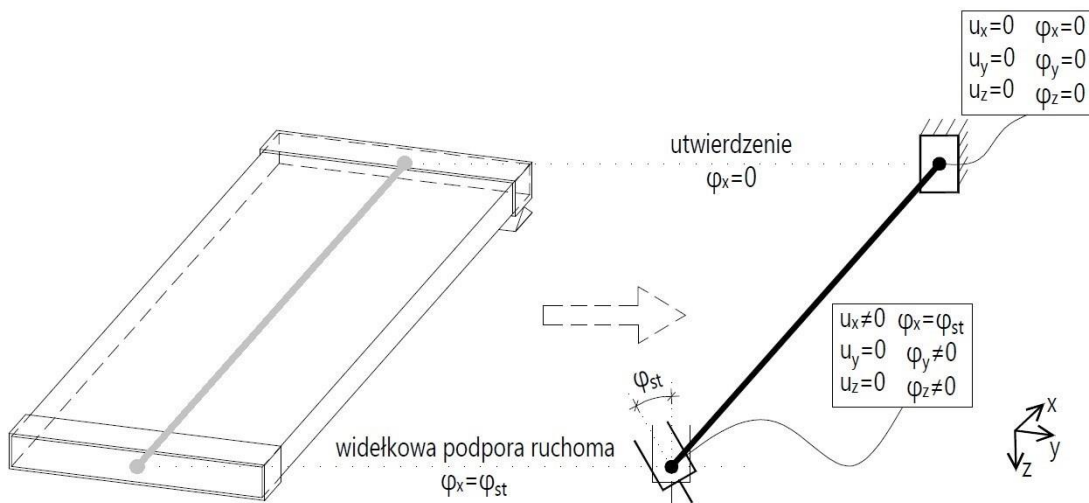
- na nieruchomym końcu płyty warstwowej zastosowano podporę widełkową ze swobodą deplanacji płyty na podporze ($u_x \neq 0, u_y = 0, u_z = 0, \varphi_x = 0, \varphi_y \neq 0, \varphi_z \neq 0$),
- na ruchomym końcu płyty warstwowej zastosowano podporę widełkową ze swobodą deplanacji płyty na podporze, wymuszając za jej pomocą obrót elementu o kąt φ_{st} ($u_x \neq 0, u_y = 0, u_z = 0, \varphi_x = \varphi_{st}, \varphi_y \neq 0, \varphi_z \neq 0$).



Rysunek 3.44. Schemat statyczny badania – skręcanie swobodne.

Do analizy skręcania skrępowanego przyjęto schemat statyczny przedstawiony na rys. 3.45, w którym:

- na nieruchomym końcu płyty warstwowej zastosowano utwierdzenie płyty z blokadą deplanacji płyty na podporze ($u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0, \varphi_x = 0, \varphi_y = 0, \varphi_z = 0$),
- na ruchomym końcu płyty warstwowej zastosowano podporę widelkową ze swobodą deplanacji płyty na podporze, wymuszając za jej pomocą obrót elementu o kąt φ_{st} ($u_x \neq 0, u_y = 0, u_z = 0, \varphi_x = \varphi_{st}, \varphi_y \neq 0, \varphi_z \neq 0$).

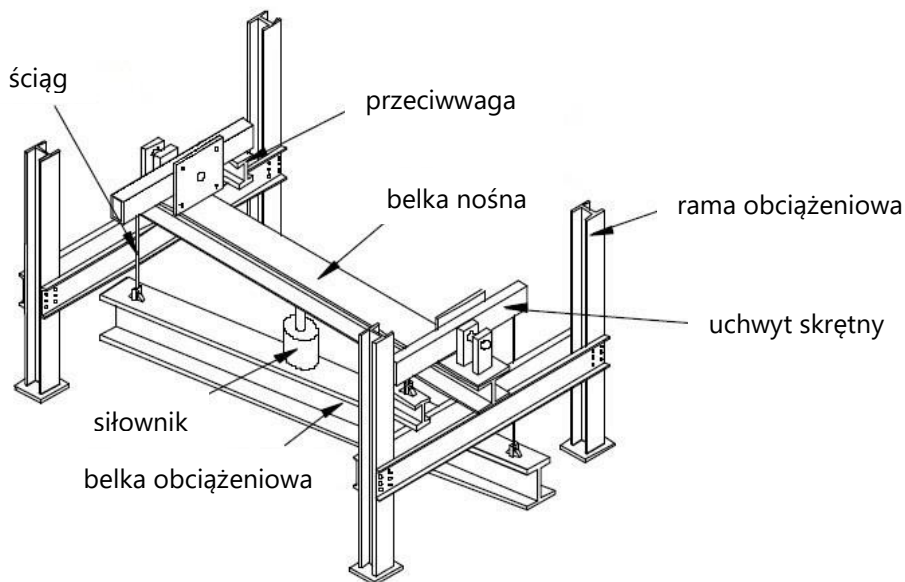


Rysunek 3.45. Schemat statyczny badania – skręcanie skrępowane.

W celu realizacji badań laboratoryjnych na pełnowymiarowych płytach warstwowych, podjęto działania związane z zaprojektowaniem dedykowanego do tego zadania stanowiska badawczego. W pierwszej kolejności zapoznano się z pracami

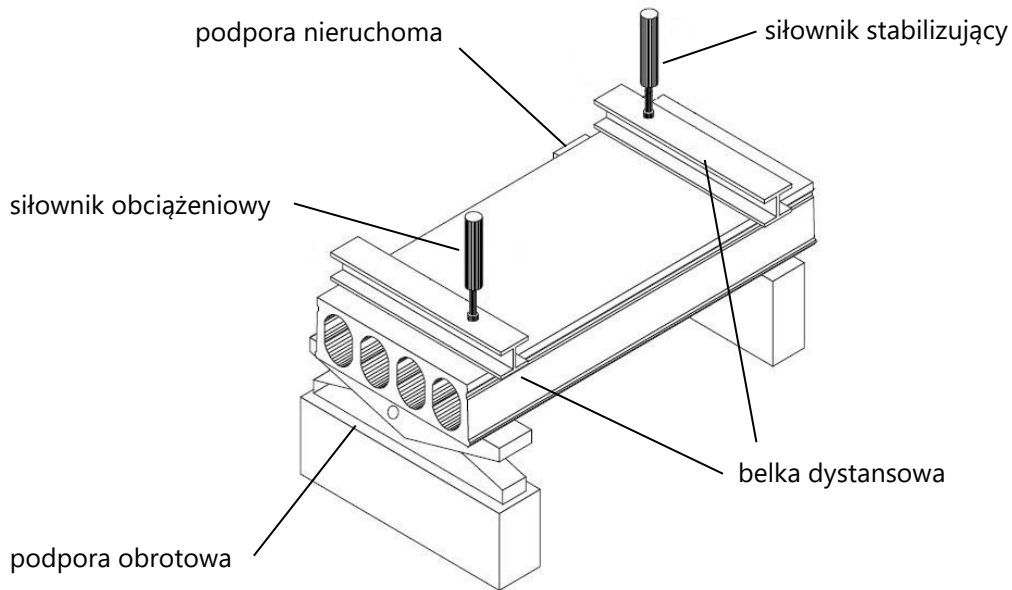
zewnątrznych jednostek laboratoryjnych, w których realizowane były badania odzwierciedlające czyste skręcanie elementów płytowych.

W publikacjach dotyczących zrealizowanych badań [26, 65], Davalos przedstawił stanowisko badawcze do skręcania elementu warstwowego. Praca stanowiska przedstawionego na rys. 3.46 polega na obrocie obu podpór, w których zamocowany jest element warstwowy. Podpory elementu warstwowego połączone są ze sobą za pomocą sztywnej belki. Obciążenie siłownikiem belki w środku jej rozpiętości pomiędzy podporami powoduje przekazanie na każdą z podpór reakcji o tej samej wartości, równej połowie wartości przyłożonej siły. Reakcje ze sztywnej belki obciążają podpory w sposób mimośrodowy, powodując powstanie przeciwstawnych podporowych momentów skręcających.



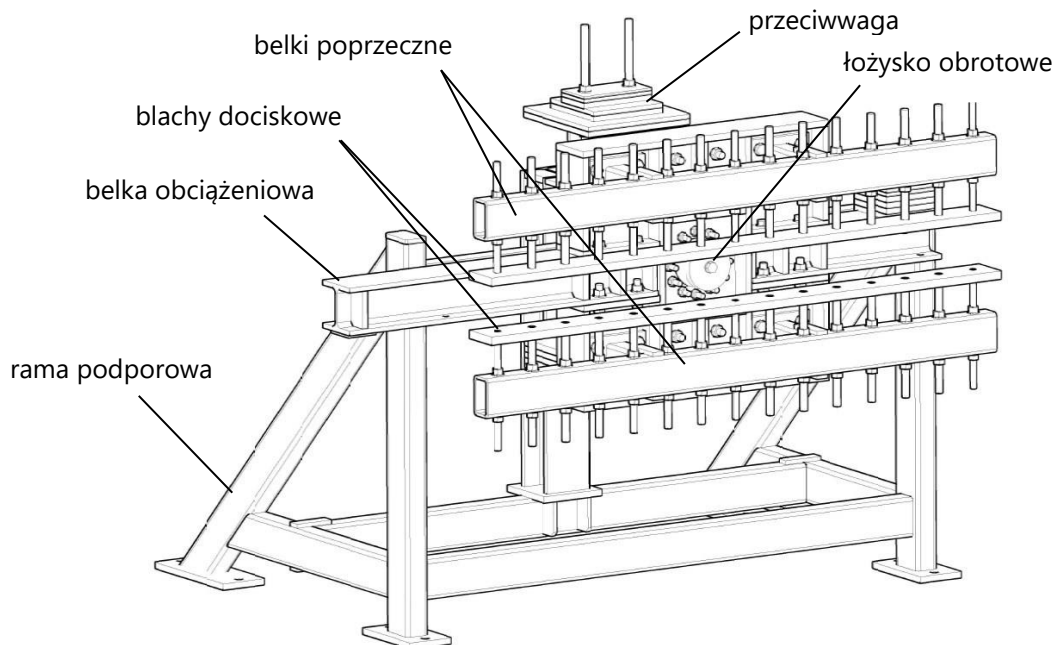
Rysunek 3.46. Stanowisko do skręcania – Davalos [26].

W raporcie z badań przeprowadzonych w ośrodku badawczym VTT w Finlandii [52] przedstawiono stanowisko do skręcania sprężonych płyt kanałowych. Praca stanowiska została także przedstawiona w publikacji [12]. Skręcany w trakcie badania element sprężony opierano na dwóch, niepołączonych wzajemnie ze sobą podporach. Praca stanowiska przedstawionego na rys. 3.47 polega na obrocie jednej z podpór, podczas gdy druga podpora pozostaje nieruchoma. Moment skręcający (obciążający badany element) wprowadzany jest do układu poprzez przyłożenie mimośrodowej siły skupionej na ruchomej podporze. Obrót podpory powoduje skręcanie badanego elementu.



Rysunek 3.47. Stanowisko do skręcania – Pajari [52].

Autorskie stanowisko badawcze do skręcania płyt warstwowych przedstawione na rys. 3.48, w stosunku do przedstawionych powyżej stanowisk cechuje prostota obsługi (interpretacji wyników), połączona z szerokim zakresem możliwości stosowania stanowiska badawczego.



Rysunek 3.48. Autorskie stanowisko do skręcania.

Oś obrotu badanych płyt warstwowych pokrywa się z osią obrotu stanowiska badawczego, co przekłada się na łatwość w interpretacji otrzymanych wyników kąta

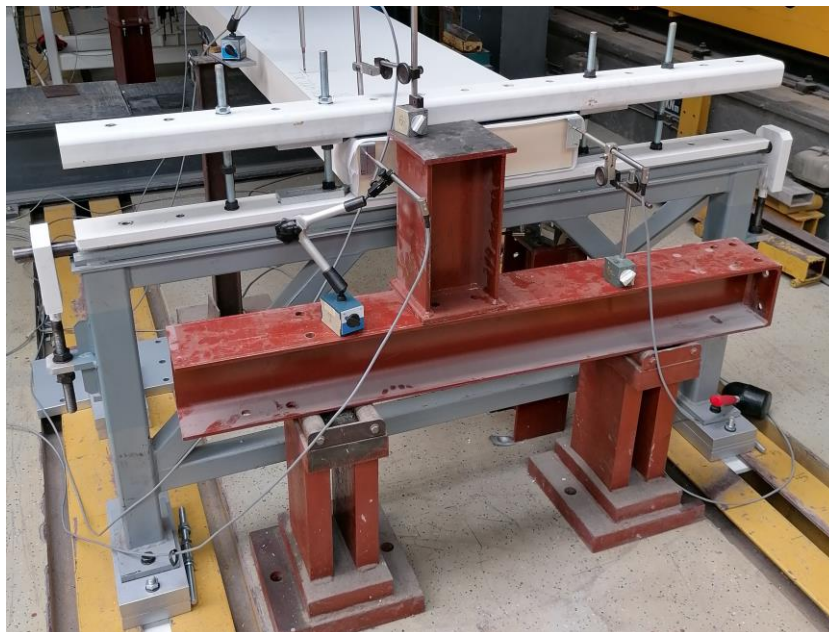
obrotu badanego elementu, w funkcji przyłożonego obciążenia generującego obrót. Dzięki zastosowaniu specjalnych środków smarujących na elementach ruchomych wszelkie opory ruchu sprowadzone są do marginalnych wartości. Dodatkowo autorskie stanowisko badawcze umożliwia badanie płyt warstwowych w szerokim zakresie wymiarów zewnętrznych. Możliwe jest badanie płyt warstwowych o zmiennej wysokości przekroju poprzecznego, a dzięki braku połączenia stanowiska badawczego z drugą podporą badanej płyty warstwowej, możliwe jest badanie płyt o zmiennej długości. Na omawiane stanowisko, dnia 11 czerwca 2021 roku w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej, zostało złożone podanie o udzielenie patentu na wynalazek. Szczegółowo budowę stanowiska przedstawiono w kolejnym rozdziale pracy.

3.2.1 Opis budowy stanowiska

W skład kompletnego stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego wykonano badania skręcania paneli warstwowych wchodzi:

- rama podporowa (rys. 3.49a) stanowiąca nieobrotową podporę dla skręcanych paneli warstwowych,
- obrotowe stanowisko badawcze (rys. 3.49b) stanowiące obrotową podporę dla skręcanych paneli warstwowych.

a)

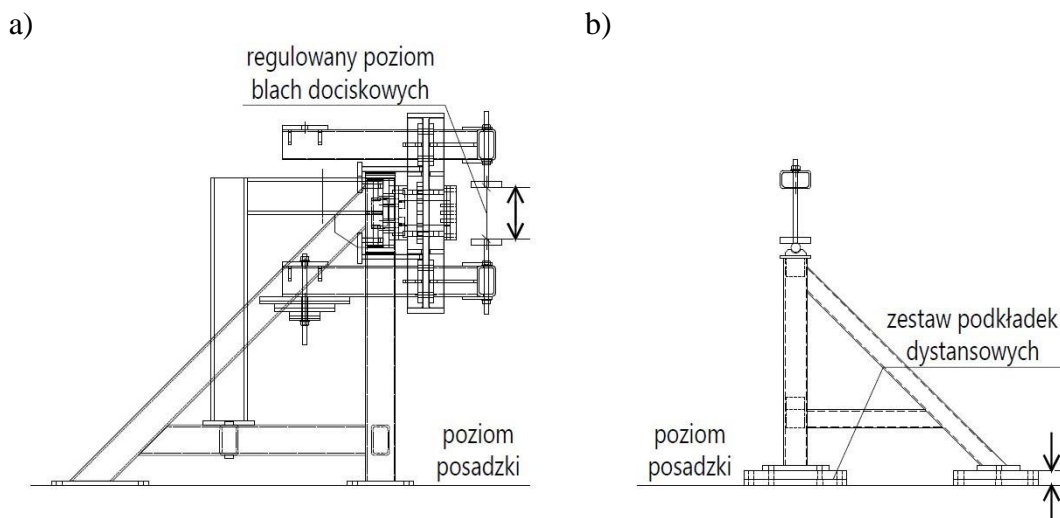




Rysunek 3.49. Stanowisko laboratoryjne do skręcania paneli warstwowych:

a) podpora nieobrotowa, b) podpora obrotowa.

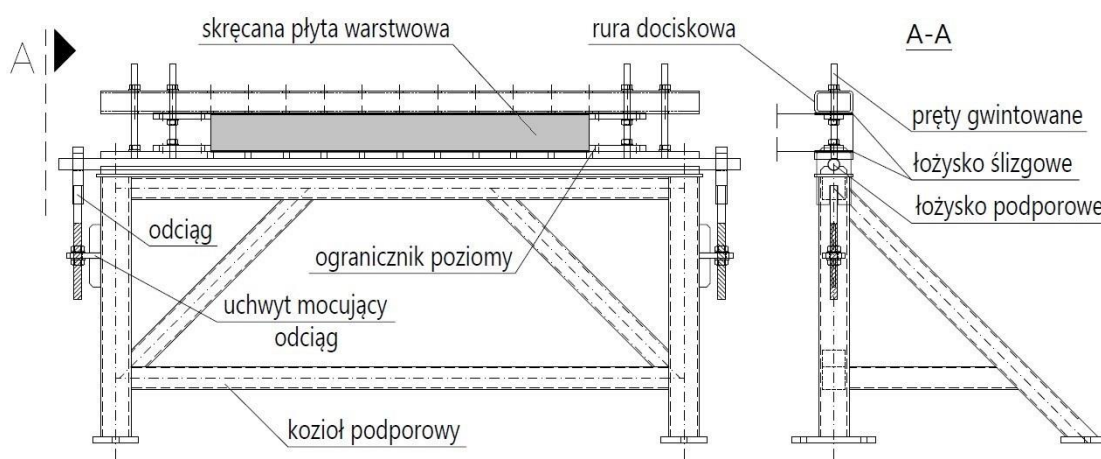
Na czas trwania badania obie podpory zamocowane są tymczasowo do szyn zatopionych w posadzce laboratorium. Dzięki takiemu rozwiązaniu, skręcanie paneli odbywa się w bezpiecznych warunkach pracy. Po skończonych badaniach możliwy jest z kolei demontaż stanowiska, co zwalnia przestrzeń laboratoryjną do prowadzenia innych badań. Swobodne ustawianie podpór względem siebie pozwala na badanie za pomocą opracowanego stanowiska paneli warstwowych o różnych długościach. Dzięki regulowanemu poziomowi blach dociskowych w obrotowym stanowisku badawczym (rys. 3.50a) oraz zestawowi podkładek dystansowych układanych pod ramą podporową (rys. 3.50b) możliwe jest badanie elementów o zmiennej wysokości przekroju poprzecznego. Skręcane płyty warstwowe mogą mieć do 260 mm wysokości, a położenie osi obrotu badanego panelu warstwowego może być dowolnie regulowane.



Rysunek 3.50. Modyfikacja stanowiska badawczego do badania płyt o różnych wysokościach:

a) obrotowe stanowisko badawcze, b) rama podporowa.

Rama podporowa stanowiąca nieobrotową podporę dla skręcanej płyty warstwowej została wykonana na bazie standardowego kozła podporowego, stosowanego dotychczas w laboratorium do badania między innymi płyt warstwowych w schemacie trzypunktowego zginania. Wykonano modyfikację przedstawioną na rys. 3.51, polegającą na dospawaniu do kozła podporowego uchwytów mocujących odciągi, które zabezpieczają łożysko podporowe przed odrywaniem od kozła. Podczas gdy jedna z krawędzi skręcanej płyty warstwowej jest na podporze wciskana w kozioł podporowy, druga z nich ma tendencję do odrywania się od podpory. Efektowi odrywania płyty zapobiegnięto poprzez zastosowanie prostokątnej rury dociskowej, połączonej z łożyskiem podporowym za pomocą prętów gwintowanych M16. Docisk płyty warstwowej do łożyska podporowego oraz blokada odrywania płyty przez zastosowanie rury dociskowej ograniczyły możliwość ruchu płyty na podporze w kierunku pionowym. Dodatkowo, w celu jak najlepszego odzwierciedlenia teoretycznego założenia pracy podpory widełkowej, poza blokadą skręcania na podporze za pomocą pionowej pary sił, zastosowano także ograniczniki poziome mocowane do łożyska podporowego oraz rury dociskowej, które blokowały przesuw płyty na podporze w kierunku poziomym.



Rysunek 3.51. Budowa ramy podporowej – nieobrotowa podpora skręcanej płyty warstwowej.

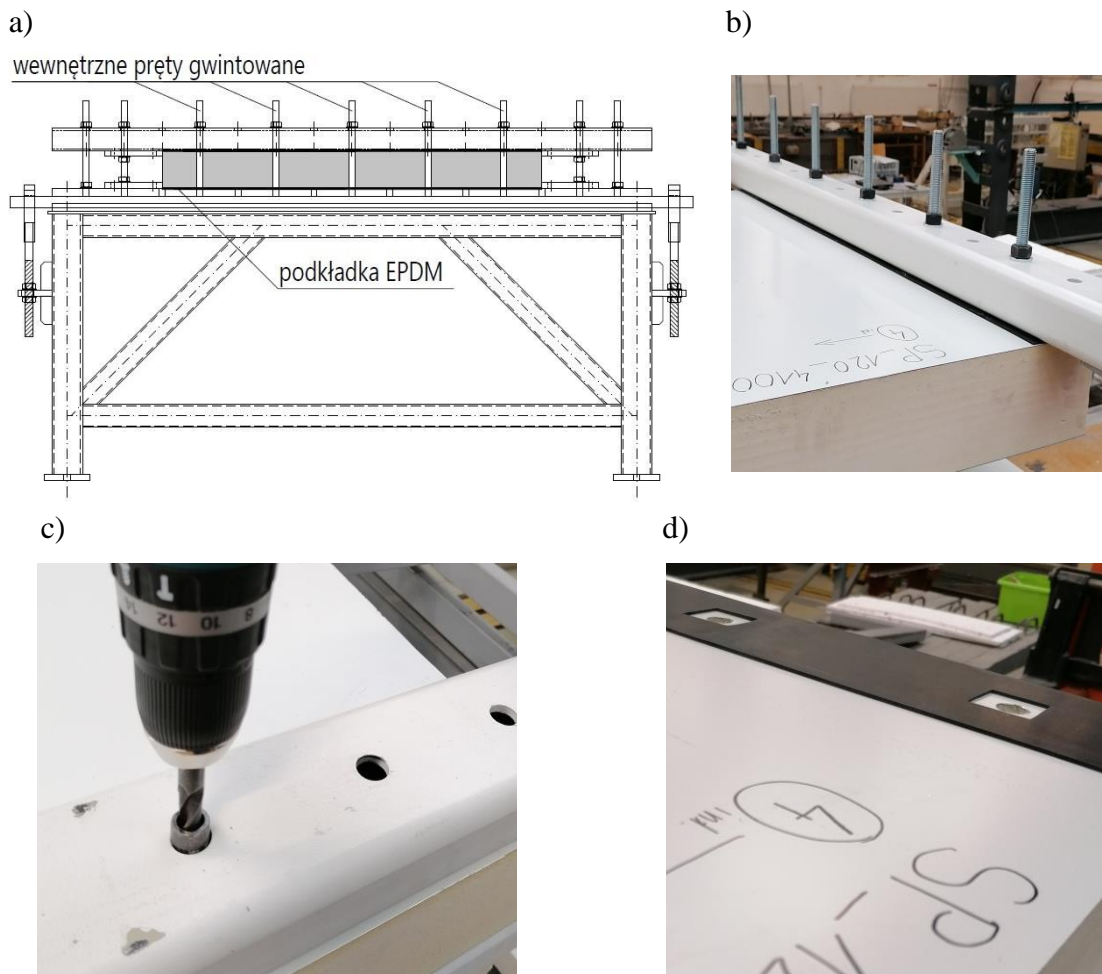
W celu zapewnienia swobody deplanacji płyty warstwowej na podporze, pomiędzy okładziny płyty, a łożysko podporowe i rurę dociskową umieszczono dodatkowe łożyska ślizgowe (rys. 3.52). Zadaniem łożysk było zminimalizowanie tarcia pomiędzy stalowymi okładzinami płyty warstwowej, a elementami podpory. Zastosowane łożyska ślizgowe są układem czterowarstwowym, z symetrycznie rozłożonymi po grubości warstwami:

- zewnętrznymi, wykonanymi z EPDM'u o grubości 2 mm,
- wewnętrznymi, wykonanymi z folii teflonowej o grubości 0,2 mm.

Zewnętrzne warstwy EPDM'u pozostawały w bezpośrednim kontakcie z okładzinami płyty warstwowej i elementami podpory. Minimalizacja tarcia na podporze osiągnięta była poprzez wzajemny poślizg wewnętrznych warstw łożyska, wykonanych z folii teflonowej. Szczegółowe informacje na temat wartości współczynnika tarcia łożyska ślizgowego przedstawiono w rozdziale 3.2.2.



Rysunek 3.52. Łożysko ślizgowe: a) detal, b) łożysko liniowe.



Rysunek 3.53. Blokada deplanacji na podporze: a) schemat podpory, b) rura dociskowa z płytą, c) stosowany szablon przy wykonywaniu otworów, d) otworowana podkładka EPDM.

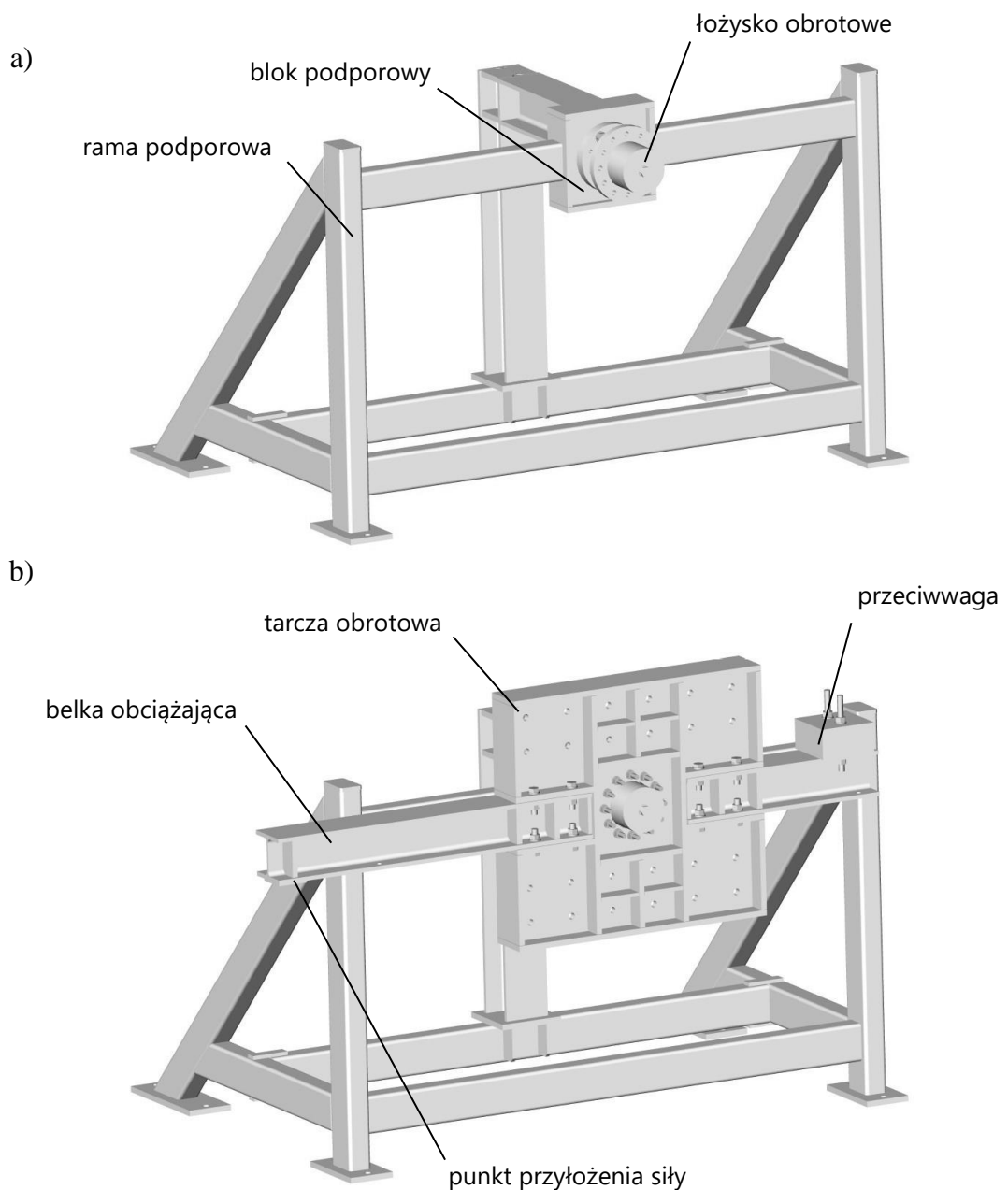
W celu realizacji badań skręcania skrępowanego płyt warstwowych, na nieobrotowej podporze płyty zastosowano ograniczenie swobody deplanacji przekroju poprzecznego badanego elementu. Blokadę możliwości przesuwu okładzin płyt warstwowych wzdłuż kierunku podłużnego płyt, wykonano poprzez zastosowanie dodatkowych łączników mechanicznych mocujących płytę na podporze. W płytach warstwowych wykonano otwory przelotowe o średnicy 14 mm, w rozstawie zgodnym z rozstawem otworów w rurze dociskowej płyty (rys. 3.53c) oraz gwintów wewnętrznych znajdujących się w łożysku podporowym. Do wykonania precyzyjnych otworów wykorzystano dedykowaną wkładkę z rury stalowej o średnicy zewnętrznej równej 20,5 mm oraz średnicy wewnętrznej równej 14,5 mm. Przed montażem płyty w stanowisku badawczym poprawność wykonania otworów była każdorazowo weryfikowana przez próbne osadzenie na płycie rury dociskowej (rys. 3.53b). Dodatkowo, aby zwiększyć tarcie pomiędzy okładzinami płyt warstwowych, a stalowymi elementami nieobrotowej podpory zastąpiono wcześniej omówione łożysko ślizgowe pojedynczą warstwą EPDM o grubości 2 mm. W podkładzie EPDM wykonane zostały odpowiednie otwory (rys. 3.53d), przez które przeprowadzane były pręty gwintowane M16 mocujące płytę warstwową na podporze. Schemat montażowy skręcania skrępowanie płyty warstwowej na nieobrotowej podporze, z zastosowaniem wewnętrznych prętów gwintowanych oraz podkładki EPDM przedstawiono na rys. 3.53a.

Obrotowe stanowisko badawcze, stanowiące obrotową podporę dla skręcania płyty warstwowej, zostało wykonane w oparciu o autorski projekt wykonawczy i warsztatowy w listopadzie 2020 roku. Główną funkcją stanowiska jest obciążenie badanego panelu warstwowego podporowym momentem skręcającym. Mimośrodowe obciążenie stanowiska wprowadzane jest do układu za pomocą zewnętrznego siłownika. Mimośród przyłożonego obciążenia, względem osi obrotu stanowiska równy jest 1000 mm. Stosowany w badaniach siłownik posiada maksymalny wysięg tłoka równy 150 mm, co przekłada się na maksymalny kąt obrotu stanowiska równy 8,53 stopnia (0,15 radiana). Podobnie jak ma to miejsce w przypadku ramy podporowej stanowiącej nieobrotową podporę skręcania płyty warstwowej, w obrotowym stanowisku badawczym możliwe jest zapewnienie swobody deplanacji podporowego przekroju poprzecznego elementu lub jej blokada. Wykorzystywane są w tym celu te same zabiegi:

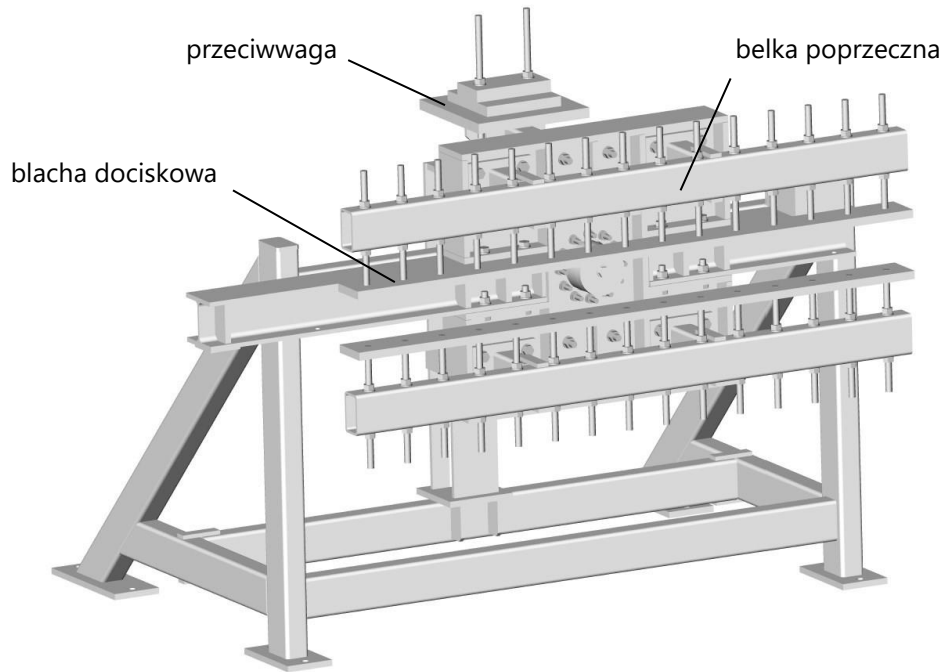
- zapewnienie swobody deplanacji przekroju poprzecznego poprzez zastosowanie łożyska ślizgowego o budowie warstwowej,

- ograniczenie swobody deplanacji przekroju poprzecznego poprzez zastosowanie wewnętrznych prętów gwintowanych mocujących płytę na podporze oraz podkładki EPDM bez dodatkowych, ślizgowych warstw teflonowych.

W przeprowadzonych badaniach skręcania swobodnego i skrępowanego, zgodnie z opisanymi założeniami dotyczącymi przyjętych, teoretycznych schematów statycznych (rys. 3.44 oraz rys. 3.45) na obrotowej podporze zapewniona była zawsze swoboda deplanacji. W celu blokady poziomego przesuwu płyty na podporze względem poziomych blach dociskowych (blokujących przesuw pionowy), zastosowane zostały poziome ograniczniki podobne jak w przypadku podpory nieobrotowej.



c)



Rysunek 3.54. Autorskie stanowisko do skręcania: a) rama podporowa z łożyskiem obrotowym, b) zamontowana tarcza obrotowa, d) kompletne stanowisko.

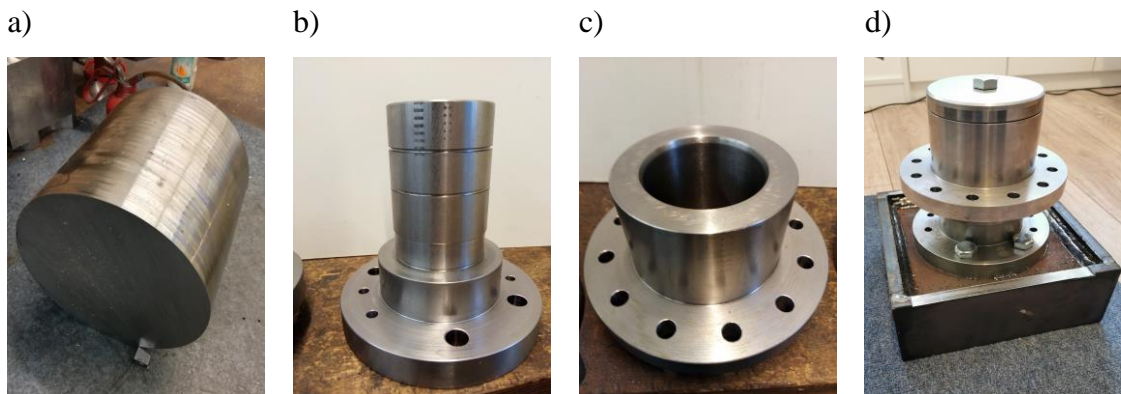
Stanowisko badawcze składa się z ramy podporowej (rys. 3.54a), która zamocowana jest do posadzki laboratorium, w którym wykonywane są badania za pomocą blach czołowych umieszczonych na spodzie ramy. Na górnej, poziomej belce ramy, w jej środkowej części znajduje się blok podporowy, do którego mocowane jest ślizgowe łożysko obrotowe (rys. 3.54a). Sztywność bloku podporowego została zwiększona za pomocą zastosowanego dodatkowego, wspornikowego mocowania bloku podporowego w ramie podporowej. Ślizgowe łożysko obrotowe składa się z trzpienia łożyska (zamontowanego nieruchomo w bloku podporowym ramy podporowej) oraz piasty łożyska (ruchoma część łożyska obracająca się na trzpieniu łożyska). Do piasty ślizgowego łożyska obrotowego mocowana jest tarcza obrotowa (rys. 3.54b). Tarcza obrotowa posiada specjalnie ukształtowane gniazda montażowe, wewnątrz których montowana jest belka dwuteowa, do której przykładana jest siła obciążająca stanowisko oraz przeciwwaga (rys. 3.54b), wykonana także jako belka dwuteowa. Od przodu tarczy obrotowej montowane są belki poprzeczne (rys. 3.54c). Do belek poprzecznych zamocowane są blachy dociskowe, które mają bezpośredni kontakt z badaną płytą warstwową. Od tyłu tarczy obrotowej montowane są przeciwwagi (rys. 3.54c), które stanowią balast stabilizujący dla belek poprzecznych, blach dociskowych oraz ciężaru badanej płyty warstwowej. Zestaw przeciwwag zapewnia utrzymanie tarczy obrotowej w równowadze, po umieszczeniu w stanowisku

badawczym płyty warstwowej. W trakcie badania siła zewnętrzna przykładana jest w kierunku pionowym, skierowana ku górze do dwuteowej belki. Działająca na mimośrodku (względem osi obrotu) siła generuje działający na płytę warstwową moment skręcający. Wprowadzony do układu moment skręcający poprzez belki poprzeczne i blachy dociskowe powoduje obrót płyty warstwowej.

Jednym z najważniejszych elementów obrotowego stanowiska badawczego jest ślizgowe łożysko obrotowe (rys. 3.55d). Płynność pracy stanowiska i minimalizacja oporów ruchu wywołanych tarciem obrotowym na łożysku została uzyskana dzięki:

- wykonaniu trzpienia łożyska (rys. 3.55b) oraz piasty łożyska (rys. 3.55c) z jednego, pełnego pręta o średnicy 200 mm (rys. 3.55a), z gatunku stali C45,
- precyzyjnie wykonanym powierzchniom stykowym pomiędzy trzpieniem łożyska i piastą łożyska – szczelina pomiędzy oboma elementami wynosi niespełna 0,5 mm,
- zastosowaniu dedykowanego smaru, który został nałożony pomiędzy trzpień i piastę.

Szczegółowa charakterystyka smaru i uzyskane za jego pomocą współczynniki tarcia na łożysku obrotowym zostały opisane w rozdziale 3.2.2.

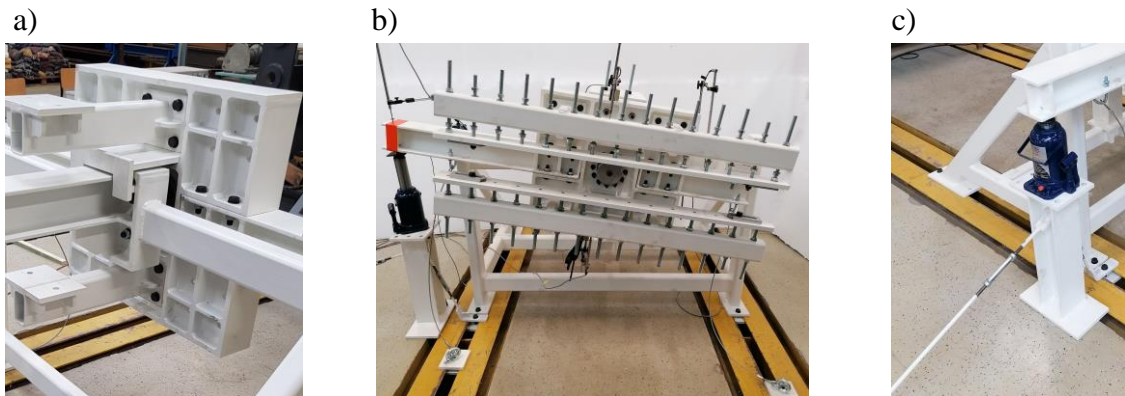


Rysunek 3.55. Ślizgowe łożysko obrotowe: a) surowy materiał, b) trzpień łożyska, c) piasta łożyska, d) złożone łożysko.

W trakcie wykonywania badań laboratoryjnych bardzo dużą wagę przykładano do zapewnienia bezpiecznych warunków pracy ze stanowiskiem. Wiele elementów stanowiska badawczego została tak zaprojektowana, aby w trakcie zniszczenia badanego elementu warstwowego nie doszło do jego nieoczekiwanego zachowania i spowodowania zagrożenia dla ekipy obsługującej stanowisko. Stojak, na którym umieszczony był siłownik zamocowano do posadzki laboratorium za pomocą napiętych odciągów (rys. 3.56c), dzięki którym pozostawał stabilny w trakcie całego procesu obciążenia stanowiska. Belka obciążająca oraz belka przeciwwagi była połączona

Badania laboratoryjne

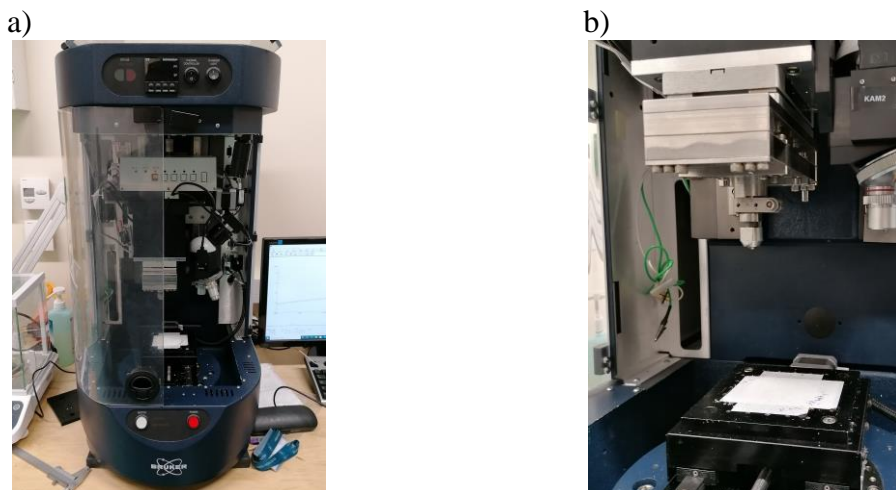
z posadzką laboratorium za pomocą stalowych linek zabezpieczających (rys. 3.56b). Podczas zniszczenia badanego elementu i niekontrolowanego obrotu stanowiska wraz ze zniszczoną próbką, stalowe linki zabezpieczały stanowisko przed nadmiernym obrotem tarczy. Dodatkowo, gdy stanowisko nie było obsługiwane na tarczę obrotową umieszczana była blokada obrotu umieszczana w tylnej części stanowiska (rys. 3.56a), utrzymująca tarczę obrotową w spoczynku.



Rysunek 3.56. Zabezpieczenie obsługi stanowiska badawczego: a) blokada obrotu tarczy obrotowej, b) ograniczenie obrotu stanowiska za pomocą linek stalowych, c) stabilizacja stojaka silownika.

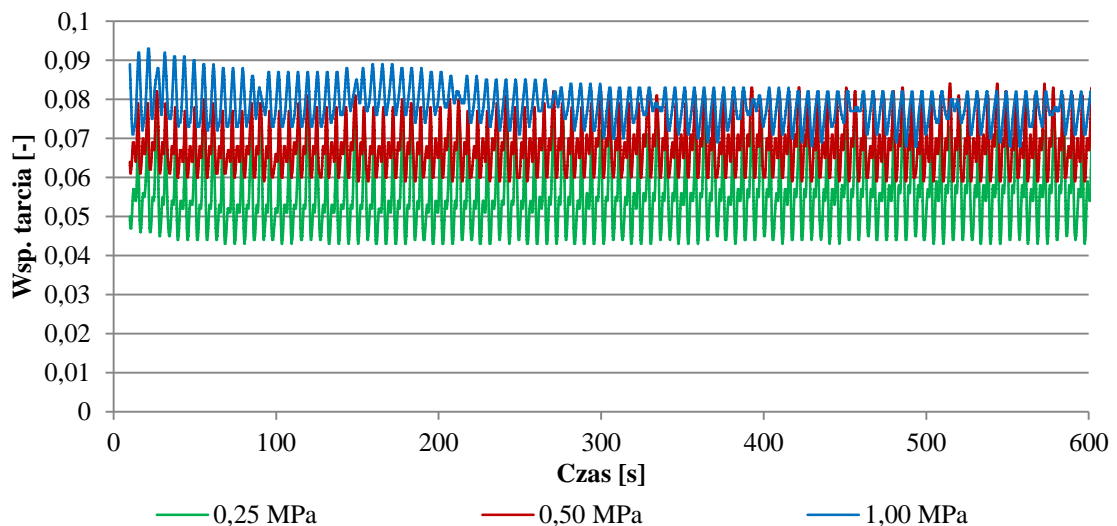
3.2.2 Współczynniki tarcia łożyska ślizgowego i obrotowego

Laboratoryjne wartości współczynników tarcia łożysk wchodzących w skład stanowiska badawczego do skręcania paneli warstwowych wyznaczono w celu poprawnej definicji parametrów kontaktowych w opracowanych modelach numerycznym. Badania przeprowadzono w Laboratorium Tribologii, Instytutu Technologii Mechanicznej, Wydziału Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Poznańskiej. Badania wykonano na tribotesterze Brucker UMT-2 (rys. 3.57).



Rysunek 3.57. Tribotester Brucker UMT-2: a) widok ogólny, b) widok przestrzeni roboczej.

Wartość współczynnika tarcia łożyska ślizgowego (rys. 3.52) została wyznaczona za pomocą testu zużyciowego (*ang. pin on float*), wymuszając na próbce laboratoryjnej ruch posuwisto-zwrotny o długości ścieżki ruchu równej 25 mm. Próbkę laboratoryjną miała kształt okręgu o średnicy 12 mm i budowę warstwową odpowiadającą budowie łożyska ślizgowego. Czas trwania badania ustalono na poziomie dziesięciu minut, w celu zobrazowania zmiany wartości współczynnika tarcia w czasie. Z uwagi na różne wartości naprężeń dociskowych na powierzchni łożyska występujące w rzeczywistym badaniu skręcania paneli warstwowych, wartości współczynników tarcia zostały wyznaczone dla wartości docisków od 0,25 MPa do 1,00 MPa. Otrzymane z badań wyniki przedstawiono na wykresie na rys. 3.58.

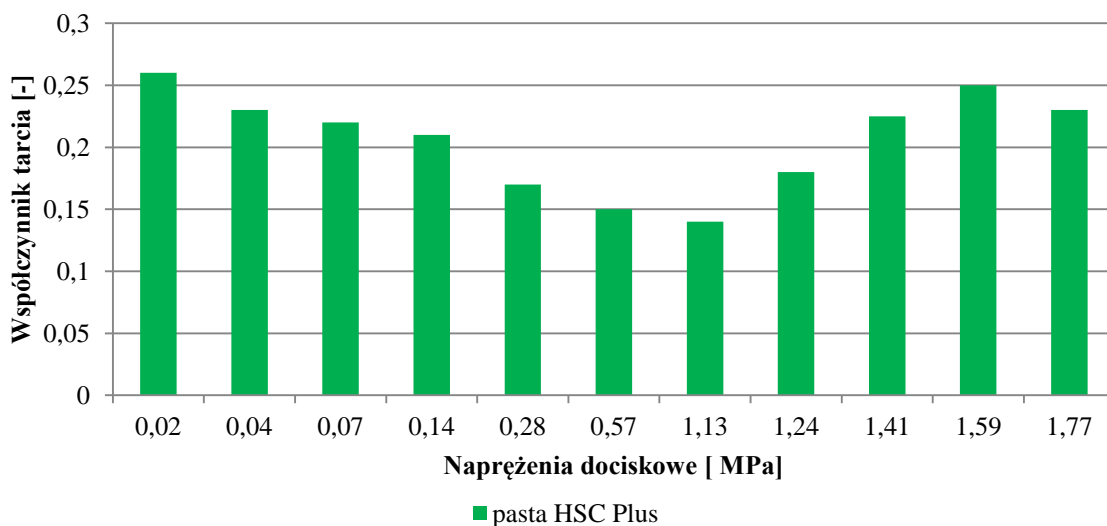


Rysunek 3.58. Współczynnik tarcia łożyska ślizgowego (rys. 3.52).

Otrzymane przez innych badaczy [41], podobne rezultaty poślizgu w układzie teflon-teflon, wskazują na poprawne przeprowadzenie badania. Z uwagi na niewielkie różnice między otrzymanymi wynikami przy różnych wartościach naprężeń dociskowych, przy wykonywanych analizach numerycznych opisanych w rozdziale 4, zastosowano stałą wartość współczynnika tarcia równą 0,075.

Wartość współczynnika tarcia ślizgowego łożyska obrotowego (rys. 3.55) została wyznaczona za pomocą testu pojedynczego przejścia wymuszając na próbce laboratoryjnej ruch posuwisty o długości ścieżki ruchu równej 30 mm. Z uwagi na stałą obecność pasty smarującej pomiędzy trzpieniem i piastą łożyska, która gwarantuje regularność zjawiska tarcia, w badaniu laboratoryjnym uzupełniana była pasta przed każdym przejściem głowicy tribotestera. Do obniżenia wartości współczynnika tarcia na

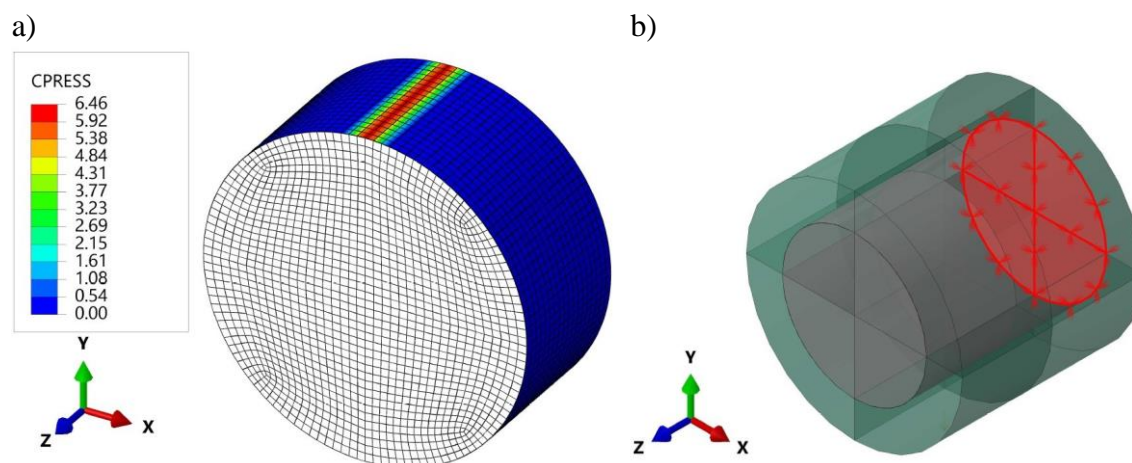
łożysku obrotowym zastosowana została pasta Molykote HSC Plus. W skład pasty wchodzi: olej mineralny, środki zagęszczające, smary stałe i proszki metali (miedzi 22%, cyny 11%). Dzięki znajdującym się w składzie pasty proszkom metali, posiada ona właściwości antyadhezyjne zapewniające łożysku płynną pracę ograniczając ryzyko pojawienia się na powierzchni kontaktu zjawiska *stick-slip*. Wartości współczynników tarcia wyznaczane były dla różnych wartości naprężeń dociskowych, na podstawowej próbce o polu powierzchni kontaktu równej 113 mm². Przeprowadzono cztery próby przejścia przy tej samej wartości naprężeń dociskowych. Średnie arytmetyczne wartości współczynników tarcia w zależności od wartości docisku przedstawiono na wykresie na rys. 3.59.



Rysunek 3.59. Współczynnik tarcia łożyska obrotowego (rys. 3.6).

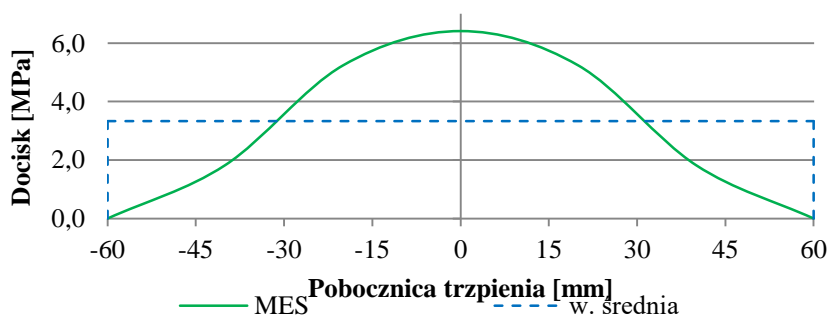
Współczynnik tarcia pasty smarującej łożysko obrotowe mieści się w zakresie od 0,14 do 0,26. Wyznaczony w badaniu współczynnik tarcia, na etapie projektowania stanowiska badawczego, wykorzystano do oszacowania wartości oporu ruchu łożyska. Wartość oporu została wyznaczona także w warunkach rzeczywistej pracy całego stanowiska (po jego wykonaniu), co opisano w rozdziale 3.2.3. W celu oszacowania wartości oporu ruchu na łożysku obrotowym, wykonano model numeryczny łożyska obciążonego ciężarem tarczy obrotowej, na podstawie którego określono wartość naprężeń dociskowych piasty na trzpieniu. Trzpień łożyska utwierdzono na jednym z jego końców (rys. 3.60b). Obciążenie o sumarycznej wartości 4100 N (odpowiadające ciężarowi tarczy obrotowej stanowiska) równomiernie rozłożono na powierzchni zewnętrznej piasty. Kierunek obciążenia pokrywał się z kierunkiem osi *y* przyjętego

układu współrzędnych (rys. 3.60). Łożysko zostało zamodelowane za pomocą bryłowych elementów skończonych typu C3D8R, z jednym punktem całkowania wewnątrz elementu. Rozmiar elementów skończonych przyjęto równy 2 mm. Zastosowano jednorodny, izotropowy model materiału o wartości modułu sprężystości podłużnej równej 205 GPa oraz współczynnika Poissona równym 0,30. Pomiędzy wewnętrzną powierzchnią piasty łożyska oraz zewnętrzną powierzchnią trzpienia łożyska zastosowano połączenie kontaktowe GENERAL CONTACT, ze zdefiniowanym parametrem kontaktu w kierunku normalnym do powierzchni styku jako HARD CONTACT. Na rys.3.60a przedstawiono wartości naprężeń dociskowych na środkowym fragmencie trzpienia łożyska obrotowego. Rozkład naprężeń dociskowych na rozwinięciu powierzchni kontaktu, w przekroju poprzecznym (płaszczyznę xy), w strefie docisku przedstawiono na rys. 3.61. Ciągłą linią zieloną oznaczono wyniki odczytane z węzłów siatki elementów skończonych modelu numerycznego, przerywaną linią niebieską wartość średnią z analizowanej strefy.



Rysunek 3.60. Model numeryczny łożyska obrotowego obciążonego ciężarem tarczy obrotowej:

a) wartość naprężeń dociskowych [MPa], b) widok ogólny modelu.



Rysunek 3.61. Wartość naprężeń dociskowych w strefie kontaktu.

Z uwagi na ograniczoną możliwość docisku próbki głowicą tribotestera wartością na poziomie 200 N, w celu określenia współczynnika tarcia przy wyższej wartości naprężeń dociskowych wykonano dodatkowe badanie na talerzyku dociskowym o mniejszym polu powierzchni. Za jego pomocą określono wartość współczynnika tarcia przy naprężeniach dociskowych równych 3,33 MPa, które odpowiadają średniej wartości docisku piasty na trzpieniu łożyska (rys. 3.61). Otrzymany z badania wynik wartości współczynnika tarcia równy 0,20 mieści się w zakresie wartości współczynników przedstawionych na rys. 3.60. Na tej podstawie, do oszacowania wartości oporu ruchu przyjęto stałą wartość współczynnika tarcia równą 0,20. Przy nacisku na trzpień łożyska wywołanym obciążeniem równym 4100 N, współczynnika tarcia równym 0,20 oraz średnicy trzpienia łożyska obrotowego równej 80 mm otrzymano opór ruchu równy 32,8 Nm. Wartość ta jest bardzo bliska wartości oporu ruchu, wyznaczonego w warunkach rzeczywistej pracy całego stanowiska (rozdział 3.2.3), co świadczy o spójności i poprawności otrzymanych rezultatów oporu.

3.2.3 Opór łożyska

Siła obciążająca stanowisko badawcze wprowadzana do układu za pomocą siłownika hydraulicznego była mierzona za pomocą siłomierza 1-C9B/20KN klasy 0,5, w zakresie sił do 20,0 kN. Z uwagi na fakt, że wprowadzana siła nie obciąża skręcanej płyty warstwowej w sposób bezpośredni, przeprowadzono serię badań laboratoryjnych określającą wartości wewnętrznych oporów ruchu stanowiska badawczego. W tym celu wykonano sześć prób pełnego wysuwu tłoka siłownika, bez umieszczonego w stanowisku badawczym dodatkowego elementu krępującego możliwość obrotu stanowiska. Jedyne opór jaki stawiany był siłownikowi generowany był przez opory ruchu stanowiska. W trakcie prowadzonych prób, poza zapisem siły, rejestrowany był także wysuw tłoka siłownika mierzony za pomocą indukcyjnego czujnika przemieszczeń 1-WA/300MM-L o zakresie znamionowym 300 mm. Czujnik przemieszczeń ustawiony był na ramie stanowiska i mierzył przemieszczenia punktu umieszczonego na górze belki obciążeniowej, zlokalizowanego tuż nad tłokiem siłownika. W trakcie realizacji pełnego programu badań skręcania paneli warstwowych, skręcane były elementy o różnej masie, obciążające stanowisko badawcze ciężarem własnym o różnej wartości. Aby uwzględnić w analizie oporu stanowiska różne wartości ciężaru badanych elementów, wewnątrz blach dociskowych stanowiska umieszczano dodatkowy balast odzwierciedlający masy badanych elementów.

Przykładowe badanie oporu ruchu stanowiska z dodatkowym balastem przedstawiono na rys. 3.62.



Rysunek 3.62. Badanie oporu ruchu stanowiska.

Poniżej, w tab. 3.11 zestawiono wszystkie próby wysuwu tłoka siłownika. Opory ruchu zostały określone dla balastu odpowiadającego połowie ciężaru własnego:

- płyty CH120 o szerokości równej 1000 mm i długości równej 4000 mm,
- rury okrągłej z badania kalibracyjnego stanowisko opisanego w rozdziale 3.2.6.

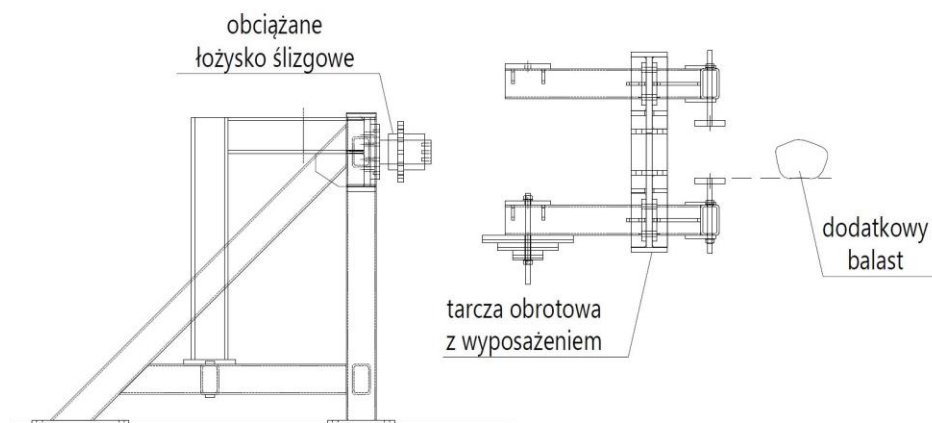
Dodatkowo wykonano próbę wysuwu tłoka siłownika bez dodatkowego balastu.

Tabela 3.11. Zestawienie prób wysuwu tłoka siłownika.

Nazwa próbki	Obciążenie [kg]	Element odniesienia	Masa [kg]	Dopasowanie [%]	Odniesienie [%]
RuraM_1	11,45	RO 88,9/3,2	11,42	100,26%	2,79%
RuraM_2	11,45	RO 88,9/3,2	11,42	100,26%	2,79%
SPM_1	0,00	-	0,00	100,00%	0,00%
SPM_2	0,00	-	0,00	100,00%	0,00%
SPM_5_1	25,52	SP_120-1000	25,75	99,11%	6,30%
SPM_5_2	25,52	SP_120-1000	25,75	99,11%	6,30%

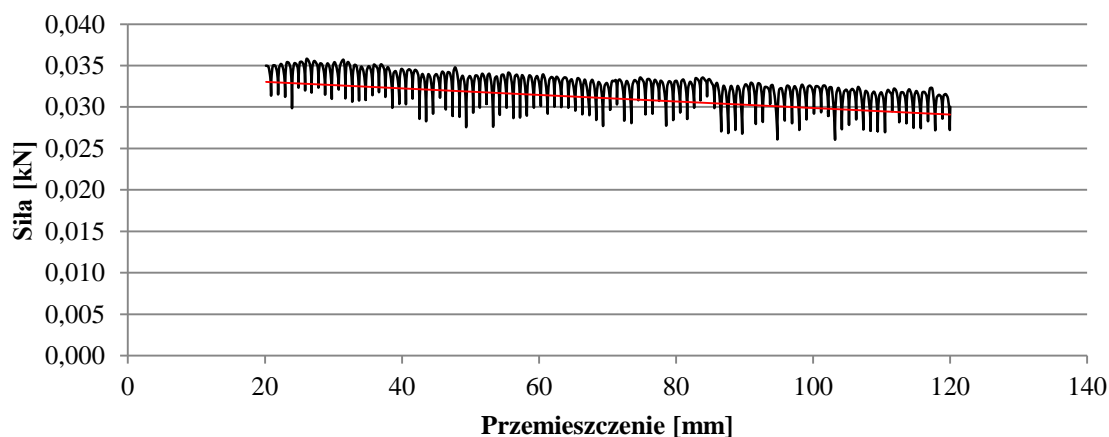
Dla każdej próby badawczej określono poziom dopasowania obciążenia balastem do masy odpowiadającej połowie ciężaru własnego przyjętego elementu odniesienia. Dodatkowo sprawdzono jaką część obciążenia łożyska stanowi dodatkowy balast w odniesieniu do ciężaru własnego tarczy obrotowej wraz z wyposażeniem (rys. 3.63).

Masa tarczy obrotowej z wyposażeniem równa jest 408,94 kg. W ostatniej kolumnie tab. 3.11 przedstawiono w formie zapisu procentowego jaką część całkowitego obciążenia, przypadającą na obrotowe łożysko ślizgowe, stanowi zastosowany w badaniach dodatkowy balast.



Rysunek 3.63. Badanie oporu ruchu stanowiska – dodatkowy balast.

Tempo wysuwu tłoka sterowane było ręcznie na średnim poziomie równym 0,51 mm/s. Dla każdej z przeprowadzonych prób wykonano wykres relacji siły odczytywanej z siłomierza do wysuwu tłoka odczytywanego za pomocą czujnika przemieszczeń. Przykładowy wykres dla próbki RuraM_1 przedstawiono na rys. 3.64. Ze względu na zaobserwowane znaczne odchylenia (od reszty zapisu) na wykresie został pominięty początkowy i końcowy zapis z próby.



Rysunek 3.64. Relacja siła – przemieszczenie podczas próby wysuwu tłoka dla próbki RuraM_1.

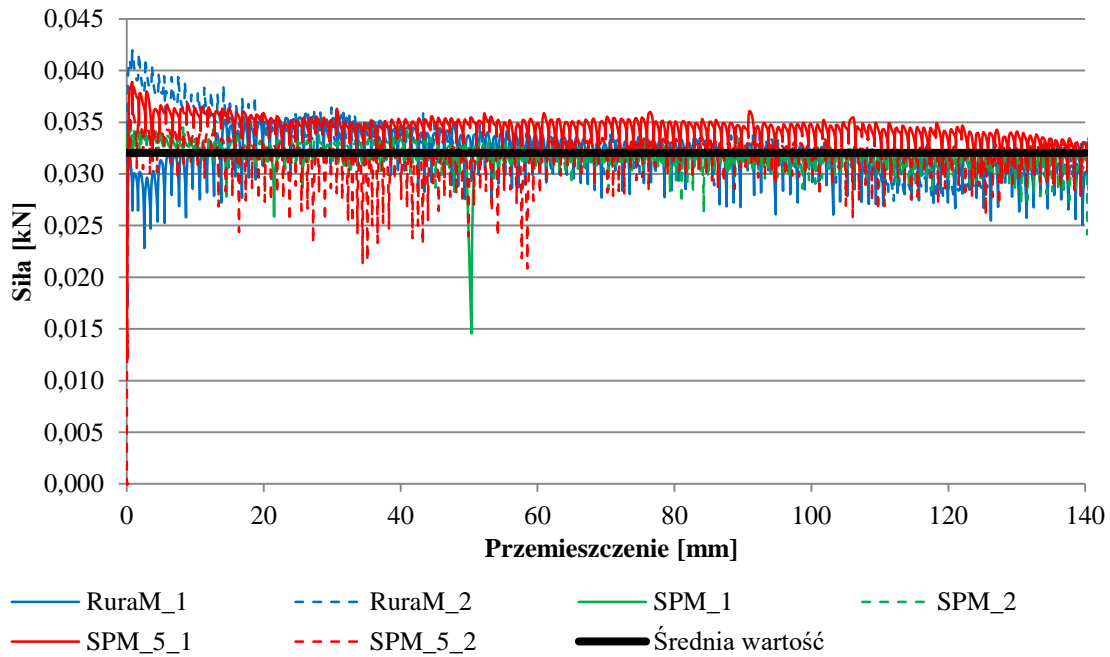
Na wykresie linią czarną oznaczony jest bezpośredni zapis wyników uzyskanych z systemu akwizycji danych MGCplus, linią czerwoną naniesiona jest liniowa linia

trendu próby. Na podstawie opracowanych wykresów, dla każdej próbki określona została wartość średnia oporu ruchu stanowiska, odpowiadająca wartości funkcji określającej linię trendu próbki przy połowie maksymalnego wysięgu tłoka siłownika. Poniżej, w tab. 3.12 przedstawiono zestawienie wyników dla wszystkich prób.

Tabela 3.12. Zestawienie wyników prób wysuwu tłoka siłownika.

Nazwa próbki	Tempo [mm/s]	Opór [N]
RuraM_1	0.58	31.80
RuraM_2	0.53	33.20
SPM_1	0.47	31.32
SPM_2	0.44	31.70
SPM_5_1	0.48	33.80
SPM_5_2	0.54	30.40
Wartość średnia \bar{x}	0.51	32.04
Odchylenie standardowe s	0.053	1.251
Wsp. zmienności v	0,104	0,039

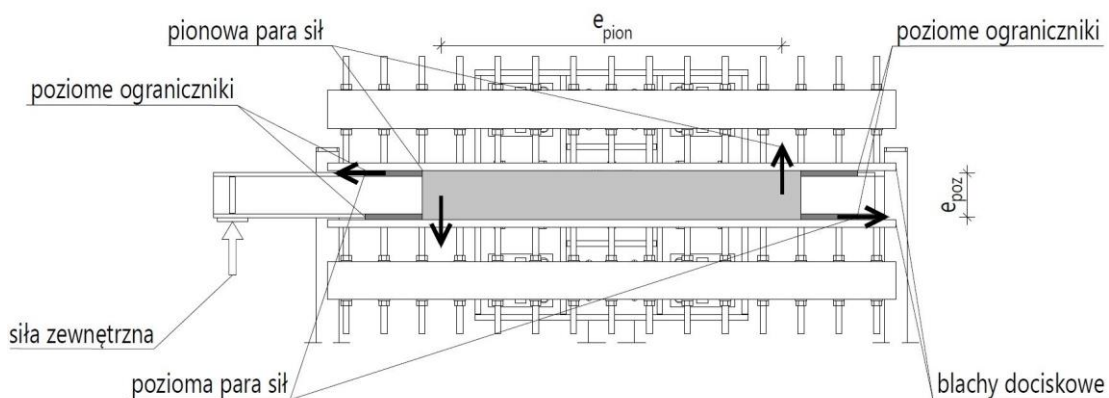
Na podstawie przeprowadzonych testów widać, że z uwagi na małą wartość ciężaru balastu w odniesieniu do ciężaru własnego tarczy stanowiska wraz z wyposażeniem, wyniki oporów ruchu nie różnią się zbyt mocno między konkretnymi próbkami. Z tego względu określono średnią wartość oporu ruchu stanowiska dla wszystkich prób i do dalszych analiz przyjęto, że jest ona niezależna od dodatkowego ciężaru obciążającego stanowisko. Wartość średnia oporu równa jest 32,04 N. Mimośród punktu przyłożenia siły, względem osi obrotu stanowiska równy jest 1000 mm. Przedstawiając więc wynik oporu ruchu stanowiska w postaci momentu skręcającego można przyjąć, że obrotowy opór ruchu stanowiska badawczego równy jest 32 Nm. Poniżej na rys. 3.65 przedstawiono pełny zapis relacji siła – przemieszczenie dla wszystkich przeprowadzonych prób oraz naniesioną na wykres wartość średnią oporu ruchu stanowiska. Na podstawie przedstawionego wykresu widać, że wartość oporu ruchu nie zmienia się znacznie wraz z wysuwem tłoka siłownika. Co więcej, przyjęta wartość średnia w zadowalający sposób odzwierciedla zachowanie stanowiska w odniesieniu do wszystkich przeprowadzonych testów.



Rysunek 3.65. Relacja siła – przemieszczenie podczas próby wysuwu tłoka dla wszystkich prób.

3.2.4 Sztywność stanowiska – określenie funkcji sztywności

Oddziałująca na stanowisko badawcze mimośrodowa siła zewnętrzna (rys. 3.66) generuje moment skręcający przekazywany na umieszczoną w stanowisku płytę warstwową. Element warstwowy zamocowany jest pomiędzy blachami dociskowymi stanowiska oraz poziomymi ogranicznikami. Dzięki takiemu sposobowi zamocowania, generowany moment skręcający przekazywany jest na badany element warstwowy za pomocą pionowej i poziomej pary sił (rys. 3.66).

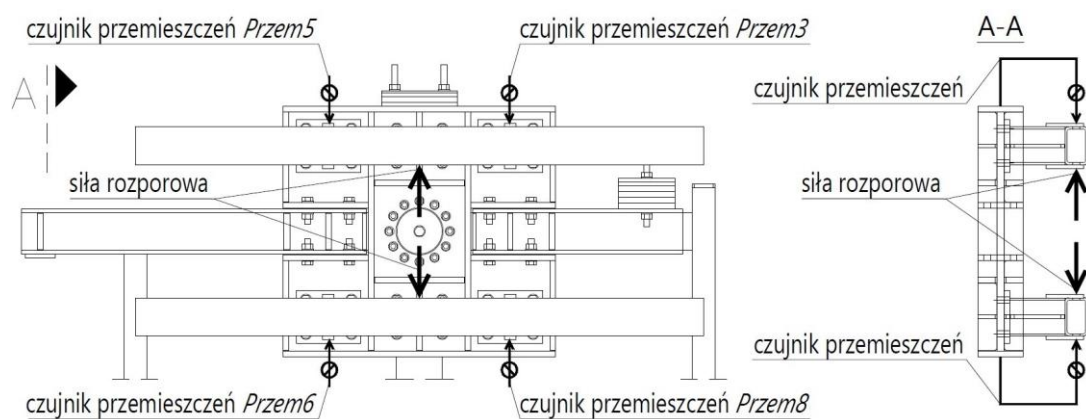


Rysunek 3.66. Schemat rozkładu obciążenia w stanowisku badawczym.

Wraz ze wzrostem wartości mimośrodowej siły zewnętrznej rosną także wartości sił oddziałujących bezpośrednio na skręcany element warstwowy. Pozioma para sił

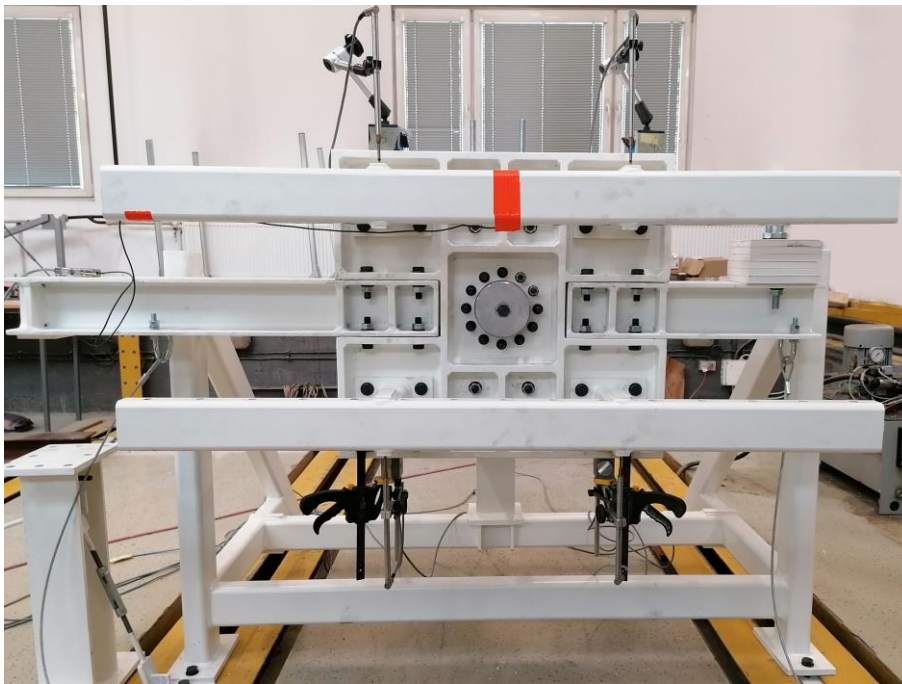
działa na badany element na stałym ramieniu e_{poz} , równym odległości między środkami ciężkości okładzin płyty warstwowej. Pomimo występującego w trakcie badania lokalnego wgniecenia okładzin w miejscu ich kontaktu z poziomymi ogranicznikami, położenie poziomych sił oddziałujących na element nie zmienia się w znaczący sposób. Ramię pionowej pary sił e_{pion} zmniejsza się sukcesywnie w trakcie trwania badania. Zmiana wartości ramienia e_{pion} wynika z zastosowania na podporze skręcanej płyty warstwowej powierzchniowych elementów dociskowych rozciągniętych na całą szerokość badanego elementu. Rdzeń płyty warstwowej ulega na podporze wgniataniu, które postępuje swobodnie od krawędzi płyty, ku jej środkowi. Przekłada się to w sposób bezpośredni na zmianę położenia wypadkowych sił pionowych oddziałujących na element. Zastosowane w stanowisku badawczym blachy dociskowe pozwalają rozłożyć efekt wgniecenia rdzenia płyty warstwowej na podporze na większą powierzchnię i uniknąć silnych, lokalnych wgniecen jakiego miałyby miejsce w przypadku zastosowania zbliżonych do punktowych, pionowych mocowań [2.4].

W trakcie realizacji badań laboratoryjnych kładziono duży nacisk na pełną kontrolę prowadzonego procesu badawczego. Prowadzono ciągłą obserwację pracy stanowiska polegającą między innymi na kontroli sztywności zamocowania badanych elementów. Pomimo tego, że materiał rdzenia płyty warstwowej jest stosunkowo podatny (w odniesieniu do sztywności zamocowania), na skutek oddziałującej wewnątrz układu pionowej pary sił, belki poprzeczne stanowiska zostały poddane rozpychaniu. Sztywność stanowiska w miejscu zamocowania w nim płyt warstwowych została laboratoryjnie określona jako relacja siły rozpychającej belki poprzecznej do ich przemieszczenia wywołanego tą siłą. Schemat badania sztywności stanowiska został przedstawiony na rys. 3.67.



Rysunek 3.67. Badanie sztywności tarczy stanowiska badawczego – schemat.

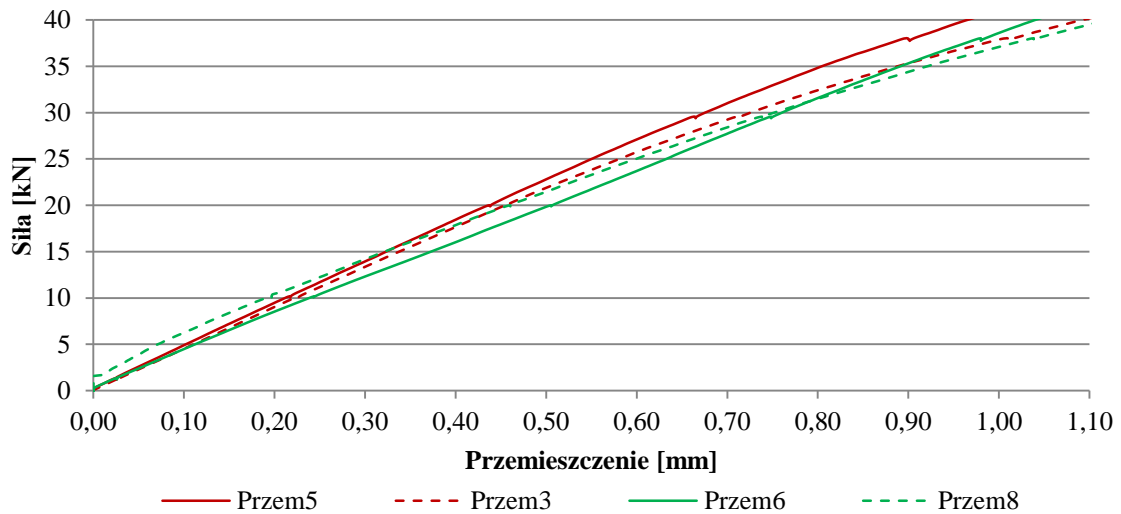
Na dolnej belce poprzecznej, w środkowej jej części, umieszczono siłownik hydrauliczny, za pomocą którego wprowadzono do badanego układu siłę rozpychającą. Pomiędzy tłokiem siłownika, a górną belką poprzeczną do pomiaru siły umieszczono siłomierz 1-C2/50KN klasy 0,1 w zakresie sił do 50,0 kN. Symetryczne wprowadzenie do wnętrza układu siły zapewniało równomierne rozpychanie obu belek poprzecznych stanowiska. Do pomiaru przemieszczeń wykorzystano czujniki indukcyjne 1-WA/50MM-T oraz 1-WA/100MM-T o zakresie znamionowym odpowiednio 50 mm i 100 mm. Czujniki przemieszczeń zostały umieszczone na korpusie tarczy obrotowej (rys. 3.68). Pomiaru przemieszczenia belek poprzecznych względem nieruchomej tarczy obrotowej dokonywano na każdej z belek, w dwóch miejscach, na skrajnych krawędziach tarczy stanowiska.



Rysunek 3.68. Badanie sztywności tarczy stanowiska badawczego.

W celu określenia sztywności stanowiska badawczego wykonano trzy próby rozpychania belek poprzecznych do momentu wskazania przez siłomierz siły o wartości 40 kN. Przykładowy zapis relacji siły rozpychającej do przemieszczenia belek stanowiska przedstawiono na wykresie na rys. 3.69. Kolorami czerwonym i zielonym oznaczono wyniki przemieszczenia odpowiednio dla górnej (czujniki: *Przem5* i *Przem3*) i dolnej (czujniki: *Przem6* i *Przem8*) belki poprzecznej stanowiska. W przeprowadzonym badaniu otrzymano zbliżone do siebie wyniki ze wszystkich czujników przemieszczeń. Wynika to z symetrycznego ustawienia czujników

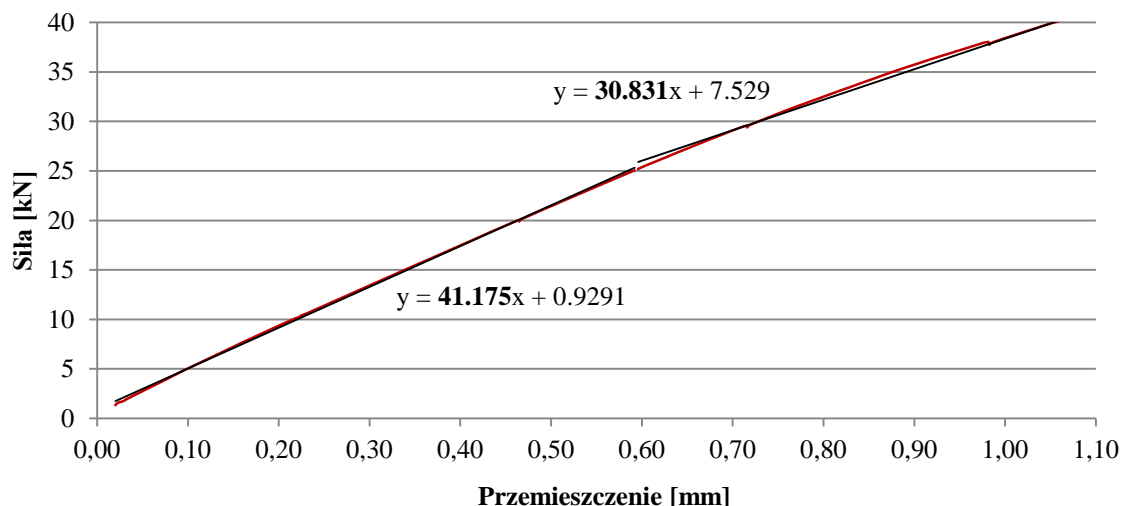
przemieszczeń na obu belkach względem siły rozpychającej oraz równego oddziaływania tej siły na obie belki.



Rysunek 3.69. Relacja siła rozporowa – przemieszczenie podczas próby sztywności stanowiska badawczego – zapis bezpośredni z próby.

Dzięki zastosowanej symetrii, w dalszych analizach posługiwano się średnią wartością przemieszczenia belek poprzecznych, obliczoną na podstawie wyników ze wszystkich czterech czujników przemieszczeń. W ten sposób, dla każdej z prób wykonano wykres uśrednionej relacji siły rozpychającej do przemieszczenia belek stanowiska. Na rys. 3.70 pokazano przykładową uśrednioną relację wykonaną dla tej samej próby, dla której szczegółowe wyniki zostały przedstawione na rys. 3.69. Kolorem czerwonym przedstawiono uśrednioną relację siły rozpychającej do przemieszczenia belek stanowiska, natomiast kolorem czarnym liniowe linie trendu próby. Z uwagi na zaobserwowane załamanie przebiegu wykresu przy wartości siły równej 25 kN, zdecydowano się na wyznaczenie wartości sztywności stanowiska dla dwóch przedziałów sił: od 0 kN do 25 kN oraz od 25 kN do 40 kN. Wartość sztywności stanowiska określono wykorzystując równanie liniowej linii trendu wyznaczonej dla każdego z zakresów. Średnie wartości sztywności stanowiska uzyskane ze wszystkich prób przedstawiają się następująco:

- dla zakresu sił rozpychających stanowisko 0 - 25 kN sztywność równa jest 41,76 kN/mm,
- dla zakresu sił rozpychających stanowisko 25 - 40 kN sztywność równa jest 30,63 kN/mm.



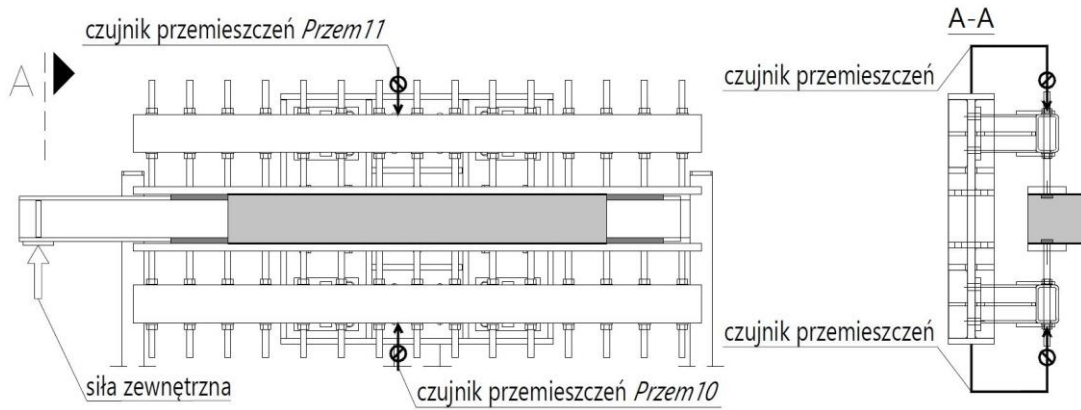
Rysunek 3.70. Relacja siła rozporowa – przemieszczenie podczas próby sztywności stanowiska badawczego – wynik uśredniony.

Wyznaczoną laboratoryjnie sztywność zamocowania uznano za wystarczającą, aby w dalszej kolejności uznawać wyniki otrzymane z badań skręcania paneli warstwowych za wartościowe.

3.2.5 Sztywność stanowiska – skręcanie paneli warstwowych

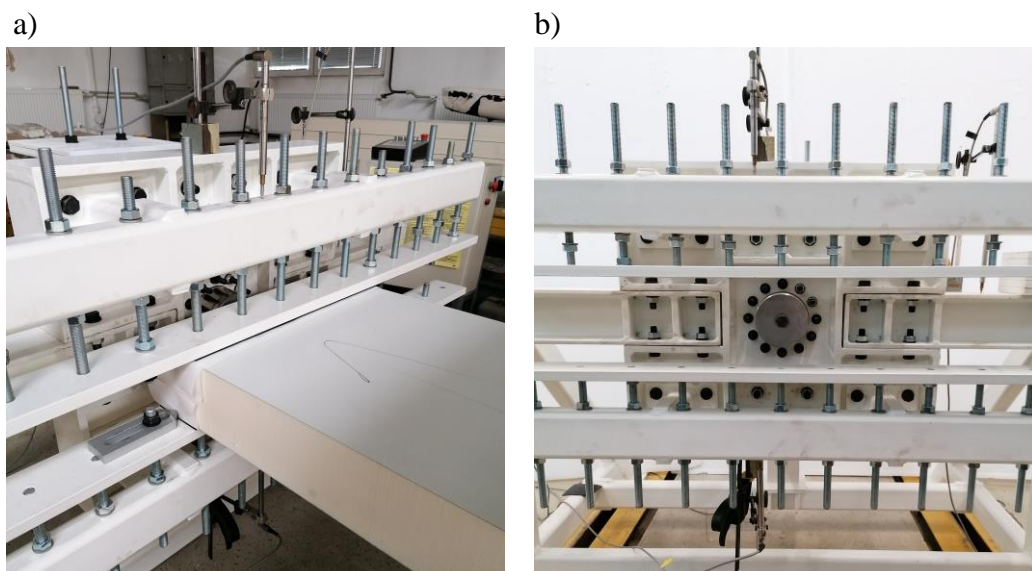
Uzupełnieniem prac dotyczących sztywności zamocowania skręcanych paneli warstwowych w stanowisku badawczym (rozdział 3.2.4) jest przedstawiona w tym rozdziale zbiorcza analiza dotycząca rozpychania belek stanowiska w trakcie realizacji badań skręcania płyt warstwowych. Szczegółowa analiza zasadniczych badań skręcania wraz z pełnym opisem oprzyrządowania stanowiska zostanie przedstawiona w rozdziale 3.3. W niniejszym rozdziale przedstawiono część danych z przeprowadzonych prób, bezpośrednio związanych z analizą rozpychania belek poprzecznych stanowiska.

Pomiaru przemieszczeń belek poprzecznych dokonano za pomocą czujników indukcyjnych 1-WA/20MM-T o zakresie znamionowym 20 mm. Czujniki zostały umieszczone na korpusie tarczy obrotowej (rys. 3.71). Pomiaru przemieszczenia belek względem ruchomej tarczy dokonywano na obu belkach, w ich środkowej części. Czujniki przemieszczeń zostały przesunięte o 50 mm względem środka belek, z uwagi na występowanie w tym miejscu prętów gwintowanych mocujących blachy dociskowe stanowiska w belkach poprzecznych (rys. 3.72). Dzięki wzajemnemu obrotowi tarczy stanowiska oraz zamocowanym na niej czujnikom przemieszczeń, otrzymane z badań wyniki stanowiły bezpośrednią informację o rozpychaniu belek stanowiska.



Rysunek 3.71. Lokalizacja czujników przemieszczeń na tarczy obrotowej w trakcie trwania badań zasadniczych – schemat.

Badania laboratoryjne paneli warstwowych o zmiennej szerokości skutkowały zmiennym położeniem wypadkowych sił pionowych oddziałujących na belki poprzeczne stanowiska. Mając ten fakt na uwadze, interpretując wyniki, zastosowano przede wszystkim podejście jakościowe. Celem prowadzonych analiz było pogłębienie wiedzy na temat wzajemnego oddziaływania na siebie stanowiska badawczego i badanych paneli warstwowych. Zbyt duże odkształcenia belek poprzecznych stanowiska mogłyby doprowadzić do niekontrolowanego sposobu przekazania sił ze stanowiska na skręcany element warstwowy. Mogłoby to spowodować znaczne odstępstwa od założonego programu badań i utrudnić interpretację wyników.



Rysunek 3.72. Lokalizacja czujników przemieszczeń na tarczy obrotowej w trakcie trwania badań zasadniczych: a) stanowisko w trakcie badania, b) stanowisko przed badaniem.

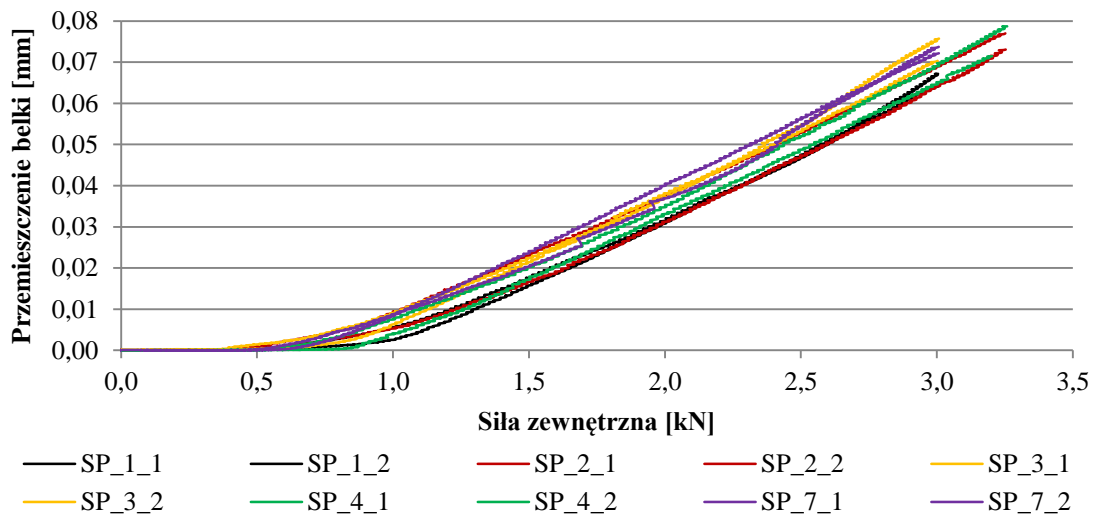
Analizowano zachowanie stanowiska w trakcie badania płyt warstwowych o wysokościach 120 mm i 160 mm oraz szerokościach 1000 mm i 500 mm. Schematy statyczne do analizy skręcania swobodnego oraz skrupowanego przyjęte w programie badań zasadniczych zakładają takie same warunki zamocowania paneli warstwowych w stanowisku badawczym (na podporze ruchomej). Z tego względu, wyniki rozpychania belek poprzecznych stanowiska otrzymane z prób obu rodzajów skręcania interpretowano wspólnie, w ramach jednej serii badawczej. Głównym rozgraniczeniem dzielącym wszystkie badane płyty na serie badawcze był przekrój poprzeczny skręcanej płyty warstwowej. W tab. 3.13 zestawiono wszystkie analizowane serie wraz z przypisanym do serii numerem rysunku, na którym pokazane zostały za pomocą wykresów relacje przemieszczenia belek poprzecznych stanowiska do siły zewnętrznej obciążającej stanowisko. Z uwagi na symetryczną budowę układu pomiarowego względem skręcanych elementów, przedstawione na wykresach wyniki opisują średnią wartość przemieszczenia górnej i dolnej belki stanowiska. W ostatniej kolumnie tab. 3.13 rozpisano nazwy próbek laboratoryjnych, które zostały umieszczone na wykresach. Każda z próbek była obciążana dwukrotnie. Na przedstawionych wykresach dodatkowa, ostatnia cyfra w nazwach próbek oznacza numer wykonanej próby obciążenia.

Tabela 3.13. Zestawienie próbek dla których dokonywano pomiaru sztywności tarczy obrotowej.

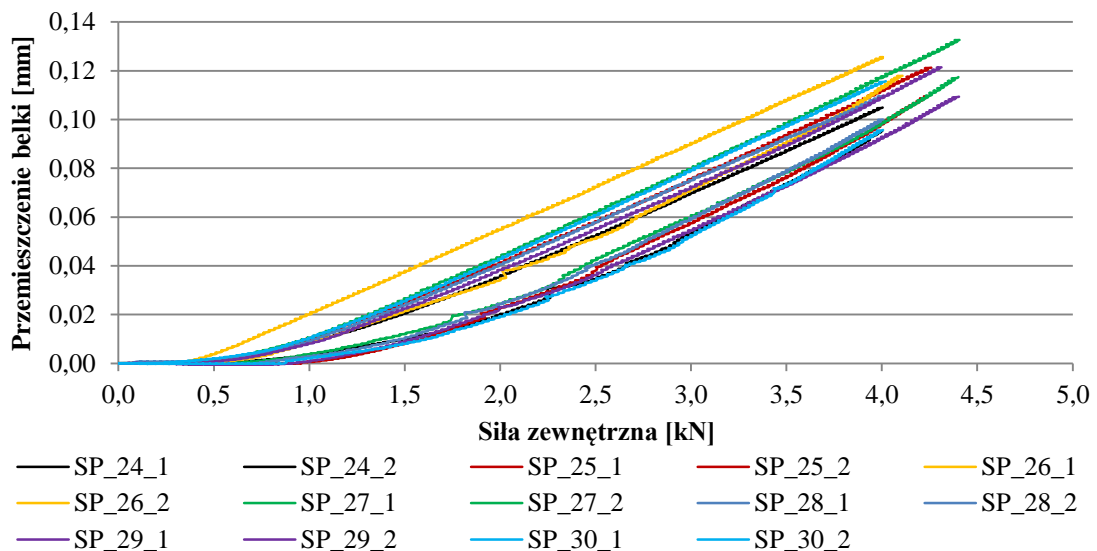
Nr rys.	Wysokość / szerokość płyty [mm]	Rodzaj skręcania	Skrócona nazwa próbki
Rys. 3.73	120 / 1000	swobodne	SP_1, SP_3, SP_7
		skrupowane	SP_2, SP_4
Rys. 3.74	160 / 1000	swobodne	SP_24, SP_26, SP_28, SP_30
		skrupowane	SP_25, SP_27, SP_29
Rys. 3.76	120 / 500	swobodne	SP_8, SP_9, SP_12, SP_13
		skrupowane	SP_10, SP_11, SP_14, SP_15
Rys. 3.77	160 / 500	swobodne	SP_31, SP_32, SP_35, SP_36
		skrupowane	SP_33, SP_34, SP_37, SP_38

Pomimo tego, że wyniki przemieszczeń belek poprzecznych stanowiska w trakcie trwania badania skręcania paneli warstwowych dla płyt o szerokości 1000 mm zostały przedstawione osobno na rys. 3.73 i rys. 3.74, odpowiednio dla płyt o wysokości

120 mm i 160 mm, można te wyniki interpretować wspólnie. Po nałożeniu na siebie obu wykresów, wszystkie krzywe zachowują się w podobny sposób. Wyraźna różnica między omawianymi seriami badawczymi wynika jednak z wartości granicznych, do których była prowadzona próba skręcania paneli warstwowych. Płyty o wysokości 160 mm są płytami sztywniejszymi i stawiają one stanowisku badawczemu większy opór, stąd maksymalne siły jakie zarejestrowano w próbach skręcania tych płyt są wyższe w odniesieniu do płyt o wysokości 120 mm.



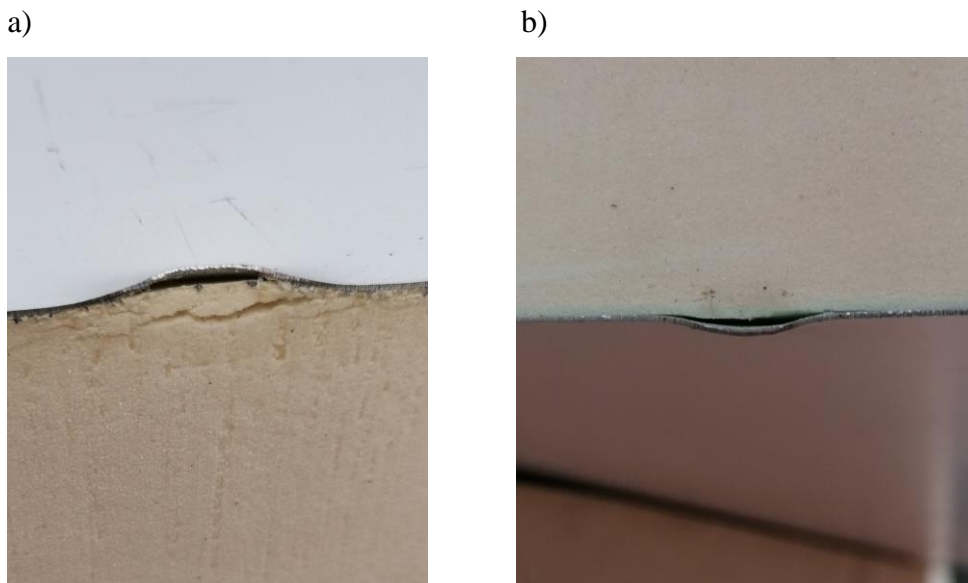
Rysunek 3.73. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 120 mm i szerokości 1000 mm w stanowisku.



Rysunek 3.74. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 160 mm i szerokości 1000 mm w stanowisku.

W przypadku obu serii badawczych, w pierwszej fazie obciążenia stanowiska zewnętrzną siłą mimośrodową, do osiągnięcia wartości siły na poziomie 0,75 kN, nie

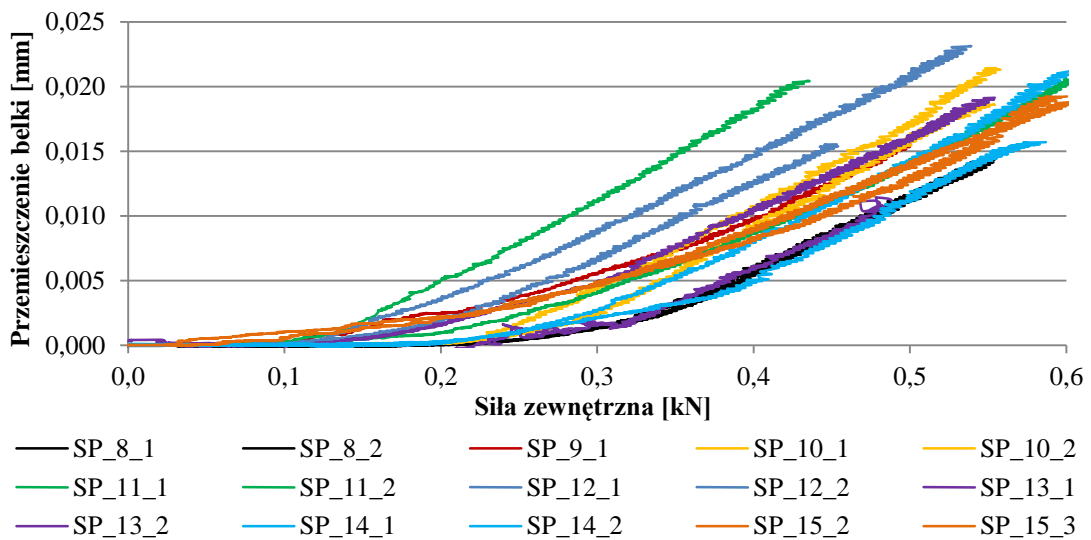
zaobserwowano wyraźnego początku rozpychania belek poprzecznych stanowiska. Do momentu osiągnięcia na podporze badanego elementu momentu skręcającego na poziomie 0,75 kNm skręcany panel warstwowy obciążony jest przede wszystkim poziomą parą sił. Podatność rdzenia płyty warstwowej sprawia, że poziome ograniczniki będące w bezpośrednim kontakcie ze stalowymi okładzinami płyty przekazują na badany element większość siły generowanej przez mimośrodową siłę zewnętrzną. Dzieje się tak do momentu, w którym następuje początek wgniatania się poziomych ograniczników w okładziny paneli warstwowych (rys. 3.75). Lokalnie postępujące w płaszczyźnie okładzin wgniecenie sprawia, że część momentu skręcającego badany element zaczyna być przekazywana na płytę warstwową, także poprzez pionową parę sił. Tożsame jest to z początkiem rozpychania belek poprzecznych stanowiska badawczego, co zaobserwować można na obu wykresach. W dalszej kolejności, wraz ze wzrostem obciążenia zewnętrznego działającego na stanowisko badawcze, następuje zbliżony do liniowego przyrost przemieszczenia belek. Maksymalne wartości rozepchnięcia belek poprzecznych stanowiska są stosunkowo niskie, nie przekraczają wartości 0,14 mm. Małe odkształcenia belek poprzecznych zapewniają stabilny sposób przekazania sił na skręcany element warstwowy. Uzyskane wyniki świadczą o odpowiedniej pracy stanowiska i obrazują sposób przekazywania na badane panele warstwowe sił generujących skręcanie.



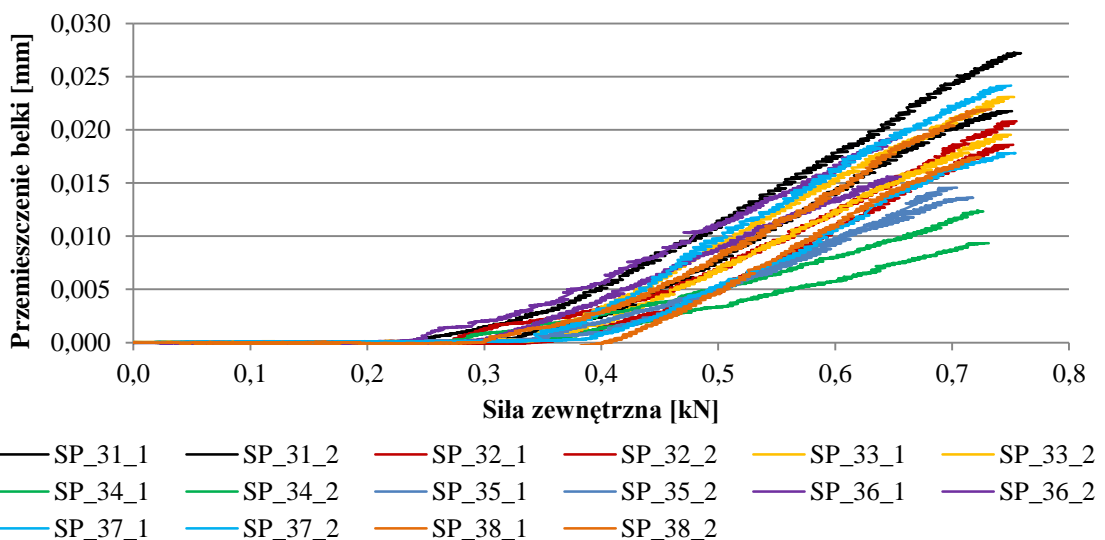
Rysunek 3.75. Wgniecenie okładziny na podporze spowodowane dociskiem poziomego ogranicznika:

a) górna okładzina, b) dolna okładzina.

W podobny sposób przedstawiono wyniki przemieszczeń belek poprzecznych stanowiska w trakcie skręcania paneli warstwowych o szerokości 500 mm. Wyniki dla płyt o wysokości 120 mm przedstawiono na rys. 3.76. Dla płyt o wysokości 160 mm wykonano odrębny rysunek (rys. 3.77). Otrzymane wyniki przedstawiają ten sam efekt zachowania się podpory skręcanych paneli warstwowych, jaki zaobserwowano w przypadku płyt o szerokości 1000 mm. W początkowej fazie skręcania paneli warstwowych decydujące znaczenie w obciążaniu badanego elementu odgrywa pozioma para sił. W momencie rozpoczęcia wgniatania poziomych ograniczników w okładziny część sił skręcających panel warstwowy rozpoczyna być przekazywana przez pionową parę sił.



Rysunek 3.76. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 120 mm i szerokości 500 mm w stanowisku.



Rysunek 3.77. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 160 mm i szerokości 500 mm w stanowisku.

Istotną różnicą między analizami płyt warstwowych o szerokości 1000 mm i 500 mm jest moment włączenia się do pracy pionowej pary sił. W przypadku płyt o szerokości 1000 mm, gdzie maksymalny moment generowany przez stanowisko wynosił 4,0 kNm, nie zaobserwowano wyraźnej różnicy między płytami o wysokości 120 mm i 160 mm. Za moment włączenia się do pracy pionowej pary sił uznano punkt, w którym mimośrodowa siła zewnętrzna osiąga wartość 0,75 kN. W przypadku płyt o szerokości 500 mm widać wyraźną różnicę w momencie, do którego obciążenie przekazywane jest na skręcany element tylko przez poziomą parę sił. W przypadku płyt o wysokości 120 mm jest to moment, w którym obciążająca siła zewnętrzna osiąga wartość 0,20 kN, natomiast w przypadku płyt o wysokości 160 mm wartość 0,35 kN. Różnica ta wynika wprost z wartości ramienia poziomej pary sił, która w przypadku płyt wyższych jest o ponad 30% większa w odniesieniu do płyt o wysokości 120 mm. Odporność na lokalne wgniecenie okładzin generowane przez poziome ograniczniki jest, co do wartości dla obu płyt, na podobnym poziomie. Dzięki większej wartości ramienia poziomej pary sił, płyty warstwowe o wysokości 160 mm będą w stanie przenieść poprzez poziomą parę sił większą wartość momentu. Jest to równoważne z późniejszym (na wykresie) włączeniem się do współpracy pionowej pary sił. Efektu tego nie widać w tak czysty sposób w przypadku płyt o szerokości 1000 mm, jednak trudno założyć, że w ogóle nie miał tam miejsca. Warto podkreślić, że wartości sił wymuszających w przypadku płyt szerszych są o rząd wielkości wyższe, dlatego nie można tych danych porównywać ze sobą w sposób bezpośredni. Należy założyć, że opisywany efekt wystąpił w przypadku skręcania wszystkich paneli warstwowych. Jednak, z uwagi na różnicę w maksymalnych wartościach sił wymuszających, został mniej lub bardziej wyeksponowany na opisanych wykresach.

3.2.6 Badanie kalibracyjne

Przed wykonaniem zasadniczych badań skręcania paneli warstwowych poddano weryfikacji poprawność działania autorskiego stanowiska badawczego. W ramach zrealizowanego badania pilotażowego przeprowadzono:

- badanie ściskania fragmentu rury okrągłej RO 88,9/3,2, celem którego było określenie modułu sprężystości stali gatunku S355J2, z którego wykonana została rura (rys. 3.78),

- badanie skręcania belki stalowej wykonanej z rury okrągłej RO 88,9/3,2, celem którego było laboratoryjne wyznaczenie sztywności skrętnej badanego elementu (rys. 3.79).

Pełny proces weryfikacji polegał na porównaniu sztywności skrętnej GI_{T-RO} skręcanej belki wyznaczonej z badania laboratoryjnego (L) ze sztywnością obliczoną analitycznie (A). Wyboru materiału oraz przekroju poprzecznego belki do badania kalibracyjnego dokonano kierując się oczekiwaną prostotą w interpretacji otrzymanych wyników. Analizowana belka została wykonana ze stali konstrukcyjnej, która cechuje się prostotą w obróbce (łatwość wykonania elementu badawczego) oraz zadawalającym poziomem jednorodności parametrów wytrzymałościowych. Przekrój poprzeczny belki ma kształt rury okrągłej, która nie ulega deplanacji podczas próby skręcania.

Obliczenia analityczne sztywności skrętnej $GI_T^{(A)}-RO$ przekroju poprzecznego analizowanej belki wykonano na podstawie pomierzonych wymiarów geometrycznych rury okrągłej, z której wykonany został element. Pomiaru geometrii dokonano na dwóch odcinkach rury, o długościach 200 mm każdy, które, jako próbki do badań materiałowych, dostarczono wraz z belką. Po określeniu parametrów geometrycznych, fragmenty rury zostały poddane próbie ściskania w celu określenia modułu sprężystości podłużnej materiału próbki. Rura okrągła, z której wykonano analizowaną belkę została wyprodukowana w tolerancjach zgodnych z normą [N-6], opisującą kształtowniki zamknięte ze stali konstrukcyjnych. Pomimo dopuszczenia przez normę [N-6] znacznych tolerancji grubości ścianki rury (- 12,5% / + 8,0%), w przeprowadzonych obliczeniach analitycznych założony został wyidealizowany kształt przekroju poprzecznego, w postaci okrągłego pierścienia. Tolerancja wymiaru średnicy zewnętrznej rury konstrukcyjnej jest znacznie mniejsza, równa $\pm 1\%$. Do obliczeń momentu bezwładności przekroju poprzecznego przy skręcaniu przyjęto, że przekrój poprzeczny o średnicy zewnętrznej D_{RO} ma stałą grubość ścianki t_{RO} na całym obwodzie. Pomiaru średnicy zewnętrznej dokonano na obu próbkach, w czterech punktach równomiernie rozłożonych po długości elementu (łącznie osiem pomiarów). Grubość ścianki została pomierzona na obu końcach odcinków rur, w czterech punktach równomiernie rozłożonych po obwodzie przekroju rury (łącznie szesnaście pomiarów). Na podstawie dokonanych pomiarów, do dalszych obliczeń przyjęto średnie wartości pomierzonych parametrów obliczone ze wszystkich pomiarów. Średnicę zewnętrzną D_{RO} przekroju pierścieniowego przyjęto równą 88,50 mm. Grubość ścianki t_{RO} równą 3,41 mm. W tym miejscu należy podkreślić, że zarówno wymiar średnicy zewnętrznej

rury, jak i grubość jej ścianki mieszczą się w tolerancjach produkcyjnych odniesionych do katalogowych wymiarów rury: średnica zewnętrzna równa 88,90 mm, grubość ścianki równa 3,20 mm. Moment bezwładności przy skręcaniu przekroju rury okrągłej I_{T-RO} został wyznaczony za pomocą poniższego równania [33]:

$$I_{T-RO} = \frac{\pi}{32} \cdot (D_{RO}^4 - d_{RO}^4), \quad (3.22)$$

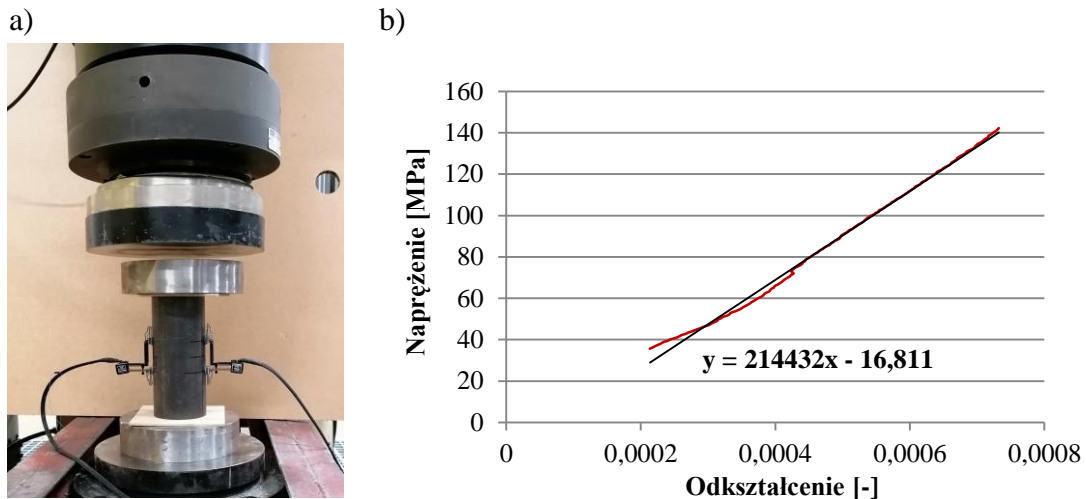
gdzie symbolem d_{RO} oznaczono średnicę wewnętrzną przekroju pierścieniowego, która równa jest średnicy zewnętrznej D_{RO} pomniejszonej o dwukrotną grubość ścianki t_{RO} .

Moduł sprężystości poprzecznej rury okrągłej G_{RO} wyznaczono stosując równanie (3.23):

$$G_{RO} = \frac{E_{RO}}{2 \cdot (1 + \nu_{RO})}, \quad (3.23)$$

które dla materiałów izotropowych wiąże go w stałą relację z modułem sprężystości podłużnej E_{RO} oraz współczynnikiem Poissona ν_{RO} . Moduł sprężystości podłużnej E_{RO} został wyznaczony laboratoryjnie, natomiast współczynnik Poissona ν_{RO} przyjęto na poziomie 0,3.

Laboratoryjne wyznaczenie modułu sprężystości podłużnej rury okrągłej E_{RO} wykonano realizując próbę jednoosiowego ściskania fragmentu rury na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8505, z siłomierzem klasy 0,5 w zakresie sił do 2000 kN. Tempo badania sterowane było przyrastającym naprężeniem na poziomie 6,0 MPa/s. Próbka obciążana była do momentu osiągnięcia wartości średnich naprężeń ściskających na poziomie 200 MPa. Wartości skrócenia próbki odczytywane były za pomocą dwóch ekstensometrów INSTRON o bazach pomiarowych równych 50 mm każdy. Ekstensometry zostały zamocowane na próbce rury okrągłej po przeciwległych względem siebie stronach. Ustawienie opomiarowanej próbki w maszynie wytrzymałościowej przed rozpoczęciem badania przedstawiono na rys. 3.78a.



Rysunek 3.78. Badanie materiałowe próbki do badania kalibracyjnego:

a) próbka laboratoryjna, b) relacja napężenie-odkształcenie badanej próbki laboratoryjnej.

Z uwagi na nieregularną budowę rury okrągłej, skomplikowanym zadaniem było ustawienie próbki w maszynie wytrzymałościowej w taki sposób, aby w jej środkowej części wywołać efekt jednoosiowego ściskania. Dokonując obciążenia wstępnego próbki na poziomie 5 MPa założono, że różnica w skróceniu elementu między wskazaniami pomiędzy dwoma ekstensometrami nie może być większa niż 10%. Pomimo odpowiedniego przygotowania powierzchni końcowych fragmentów rury oraz zastosowania talerzy pośrednich o płaskich powierzchniach zadanie to, w takiej formie okazało się niewykonalne. Bardzo duża wrażliwość ustawienia próbki wewnątrz szczęk maszyny wytrzymałościowej powodowała występowanie dużych różnic skrócenia próbki na obu opomiarowanych ściankach. W celu zniwelowania lokalnych koncentracji naprężeń wynikających z nieidealnych warunków przekazania sił pomiędzy maszyną wytrzymałościową i badaną próbką zdecydowano się na zastosowanie dodatkowych, podatnych przekładek wykonanych ze sklejki. Pozwoliło to na bardziej równomierny rozkład sił na konturze rury i uzyskanie wymaganego poziomu zgodności pomiędzy wartościami odczytywanymi z zamocowanych do próbki ekstensometrów. Na wykresie przedstawionym na rys. 3.78b zaprezentowano relację średniego naprężenia ściskającego próbkę do średniego odkształcenia (średnia z obu ekstensometrów) przy ściskaniu. Moduł sprężystości próbki określono z zakresu naprężeń średnich od 35,5 MPa do 142 MPa, co stanowi odpowiednio 10% i 40% teoretycznej granicy plastyczności stali gatunku S355J2, z którego została wykonana rura stalowa. Na wykresie linią czerwoną oznaczono bezpośredni zapis wyników uzyskanych z maszyny wytrzymałościowej, a linią czarną naniesiono liniową linię

trendu próby. Dla tak przygotowanego wykresu odczytano kąt pochylenia liniowej linii trendu, którego tangens równy jest wartości modułu sprężystości podłużnej badanej próbki. Rezultatem zrealizowanych badań jest wartość modułu sprężystości odniesiona do całkowitego przekroju poprzecznego rury E_{RO} równa 214,43 GPa, ze współczynnikiem determinacji dla równania regresji równym 0,9957.

Do wyników z przeprowadzonego badania należy podchodzić z należytą ostrożnością. Trzeba jasno podkreślić, że:

- określony laboratoryjnie moduł sprężystości podłużnej jest obarczony błędem z uwagi na wrażliwość ustawienia próbki wewnątrz szczęk maszyny wytrzymałościowej (wprowadzenie do układu stanu jednoosiowego ściskania) oraz jakość przygotowanych powierzchni kontaktowych,
- norma konstrukcyjna, zgodnie z którą wykonany jest element stalowy dopuszcza odchyłki przekroju poprzecznego na stosunkowo wysokim poziomie, co przekłada się na znaczną zmienność przekroju poprzecznego na długości badanego elementu i zaburza stan jednoosiowego ściskania,
- poddane próbie jednoosiowego ściskania zostały dwie próbki rury.

Celem badania było wykluczenie występowania grubych błędów w prowadzonej analizie kalibracji stanowiska badawczego. Pomimo opisanych wyżej niedoskonałości przeprowadzonej próby, uznano postawiony zadaniu cel za osiągnięty i do dalszych analiz przyjęto moduł sprężystości podłużnej rury okrągłej E_{RO} jako średnią wartość z przeprowadzonych prób równą 215,44 GPa.

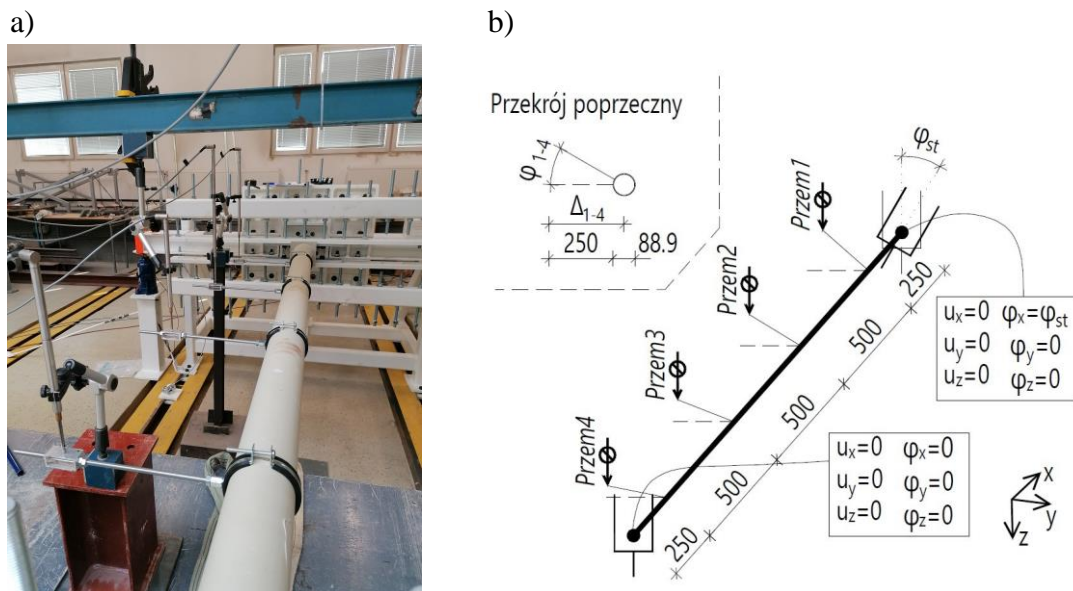
Podstawiając do równania (3.23) dane liczbowe, wyznaczono wartość modułu sprężystości poprzecznej rury okrągłej G_{RO} :

$$G_{RO} = \frac{215\,440}{2 \cdot (1+0,3)} = 82\,861 \text{ MPa.} \quad (3.24)$$

Wyznaczona w opisany sposób analityczna sztywność skrętna $GI_T^{(A)}_{RO}$ przekroju poprzecznego skręcanej belki stalowej osiąga wartość równą 136,94 kNm².

Laboratoryjne wyznaczenie sztywności skrętniej $GI_T^{(L)}_{RO}$ przekroju poprzecznego belki wykonano realizując próbę skręcania analizowanego elementu. Stalowa belka została zamocowana na jednym swoim końcu na podporze nieruchomej, na której zostały zablokowane jej wszystkie stopnie swobody. Drugi koniec belki zamocowano w autorskim stanowisku badawczym. Na podporze ruchomej – obrotowej zostały

zablokowane możliwości przesuwu belki po wszystkich trzech kierunkach oraz obroty wokół osi y i z . Obrót belki na podporze wokół osi x tożsamy był z obrotem tarczy stanowiska badawczego. W ten sposób wprowadzano do układu podporowy moment skręcający. Widok badanego elementu umieszczonego w stanowisku badawczym oraz schemat badania został przedstawiony na rys. 3.79.



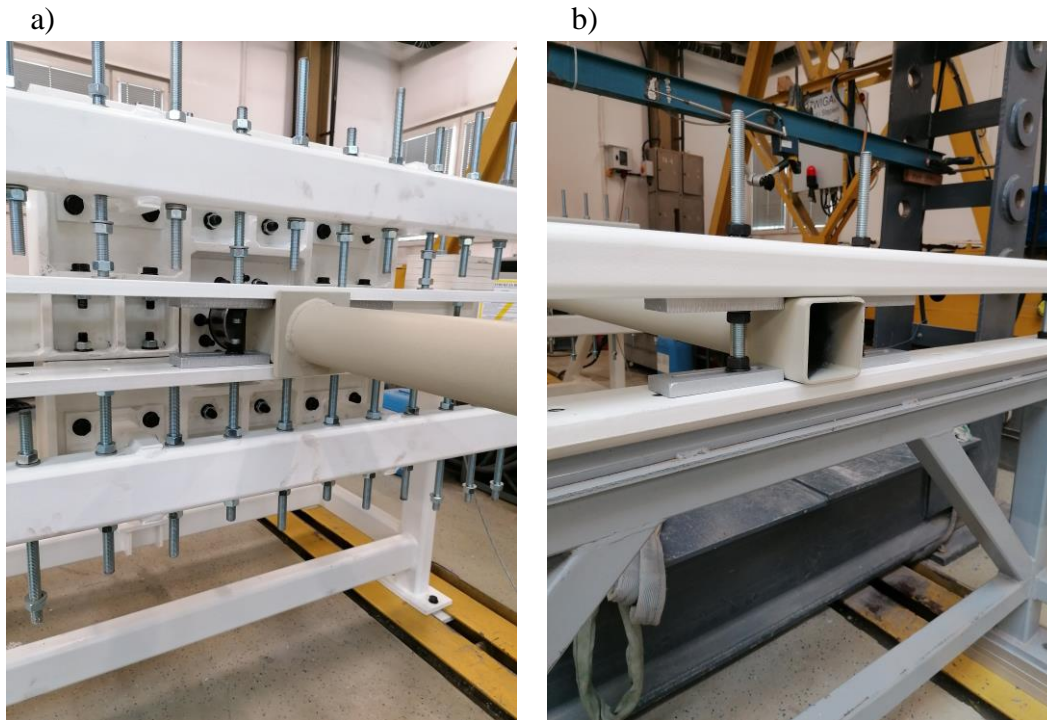
Rysunek 3.79. Badanie kalibracyjne skręcania rury okrągłej:

a) próbka laboratoryjna, b) schemat badania.

W opisywanej próbie skręcania mierzono względne przyrosty kąta obrotu na długości badanego elementu, w odniesieniu do względnego przyrostu siły generującej obrót. Pomiaru obrotu belki w zdefiniowanym punkcie na długości elementu dokonano pośrednio za pomocą pomiaru przemieszczenia punktu oddalonego od osi obrotu (sztywno z nią związaną) o znaną odległość. Na długości skręcanej próbki w równych rozstawach ustawione zostały czujniki przemieszczeń, które mierzyły przemieszczenia pionowe punktów odsuniętych od lica rury o wartość 250 mm. W chwili początkowej wszystkie punkty pomiarowe znajdowały się w pozycji poziomej. Pomiaru przemieszczeń dokonano za pomocą czujników indukcyjnych 1-WA/50MM-T oraz 1-WA/100MM-T, o zakresie znamionowym odpowiednio 50 mm i 100 mm.

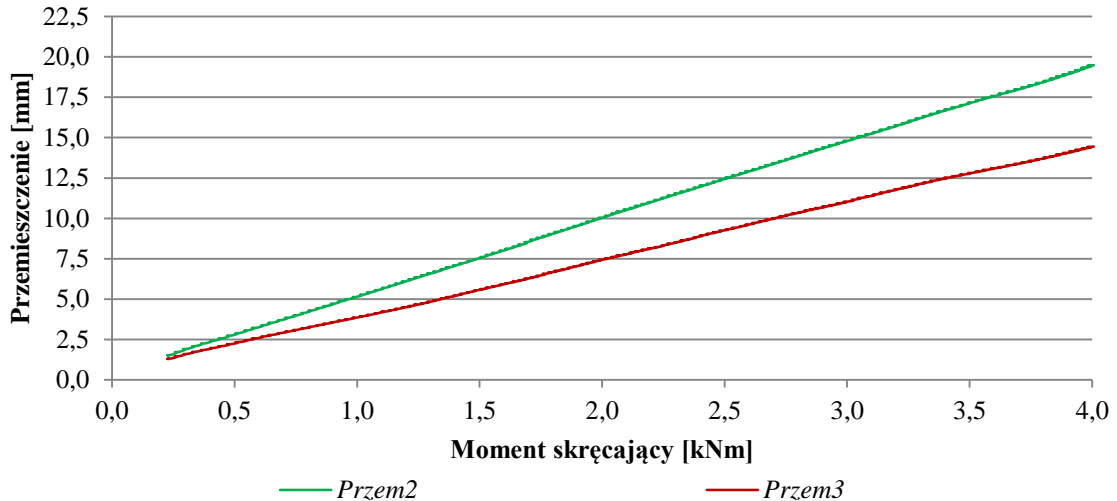
W celu odpowiedniego zamocowania na podporach belki o przekroju okrągłym, na obu jej końcach zastosowane zostały dodatkowe elementy transmisyjne o zmienionym przekroju poprzecznym. Poprzez zastosowanie pośredniej blachy czołowej połączonej z rurą okrągłą, za pomocą obwodowej spiny pachwinowej, na

końcach belki zostały dospawane odcinki rury kwadratowej o długości 120 mm i wymiarze boku równym 100 mm. Skręcana belka stalowa, zakończona kwadratowym przekrojem poprzecznym, została dociśnięta na podporze za pomocą elementów blokujących możliwość jej przesuwu względem podpory zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym. Mocowanie skręcanej belki na obu podporach zostało przedstawione na rys. 3.80.



Rysunek 3.80. Zamocowanie rury okrągłej na podporze: a) ruchomej - obrotowej, b) nieruchomej.

Pierścieniowy przekrój poprzeczny skręcanej belki nie ulega deplanacji [33]. Przyjęto, że w wewnętrznej części belki, w odpowiedniej odległości od podpór, które mogą generować lokalne zaburzenia, dochodzi do jej czystego skręcania. Konsekwentnie, pomimo ustawienia na długości elementu czterech czujników przemieszczeń, w dalszej analizie korzystano tylko z wyników zapisanych dla czujników wewnętrznych: *Przem2* i *Przem3*. Na rys. 3.81 przedstawiono relację przemieszczenia pionowego punktów zlokalizowanych w wewnętrznej części belki do momentu skręcającego generującego obrót elementu. Przedstawione wyniki obrazują płynny (liniowy) przyrost wartości przemieszczeń punktów pomiarowych wraz ze wzrostem wartości obciążenia.



Rysunek 3.81. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej rury okrągłej.

Kąty obrotu przekroju poprzecznego skręcanej belki w punktach 2 i 3 (rys. 3.79b) oznaczono symbolami odpowiednio φ_2 oraz φ_3 . Na podstawie znanych wartości przemieszczeń pomierzonych czujnikami *Przem2* oraz *Przem3*, wartości kątów obrotu w analizowanych punktach można wyznaczyć korzystając z poniższych zależności:

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{w_2}{\Delta_2} \right), \\ \varphi_3 &= \tan^{-1} \left(\frac{w_3}{\Delta_3} \right),\end{aligned}\tag{3.25}$$

gdzie symbolem w_i oznaczono wartość przemieszczenia pomierzonego i -tym czujnikiem, natomiast symbolem Δ_i odległość punktu pomiarowego i -tego czujnika względem osi obrotu skręcane elementu. Przy stałej wartości obciążenia skręcającego przyrost kąta obrotu między punktami 2 i 3 odniesiony do odległości między tymi punktami Δx , określa się jako jednostkowy kąt skręcania:

$$\theta_{2-3} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\Delta x}.\tag{3.26}$$

Relację wartości momentu skręcającego M_T i jednostkowego kąta skręcania można zapisać z wykorzystaniem sztywności skrętej GI_T za pomocą poniższej zależności:

$$\theta_{2-3} = \frac{M_T}{GI_T}.\tag{3.27}$$

Przekształcając równanie (3.27) oraz wprowadzając do niego dodatkowy symbol Δ określający w sposób uogólniony przyrost danej wartości, otrzymano:

$$GI_T = \frac{\Delta M_T}{\Delta \theta_{2-3}}. \quad (3.28)$$

Równanie (3.28) należy interpretować jak niżej:

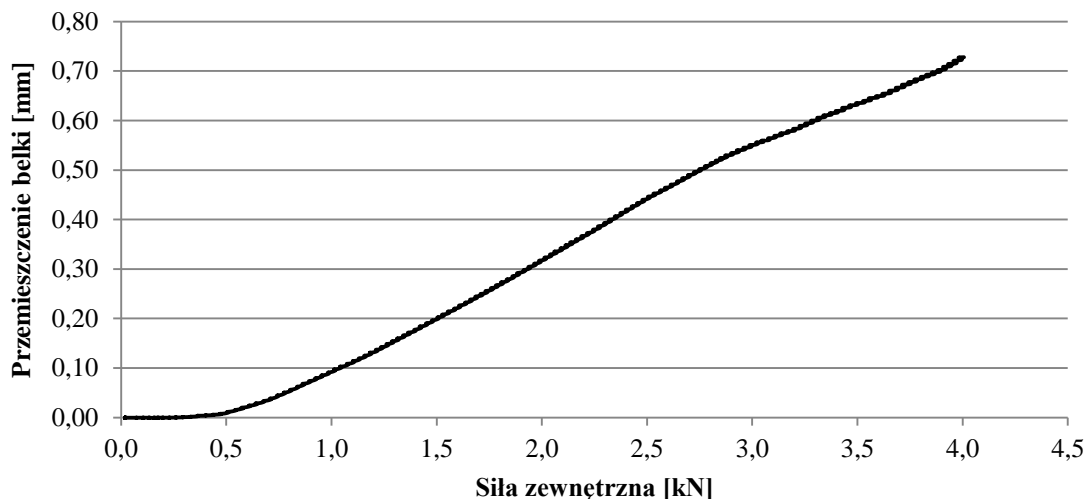
- przyrostowi wartości momentu skręcającego ΔM_T towarzyszy przyrost jednostkowego kąta skręcania $\Delta \theta_{2-3}$,
- iloraz przyrostu wartości momentu skręcającego i jednostkowego kąta skręcania jest wartością sztywności skrętnej skręcanego elementu,
- korzystając z danych umieszczonych na rys. 3.81 oraz równań od (3.25) do (3.28), na podstawie dowolnie przyjętego przyrostu wartości momentu skręcającego można obliczyć wartość sztywności skrętnej badanej belki.

Korzystając z powyższego wyprowadzenia, laboratoryjnie wyznaczona sztywność skrętna $GI_T^{(L)}-RO$ przekroju poprzecznego skręcanej belki stalowej osiąga wartość równą $124,93 \text{ kNm}^2$. Różnica względna pomiędzy sztywnością skrętą obliczoną analitycznie, a tą wyznaczoną laboratoryjnie wynosi:

$$\frac{GI_T^{(A)}-RO - GI_T^{(L)}-RO}{GI_T^{(A)}-RO} = \frac{136,94 - 124,93}{136,94} = 9,61\%. \quad (3.29)$$

Otrzymany w ramach przeprowadzonych prac kalibracyjnych stanowiska poziom zgodności pomiędzy obliczeniami analitycznymi, a badaniem laboratoryjnym uznano za satysfakcjonujący z uwagi na znane (opisane we wcześniejszej części rozdziału) niedoskonałości przeprowadzonych badań materiałowych i znaczne tolerancje geometryczne badanych próbek. Badanie to potwierdziło możliwość stosowania autorskiego stanowiska badawczego do realizacji badań skręcania paneli warstwowych.

W trakcie prowadzonych badań pilotażowych opisanych w niniejszym rozdziale, dodatkowo wykonana została analiza rozpychania belek stanowiska na obrotowej podporze skręcanej belki stalowej. Metodologia prowadzonych obserwacji była taka sama jak w przypadku realizacji zasadniczych badań skręcania paneli warstwowych (rozdział 3.2.5). Istotną zaobserwowaną różnicą są wartości przemieszczeń belek stanowiska podczas skręcania belki stalowej. Na rys. 3.82 przedstawiono wyniki przemieszczeń belek poprzecznych w trakcie trwania badania skręcania belki stalowej.



Rysunek 3.82. Sztywność zamocowania rury okrągłej w stanowisku.

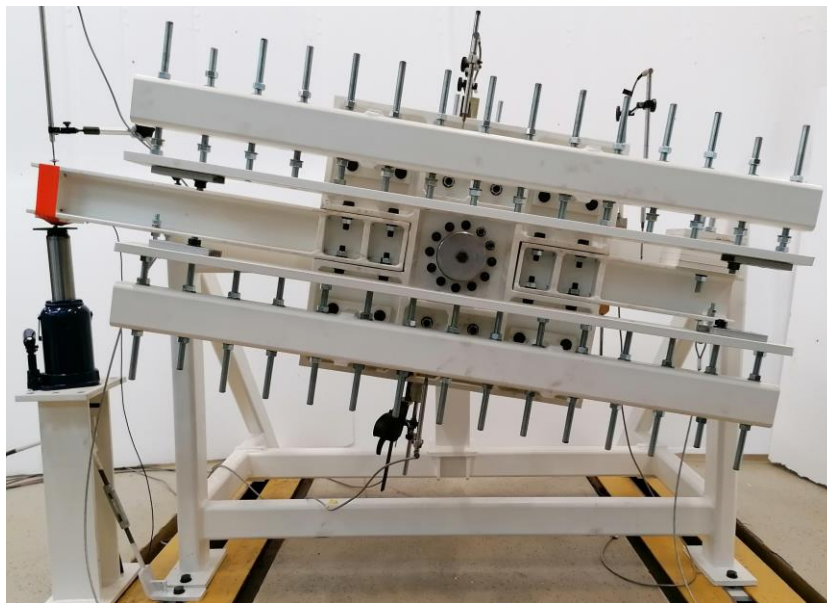
W przypadku skręcania płyt warstwowych, przy wartości generowanego przez stanowisko badawcze momentu skręcającego na poziomie 4,0 kNm, wartość rozpychania belek stanowiska nie przekraczała 0,15 mm. Podczas skręcania belki stalowej (mocowanej na podporze poprzez transmisyjny fragment rury kwadratowej), przy tej samej wartości momentu skręcającego belki, stanowiska przemieściły się o wartość 0,70 mm. Tak duża różnica w wartościach rozpychania belek poprzecznych stanowiska wynika przede wszystkim z dwóch czynników:

- znacznie większej sztywności na podporze skręcanej rury stalowej w odniesieniu do badanych paneli warstwowych,
- znacznie mniejszej wartości ramienia pionowej pary sił w przypadku badania rury stalowej związanej z gabarytem przekroju podporowego badanego elementu, co z kolei przekłada się na znacznie większe wartości pionowych sił rozpychających belki stanowiska.

Wykonana analiza pozwoliła kontrolować zachowanie stanowiska w trakcie trwania próby skręcania. Dodatkowo wykazano, że za pomocą autorskiego stanowiska badawczego w bezpieczny sposób można wykonywać próby skręcania nie tylko podatnych w obrębie podpory elementów, ale także tych relatywnie sztywnych. Podsumowując, sztywność podporowa badanych elementów przekłada się w sposób bezpośredni na wewnętrzne zachowanie się stanowiska badawczego podczas realizowanej próby skręcania. Nie wpływa jednak negatywnie na prowadzone analizy skręcania badanych elementów.

3.3. Badanie skręcania paneli warstwowych

W ramach realizacji badań skręcania paneli warstwowych zostały wykonane 92 próby laboratoryjne. Skręcanie badanych elementów było sterowane przyrastającym w czasie kątem obrotu stanowiska badawczego. Każdy panel warstwowy obciążany był do momentu całkowitego wysuwu tłoka siłownika (około 150 mm), ustawionego na mimośrodku 1000 mm względem osi obrotu stanowiska (obrót stanowiska badawczego o $8,53^\circ$, tj. 0,15 radiana). Tempo wysuwu tłoka siłownika mieściło się w zakresie od 0,50 mm/s do 0,60 mm/s. Po osiągnięciu maksymalnego kąta obrotu stanowiska następowało powolne odpuszczenie skręconego panelu. Następnie, po powrocie badanego elementu do układu początkowego, panel warstwowy zostawał raz jeszcze skręcony do maksymalnej wartości kąta obrotu. Stanowisko badawcze przy maksymalnym wysuwie tłoka siłownika zostało przedstawione na rys. 3.83.



Rysunek 3.83. Stanowisko badawcze przy maksymalnym wysuwie siłownika.

Badania skręcania wykonano na 46 panelach warstwowych dostarczonych przez firmę Pruszyński SP. z o.o. Do badań przeznaczono panele chłodnicze PIRTECH PWS-PIR-CH, o wysokościach przekroju poprzecznego równych 120 mm i 160 mm. Do produkcji płyt warstwowych zastosowano blachy nie posiadające żadnego profilowania (gładkie okładziny), a wypełnienie paneli warstwowych wykonano z pianki poliizocyanurowej (PIR). Po zakończonym procesie produkcji, płyty warstwowe zostały pocięte na gotowe do badań próbki za pomocą specjalistycznej piły tarczowej.

We wszystkich przeprowadzonych próbach laboratoryjnych dokonano pomiaru przemieszczeń charakterystycznych punktów skręcanych paneli warstwowych za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń 1-WA/20MM-T, 1-WA/50MM-T oraz 1-WA/100MM-T, o zakresie odpowiednio 20 mm, 50 mm i 100 mm. Rozmieszczenie czujników było zależne od wymiarów badanej próbki oraz od rodzaju generowanego w badaniu skręcania: swobodnego lub skrępowanego. Dodatkowo, na części płyt zastosowane zostały elektryczne tensometry oporowe w łącznej liczbie 156 sztuk. Do pomiaru odkształceń zastosowano:

- tensometry liniowe 1-LY11-10/120, o aktywnej długości siatki pomiarowej równej 10 mm oraz rezystencji równej 120 Ω ,
- rozety tensometryczne 1-RY11-10/120, z 3 drabinkami pomiarowymi ułożonymi w układzie $0^\circ/45^\circ/90^\circ$, o aktywnej długości siatki pomiarowej równej 2,9 mm oraz rezystancji równej 120 Ω .

Dokładny opis dostarczonych do badań próbek, rozmieszczenia na nich czujników przemieszczeń oraz punktów pomiarów tensometrycznych przedstawiono w kolejnych rozdziałach pracy.

3.3.1 Zestawienie próbek

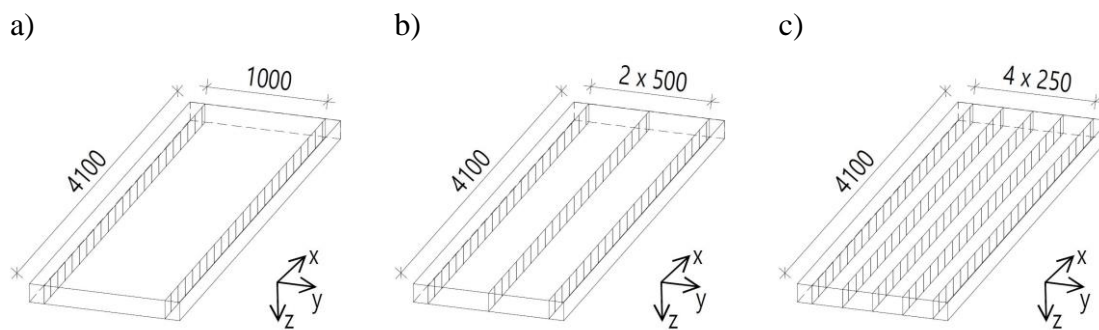
Dostarczone przez producenta panele warstwowe (rys. 3.84) zostały przygotowane w taki sposób, aby interpretacja wyników z przeprowadzonych badań była możliwie prosta. W celu zachowania jednorodności pracy skręcanych elementów, w pierwszej kolejności z płyt warstwowych zostały odcięte boczne zamki podłużne, aby badane panele były pozbawione zaburzeń geometrycznych. Następnie pełne płyty warstwowe zostały pocięte na próbki o zdefiniowanej szerokości.



Rysunek 3.84. Dostarczone do badań panele warstwowe.

Badania laboratoryjne

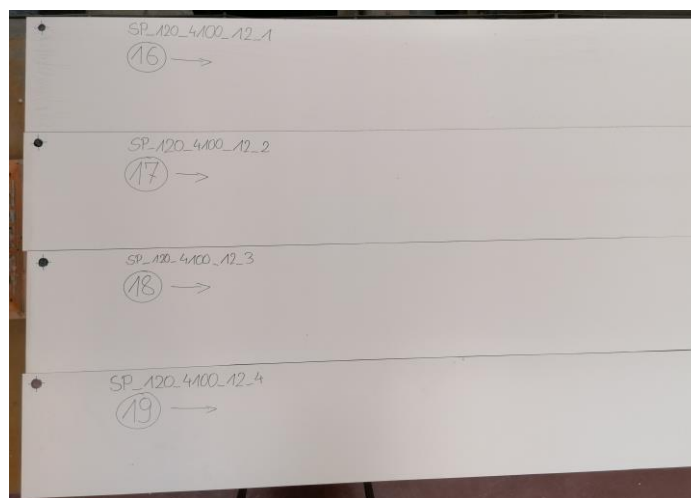
W ramach realizacji pełnego programu badań poddane skręcaniu zostały panele warstwowe o długości 4100 mm. Badanie wykonano dla trzech różnych szerokości przekroju poprzecznego: 1000 mm, 500 mm i 250 mm. Próbki o szerokościach 1000 mm (rys. 3.85a) zostały wykonane poprzez symetryczne odcięcie z płyt warstwowych podłużnych zamków. Próbki o szerokościach 500 mm (rys. 3.85b) oraz 250 mm (rys. 3.85c) zostały dodatkowo pocięte, przy zachowaniu ich symetrycznego ułożenia względem pełnej szerokości płyty warstwowej.



Rysunek 3.85. Geometria przygotowanych do badań paneli warstwowych o szerokościach:

a) 1000 mm, b) 500 mm, c) 250 mm.

Zgodnie z ustaleniami dokonany z producentem płyt warstwowych, każda dostarczona próbka została jednoznacznie opisana. Opis zawsze był naniesiony na zewnętrzną okładzinę panelu (okładzina dolna podczas procesu produkcji), tożsamą z zewnętrzną okładziną płyty warstwowej, z której był wycinany. Przykładowo opis paneli warstwowych o szerokości przekroju poprzecznego równej 250 mm pokazano na rys. 3.86.



Rysunek 3.86. Opis paneli warstwowych.

Na każdej próbce oznaczony był punkt orientacyjny oraz kierunek produkcji płyt warstwowych. Punkt orientacyjny umieszczany był zawsze przy lewej krawędzi panelu warstwowego, będąc skierowanym zgodnie z kierunkiem produkcji płyt. Dodatkowo zadbane, aby numeracja próbki odzwierciedlała położenie panelu względem szerokości płyty, z której został wycięty. Numerację próbek rozpoczynano od lewej strony, będąc skierowanym zgodnie z kierunkiem produkcji płyt.

Próbki przeznaczone do badań, wraz z ich podziałem na rodzaj generowanego w próbie laboratoryjnej skręcania, zestawiono zbiorczo w tab. 3.14 oraz tab. 3.15. W ramach uproszczenia zapisu oraz czytelności prezentowanych w rozprawie wyników analiz każdej próbce została przypisana pełna oraz skrócona nazwa.

Tabela 3.14. Zestawienie paneli warstwowych o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm.

Wysokość / szerokość panelu [mm]	Rodzaj skręcania	Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki
120 / 1000	swobodne	SP_120_4100_1_1	SP_1_1/2
		SP_120_4100_3_1	SP_3_1/2
		SP_120_4100_5_1	SP_5_1/2
		SP_120_4100_7_1	SP_7_1/2
	skrępowane	SP_120_4100_2_1	SP_2_1/2
		SP_120_4100_4_1	SP_4_1/2
120 / 500	swobodne	SP_120_4100_8_1	SP_8_1/2
		SP_120_4100_8_2	SP_9_1/2
		SP_120_4100_10_1	SP_12_1/2
		SP_120_4100_10_2	SP_13_1/2
	skrępowane	SP_120_4100_9_1	SP_10_1/2
		SP_120_4100_9_2	SP_11_1/2
		SP_120_4100_11_1	SP_14_1/2
		SP_120_4100_11_2	SP_15_1/2
120 / 250	swobodne	SP_120_4100_12_1	SP_16_1/2
		SP_120_4100_12_2	SP_17_1/2
		SP_120_4100_12_3	SP_18_1/2
		SP_120_4100_12_4	SP_19_1/2
	skrępowane	SP_120_4100_13_1	SP_20_1/2
		SP_120_4100_13_2	SP_21_1/2
		SP_120_4100_13_3	SP_22_1/2
		SP_120_4100_13_4	SP_23_1/2

Tabela 3.15. Zestawienie paneli warstwowych o wysokości przekroju poprzecznego równej 160 mm.

Wysokość / szerokość panelu [mm]	Rodzaj skręcania	Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki
160 / 1000	swobodne	SP_160_4100_1_1 SP_160_4100_3_1 SP_160_4100_5_1 SP_160_4100_7_1	SP_24_1/2 SP_26_1/2 SP_28_1/2 SP_30_1/2
	skrępowane	SP_160_4100_2_1 SP_160_4100_4_1 SP_160_4100_6_1	SP_25_1/2 SP_27_1/2 SP_29_1/2
160 / 500	swobodne	SP_160_4100_8_1 SP_160_4100_8_2 SP_160_4100_10_1 SP_160_4100_10_2	SP_31_1/2 SP_32_1/2 SP_35_1/2 SP_36_1/2
	skrępowane	SP_160_4100_9_1 SP_160_4100_9_2 SP_160_4100_11_1 SP_160_4100_11_2	SP_33_1/2 SP_34_1/2 SP_37_1/2 SP_38_1/2
160 / 250	swobodne	SP_160_4100_12_1 SP_160_4100_12_2 SP_160_4100_12_3 SP_160_4100_12_4	SP_39_1/2 SP_40_1/2 SP_41_1/2 SP_42_1/2
	skrępowane	SP_160_4100_13_1 SP_160_4100_13_2 SP_160_4100_13_3 SP_160_4100_13_4	SP_43_1/2 SP_44_1/2 SP_45_1/2 SP_46_1/2

Kolejne cyfry oddzielone symbolem „_”, umieszczone po symbolu „SP” oznaczają:

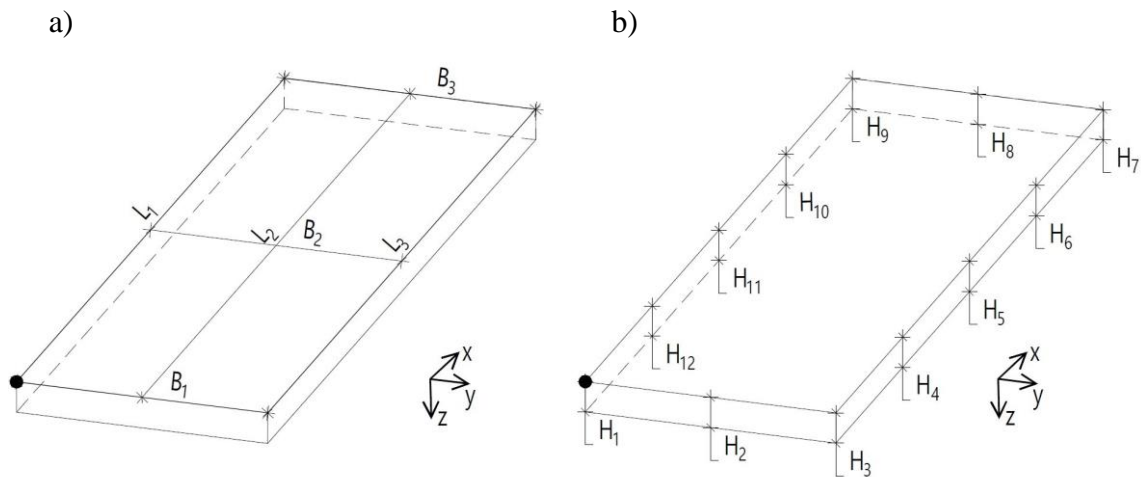
- w przypadku zapisu pełnej nazwy próbki:

- wysokość przekroju poprzecznego próbki,
- długość próbki,
- numer płyty warstwowej danej wysokości, z której próbka została wycięta,
- położenie próbki względem pełnej szerokości płyty warstwowej, z której próbka została wycięta,

- w przypadku zapisu skróconej nazwy próbki:

- numer badanej próbki laboratoryjnej,
- numer próby laboratoryjnej wykonywanej na tej samej próbce.

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych, każda z 46 próbek została dokładnie pomierzona. Pomiaru długości oraz szerokości próbki dokonano za pomocą miary taśmowej. Do pomiaru wysokości próbki wykorzystano suwmiarkę elektroniczną. Pomiaru długości L_i oraz szerokości B_i dokonano w trzech miejscach równomiernie rozłożonych odpowiednio po szerokości i długości próbki (rys. 3.87a). Pomiaru wysokości H_i dokonano w 12 miejscach rozłożonych po obwodzie próbki zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.87b.



Rysunek 3.87. Miejsca pomiaru geometrii próbek: a) długości i szerokości, b) wysokości, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki względem którego rozpoczynano pomiar).

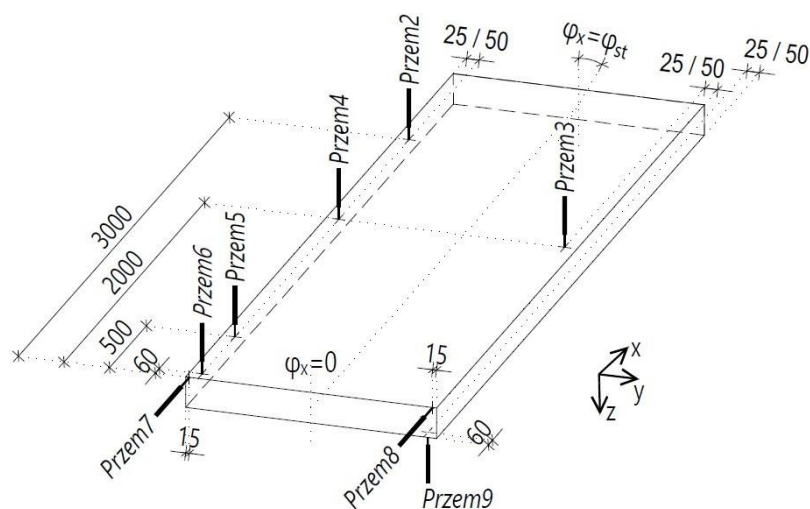
Do dalszych analiz przyjmowane były średnie arytmetyczne wartości wszystkich wymiarów próbek. Pełne zestawienie dokonanych pomiarów oraz ich uśrednione wartości zostały zestawione w Załączniku A, w tab. A.1-A.2.

3.3.2 Skręcanie swobodne – analiza przemieszczeń

Laboratoryjne wyznaczenie sztywności skrętej GI_T^{SP-LAB} przekroju poprzecznego panelu warstwowego wykonano realizując próbę skręcania swobodnego analizowanego elementu. Sposób zamocowania paneli warstwowych zarówno na podporze nieruchomej (rama podporowa), jak i ruchomej (stanowisko badawcze) odzwierciedlał przyjęte dla swobodnego skręcania teoretyczne warunki brzegowe opisane w rozdziale 3.2 (rys. 3.44). Dokładny opis budowy podpór umożliwiających panelom warstwowym deplanację przekroju poprzecznego w przekroju podporowym opisano w rozdziale 3.2.1.

Dla wszystkich paneli warstwowych skręcanych swobodnie przyjęto rozmieszczenie czujników przemieszczeń względem zewnętrznego gabarytu skręcanych

elementów zgodnie z rys. 3.88. Czujniki mierzące pionowe przemieszczenia punktów górnej i dolnej okładziny zostały odsunięte od podłużnych krawędzi paneli warstwowych o 25 mm w przypadku paneli o szerokości 250 mm oraz 50 mm w przypadku paneli o szerokościach 500 mm i 1000 mm.



Rysunek 3.88. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na próbce – skręcanie swobodne.

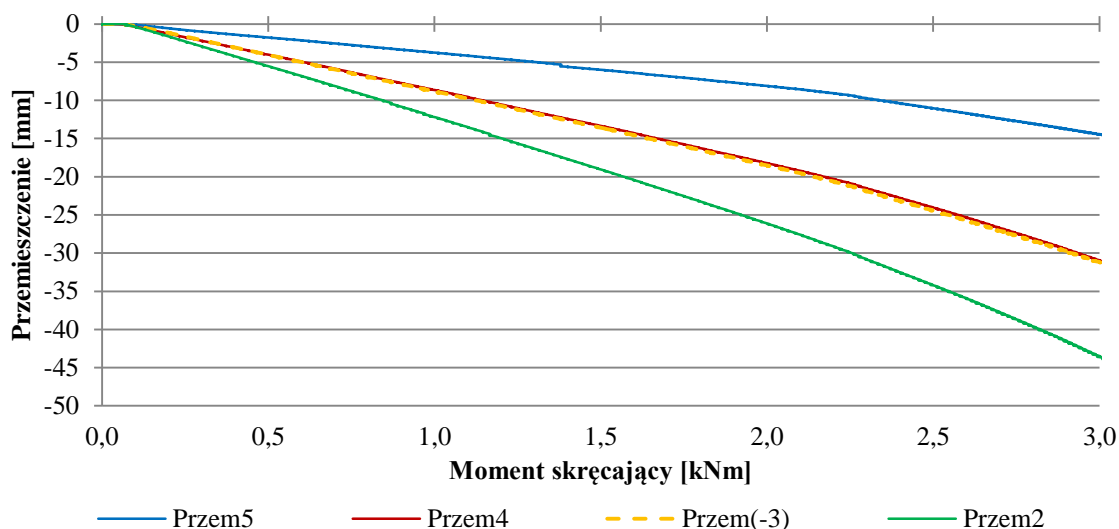
Na podstawie wyników przemieszczeń otrzymanych z przeprowadzonych badań wykonano analizy zjawisk zachodzących w trakcie skręcania paneli warstwowych:

- zachowania symetrii skręcania badanej próbki (czujniki: *Przem4*, *Przem3*),
- lokalnego zginięcia rdzenia panelu warstwowego na podporze (czujniki: *Przem6*, *Przem9*),
- przyrostu kąta obrotu skręcanego panelu warstwowego na długości badanego elementu (czujniki: *Przem5*, *Przem4*, *Przem2*),
- deplanacji przekroju poprzecznego próbki na nieobrotowej podporze (czujniki: *Przem7*, *Przem8*).

Szczegółowe analizy laboratoryjnego wyznaczenia sztywności skrętnej GI_T^{SP-LAB} panelu warstwowego oraz pozostałych, wyżej wymienionych zjawisk przedstawiono poniżej, na wybranych przykładach. W postaci tabelarycznej zestawiono wyniki wyznaczonych dla każdej grupy próbek sztywności skrętnych paneli warstwowych. Dodatkowo, szczegółowe wyniki dla poszczególnych prób zestawiono w Załączniku C, w tab. C.1.

Na rys. 3.89 pokazano przykładową relację przemieszczenia pionowego punktów *Przem2* - *Przem5* do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego dla próbki SP_120_4100_1_1 (SP_1_1). Maksymalny moment skręcający jaki

osiągnięto w próbie SP_1_1, przy pełnym wysuwie tłoka siłownika, równy był 3,13 kNm. Próba obciążeniowa trwała 295 s, co przekłada się na tempo wysuwu tłoka siłownika równe 0,51 mm/s.



Rysunek 3.89. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.

Przemieszczenia odczytywane z czujnika *Przem3* w realizowanej próbie skręcania osiągały wartości dodatnie. W celu weryfikacji zachowania symetrii skręcania badanej próbki zostały one przemnożone przez wartość (-1). W celu poprawienia czytelności wykresu wyniki przemieszczeń czujnika *Przem(-3)* oznaczono linią przerywaną. Przedstawione na powyższym wykresie krzywe, obrazujące wartości przemieszczeń przeciwnych krawędzi w środku rozpiętości badanego panelu warstwowego (*Przem4* oraz *Przem(-3)*), zachowują zgodność w pełnym zakresie obciążenia próbki. Świadczy to o symetrycznej pracy skręcanej panelu warstwowego. Opisana weryfikacja zachowania symetrii skręcania próbki stanowiła każdorazowo wstęp do prowadzonych w dalszej kolejności analiz. Aby otrzymane z realizowanych prób laboratoryjnych wyniki uznać za wiarygodne wymagano zgodności symetrii skręcania próbki powyżej 95%. Poziom zgodności określano za pomocą relacji:

$$\frac{\min(\text{Przem4}; \text{Przem}(-3))}{\max(\text{Przem4}; \text{Przem}(-3))} \cdot 100\%. \quad (3.30)$$

Dla omawianej próby SP_1_1 osiągnięto poziom zgodności symetrii równy 98,3%.

Pomiar względnego przyrostu kąta obrotu przekroju poprzecznego skręcanej elementu na jego długości, w odniesieniu do względnego przyrostu siły generującej

obrót, posłużył do wyznaczenia sztywności skrętnej GI_T^{SP-LAB} przekroju poprzecznego badanego panelu warstwowego. Laboratoryjne wyznaczenie sztywności skrętnej GI_T^{SP-LAB} wykonano w oparciu o wyniki przemieszczeń odczytane z czujników *Przem2*, *Przem4* oraz *Przem5*. Rozmieszczenie czujników po długości badanej próbki przedstawiono wcześniej na schemacie na rys. 3.88. Kąty obrotu przekroju poprzecznego skręcanego panelu warstwowego w punktach 2, 4 oraz 5 oznaczono symbolami odpowiednio φ_2 , φ_4 oraz φ_5 . Na podstawie znanych wartości przemieszczeń (rys. 3.89), wartości kątów obrotu w analizowanych punktach można wyznaczyć korzystając z poniższych zależności:

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \tan^{-1}\left(\frac{w_2}{\Delta_2}\right), \\ \varphi_4 &= \tan^{-1}\left(\frac{w_4}{\Delta_4}\right), \\ \varphi_5 &= \tan^{-1}\left(\frac{w_5}{\Delta_5}\right),\end{aligned}\tag{3.31}$$

gdzie symbolem w_i oznaczono wartość przemieszczenia pomierzonego i -tym czujnikiem, natomiast symbolem Δ_i odległość punktu pomiarowego i -tego czujnika od osi obrotu skręcanego panelu warstwowego. Przy stałej wartości obciążenia skręcającego, przyrost kąta obrotu między punktami 2 i 4 oraz 4 i 5 odniesiony do odległości między tymi punktami Δx_{2-4} oraz Δx_{4-5} określa się jako jednostkowy kąt skręcania:

$$\begin{aligned}\theta_{2-4} &= \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{\Delta x_{2-4}}, \\ \theta_{4-5} &= \frac{\varphi_4 - \varphi_5}{\Delta x_{4-5}}.\end{aligned}\tag{3.32}$$

Relację wartości momentu skręcającego M_T i jednostkowego kąta skręcania można zapisać z wykorzystaniem sztywności skrętnej GI_T za pomocą poniższych zależności:

$$\begin{aligned}\theta_{2-4} &= \frac{M_T}{GI_T^{2-4}}, \\ \theta_{4-5} &= \frac{M_T}{GI_T^{4-5}}.\end{aligned}\tag{3.33}$$

Przekształcając równania (3.33) oraz wprowadzając do nich dodatkowy symbol Δ określający w sposób uogólniony przyrost danej wartości, otrzymano:

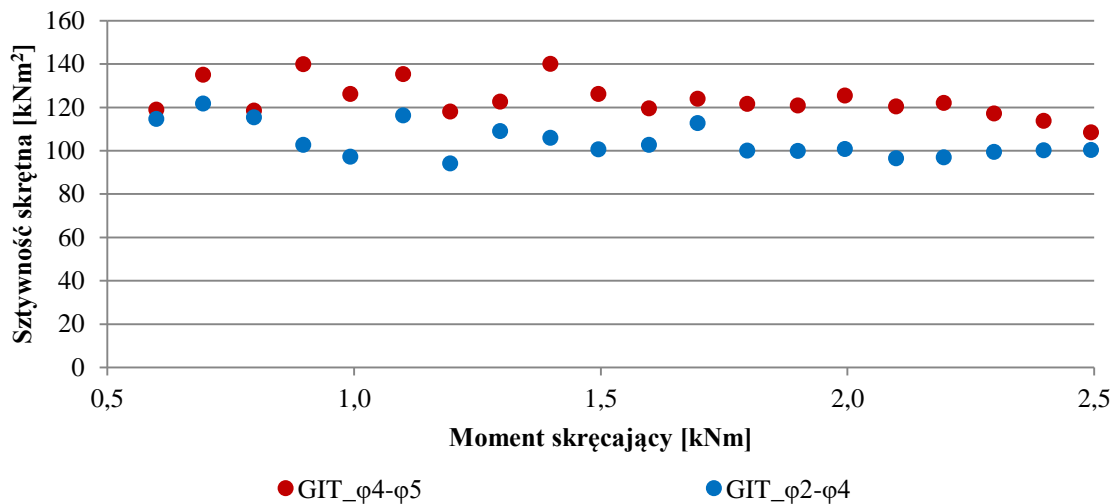
$$GI_T^{2-4} = \frac{\Delta M_T}{\Delta \theta_{2-4}},$$

$$GI_T^{4-5} = \frac{\Delta M_T}{\Delta \theta_{4-5}}.$$
(3.34)

Z uwagi na nieliniowy przyrost wartości przemieszczeń punktów 2, 4 oraz 5 (rys. 3.89), obliczenia sztywności skrętniej wykonano dla stałej wartości przyrostu momentu skręcającego ΔM_T równej 100 Nm, w przedziale obciążenia próbki od 500 Nm do 2500 Nm. Jako końcowy wynik przyjęto średnią wartość sztywności z analizowanego przedziału obciążenia. Na rys. 3.90 przedstawiono wyniki sztywności skrętniej przekroju poprzecznego próbki SP_1_1 w pełnym zakresie obciążenia próbki. Średnie arytmetyczne wartości sztywności skrętnych wyznaczonych z obu analizowanych przedziałów równe są:

$$GI_{T-LAB}^{2-4} = 104,25 \text{ kNm}^2,$$

$$GI_{T-LAB}^{4-5} = 123,61 \text{ kNm}^2.$$
(3.35)



Rysunek 3.90. Wyniki sztywności skrętniej w pełnym zakresie obciążenia próbki SP_1_1.

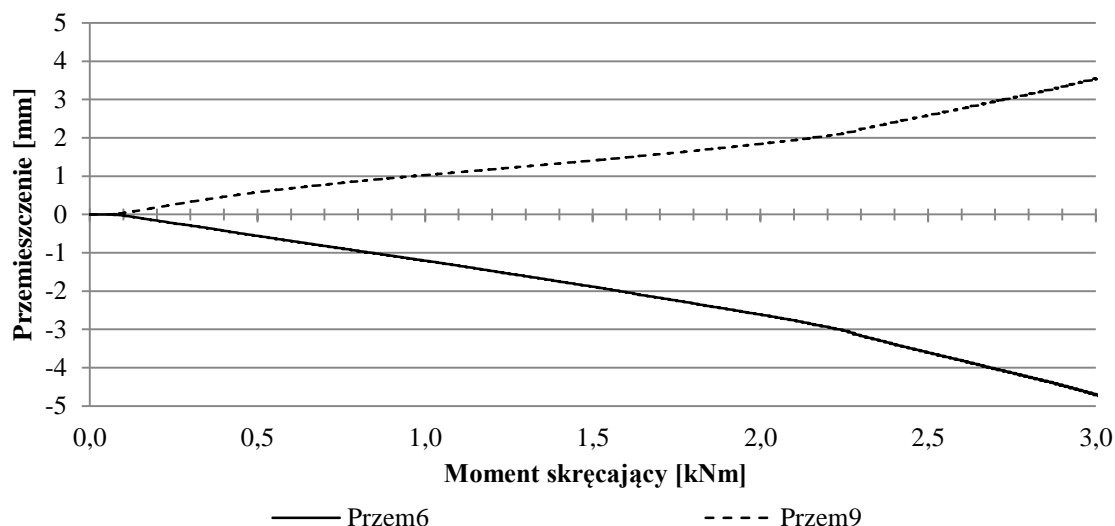
Przedstawione na wykresie na rys. 3.90 wyniki wskazują na znaczne różnice w wyznaczonych wartościach sztywności skrętnych. Różnica ta wynika z rozmieszczenia na próbce pomiarowej punktów, względem których obliczany jest przyrost kąta obrotu skręcanego panelu warstwowego. Znacznie większe wartości

szywności skrętniej GI_T^{SP-LAB} uzyskano z analizy względnego przyrostu kąta obrotu pomiędzy punktami 4 i 5 w stosunku do obliczeń wykonanych pomiędzy punktami 2 i 4. Przy stałej wartości przyrostu momentu skręcającego ΔM_T spowodowane jest to mniejszą wartością jednostkowego kąta skręcania $\theta_{4.5}$ w odniesieniu do wartości $\theta_{2.4}$. Odległości między punktami pomiarowymi oraz punktów pomiarowych względem osi obrotu skręcanego panelu warstwowego są wartościami stałymi w obrębie realizowanej próby skręcania. Opisywana znaczna różnica wyznaczonych wartości sztywności skrętnych wynika bezpośrednio z mniejszego względnego przyrostu pionowego przemieszczenia pomiędzy punktami 4 i 5 w odniesieniu do przyrostu pomiędzy punktami 2 i 4. Wywołane jest to efektem lokalnego wgniecenia rdzenia panelu warstwowego w obrębie podpory, który wpływa na wartości przemieszczeń punktu 5. Widok wgniecenia rdzenia próbki SP_1_1 na nieruchomej podporze w trakcie badania przedstawiono na rys. 3.91.



Rysunek 3.91. Wgniecenie na podporze próbki SP_1_1.

Zgodnie z przedstawionym na rys. 3.88 schematem ustawienia czujników przemieszczeń, w trakcie wykonywanych prób skręcania, na podporze nieruchomej mierzono wgniecenie rdzenia paneli warstwowych w dwóch punktach. Pomiaru dokonywano od strony okładzin, które były dociskane do podpory za pomocą czujników: *Przem6* oraz *Przem9*.



Rysunek 3.92. Relacja przemieszczenie – moment skręcający wgniecenia na podporze próbki SP_1_1.

Wyniki przedstawione na rys. 3.92 obrazują symetryczne zachowanie obu krawędzi skręcanego panelu warstwowego. Na skutek podatności rdzenia, w odległości 10 mm od krawędzi blachy podporowej (60 mm od osi podpory) dochodzi do znacznych wartości przemieszczeń pionowych punktów 6 i 9. Rysunek 3.91 wyraźnie przedstawia zjawisko wgniatania rdzenia i uzasadnia przedstawione na rys. 3.92 wartości przemieszczeń. Należy podkreślić, że na sumaryczną wartość pionowych przemieszczeń *Przem6* oraz *Przem9* składa się zarówno efekt lokalnego wgniecenia rdzenia panelu warstwowego (składnik dominujący), jak i efekt skręcania obciążonego elementu (składnik marginalny).

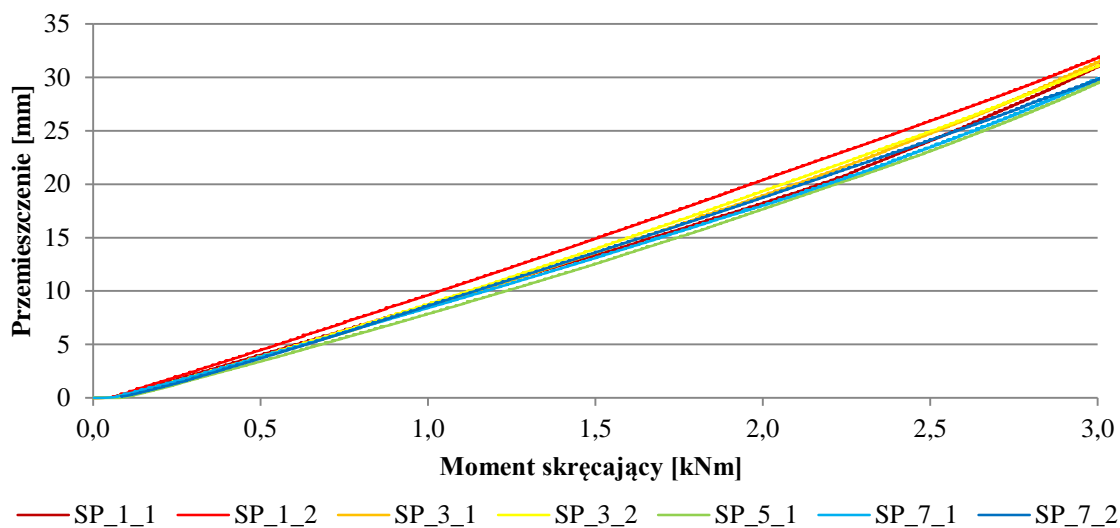
Efekt lokalnego wgniecenia górnej okładziny, mierzony za pomocą czujnika *Przem6*, rozmywa się na długości badanego elementu i wpływa bezpośrednio na wartości przemieszczeń punktu 5. Przy wartości obciążenia panelu warstwowego momentem skręcającym równym 2,0 kNm wartość przemieszczenia w punkcie 6 równa jest 2,6 mm, natomiast w punkcie 5 równa jest 8,0 mm. Wyraźnie widać, jak dużą wartością w odniesieniu do przemieszczenia pionowego w punkcie 5 stanowi wartość przemieszczenia w punkcie 6. Wgniecenie rdzenia na podporze jest zjawiskiem silnie lokalnym i ciężko precyzyjnie określić w jak dużym stopniu wpływa ono na wartości przemieszczeń pomierzonych w punkcie 5.

Na przeciwnym końcu skręcanego panelu warstwowego, na podporze ruchomej efekt lokalnego wgniecenia rdzenia występuje od strony dolnej okładziny – z dala od ustawionych czujników przemieszczeń. Dodatkowo, z uwagi na większą odległość punktu 2 od podpory ruchomej (1000 mm) w odniesieniu do odległości punktu 5 od

podpory nieruchomej (500 mm) przyjęto, że efekt lokalnego wgniecia rdzenia jest w punkcie 2 znacznie mniejszy niż w punkcie 5. W dalszych analizach sztywność skrętna GI_T paneli warstwowych była wyznaczana na podstawie wyników otrzymanych z punktów 2 oraz 4:

$$GI_{T-LAB}^{SP} = GI_T^{2-4} = 104,25 \text{ kNm}^2. \quad (3.36)$$

Pełna seria badawcza danego przekroju poprzecznego panelu warstwowego obejmowała badanie czterech próbek, dokonując na każdej próbce po dwie próby obciążeniowe. W celu weryfikacji powtarzalności otrzymywanych z badań wyników na rys. 3.93 pokazano przemieszczenia $Przem3$ wszystkich próbek o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm oraz szerokości 1000 mm.



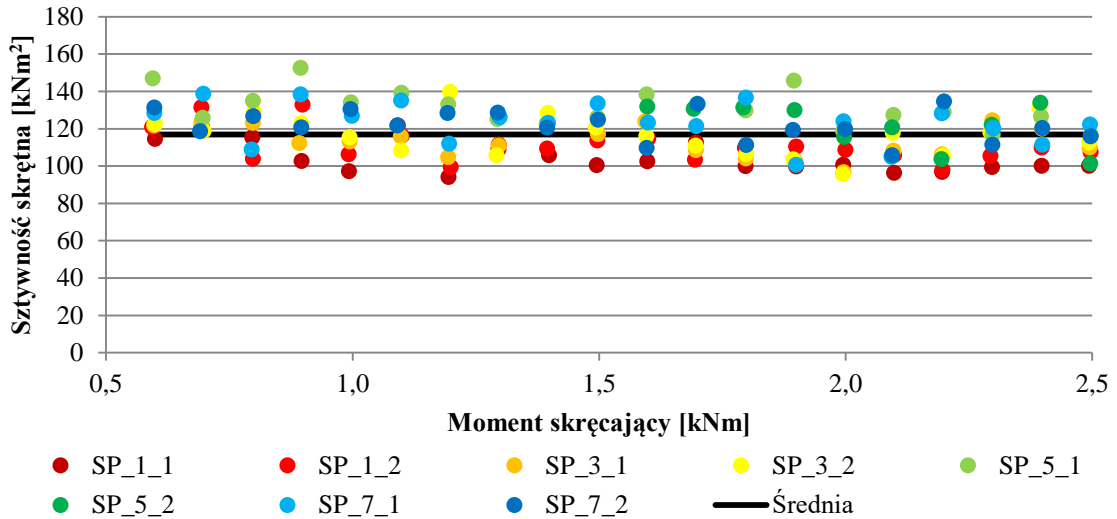
Rysunek 3.93. Relacja przemieszczenie $Przem3$ – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: $H = 120$ mm, $B = 1000$ mm.

Mierzone w środku rozpiętości skręcanego elementu przemieszczenia pionowe dla wszystkich próbek osiągają zbliżone wartości przy tym samym poziomie obciążenia. Przedstawione na powyższym wykresie krzywe mają podobny przebieg.

Obliczone przy stałej wartości przyrostu momentu skręcającego ΔM_T równej 100 Nm, w przedziale obciążenia próbek od 500 Nm do 2500 Nm, sztywności skrętne przedstawiono graficznie na rys. 3.94. Średnie wartości sztywności z analizowanego przedziału obciążenia dla każdej próbki zestawiono w tab. 3.16. Średnia wartość sztywności skrętnej panelu warstwowego o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm i szerokości 1000 mm wynosi:

$$GI_{T-LAB}^{120/1000} = 116,91 \text{ kNm}^2. \quad (3.37)$$

Średnia wartość sztywności skrętniej (3.37) wyznaczona dla analizowanej serii badawczej została naniesiona na wykresie na rys. 3.94 ciągłą, czarną linią.



Rysunek 3.94. Wyniki sztywności skrętniej w pełnym zakresie obciążenia próbek, wyniki dla paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.

Tabela 3.16. Sztywność skrętna paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.

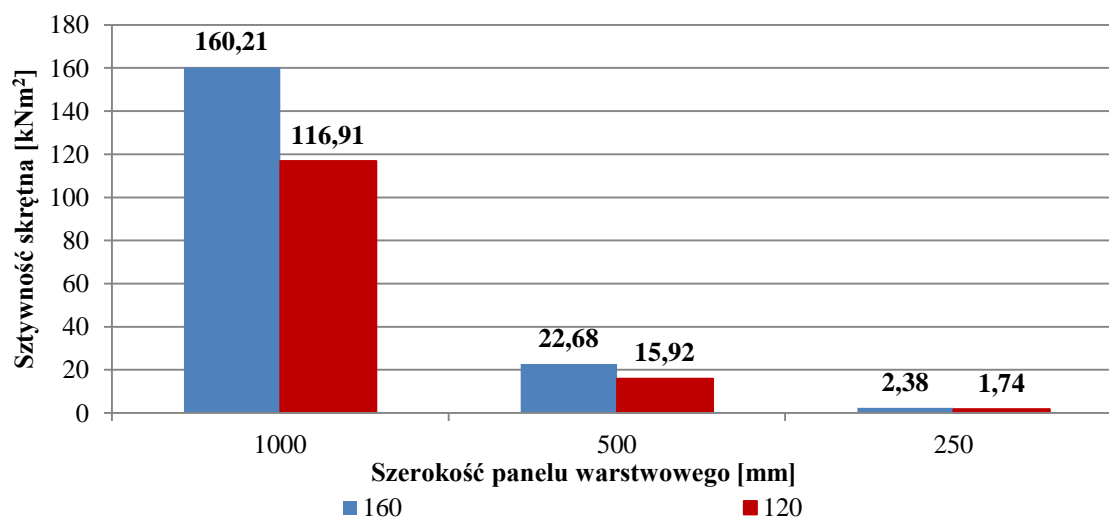
Skrócona nazwa próbki	Sztywność skrętna $GI_{T-LAB}^{120/1000}$ [kNm ²]
SP_1_1	104,25
SP_1_2	111,20
SP_3_1	113,47
SP_3_2	116,45
SP_5_1	131,10
SP_5_2	113,88
SP_7_1	123,22
SP_7_2	121,68
Wartość średnia \bar{x}	116,91
Odchylenie standardowe s	8,26
Wsp. zmienności v	0,07

W ten sam sposób wyznaczone zostały laboratoryjne sztywności skrętnie pozostałych paneli warstwowych skręcanych w schemacie skręcania swobodnego. Zmniejszaniu szerokości przekroju poprzecznego badanych elementów towarzyszył gwałtowny

spadek ich sztywności skrętnej. Węższe panele warstwowe stawiały stanowisku badawczemu mniejszy opór. Wyznaczenie sztywności skrętnej paneli warstwowych o szerokościach 500 mm wykonano przy stałej wartości przyrostu momentu skręcającego ΔM_T równej 20 Nm, w przedziale obciążenia próbek od 100 Nm do 500 Nm. Natomiast paneli warstwowych o szerokościach 250 mm wykonano przy stałej wartości przyrostu momentu skręcającego ΔM_T równej 4 Nm, w przedziale obciążenia próbek od 4 Nm do 100 Nm. Średnie wartości sztywności skrętnych paneli warstwowych o zmiennych wymiarach przekroju poprzecznego zestawiono w tab. 3.17. Dodatkowo wyznaczone wartości sztywności zestawiono w postaci graficznej na wykresie słupkowym przedstawionym na rys. 3.95.

Tabela 3.17. Sztywność skrętna paneli warstwowych.

Wysokość / szerokość panelu [mm]	Sztywność skrętna GI_T^{SP-LAB}		
	Wartość średnia \bar{x} [kNm ²]	Odchylenie standardowe s [kNm ²]	Wsp. zmienności v [-]
120 / 1000	116,91	8,26	0,07
120 / 500	15,92	0,40	0,03
120 / 250	1,74	0,31	0,18
160 / 1000	160,21	8,27	0,05
160 / 500	22,68	1,21	0,05
160 / 250	2,38	0,21	0,09



Rysunek 3.95. Sztywność skrętna paneli warstwowych.

Powyższe dane wyraźnie obrazują gwałtowny spadek wartości sztywności skrętnej paneli warstwowych przy zmniejszaniu szerokości przekroju poprzecznego elementu.

Dwukrotnemu zmniejszeniu szerokości z wartości 1000 mm do wartości 500 mm towarzyszy ponad siedmiokrotna redukcja sztywności skrętnej panelu warstwowego. Dalsze zmniejszenie szerokości do wartości 250 mm to kolejna dziewięciokrotna redukcja sztywności skrętnej – w odniesieniu do panelu warstwowego o szerokości równej 500 mm. Porównując ze sobą panele warstwowe o pełnej szerokości równej 1000 mm z najwęższymi badanymi panelami można stwierdzić, że czterokrotnemu zmniejszeniu szerokości przekroju poprzecznego elementu towarzyszy spadek sztywności skrętnej o ponad 65 razy. Mniej czułym parametrem wpływającym na zmianę sztywności skrętnej próbki jest wysokość przekroju poprzecznego. Dla wszystkich badanych szerokości panelu warstwowego zaobserwowano podobny wpływ zmiany wysokości na otrzymywane wartości sztywności skrętnej. Zmniejszeniu wysokości przekroju poprzecznego z wartości 160 mm do wartości 120 mm (około 33%) towarzyszył spadek wartości sztywności skrętnej o około 40%.

Opisana w niniejszym rozdziale metoda interpretacji wyników uzyskanych z próby skręcania paneli warstwowych z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego pozwala na wiarygodne określenie sztywności skrętnej badanych elementów. Zastosowane na obu podporach warunki podparcia tylko w minimalnym stopniu powodują blokadę deplanacji przekroju poprzecznego skręcanych paneli warstwowych. Spowodowane jest to występującym niezerowym tarciem pomiędzy okładzinami paneli warstwowych a blachami dociskowymi stanowiska badawczego oraz ramy podporowej. Marginalny wpływ na wyznaczone wartości sztywności skrętnych częściowej blokady deplanacji na podporach został jeszcze bardziej zniwelowany poprzez analizowanie względnego przyrostu kątów obrotu skręcanych paneli warstwowych na podstawie punktów znajdujących się w wewnętrznej części badanego elementu. Punkty pomiarowe, w oparciu o które prowadzone były przedmiotowe analizy, były wolne od lokalnych zaburzeń pojawiających się w trakcie prowadzonych prób skręcania. Dzięki pomiarowi przyrostu kąta obrotu wywołanego względnym przyrostem obciążenia skręcanej próbki wyeliminowano także wpływ oporów ruchu stanowiska na otrzymywane wartości sztywności skrętnych.

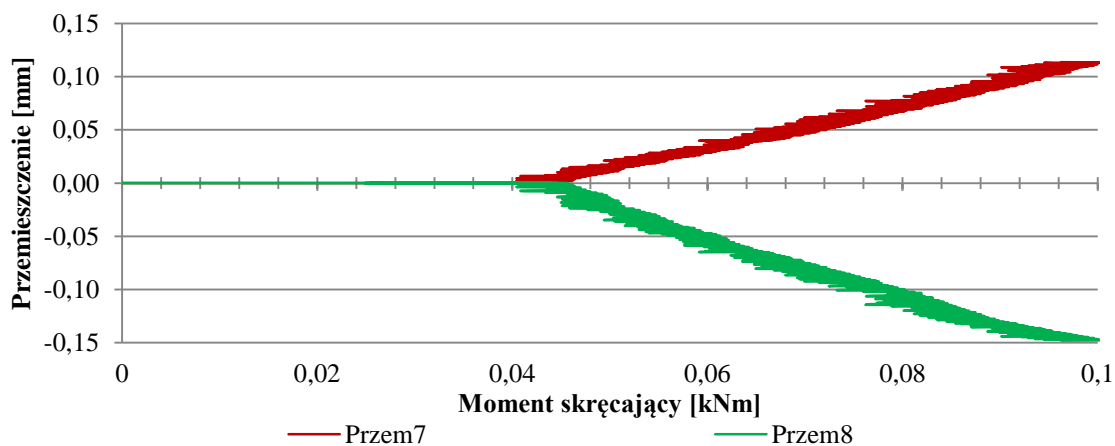
Zjawiskiem ściśle związanym ze skręcaniem swobodnym paneli warstwowych jest spaczenie przekroju poprzecznego skręcane elementu. W trakcie obrotu przekroju poprzecznego możliwe jest wystąpienie niezerowych przemieszczeń u_x – w kierunku podłużnym skręcanej próbki. Pomiaru deplanacji podporowego przekroju poprzecznego na skręcanych panelach warstwowych dokonano za pomocą doklejonych do górnej

okładziny stalowych blach wygiętych pod kątem 90 stopni – w celu możliwości odpowiedniego montażu czujnika przemieszczeń (rys. 3.96).

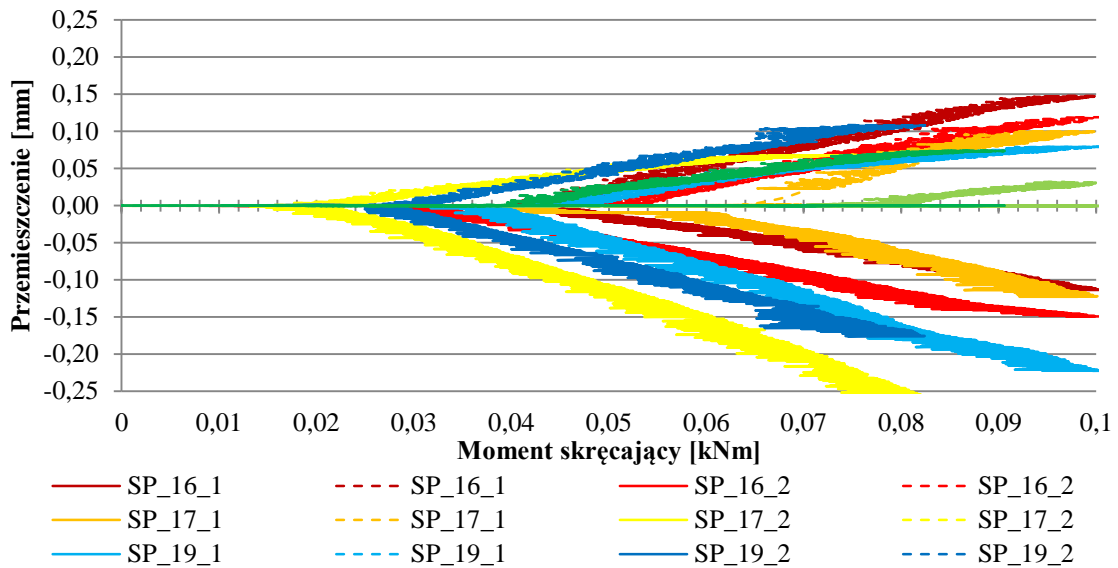


Rysunek 3.96. Pomiar deplanacji podporowego przekroju poprzecznego próbki SP_16_1.

Najczytelniejsze wyniki obrazujące zachowanie podporowego przekroju poprzecznego otrzymano w przypadku paneli o szerokościach równych 250 mm. W trakcie badania tych próbek generowane siły skręcające były relatywnie niskie, co z kolei przekładało się na małe wartości docisków okładzin do podpór. Dzięki temu przyklejone do okładzin blaszki dystansowe zachowywały się stabilnie i umożliwiały ciągły pomiar przemieszczeń. Na rys. 3.97 przedstawiono zapis relacji przemieszczeń podłużnych punktów górnej okładziny *Przem7* i *Przem8* do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego dla próbki SP_120_4100_12_1 (SP_16_1). Na rys. 3.98 przedstawiono te same wyniki dla pełnej serii badawczej paneli warstwowych o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm i szerokości równej 250 mm.



Rysunek 3.97. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_16_1.

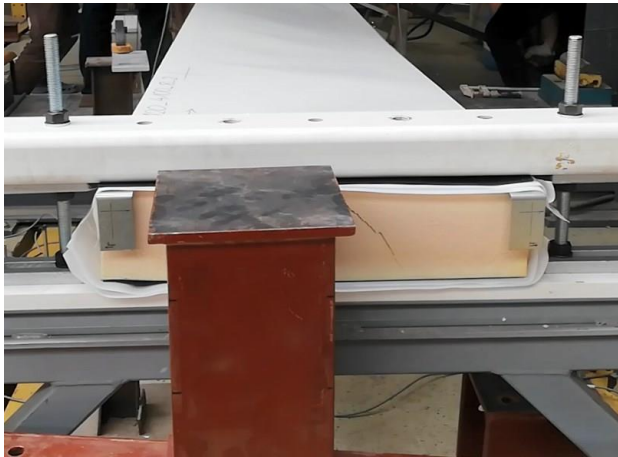


Rysunek 3.98. Relacja przemieszczenie – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: $H = 120$ mm, $B = 250$ mm.

Na powyższym, zbiorczym wykresie widać powtarzalne zachowanie się skręcanych paneli warstwowych. Liniami przerywanymi zostały oznaczone wartości przemieszczeń *Przem7* (wartości dodatnie), liniami ciągłymi oznaczono wartości przemieszczeń *Przem8* (wartości ujemne). Początkowy brak spaczenia przekroju poprzecznego paneli warstwowych, do wartości momentu skręcającego element równej około 30 Nm należy wiązać z występującymi oporami ruchu stanowiska badawczego, które zostały opisane w rozdziale 3.2.3. Dalszemu wzrostowi obciążenia towarzyszy płynnie postępująca deplanacja podporowego przekroju poprzecznego panelu warstwowego, co podkreśla odpowiednie zachowanie podpory w schemacie skręcania swobodnego (swoboda deplanacji podporowego przekroju poprzecznego).

Laboratoryjne próby skręcania swobodnego paneli warstwowych były prowadzone do momentu osiągnięcia pełnego wysuwu tłoka siłownika, co przekłada się bezpośrednio na maksymalny kąt skręcania stanowiska na poziomie $8,53^\circ$, tj. 0,15 radiana. Przy takich wartościach kąta obrotu paneli warstwowych nie udało się doprowadzić badanych elementów do zniszczenia. W celu poznania mechanizmu zniszczenia poddanych skręcaniu paneli warstwowych zdecydowano się, po przeprowadzeniu dwóch prób laboratoryjnych, część paneli obciążyć dodatkowo trzeci raz, z zastosowaniem dodatkowego wysięgu na siłowniku. Na rys. 3.99 przedstawiono przykładowo mechanizm zniszczenia panelu warstwowego SP_120_4100_8_2.

a)



b)



c)



Rysunek 3.99. Schemat zniszczenia panelu warstwowego SP_120_4100_8_2 w próbie skręcania swobodnego: a), b) panel zamocowany w stanowisku, c) widok rdzenia z góry.

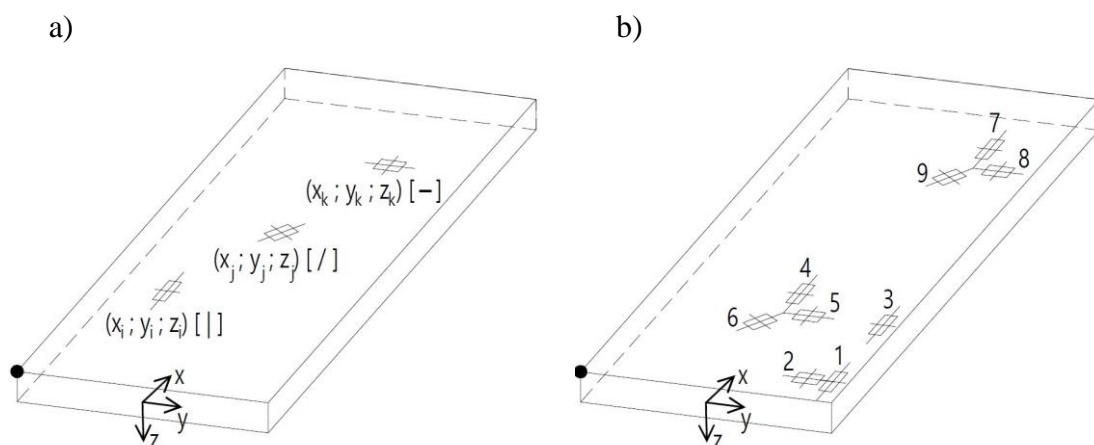
Z uwagi na dynamiczny przebieg zniszczenia paneli warstwowych ciężko określić na podstawie przeprowadzonych prób, z jakim efektem związana jest inicjacja procesu zniszczenia próbek. W trakcie realizowanych prób obserwowano lokalnie występujące utraty przyczepności (odspojenia) pomiędzy okładzinami a rdzeniem paneli warstwowych w obrębie podpór. Było to spowodowane pojawiającymi się siłami stycznymi, jakie były przekazywane na okładziny z poziomych ograniczników mocujących skręcany element. Schematem zniszczenia pasującym do wszystkich próbek, które obciążano z zastosowaniem dodatkowego wysuwu na siłowniku jest ścięcie rdzenia przy skręcaniu. Na rys. 3.99c przedstawiono widok rdzenia panelu warstwowego SP_120_4100_8_2, z wewnętrznej części panelu warstwowego po przeprowadzonej próbie skręcania oraz po zdjęciu z próbki wierzchniej okładziny. Przebieg powierzchni zniszczenia rdzenia jest wyraźnie odmienny od tego, który zaobserwować można w trakcie realizacji próby czystego ścinania paneli warstwowych.

Powierzchnie zniszczenia nachylone są do podłużnych powierzchni bocznych pod kątem różnym od 90° .

3.3.3 Skręcanie swobodne – analiza naprężeń

Na części badanych paneli warstwowych dokonano pomiaru liniowych odkształceń okładzin za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych. Zastosowanie pomiaru tensometrycznego miało na celu określenie wartości naprężeń normalnych σ_x^f i σ_y^f oraz stycznych τ_{xy}^f w wybranych punktach pomiarowych. Przeprowadzone zapisy wartości odkształceń posłużyły w dalszej kolejności do weryfikacji zgodności opracowanych modeli numerycznych z rzeczywistym badaniem laboratoryjnym. Do wyznaczenia wartości naprężeń normalnych i stycznych zastosowano tensometry liniowe i rozety tensometryczne opisane w rozdziale 3.3.

W trakcie przygotowywania próbek do badań, każdy punkt pomiaru odkształceń został precyzyjnie opisany. Lokalizacja tensometrów została zapisana w zapisie współrzędnych kartezjańskich. Początek układu współrzędnych przyjęto w punkcie przecięcia osi symetrii przekroju poprzecznego panelu warstwowego, zlokalizowanego na końcu elementu oznaczonym punktem orientacyjnym. Na rys. 3.100a pokazano schemat, zgodnie z którym opisywano rozmieszczenie czujników tensometrycznych. Przykładowe rozmieszczenie punktów pomiarowych odkształceń na próbce SP_120_4100_1_1 pokazano na rys. 3.100b. Pozostałe dane, niezbędne do precyzyjnego opisu punktów, zestawiono w tab. 3.18.



Rysunek 3.100. Rozmieszczenie tensometrów na próbce: a) zapis ogólny, b) próbka SP_120_4100_1_1, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki, względem którego ustawiano próbkę).

Tabela 3.18. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_1_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 450 ; -60) []
2	(240 ; 430 ; -60) [-]
3	(1000 ; 450 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) [-]
6	(1000 ; 0 ; -60) [/]
7	(3000 ; 250 ; -60) []
8	(3000 ; 250 ; -60) [-]
9	(3000 ; 250 ; -60) [/]

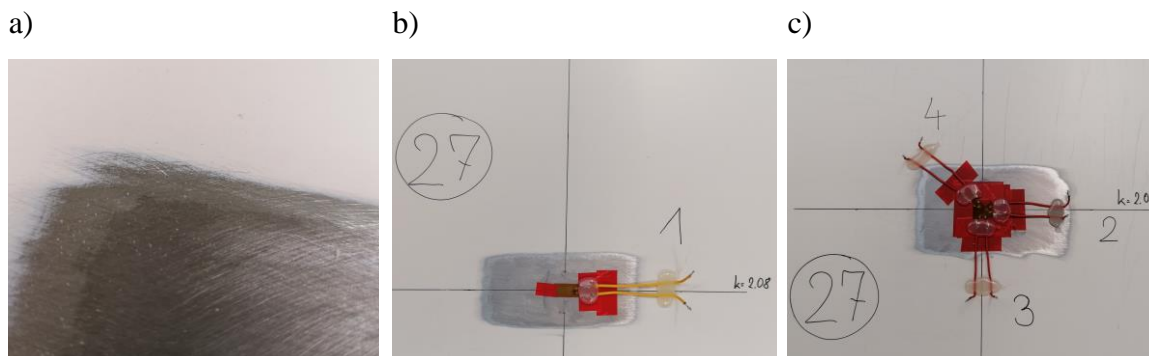
Poza określeniem współrzędnych x, y, z , każdemu punktowi pomiarowemu został dodatkowo przypisany kierunek ułożenia drabinek pomiarowych tensometru zgodnie z poniższą zasadą:

- symbolem „|” oznaczano kierunek zgodny z kierunkiem osi x układu współrzędnych,
- symbolem „-” oznaczano kierunek zgodny z kierunkiem osi y układu współrzędnych,
- symbolem „/” oznaczono kierunek nachylony pod dodatnim kątem 45° do kierunku osi x układu współrzędnych.

Szczegółowe dane opisujące rozmieszczenie punktów tensometrycznych na pozostałych badanych panelach warstwowych zestawiono w Załączniku A, w tab. A.13-A.32.

Czujniki tensometryczne wykorzystane w badaniach laboratoryjnych zostały wyprodukowane i dostarczone przez firmę HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH). Do montażu tensometrów liniowych (rys 3.101b) oraz rozet tensometrycznych (rys. 3.101c) wykorzystano szybkoschnący, utwardzany na zimno klej Z70. Przed przystąpieniem do klejenia czujników tensometrycznych powierzchnie okładzin zostały odpowiednio do tego przygotowane (rys. 3.101a). W pierwszej kolejności, na badanych próbkach dokonano precyzyjnego wyznaczeniu miejsc pomiarowych. Następnie, z okładzin paneli warstwowych lokalnie usunięto zewnętrzną warstwę organiczną oraz warstwę antykorozyjną. W ostatnim kroku mechanicznie odsłonięty rdzeń stalowy został odtłuszczony za pomocą acetonu technicznego. Wszystkie tensometry klejone były bezpośrednio do stalowego rdzenia okładzin. Finalnie, w sąsiedztwie gotowego punktu pomiarowego został umieszczony jego szczegółowy opis, który zawierał (rys. 3.101 b-c):

- numer realizowanej próby laboratoryjnej,
- numer punktu pomiarowego w ramach realizowanej próby laboratoryjnej,
- stałą tensometryczną opisywanego tensometru lub rozety.

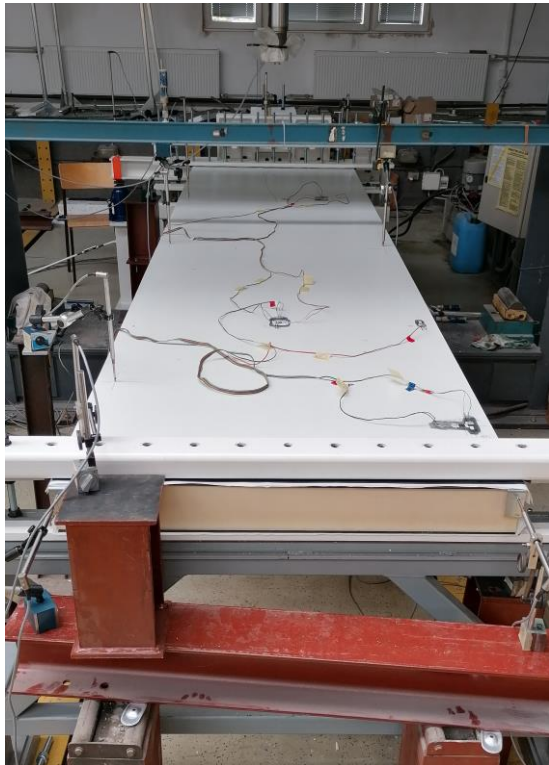


Rysunek 3.101. Mocowanie czujników tensometrycznych: a) przygotowanie powierzchni, b) tensometr liniowy 1-LY11-10/120, c) rozeta tensometryczna 1-RY11-10/120.

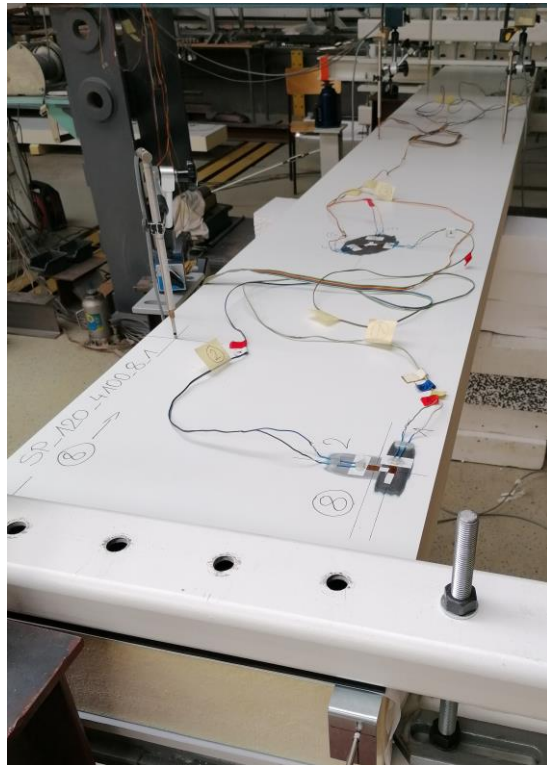
Pomiaru odkształceń dokonano na dziesięciu próbkach skręcanych swobodnie i dziesięciu próbkach skręcanych skrępowanie. W niniejszym rozdziale omówiono próbki skręcane swobodnie. Opis próbek skręcanych skrępowanie przedstawiono w rozdziale 3.3.5. Czujnikami tensometrycznymi opomiarowane zostały dwa panele o szerokościach 1000 mm, dwa o szerokościach 500 mm oraz jeden o szerokości 250 mm. Pomiaru dokonano zarówno na próbkach o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm, jak i 160 mm. Ustawione w stanowisku badawczym panele warstwowe o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm, z naklejonymi czujnikami tensometrycznymi pokazano przykładowo na rys. 3.102 a-c.

W obrębie indywidualnego obwodu pomiarowego, każdemu punktowi pomiaru odkształceń przypisany został niezależny tensometr kompensacyjny. Zadaniem punktów kompensacyjnych była redukcja czynników ubocznych takich jak temperatura czy wilgotność na wartości odkształceń zasadniczych punktów pomiarowych. Tensometry kompensacyjne zostały naklejone na oczekujące na badanie panele warstwowe, wchodzące w skład pełnego programu badań. Kompensacyjne panele warstwowe ułożono możliwie blisko stanowiska badawczego, za pomocą którego realizowano zasadnicze badania skręcania elementów. Miało to na celu jak najdokładniejsze zapewnienie równych parametrów termiczno-wilgotnościowych otoczenia próbek badanych oraz kompensacyjnych. Na rys. 3.102d przedstawiono opomiarowane panele kompensacyjne przygotowane do badań próbek o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm.

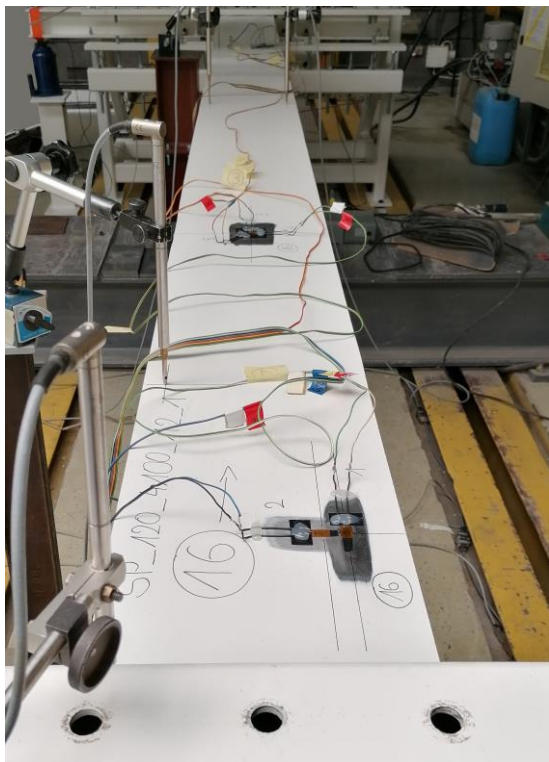
a)



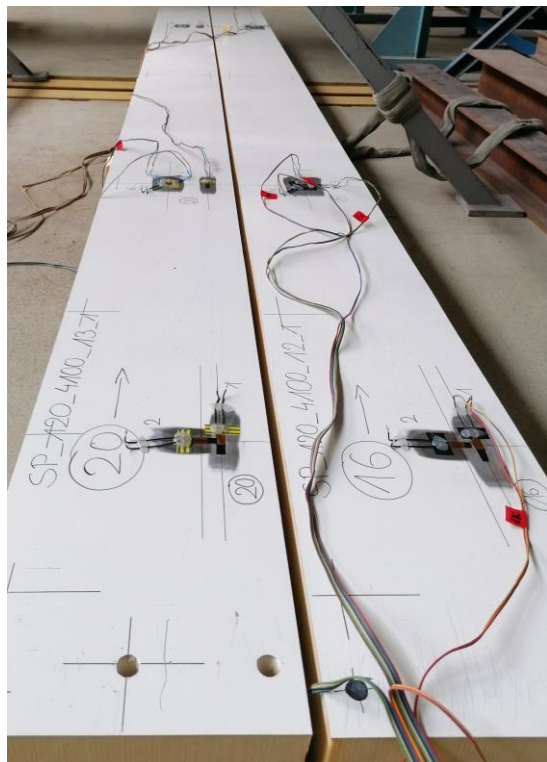
b)



c)



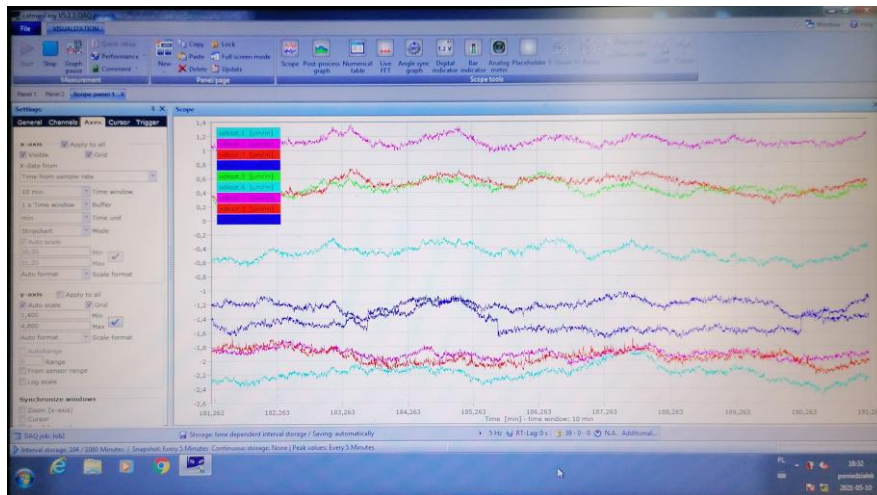
d)



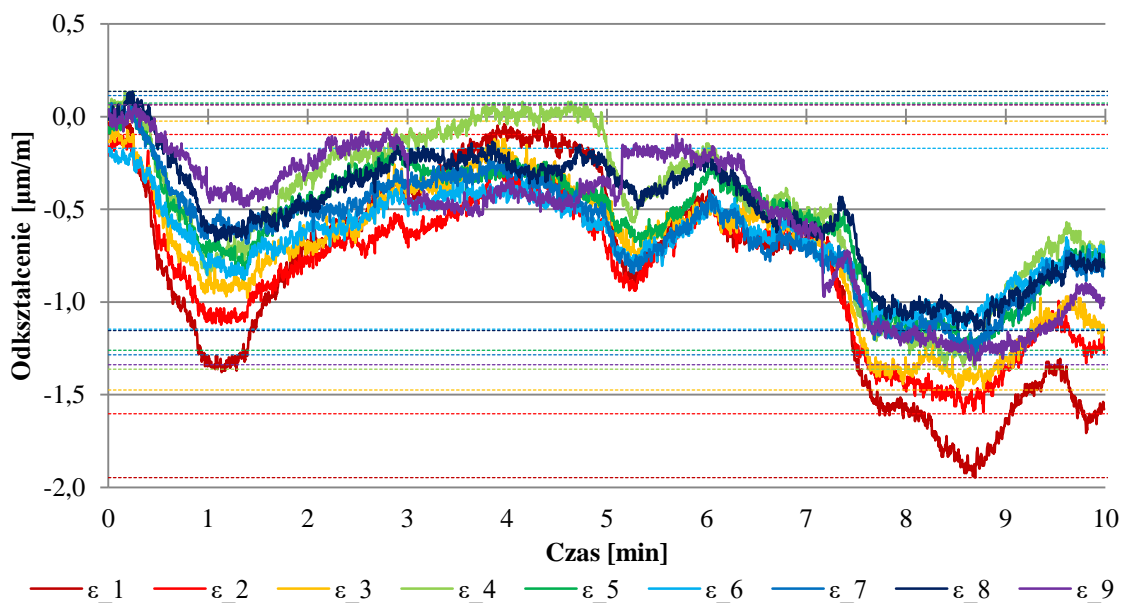
Rysunek 3.102. Badania paneli warstwowych z zastosowaniem tensometrów:

- a) SP_120_4100_1_1, b) próbka SP_120_4100_8_1,
- c) próbka SP_120_4100_12_1, d) tensometry kompensacyjne próbka.

Przystępując do realizacji próby skręcania paneli warstwowych z zastosowaniem czujników tensometrycznych każdorazowo wykonywano stabilizację pomiaru tensometrycznego z określeniem wartości szumu tensometrycznego. Po upływie piętnastu minut od chwili zakończenia lutowania ostatniego obiegu elektrycznego dokonywano dziesięciominutowego zapisu odkształceń (rys. 3.103) nieobciążonej próbki. Przykładowy zapis stabilizacji układu tensometrycznego dla próbki SP_120_4100_1_1 przedstawiono na rys. 3.104. Liniami ciągłymi zostały przedstawione zapisy zmiennych w funkcji czasu odkształceń konkretnych punktów pomiarowych. Liniami przerywanymi zostały oznaczone minimalne i maksymalne wartości odkształceń każdego punktu.



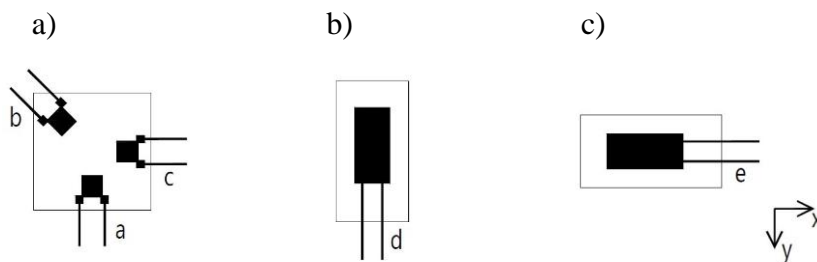
Rysunek 3.103. Stabilizacja pomiaru tensometrycznego – podgląd zapisu próby.



Rysunek 3.104. Stabilizacja pomiaru tensometrycznego – próbka SP_120_4100_1_1.

Dla każdego punktu pomiarowego została określona wartość szumu tensometrycznego, który zdefiniowano jako różnicę między maksymalną i minimalną wartością zapisanych w próbie odkształceń. Wynikiem przeprowadzonej analizy stabilizacji układu tensometrycznego dla próby SP_1_1 są wartości szumu tensometrycznego mieszczące się w zakresie odkształceń od 0,98 $\mu\text{m}/\text{m}$ do 2,0 $\mu\text{m}/\text{m}$. Opisany proces stabilizacji układu pozwalał kontrolować rozmiar błędu pomiarowego występującego w trakcie wykonywania analiz pomiaru odkształceń.

Na podstawie sygnałów pomiarowych otrzymanych z poszczególnych czujników, wykorzystując prawo Hooke'a obliczono składowe płaskiego stanu naprężenia w okładzinach analizowanego panelu warstwowego. Mocowanie punktów pomiarowych na panelach warstwowym wykonano zgodnie ze szkicem przedstawionym na rys. 3.105. Rozety tensometryczne (rys. 3.105a) ustawiano zawsze w taki sposób, aby kierunek drabinki pomiarowej c był zgodny z kierunkiem osi x przyjętego układu współrzędnych. Tensometry liniowe (rys. 3.105 b-c) ustawiano drabinką pomiarową zgodnie z kierunkami osi x lub y przyjętego układu.



Rysunek 3.105. Oznaczenie punktów pomiarów tensometrycznych: a) rozeta, b,c) tensometr liniowy.

Do wyznaczenia wartości naprężeń efektywnych, odniesionych do warstwowej budowy okładziny (całkowita grubość okładziny wraz z warstwami organicznymi), wykorzystano efektywny moduł sprężystości podłużnej $E_{t,f}^f$ wyznaczony dla takiego układu warstw (rozdział 3.1.1). Współczynnik Poissona $\nu_{t,f}^f$ warstwowej okładziny przyjęto równy 0,30. Obliczenia wartości poszczególnych naprężeń wykonano na podstawie zapisu odkształceń ε_i odpowiednich punktów pomiarowych.

W punktach mocowania rozet tensometrycznych wyznaczano wartości naprężeń stycznych τ_{xy}^f oraz naprężeń normalnych σ_x^f i σ_y^f za pomocą poniższych zależności:

$$\tau_{xy}^f = \frac{E_{t,f}^f}{2 \cdot (1 + \nu_{t,f}^f)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2 \cdot \varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2},$$

$$\sigma_x^f = E_{t,f}^f \cdot \varepsilon_c,$$

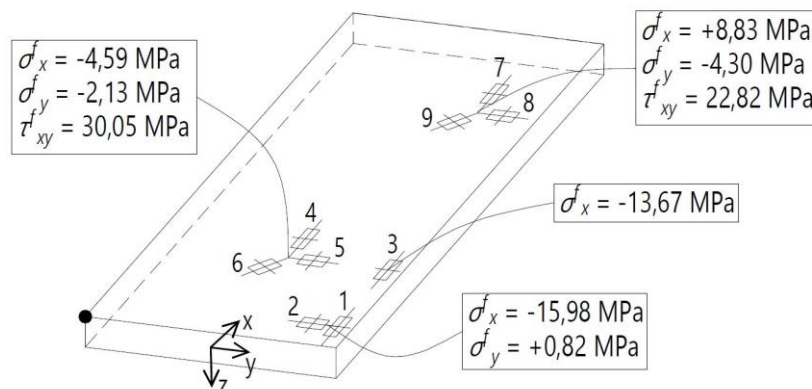
$$\sigma_y^f = E_{t,f}^f \cdot \varepsilon_a.$$
(3.38)

W punktach mocowania tensometrów liniowych wyznaczano wartości naprężeń normalnych σ_x^f lub σ_y^f za pomocą poniższych zależności:

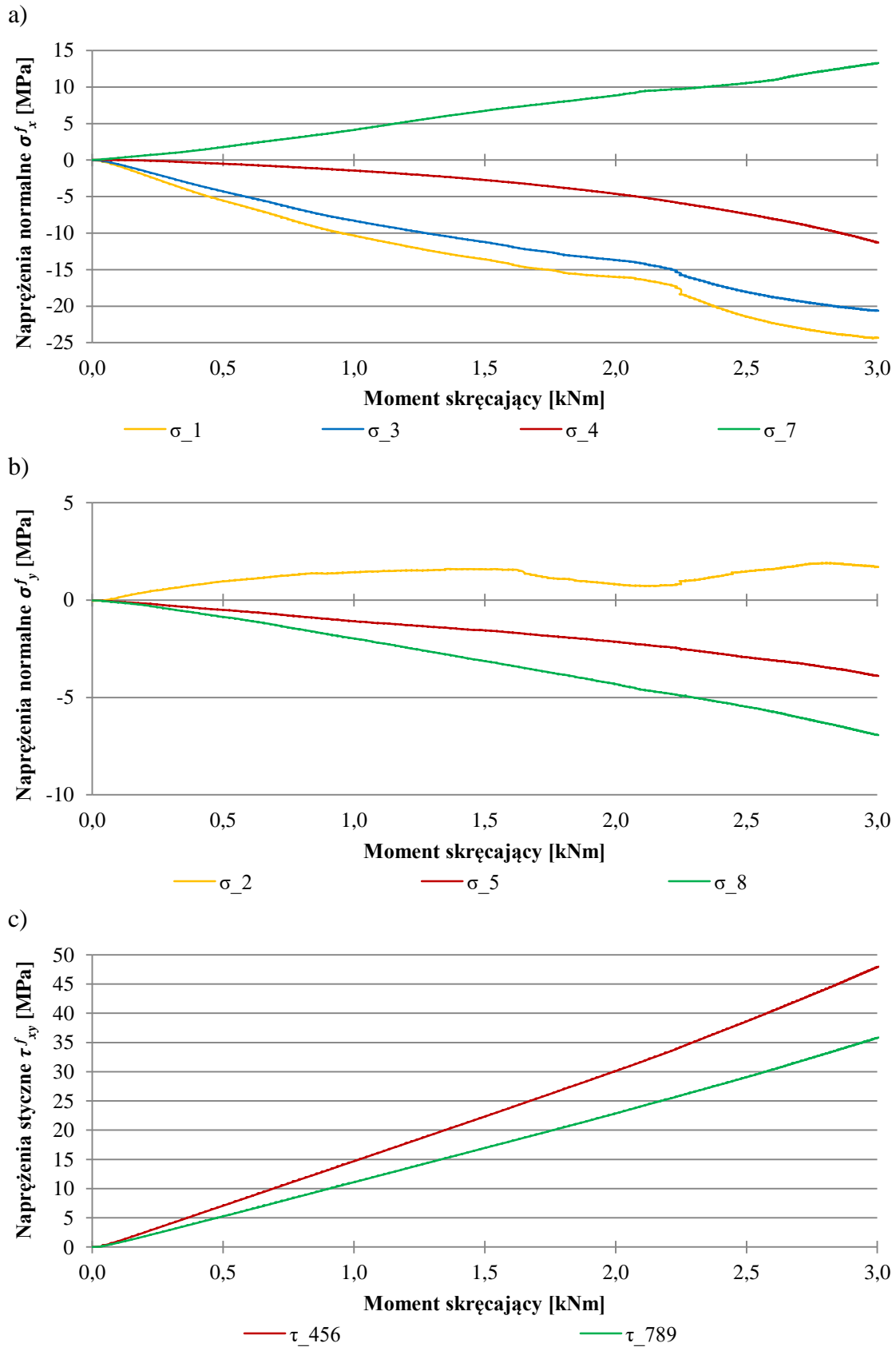
$$\sigma_x^f = E_{t,f}^f \cdot \varepsilon_e,$$

$$\sigma_y^f = E_{t,f}^f \cdot \varepsilon_d.$$
(3.39)

Na schemacie analizowanego panelu warstwowego SP_120_4100_1_1 rys. 3.106 pokazano wyznaczone wartości naprężeń w okładzinach elementu przy obciążeniu próbki momentem skręcającym równym 2,0 kNm. Wartości poszczególnych naprężeń w pełnym zakresie obciążenia skręcającego pokazano w postaci wykresów na rys. 3.107. Z przedstawionych na wykresach danych widać relatywnie płynny wzrost wartości wszystkich naprężeń wraz ze wzrostem obciążenia panelu warstwowego. Największe zaburzenia przebiegu krzywych na wykresach zaobserwować można w przypadku zapisu naprężeń normalnych w punktach zlokalizowanych blisko podpór. Wartym podkreślenia jest fakt, że pomimo rzetelnego odzwierciedlenia warunków podparcia skręcanego swobodnie panelu warstwowego, wewnątrz próbek pojawiają się niezerowe wartości naprężeń normalnych. Należy je jednak kojarzyć przede wszystkim z lokalnymi deformacjami paneli warstwowych na podporach, a nie z blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego panelu warstwowego.



Rysunek 3.106. Naprężenia wewnętrzne w próbce SP_120_4100_1_1 przy obciążeniu równym 2,0 kNm.



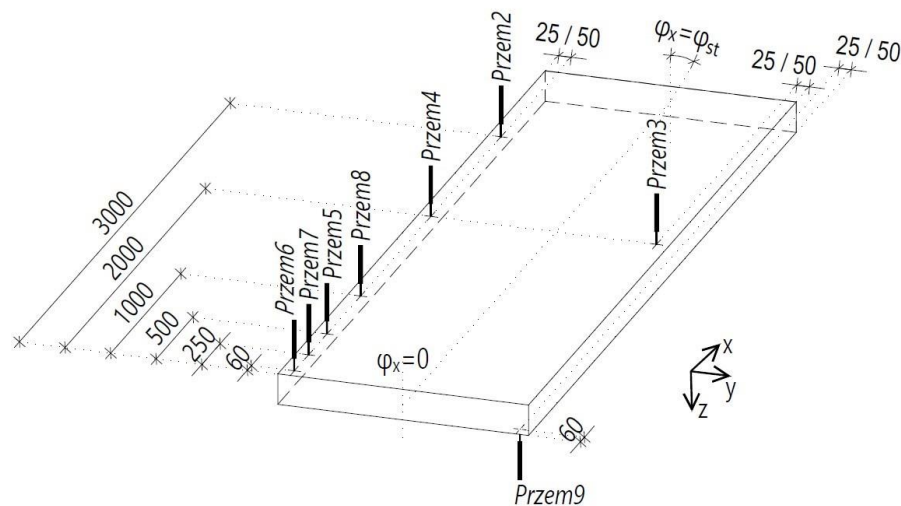
Rysunek 3.107. Relacja naprężenia wewnętrzne – obciążenie dla próbki SP_120_4100_1_1:

a) naprężenia normalne σ_x^f , b) naprężenia normalne σ_y^f , c) naprężenia styczne τ_{xy}^f

3.3.4 Skręcanie skrępowane – analiza przemieszczeń

Przeprowadzone próby skręcania skrępowanego paneli warstwowych miały na celu zobrazowanie wpływu blokady deplanacji przekroju poprzecznego próbki na odpowiedź mechaniczną skręcanego elementu. Wykonano obserwacje wartości przemieszczeń charakterystycznych punktów na powierzchni panelu warstwowego oraz naprężeń wewnątrz górnej okładziny. Sposób zamocowania paneli warstwowych zarówno na podporze nieruchomej (rama podporowa), jak i ruchomej (stanowisko badawcze) odzwierciedlał przyjęte dla skręcania skrępowanego teoretyczne warunki brzegowe opisane w rozdziale 3.2 (rys. 3.45). Dokładny opis budowy podpory nieruchomej, której zadaniem była blokada deplanacji przekroju poprzecznego w przekroju podporowym, opisano w rozdziale 3.2.1.

Dla wszystkich paneli warstwowych skręcanych skrępowanie przyjęto rozmieszczenie czujników przemieszczeń względem zewnętrznego gabarytu skręcanych elementów zgodnie z rys. 3.108. Czujniki mierzące pionowe przemieszczenia punktów górnej i dolnej okładziny zostały odsunięte od podłużnych krawędzi paneli warstwowych o 25 mm w przypadku paneli o szerokości 250 mm oraz 50 mm w przypadku paneli o szerokościach 500 mm i 1000 mm.



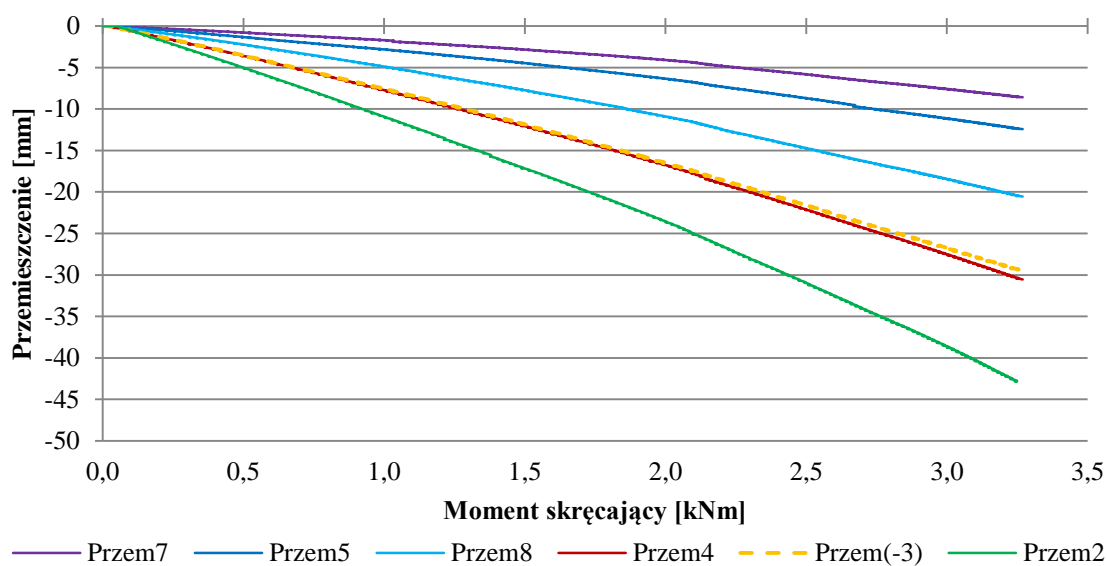
Rysunek 3.108. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na próbce – skręcanie skrępowane.

Na podstawie wyników przemieszczeń otrzymanych z przeprowadzonych badań wykonano analizy zjawisk zachodzących w trakcie skręcania paneli warstwowych:

- zachowania symetrii skręcania badanej próbki (czujniki: *Przem4*, *Przem3*),

- lokalnego zgnięcia rdzenia panelu warstwowego na podporze (czujniki: *Przem6*, *Przem9*),
- wpływu blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego na zachowanie panelu warstwowego w odniesieniu do próbek skręcanych swobodnie, o tych samych wymiarach przekroju poprzecznego (czujniki: *Przem5*, *Przem4*, *Przem2*).

Na rys. 3.109 pokazano przykładową relację przemieszczenia pionowego punktów *Przem2* – *Przem5*, *Przem7* oraz *Przem8* do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego dla próbki SP_120_4100_2_1 (SP_2_1). Maksymalny moment skręcający jaki osiągnięto w próbie SP_2_1, przy pełnym wysuwie tłoka siłownika, równy był 3,33 kNm. Wartość ta jest o 6,4% większa od maksymalnego obciążenia zarejestrowanego w trakcie badania skręcania swobodnego próbki SP_1_1. Próba obciążeniowa trwała 290 s, co przekłada się na tempo wysuwu tłoka siłownika równe 0,52 mm/s.

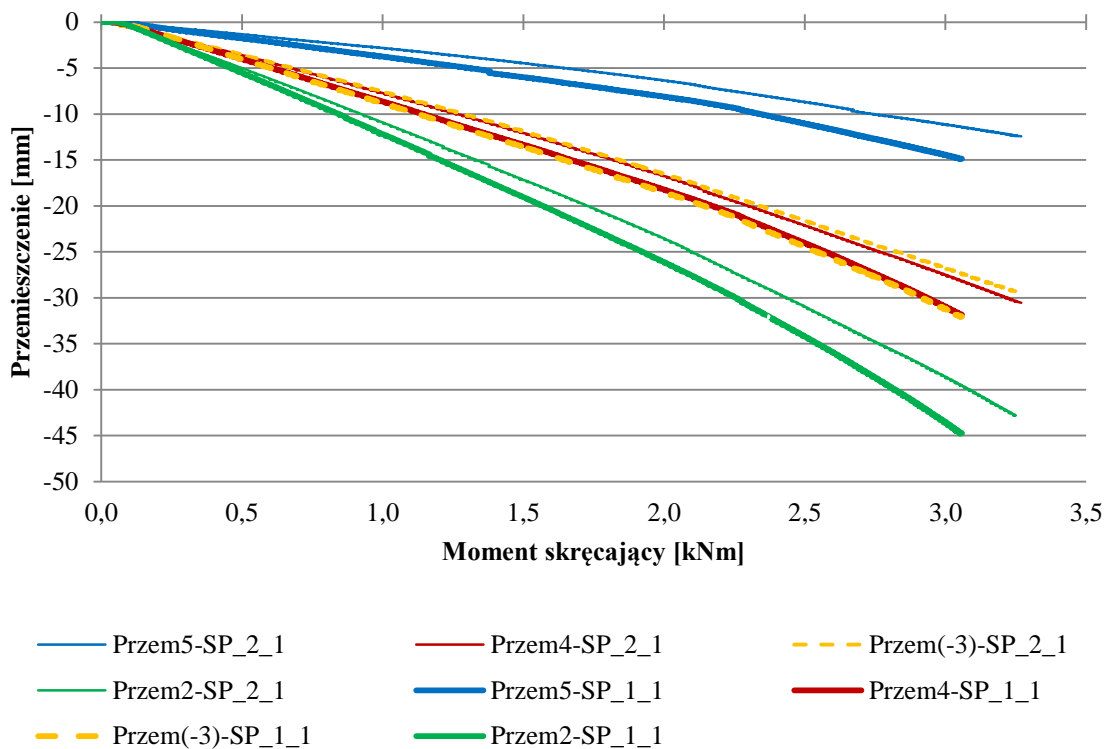


Rysunek 3.109. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_2_1.

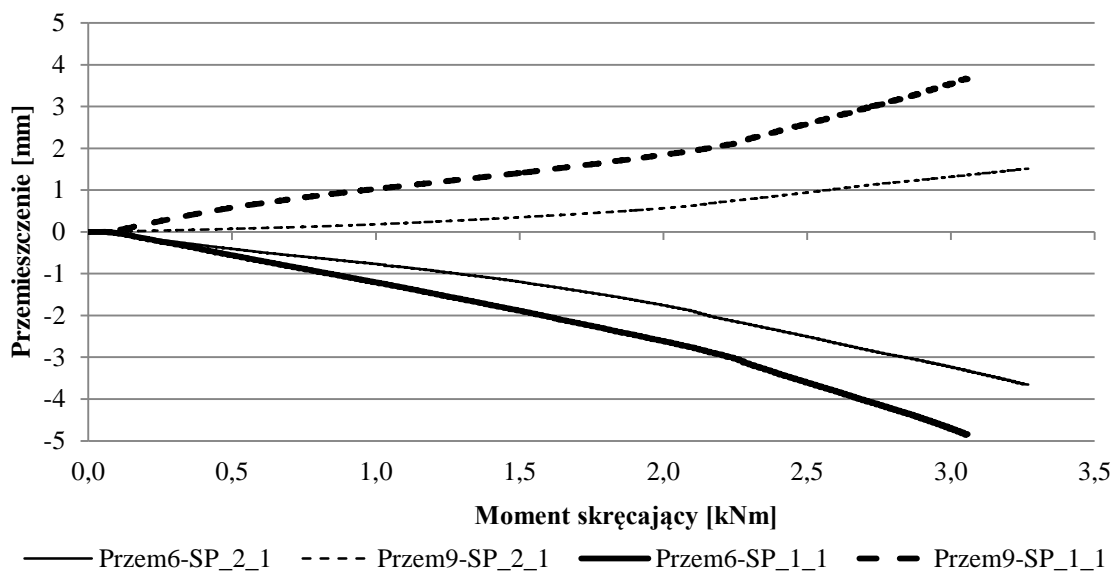
Podobnie jak w przypadku analizy skręcania swobodnego, przemieszczenia odczytywane z czujnika *Przem3* w realizowanej próbie skręcania skrępowanego osiągały wartości dodatnie. W celu weryfikacji zachowania symetrii skręcania badanej próbki zostały one przemnożone przez wartość (-1). Przedstawione na powyższym wykresie krzywe obrazujące wartości przemieszczeń przeciwnych krawędzi w środku rozpiętości badanego panelu warstwowego (*Przem4* oraz *Przem(-3)*) zachowują zgodność w pełnym zakresie obciążenia próbki. Świadczy to o symetrycznej pracy

skręcanego panelu warstwowego. Dla omawianej próby SP_2_1 osiągnięto poziom zgodności symetrii (równanie 3.30) równy 97,9%.

W celu zobrazowania wpływu, jaki miała wykonana w zrealizowanych badaniach laboratoryjnych blokada deplanacji przekroju podporowego na zachowanie skręcanego panelu warstwowego wykonano dodatkowe wykresy przedstawione na rys. 3.110 i rys. 3.111. Na rys. 3.110 przedstawiono relację przemieszczenia pionowego punktów *Przem2 - Przem5* do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego dla próbek skręcanych swobodnie (SP_1_1) i skrępowanie (SP_2_1). Na rys. 3.111 przedstawiono pomiar wgniecenia okładzin paneli warstwowych na podparze nieruchomej dla obu rodzajów skręcania panelu warstwowego o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm oraz szerokości równej 1000 mm. Cienkimi liniami oznaczono wyniki z badań skręcania skrępowanego panelu warstwowego (SP_2_1), liniami pogrubionymi wyniki z badań skręcania swobodnego (SP_1_1). Przedstawione na obu wykresach dane obrazują względne zachowanie tych samych punktów pomiarowych zlokalizowanych na skręcanych w różny sposób panelach warstwowych.



Rysunek 3.110. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanych próbek SP_1_1 i SP_2_1.



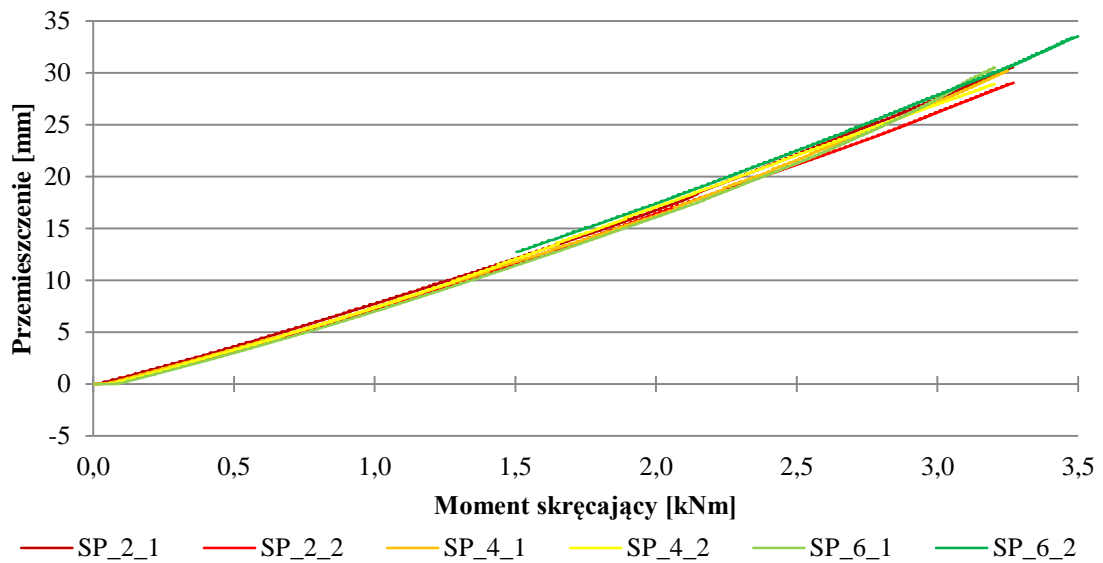
Rysunek 3.111. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanych próbek SP_1_1 i SP_2_1 obrazujący wgniecenie próbek na podporze.

Zastosowana w zrealizowanych badaniach laboratoryjnych blokada deplanacji spowodowała zmniejszenie wartości przemieszczeń wszystkich punktów, w których ustawione były indukcyjne czujniki przemieszczeń. W całym zakresie obciążenia próbki, na całym obszarze skręcanego panelu warstwowego zaobserwować można redukcję kątów obrotu skręcanych skrupowanie elementów, w odniesieniu do tych skręcanych swobodnie.

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 3.110 zaobserwować można spadek wartości przemieszczeń punktów pomiarowych od 10% (*Przem2*, *Przem4*) do 20% (*Przem5*). Im bliżej podpory nieruchomej tym wpływ blokady deplanacji przekroju poprzecznego odgrywał większą rolę na zmniejszenie wartości przemieszczeń analizowanych punktów (obserwowano większy spadek wartości przemieszczeń). Największy wpływ blokady deplanacji na zachowanie skręcanego panelu warstwowego zaobserwować można w bliskim sąsiedztwie podpory nieruchomej. Wartości wgniecenia rdzenia panelu warstwowego na podporze są w przypadku skręcania skrupowanego 1,5 - 2,0 razy mniejsze niż miało to miejsce w przypadku zrealizowanych prób skręcania swobodnego (rys. 3.111). Warto podkreślić, że wpływ na to miała nie tylko blokada przesuwu punktów wewnętrznych panelu warstwowego po kierunkach osi x oraz y zrealizowana za pomocą łączników mechanicznych. Dodatkowym czynnikiem niwelującym efekt wgniecenia rdzenia na podporze było zapieranie się okładzin skręcanego panelu warstwowego o gwinty łączników mechanicznych i częściowe blokowanie ich przesuwu po kierunku osi z .

Na wartości przemieszczeń punktów *Przem7* oraz *Przem5* zlokalizowanych w strefie przypodporowej (rys. 3.109), w której efekty blokady deplanacji występują najsilniej, duży wpływ mają także lokalne efekty związane z wgniataniem rdzenia panelu warstwowego na podporze. Z tego względu, nie zdecydowano się w pracy na analizę przyrostu kąta obrotu skręcanego skrępowanie panelu warstwowego na długości badanego elementu. Otrzymane z analiz wyniki przyrostu kąta obrotu pochodzące ze strefy przypodporowej, które mogłyby posłużyć do wyznaczenia sztywności giętno-skrętnej EI_{ω} paneli warstwowych, obarczone byłyby zbyt dużym błędem.

Na rys. 3.112 pokazano przemieszczenia *Przem3* wszystkich próbek skręcanych skrępowanie o tej samej budowie przekroju poprzecznego, w celu weryfikacji powtarzalności otrzymywanych z badań wyników. Pełna seria badawcza analizowanego przekroju poprzecznego panelu warstwowego obejmowała badanie trzech próbek, dokonując na każdej próbce po dwie próby obciążeniowe.



Rysunek 3.112. Relacja przemieszczenie *Przem3* – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: $H = 120$ mm, $B = 1000$ mm.

Przemieszczenia pionowe mierzone w środku rozpiętości skręcanego elementu, przy tym samym poziomie obciążenia, osiągają zbliżone wartości dla wszystkich próbek. Przedstawione na wykresie na rys. 3.112 krzywe mają podobny przebieg.

3.3.5 Skręcanie skrępowane – analiza naprężeń

Podobnie jak w przypadku próbek badanych w schemacie skręcania swobodnego, pomiaru odkształceń dokonano na dziesięciu próbkach skręcanych skrępowanie.

Czujnikami tensometrycznymi opomiarowane zostały dwa panele o szerokościach 1000 mm, dwa o szerokościach 500 mm oraz jeden o szerokości 250 mm. Pomiaru dokonano zarówno na próbkach o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm, jak i 160 mm. Ustawioną w stanowisku badawczym próbkę SP_120_4100_2_1 o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm i szerokości równej 1000 mm pokazano na rys. 3.113. Jest to próbka z największą liczbą – 12 punktów pomiaru odkształceń.



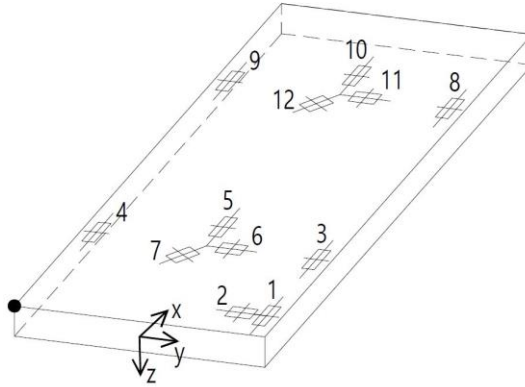
Rysunek 3.113. Badania paneli warstwowych z zastosowaniem tensometrów:
próbka SP_120_4100_2_1.

Zrealizowane badania skręcania skrępowanego paneli warstwowych pozostawały w pełnej zgodności ze szczegółowym opisem procesu laboratoryjnego przedstawionym w rozdziale 3.3.3 dotyczącym pomiaru odkształceń próbek skręcanych swobodnie.

Zastosowano te same reguły dotyczące:

- opisu punktów pomiarowych,
- rodzaju zastosowanych tensometrów,
- sposobu przygotowania powierzchni okładzin,
- stabilizacji (kompensacji) pomiaru tensometrycznego
- odczytu danych pomiarowych i wyznaczeniu na ich podstawie wartości naprężeń wewnątrz analizowanej próbki.

Lokalizacja tensometrów na próbkach skręcanych skrępowanie została opisana w zapisie współrzędnych kartezjańskich. Rozmieszczenie punktów pomiarowych odkształceń na omawianej próbce SP_120_4100_2_1 pokazano na rys. 3.114. Pozostałe dane, niezbędne do precyzyjnego opisu punktów zestawiono w tab. 3.19.



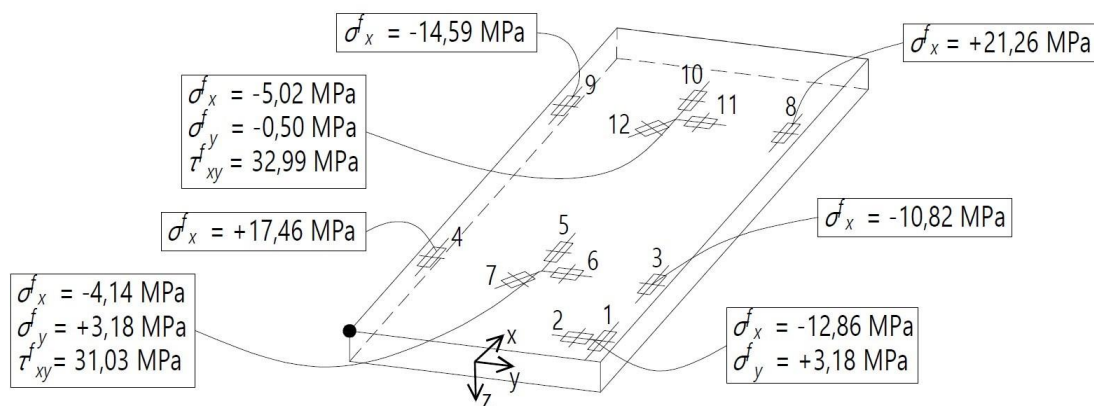
Rysunek 3.114. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_2_1, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki, względem którego ustawiano próbkę).

Tabela 3.19. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_2_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 450 ; -60) []
2	(240 ; 430 ; -60) [-]
3	(1000 ; 450 ; -60) []
4	(1000 ; -450 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) []
6	(1000 ; 0 ; -60) [-]
7	(1000 ; 0 ; -60) [/]
8	(3000 ; 450 ; -60) []
9	(3000 ; -450 ; -60) []
10	(3000 ; 0 ; -60) []
11	(3000 ; 0 ; -60) [-]
12	(3000 ; 0 ; -60) [/]

Na schemacie analizowanego panelu warstwowego SP_120_4100_2_1 rys. 3.115 pokazano wyznaczone wartości naprężeń w okładzinach elementu przy obciążeniu próbki momentem skręcającym równym 2,0 kNm. Wyniki te porównano z wynikami przedstawionymi na rys. 3.106 pochodzącymi z analiz skręcania swobodnego osiągniętymi przy tej samej wartości obciążenia próbki. Analizując zestawione dane nie zaobserwowano wyraźnych różnic między wartościami naprężeń otrzymanymi z analizy skręcania skrępowanego, a tymi otrzymanymi z analizy skręcania swobodnego. Zaobserwowane rozbieżności pomiędzy konkretnymi wartościami naprężeń oscylują wokół wartości szumu tensometrycznego, jaki wyznaczono dla zrealizowanych prób. Warto podkreślenia są pozostające na niskim poziomie wartości

naprężeń normalnych w obrębie podporowego przekroju poprzecznego, w którym została zablokowana swoboda deplanacji. Wskazywać to może na niepełną blokadę możliwości spaczenia przekroju podporowego, co zostanie szerzej omówione w kolejnym rozdziale pracy. Warto podkreślić są znaki naprężeń normalnych σ_x^f na przeciwległych krawędziach oraz końcach skręcanego panelu warstwowego. W punktach pomiarowych 3 i 9 dochodzi do ściskania okładzin po kierunku osi x , natomiast w punktach 4 i 8 do ich rozciągania (w tym samym kierunku). Wyznaczone wartości naprężeń normalnych σ_x^f jednoznacznie świadczą o charakterze zachowania skręcanego panelu warstwowego.



Rysunek 3.115. Naprężenia wewnętrzne w próbce SP_120_4100_2_1 przy obciążeniu równym 2,0 kNm.

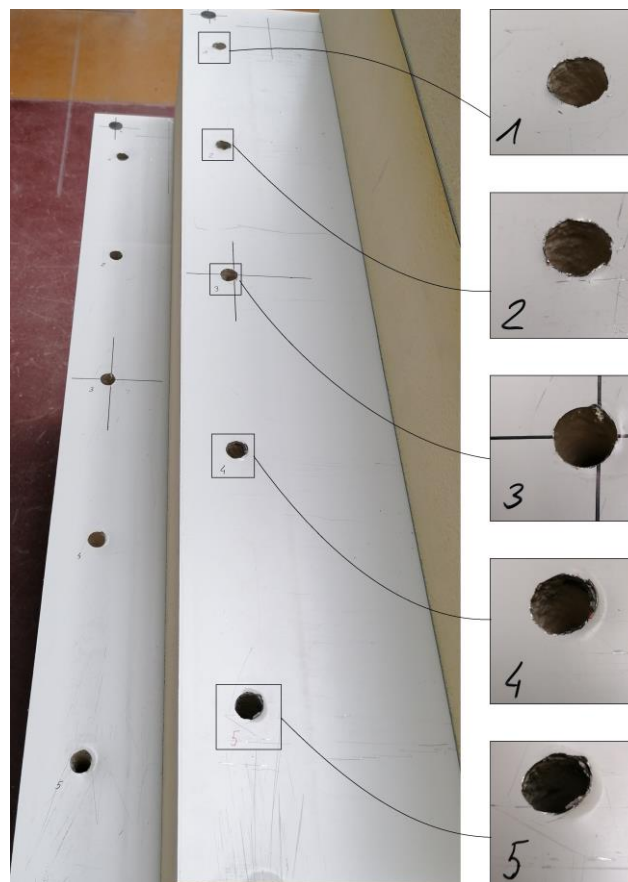
3.3.6 Komentarz do zrealizowanych badań laboratoryjnych

Przedstawione w rozdziale 3.3. analizy badań laboratoryjnych wykonano na podstawie obserwacji pełnego zakresu przebadanych próbek. Konkretnie zjawiska zachodzące w trakcie skręcania swobodnego i skrępowanego paneli warstwowych przedstawiono na wybranych przykładach.

W trakcie realizacji prób skręcania skrępowanego paneli warstwowych, pomimo zastosowania na podparze nieruchomej fizycznych łączników mechanicznych, zaobserwowano niepełną blokadę deplanacji podporowego przekroju poprzecznego. Przedstawione wyniki przemieszczeń oraz naprężeń wskazują na częściowe ograniczenie możliwości spaczenia przekroju poprzecznego panelu warstwowego. Zmiany wartości tych przemieszczeń i naprężeń (w odniesieniu do paneli warstwowych skręcanych swobodnie) są znacznie mniejsze niż te, których spodziewano się na etapie przygotowywania programu badań zasadniczych. Spodziewany efekt pełnej blokady deplanacji przekroju podporowego pokazano w oparciu o przeprowadzone analizy

numeryczne w rozdziale 4.5. Za główną przyczynę braku pełnej blokady deplanacji przekroju poprzecznego na podporze nieruchomej uznano zastosowanie punktowych ograniczeń przesuwu punktów wewnętrznych panelu warstwowego. W sąsiedztwie łączników mechanicznych dochodziło do silnych koncentracji naprężeń, czego efektem było uplastycznienie i deformacja okładzin w strefach ich kontaktu z łącznikami. Na skutek deformacji okładzin dochodziło do niewielkiego przesuwu punktów wewnętrznych panelu warstwowego po kierunku osi x . Stan okładzin panelu warstwowego w strefie podporowej, po przeprowadzonej próbie skręcania skrępowanego, obrazujący wyżej opisane zjawisko przedstawiono na rys. 3.116.

Z praktycznego punktu widzenia pełne ograniczenie deplanacji podporowego przekroju poprzecznego z zastosowaniem fizycznych łączników mechanicznych jest trudne w realizacji. Cienkie okładziny stosowanych w budownictwie paneli warstwowych są bardzo wrażliwe na silne koncentracje naprężeń dociskowych. Na ich skutek dochodzi do deformacji okładzin i zmniejszenia efektu blokady deplanacji przekroju poprzecznego na podporze.



Rysunek 3.116. Strefa podporowa panelu warstwowego SP_120_4100_2_1 po przeprowadzonej próbie skręcani skrępowanego.

4. Analizy numeryczne

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych skręcania paneli warstwowych stanowiły podstawowe źródło weryfikacji poprawności opracowanych modeli numerycznych badanych próbek. Wykonane w ramach prowadzonych prac analizy numeryczne opracowano za pomocą oprogramowania SIMULIA ABAQUS. Wykonano modele numeryczne analizowanych przypadków skręcania paneli warstwowych:

- modele skręcania swobodnego z odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia elementów,
- modele skręcania skrępowanego z odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia elementów,
- modele skręcania skrępowanego z zastosowaniem pełnej blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego.

Wykonanie finalnych modeli numerycznych zostało poprzedzone opracowaniem licznych modeli próbnych. Poszukiwano odpowiednich narzędzi numerycznych do możliwie najdokładniejszego odzwierciedlenia zachowania skręcanych paneli warstwowych w rzeczywistych badaniach laboratoryjnych. Dodatkowo, za pomocą modeli parametrycznych opartych na modelu skręcanej swobodnie próbki SP_120_4100_1_1 wykonano:

- analizę wrażliwości zmiany parametrów materiałowych na uzyskiwaną odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych,
- analizę zbieżności odpowiedzi mechanicznej skręcanych paneli warstwowych wraz ze zmianą rozmiaru i typu zastosowanych w modelach elementów skończonych.

Łącznie opracowano i przeanalizowano ponad sto modeli numerycznych. Dla jak najlepszego odzwierciedlenia rzeczywistej pracy skręcanych paneli warstwowych wszystkie modele numeryczne zostały wykonane jako trójwymiarowe, bryłowo-powłokowe.

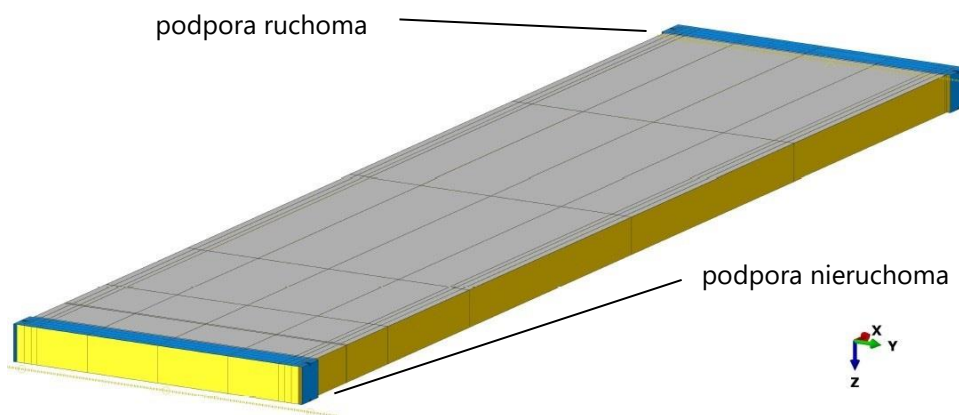
4.1. Budowa modelu numerycznego

W kolejnych rozdziałach szczegółowo opisano budowę wykonanych modeli numerycznych na przykładzie próbki skręcanej swobodnie panelu warstwowego SP_120_4100_1_1. Dodatkowo, w odniesieniu do próbki wzorcowej, opisane zostały modyfikacje wprowadzone przy modelowaniu pozostałych paneli warstwowych.

4.1.1 Warunki podparcia

W ramach analizy skręcania swobodnego, na całej długości skręcane elementu należało zadbać o jak największą swobodę przesuwu punktów wewnętrznych modelowanego panelu warstwowego po kierunku osi x .

Podpory skręcanych paneli warstwowych (rys. 4.1) zostały zamodelowane za pomocą analitycznie sztywnych elementów powłokowych. Elementy podporowe nie były poddawane analizom wytrzymałościowym, a relacja ich sztywność do sztywności badanych paneli warstwowych była na tyle duża, że zastosowanie takich elementów uznano za najbardziej zasadne.

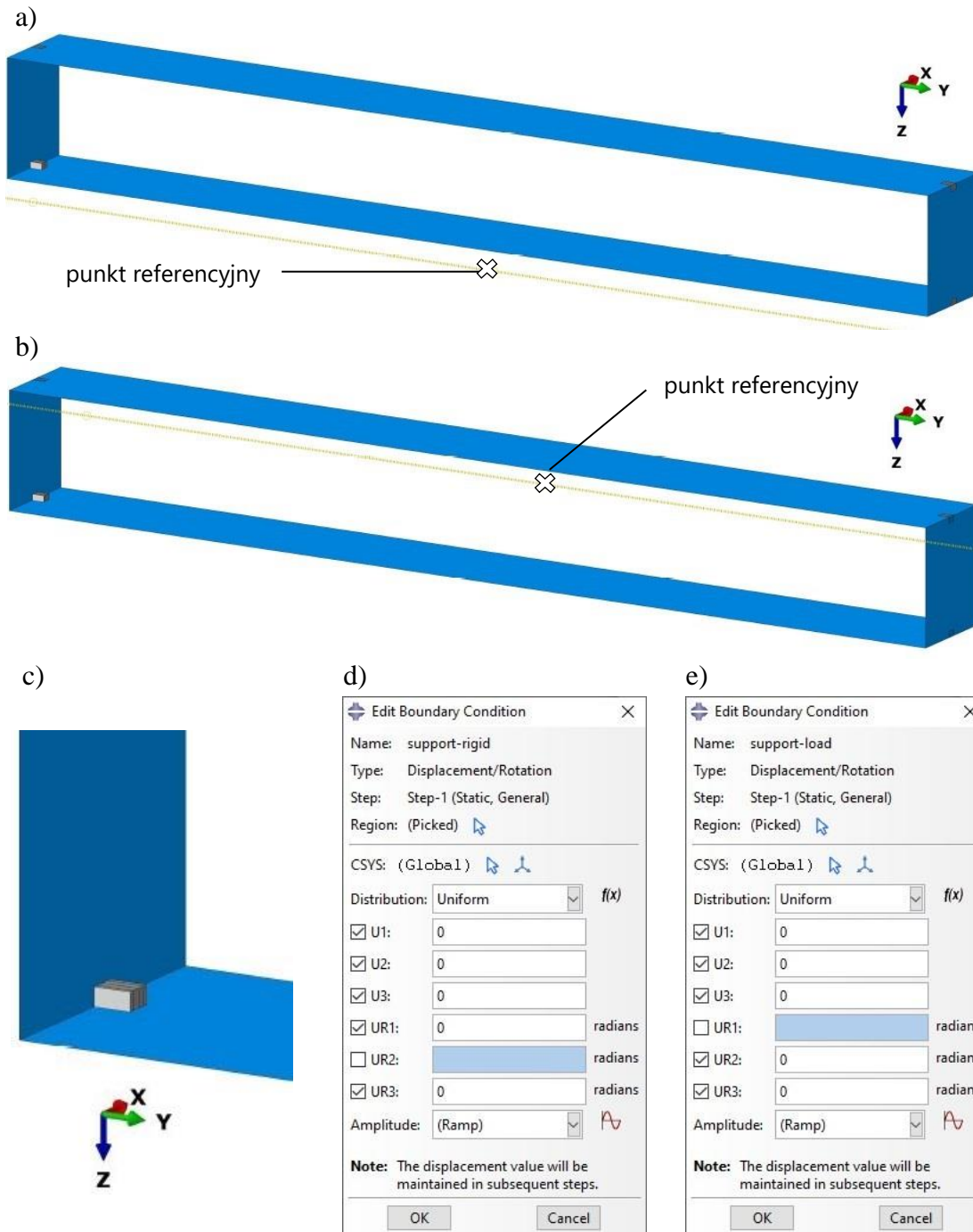


Rysunek 4.1. Warunki podparcia próbki SP_120_4100_1_1 w modelu numerycznym.

Podpora nieruchoma (rys. 4.2a) oraz podpora ruchoma (rys. 4.2b) zostały zamodelowane w podobny sposób. Elementy podporowe wykonano w formie zamkniętej ramy obejmującej podporowy przekrój poprzeczny panelu warstwowego na długości 100 mm. Wysokość ramy przyjęto równą wysokości przekroju poprzecznego badanej próbki. Szerokość została powiększona o 50 mm względem szerokości przekroju poprzecznego skręcane elementu. Poszerzenie szerokości związane było z umieszczeniem wewnątrz ram podporowych dodatkowych poziomych ograniczników (rys. 4.2c), za pomocą których odzwierciedlono laboratoryjne warunki podparcia paneli warstwowych. Poziome ograniczniki zamodelowano za pomocą elementów bryłowych. Uformowanie elementów podporowych w sztywny przekrój zamknięty, z umieszczonymi wewnątrz ogranicznikami, pozwoliło na odpowiednią wymianę oddziaływań pomiędzy podporami i skręcanych panelami warstwowymi.

Każdej podporze zostały przypisane indywidualne warunki brzegowe polegające na blokadzie odpowiednich stopni swobody. Punkty referencyjne, w których definiowano warunki brzegowe zlokalizowano w miejscach ściśle związanych

z globalnym zachowaniem podpór. Rozmieszczenie punktów referencyjnych zostało tak dobrane, aby za pomocą odpowiedniej blokady konkretnych stopni swobody było możliwe poprawne zdefiniowanie zachowania całej podpory.

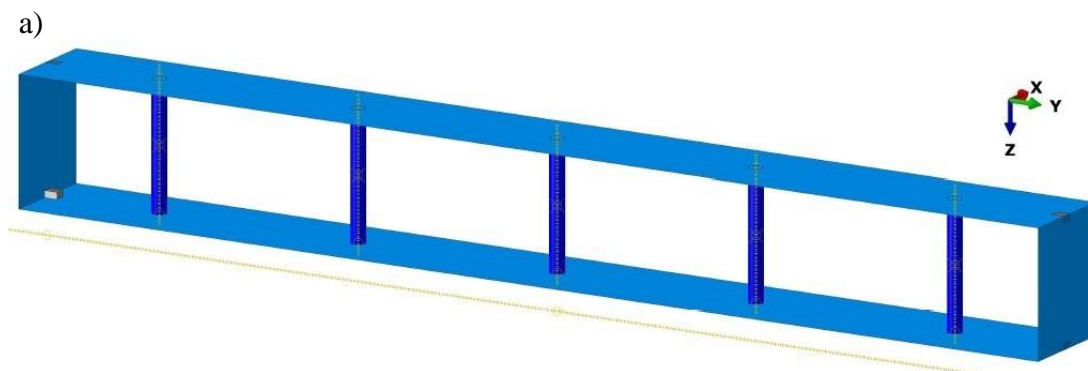


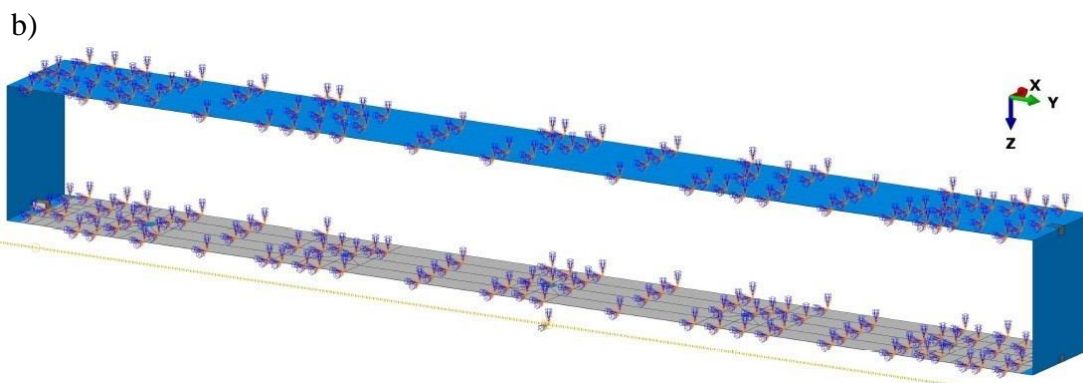
Rysunek 4.2. Warunki podparcia skręcanych swobodnie paneli warstwowych:

- a) podpora nieruchoma, b) podpora ruchoma – obrotowa, c) poziomy ogranicznik,
- d) podpora nieruchoma – stopnie swobody, e) podpora ruchoma – stopnie swobody.

Punkt referencyjny podpory nieruchomej (rys. 4.2a), której umożliwiono obrót wokół osi y został zdefiniowany 35 mm poniżej dolnej powierzchni ramy podporowej, w miejscu, względem którego dopuszczony został obrót. Oś obrotu podpory wokół osi y pokrywa się z osią przegubu liniowego podpory nieruchomej zastosowanej w badaniach laboratoryjnych. Pozostałe stopnie swobody: przesuwu po kierunkach x , y , z oraz obroty wokół osi x i z zostały zablokowane (rys. 4.2d). Punkt referencyjny podpory ruchomej (rys. 4.2b), której umożliwiono obrót wokół osi x został zdefiniowany po zewnętrznej stronie ramy podporowej, w miejscu, względem którego dopuszczony został obrót. Oś obrotu podpory ruchomej wokół osi x pokrywa się z osią obrotu stanowiska badawczego. Pozostałe stopnie swobody: przesuwu po kierunkach x , y , z oraz obroty wokół osi y i z zostały zablokowane (rys. 4.2e).

W przypadku modelowania numerycznego skręcania skrępowanego paneli warstwowych ruchoma podpora obrotowa została wykonana w ten sam sposób jak opisano powyżej. Z kolei na podporze nieruchomej panelowi warstwowemu została ograniczona swoboda deplanacji w przekroju podporowym. Ograniczenie swobody deplanacji wykonano z pełnym odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia paneli warstwowych. Zamodelowane zostały fizycznie łączniki mechaniczne (rys. 4.3a), dla których zdefiniowano odpowiednie warunki ich kontaktu z mocowanym panelem warstwowym. Dodatkowo, w ramach prowadzonych prac numerycznych wykonano analizy skręcania skrępowanego z zastosowaniem pełnej blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego skręcanego elementu. Blokadę deplanacji na podporze wykonano za pomocą zdefiniowania powierzchniowych warunków brzegowych, przypisanych bezpośrednio do okładzin paneli warstwowych. Na powierzchniach kontaktu okładzin z nieruchomą ramą podporową zostały zablokowane możliwości przesuwu okładzin po kierunkach osi x i y (rys. 4.3b).

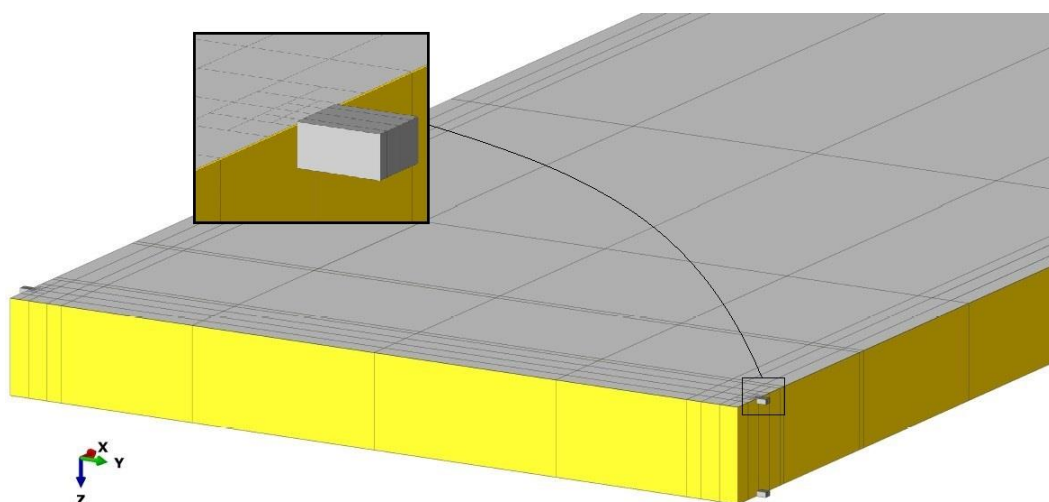




Rysunek 4.3. Warunki podparcia paneli warstwowych skręcanych skrępowanie:
a) laboratoryjne, b) z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego.

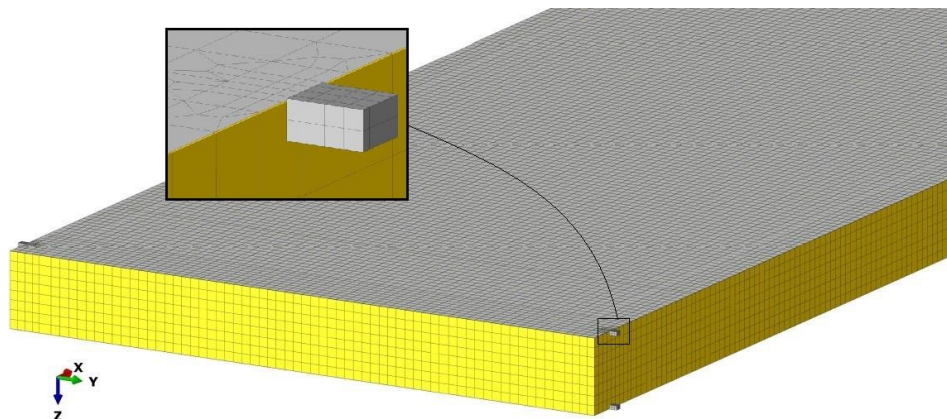
4.1.2 Rozmiar i typ elementów skończonych

Geometria modelowanych paneli warstwowych została opracowana w pełnej zgodności z rzeczywistymi próbkami pomierzonymi w laboratorium. Przestrzenne modele numeryczne zostały wykonane z zastosowaniem bryłowych i powłokowych obiektów geometrycznych. Rdzeń paneli warstwowych oraz poziome ograniczniki umieszczone wewnątrz ram podporowych wykonano za pomocą obiektów bryłowych. Okładziny paneli warstwowych wykonano jako jednorodne obiekty powłokowe o grubości równej sumie grubości poszczególnych warstw. Geometryczną budowę panelu warstwowego SP_120_4100_1_1 przedstawiono na rys. 4.4. Widoczne na rysunku linie wewnątrz gabarytu próbki związane są z dokonaniem podziałem elementów składowych na mniejsze części. Proces ten ułatwił odpowiednie nałożenie siatki elementów skończonych na skręcany element. Dodatkowo, punkty przecięcia krawędzi podziału wyznaczały lokalizację miejsc szczególnych wewnątrz analizowanych próbek.



Rysunek 4.4. Próbką SP_120_4100_1_1 – budowa modelu.

W celu dokonania odpowiedniego wyboru rozmiaru siatki oraz typu zastosowanych w analizach elementów skończonych wykonano analizę zbieżności wyników, którą szczegółowo opisano w rozdziale 4.3. W rezultacie przeprowadzonej analizy zbieżności rdzeń paneli warstwowych zamodelowano za pomocą ośmiowęzłowych, bryłowych elementów skończonych C3D8, z ośmioma punktami całkowania wewnątrz elementu. Tego samego typu elementy skończone zostały wykorzystane przy budowie poziomych ograniczników, stanowiących część składową podpory skręcanego elementu. Okładziny paneli warstwowych zamodelowano za pomocą czterowęzłowych, powłokowych elementów skończonych S4, z czterema punktami całkowania wewnątrz elementu. Podstawowy rozmiar siatki elementów skończonych modelowanych paneli warstwowych zarówno dla powłokowych elementów okładzin, jak i bryłowych elementów rdzenia przyjęto równy 15 mm. Z uwagi na stosunkowo małe gabaryty poziomych ograniczników (szerokość równa 10 mm), w obrębie ich kontaktu z okładzinami paneli warstwowych, siatka elementów skończonych została odpowiednio dogęszczona do wymiaru równego 3,125 mm. Budowę siatki elementów skończonych próbki SP_120_4100_1_1 wraz z lokalnym powiększeniem miejsca kontaktu panelu warstwowego z poziomym ogranicznikiem pokazano na rys. 4.5.



Rysunek 4.5. Próbką SP_120_4100_1_1 – siatka MES.

4.1.3 Model materiału

Wykorzystane w modelach numerycznych parametry materiałowe rdzenia oraz okładzin paneli warstwowych zostały przyjęte na podstawie przeprowadzonych w szerokim zakresie badań materiałowych. Opracowując program badań wykonano opisaną w rozdziale 4.2 analizę wrażliwości zmiany parametrów materiałowych na zachowanie skręcanych paneli warstwowych. Mając na uwadze czasochłonność i skomplikowanie

części badań materiałowych, te parametry, które zgodnie z przeprowadzoną analizą wrażliwości nie odgrywały istotnego znaczenia w odpowiedzi mechanicznej skręcanych paneli warstwowych, zostały przyjęte na podstawie wyników przedstawionych przez innych badaczy. Do parametrów materiałowych rdzenia, które w ramach prac nad rozprawą nie zostały wyznaczone laboratoryjnie należą: moduł ścinania rdzenia G_{xy}^c oraz współczynniki Poissona rdzenia $\nu_{xy}^c, \nu_{yz}^c, \nu_{zx}^c$. W trakcie wyznaczania modułu sprężystości podłużnej rdzenia (rozdział 3.1.2) za pomocą metody optycznych pomiarów przemieszeń wyznaczony został tylko współczynnik Poissona materiału ν_{zy}^c .

Rdzeń paneli warstwowych został zamodelowany za pomocą ortotropowego modelu materiału, dla którego uogólnione prawo Hooke'a można zapisać za pomocą relacji [42]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_x & -\nu_{yz}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

w której symetria macierzy podatności związana jest z poniższymi zależnościami pomiędzy poszczególnymi modułami sprężystości i współczynnikami Poissona [42]:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}. \quad (4.2)$$

Właściwości materiału ortotropowego w zakresie liniowo – sprężystym można opisać za pomocą dziewięciu unikatowych składowych:

- trzech modułów sprężystości podłużnej: E_x, E_y, E_z ,
- trzech modułów ścinania: G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} ,
- trzech współczynników Poissona: $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$,

które dla rdzenia panelu warstwowego SP_120_4100_1_1 przyjęto w postaci:

$$\begin{aligned} E_x^c &= 16,84 \text{ MPa}, & \nu_{xy}^c &= 0,68, & G_{xy}^c &= 1,90, \\ E_y^c &= 5,93 \text{ MPa}, & \nu_{yz}^c &= 0,29, & G_{yz}^c &= 1,81, \\ E_z^c &= 4,20 \text{ MPa}, & \nu_{zx}^c &= 0,37, & G_{zx}^c &= 2,82. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Moduły sprężystości podłużnej rdzenia: E_x^c, E_y^c, E_z^c przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych zgodnie z wynikami przedstawionymi w rozdziale 3.1.2 (tab. 3.6). Moduły ścinania rdzenia: G_{yz}^c, G_{zx}^c przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych zgodnie z wynikami przedstawionymi w rozdziale 3.1.3 (tab. 3.8 i tab. 3.9). Współczynniki Poissona przyjęto na podstawie pracy [21], jako średnią arytmetyczną z wyników przedstawionych dla próby rozciągania i ściskania próbek. Wyboru pracy [21] dokonano na podstawie zbliżonej wartości współczynnika Poissona ν_{zy}^c przedstawionego w pracy [21], z tym wyznaczonym w badaniach laboratoryjnych (tab. 3.5). Moduł ścinania rdzenia G_{xy}^c został wyznaczony z przedstawionego w pracy [25] równania:

$$\frac{1}{E_{x45}^c} = \frac{1-\nu_{xy}^c}{4 \cdot E_x^c} + \frac{1-\nu_{yx}^c}{4 \cdot E_y^c} + \frac{1}{G_{xy}^c}, \quad (4.4)$$

gdzie symbolem E_{x45}^c oznaczono moduł sprężystości podłużnej materiału rdzenia po kierunku obróconym o 45° względem osi x , a nieznaną wartość współczynnika Poissona ν_{yx}^c wyznaczono z równania (4.2) na podstawie wyznaczonych laboratoryjnie modułów sprężystości podłużnej rdzenia (tab. 3.6).

Okładziny paneli warstwowych zostały zamodelowane za pomocą jednorodnego, izotropowego, sprężysto-plastycznego modelu materiału. Efektywny moduł sprężystości podłużnej $E_{t,f}^f$ oraz współczynnik Poissona $\nu_{t,f}^f$ odniesione do całkowitej grubości okładziny (wraz z warstwami antykorozyjnymi oraz organicznymi) w zakresie liniowo – sprężystym przyjęto równe:

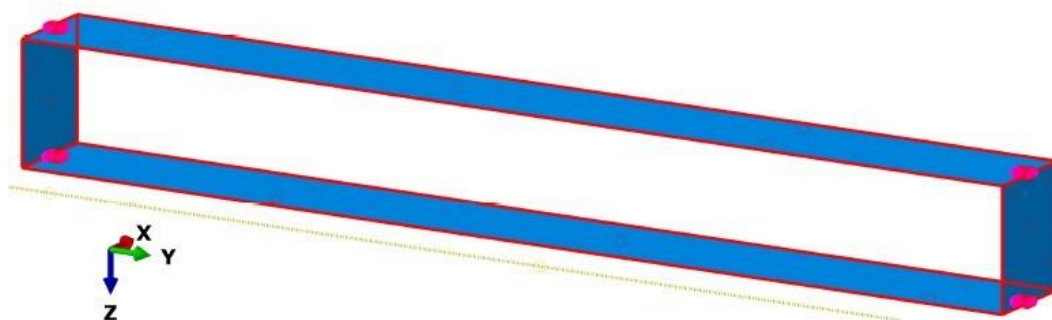
$$E_{t,f}^f = 195,05 \text{ GPa}, \quad \nu_{t,f}^f = 0,30. \quad (4.5)$$

Dodatkowo, dla bliższego rzeczywistości odzwierciedlenia zachowania się okładzin paneli warstwowych w miejscach ich styku z poziomymi ogranicznikami na podporach, model materiału okładzin został wzbogacony o półkę plastyczną. Na podstawie badań laboratoryjnych, wypadkową wartość granicy plastyczności materiału okładzin próbki SP_120_4100_1_1 przyjęto równą 375 MPa.

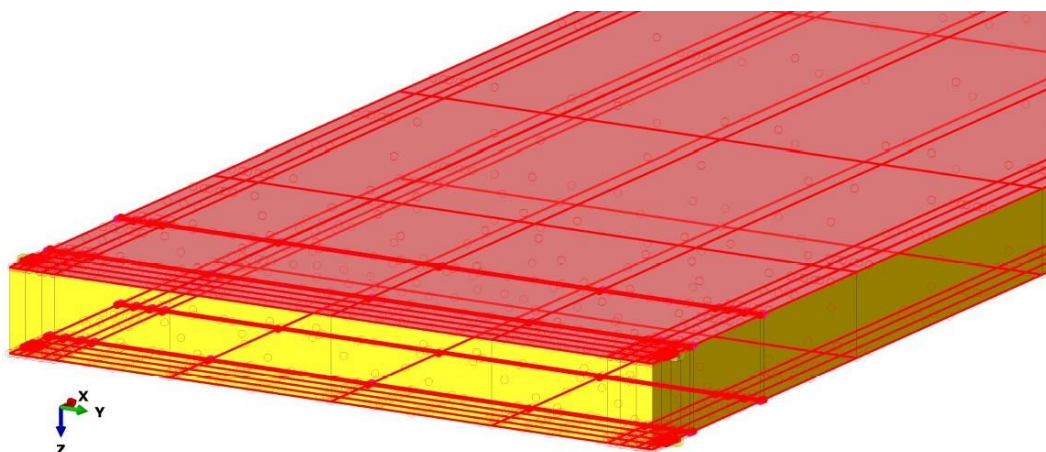
Poziome ograniczniki zostały zamodelowane za pomocą liniowo – sprężystego, jednorodnego, izotropowego modelu materiału. Założono wartość modułu sprężystości podłużnej równą 210 GPa oraz współczynnika Poissona równą 0,30.

4.1.4 Parametry kontaktu

W opracowanych modelach numerycznych zastosowano dwa główne rodzaje interakcji pomiędzy poszczególnymi elementami modelu. W przypadku wzajemności odkształceń stykających się ze sobą elementów wykorzystano dostępną w oprogramowaniu ABAQUS funkcję TIE. Z definicji zakłada ona przypisanie sąsiednim węzłom tych samych wartości przemieszczeń oraz obrotów (wyrównanie wartości wszystkich aktywnych stopni swobody) na zdefiniowanych parach powierzchni kontaktowych. W każdej takiej parze współpracujących powierzchni jedna z nich definiowana jest jako powierzchnia główna, druga jako powierzchnia podrzędna [1]. W taki sposób zamodelowany został kontakt pomiędzy poziomymi ogranicznikami, a sztywną ramą podporową (rys. 4.6) oraz kontakt pomiędzy okładzinami, a rdzeniem paneli warstwowych (rys. 4.7).



Rysunek 4.6. Kontakt TIE pomiędzy poziomymi ogranicznikami, a sztywną ramą podporową.



Rysunek 4.7. Kontakt TIE pomiędzy okładzinami, a rdzeniem paneli warstwowych.

W przypadku styku dwóch powierzchni, wobec których nie można założyć równości aktywnych stopni swobody sąsiednich węzłów (rys. 4.8), zastosowano połączenie kontaktowe SURFACE TO SURFACE, z odpowiednio zdefiniowanymi

parametrami kontaktu. Parametrem wspólnym dla wszystkich zdefiniowanych w ten sposób kontaktów (rys. 4.8) jest definicja pracy połączenia w kierunku normalnym do powierzchni styku jako HARD-CONTACT. Gdy powierzchnie kontaktowe stykają się, każdy nacisk styku może być przenoszony między nimi. Powierzchnie kontaktowe mogą się rozdzielić, gdy nacisk styku zmniejsza się do zera [1]. Definicja pracy połączenia w kierunku stycznym do powierzchni styku opierała się na stałej wartości przyjętego współczynnika tarcia. Wartość współczynnika uzależniono od rodzaju stykających się ze sobą powierzchni:

- w przypadku kontaktu okładzin paneli warstwowych z ramami podporowymi przyjęto współczynnik tarcia μ równy 0,075 (z uwagi na zastosowane w budowie stanowiska laboratoryjnego dodatkowe łożysko ślizgowe),
- w przypadku kontaktu ze sobą pozostałych elementów stalowych przyjęto współczynnik tarcia μ równy 0,30.

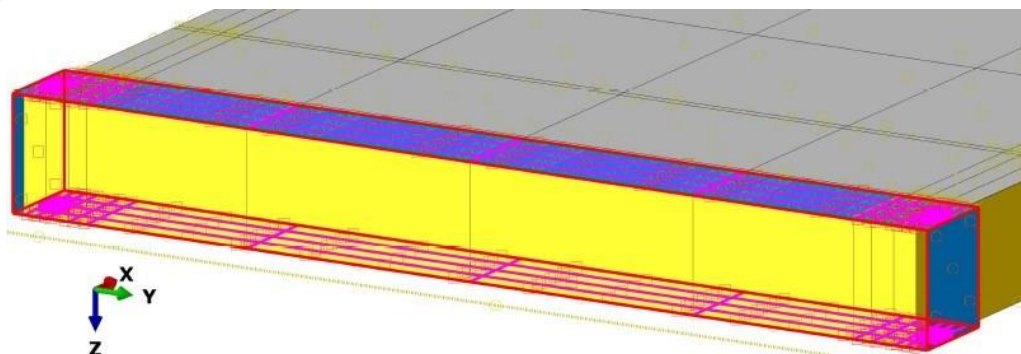
Wyżej opisane parametry kontaktów zdefiniowano pomiędzy:

- powierzchniami ram podporowych (powierzchnie główne), a powierzchniami okładzin paneli warstwowych (powierzchnie podrzędne) – rys. 4.8a,
- powierzchniami poziomych ograniczników (powierzchnie główne), a krawędziami okładzin paneli warstwowych (krawędzie podrzędne) – rys. 4.8b.

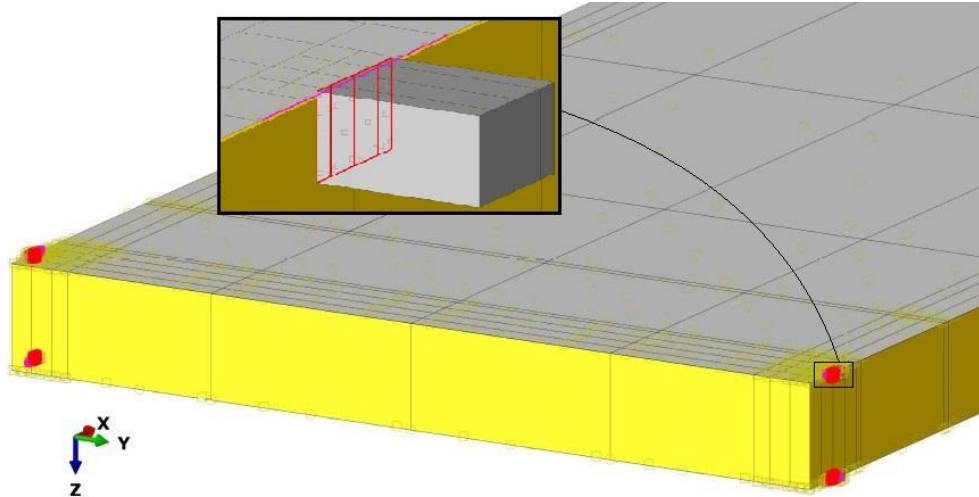
Dodatkowo, w przypadku modeli numerycznych skręcania skrępowanego zastosowano powiązania kontaktowe pomiędzy:

- powierzchniami mechanicznych łączników podporowych (powierzchnie główne), a krawędziami otworów wykonanych w okładzinach paneli warstwowych (krawędzie podrzędne) – rys. 4.8c.

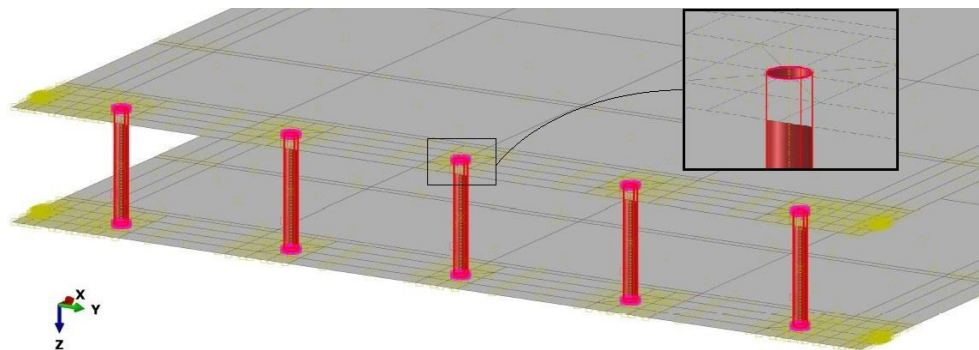
a)



b)



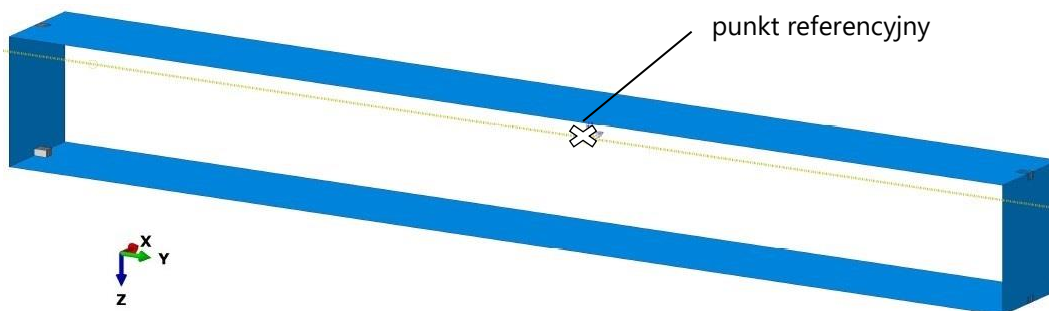
c)



Rysunek 4.8. Kontakt SURFACE TO SURFACE pomiędzy: a) okładzinami paneli warstwowych, a ramą podporową, b) poziomymi ogranicznikami, a okładzinami paneli warstwowych, c) łącznikami mechanicznymi, a okładzinami paneli warstwowych.

4.1.5 Obciążenie

Obciążenie modelowanych paneli warstwowych definiowano w punkcie referencyjnym ruchomej podpory obrotowej (rys. 4.9). Skupiony moment skręcający M_x przekazywano na skręcany element poprzez sztywną ramę podporową, w dziesięciu przyrostowych krokach. Próbka SP_120_4100_1_1 obciążona była momentem skręcającym o wartości równej 3,0 kNm.



Rysunek 4.9. Próbka SP_120_4100_1_1 – obciążenie.

4.2. Analiza wrażliwości zmiany parametrów materiałowych

Model numeryczny próbki SP_120_4100_1_1, opisany w rozdziale 4.1, wykorzystano jako model bazowy do przeprowadzonej analizy wrażliwości zmiany parametrów materiałowych na uzyskiwaną odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych. Analiza wrażliwości wykonana została przed realizacją badań materiałowych opisanych w rozdziale 3.1. Z tego względu parametry materiałowe rdzenia panelu warstwowego wykorzystane do budowy modelu bazowego zostały przyjęte na podstawie pracy innych badaczy [18]. W odniesieniu do parametrów rdzenia z pracy [18] przyjęto dodatkowo, że moduły ścinania we wszystkich trzech płaszczyznach są równe modułowi ścinania w płaszczyźnie xz . Parametry materiałowe okładzin modelu bazowego przyjęto zgodnie z wartościami przedstawionymi w pracy [19]. Przeprowadzona analiza miała na celu wskazanie parametrów materiałowych, które w sposób najbardziej znaczący wpływają na zachowanie skręcanych paneli warstwowych. Na parametrach tych należało skupić największą uwagę w trakcie wykonywania zasadniczych badań materiałowych. W trakcie prowadzonej analizy zmieniano: dziewięć parametrów (4.3) definiujących materiał rdzenia oraz dwa parametry (4.5) definiujące materiał okładzin modelowanych paneli warstwowych. Zmiany wartości współczynników Poissona materiału rdzenia dokonywano jednocześnie przy zachowaniu równości między nimi:

$$v^c = v_{xy}^c = v_{yz}^c = v_{zx}^c. \quad (4.6)$$

Oceny wpływu zmiany parametrów materiałowych na przeprowadzane analizy dokonano w oparciu o wyznaczaną numerycznie sztywność skrętną (metodykę wyznaczania opisano w rozdziale 4.4.2) oraz wartość przemieszczenia *Przem3* (rys. 3.88) w środku rozpiętości skręcane panelu warstwowego. Wyznaczona numerycznie sztywność skrętna bazowego panelu warstwowego równa jest $115,55 \text{ kNm}^2$, a wartość przemieszczenia *Przem3* równa $29,22 \text{ mm}$ (przy obciążeniu próbki momentem skręcającym o wartości równej $3,0 \text{ kNm}$). Wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w tab. 4.1.

Tabela 4.1. Wpływ parametrów materiałowych na zachowanie skręcanego panelu warstwowego.

Parametr materiału	Wartość bazowa parametru	Liczbowy zakres zmian parametru		Procentowy zakres zmian parametru		Procentowa zmiana sztywności skrętej		Procentowa zmiana przemieszczenia <i>Przem3</i>	
		od	do	min	max	dla min	dla max	dla min	dla max
E_x^c [MPa]	13,89	7,89	19,89	-43,2%	43,2%	-0,003%	0,004%	0,040%	-0,026%
E_y^c [MPa]	5,61	2,61	8,61	-53,5%	53,5%	0,002%	-0,001%	0,005%	-0,003%
E_z^c [MPa]	3,54	0,54	6,54	-84,7%	84,7%	0,375%	-0,087%	19,725%	-2,028%
ν^c [-]	0,00	-0,30	0,30			-0,102%	0,007%	-0,899%	-1,270%
G_{xy}^c [MPa]	3,00	2,25	3,75	-25,0%	25,0%	-0,004%	0,003%	0,008%	-0,008%
G_{xz}^c [MPa]	3,00	2,25	3,75	-25,0%	25,0%	-22,098%	20,819%	24,426%	-14,932%
G_{yz}^c [MPa]	3,00	2,25	3,75	-25,0%	25,0%	0,942%	-0,761%	2,536%	-1,640%
$E_{t,f}^f$ [GPa]	195,0	165,0	225,0	-15,4%	15,4%	-2,665%	2,099%	2,109%	-1,572%
$\nu_{t,f}^f$ [-]	0,30	0,00	0,30		0,0%	3,142%	0,000%	-2,239%	0,000%

Procentowy zakres zmian parametrów materiałowych określono za pomocą relacji:

$$\left(\frac{\text{wartość zmieniona parametru}}{\text{wartość bazowa parametru}} - 1,0 \right) \cdot 100\%. \quad (4.7)$$

Wpływ zmiany parametrów materiałowych na wartość wyznaczanej sztywności skrętej i przemieszczenia *Przem3* określano za pomocą zależności:

$$\left(\frac{\text{sztywność skrętna po zmianie parametru materiałowego}}{\text{bazowa sztywność skrętna}} - 1,0 \right) \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

$$\left(\frac{\text{przemieszczenie } Przem3 \text{ po zmianie parametru materiałowego}}{\text{bazowe przemieszczenie } Przem3} - 1,0 \right) \cdot 100\%. \quad (4.9)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy widać, że parametrem, który silnie wpływa na wyznaczone wartości sztywności skrętnych jest moduł ścinania rdzenia G_{zx}^c panelu warstwowego. Zmiana jego wartości o 25% powoduje zmianę sztywności skrętną o ponad 20%. Zależność ta jest widoczna zarówno wraz ze zmniejszaniem wartości modułu ścinania, jak i wzrostem jego wartości. Warty podkreślenia jest fakt, że zmiany wartości pozostałych modułów ścinania rdzenia G_{xy}^c oraz G_{yz}^c paneli warstwowych w marginalny sposób wpływają na zmiany wyznaczanych sztywności skrętnych. Podobnie, marginalny wpływ na wyznaczaną wartość sztywności skrętną mają wartości współczynników Poissona materiału rdzenia, które w opisywanej analizie wrażliwości zmieniano od wartości -0,30 do wartości 0,30. Podczas modyfikacji wartości modułów sprężystości materiału rdzenia nie zaobserwowano wyraźnej zmiany wyznaczonej numerycznie sztywności skrętną paneli warstwowych. Należy jednak podkreślić i omówić wyraźny wpływ zmiany wartości modułu sprężystości E_z^c na wartości przemieszczeń *Przem3* skręcanego panelu warstwowego. Modyfikacja sztywności podłużnej materiału rdzenia po kierunku osi z wpływa bezpośrednio na wartości lokalnego wgniecenia panelu warstwowego na podporze. Lokalne wgniecenie przekłada się bezpośrednio na zachowanie skręcanego elementu.

W zauważalny sposób na zachowanie skręcanych paneli warstwowych wpływa modyfikacja parametrów materiałowych okładzin. Zmiana wartości modułu sprężystości podłużnej o 15% powoduje zmianę sztywności skrętną o około 3% oraz wartości przemieszczenia *Przem3* o około 2%. W przypadku zmian modułu sprężystości okładzin istotny jest jednak fakt, że wpływ na zachowanie skręcanego elementu jest wyraźnie mniejszy niż zakres zmienianego parametru. Dodatkowo, w przeprowadzonych badaniach materiałowych parametr ten został precyzyjnie wyznaczony.

4.3. Analiza zbieżności: rozmiar i rodzaj elementów skończonych

Dobór rozmiaru i typu zastosowanych w analizach numerycznych elementów skończonych został poprzedzony wykonaną analizą zbieżności otrzymywanych wyników. Przeprowadzenie analizy zbieżności pozwala zweryfikować poprawność przyjętych w analizie numerycznej założeń dotyczących budowy modelu. Analizę rozpoczęto od zastosowania bryłowych C3D8R i powłokowych S4R elementów skończonych o zredukowanej liczbie punktów całkowania wewnątrz elementu. Na tego typu elementach skończonych przeprowadzona została analiza wpływu rozmiaru siatki

elementów skończonych na otrzymywane wyniki przemieszczeń *Przem3* (rys. 3.88) oraz naprężeń w przekroju poprzecznym w środku rozpiętości skręcanej próbki:

- normalnych σ_x^f na krawędzi górnej okładziny panelu warstwowego,
- stycznych τ_{xy}^f w środku szerokości górnej okładziny panelu warstwowego,
- stycznych τ_{xz}^c w środku wysokości, na zewnętrznej krawędzi rdzenia panelu warstwowego.

Wyniki przeprowadzonych analiz zestawiono w tab. 4.2.

Tabela 4.2. Wpływ rozmiaru siatki MES na zbieżność wyników skręcanych paneli warstwowych.

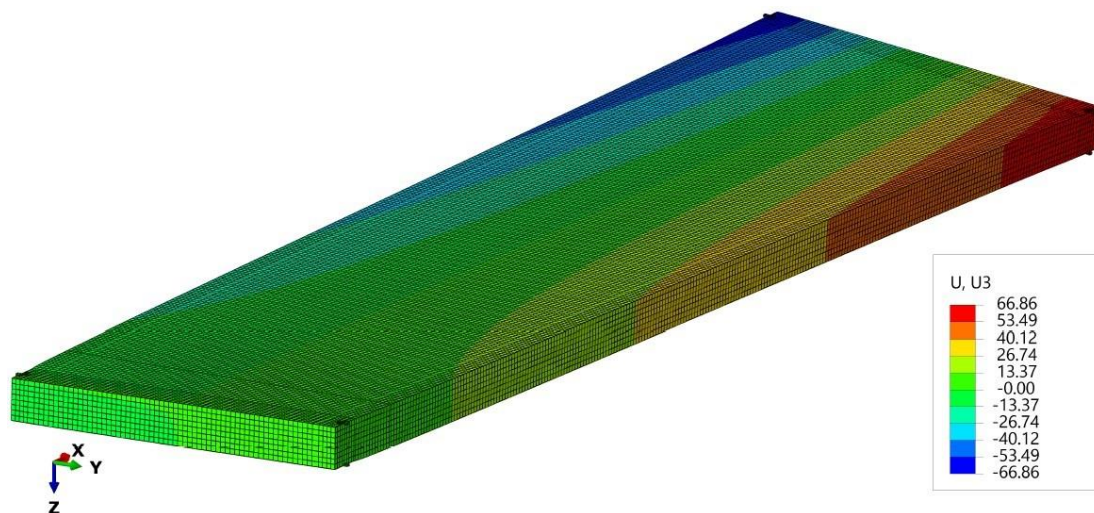
Rozmiar siatki MES [mm]	Liczba elementów	Liczba węzłów	Liczba zmiennych	<i>Przem3</i> [mm]	Sztywność GI_T [kNm ²]	τ_{xy}^f [MPa]	σ_x^f [MPa]	τ_{xz}^c [kPa]
15	198690	231412	780702	29,44	115,25	36,41	1,65	65,59
20	89750	108682	375018	29,45	115,17	36,43	1,65	64,70
30	34282	45070	154296	29,46	115,11	36,41	1,64	64,74
40	19858	27966	92424	29,46	115,77	36,38	1,62	64,78

Przedstawione wyniki nie wykazują wyraźnych różnic pomiędzy wartościami przemieszczeń i naprężeń odczytanymi z opracowanych modeli numerycznych. Podczas zmiany rozmiaru siatki elementów skończonych nie zaobserwowano utraty zbieżności wyników otrzymanych z przeprowadzonych analiz. Na ich podstawie zdecydowano pozostać przy podstawowym rozmiarze elementów skończonych (poza obszarami dogęszczenia) równym 15 mm, bez dalszego zagęszczania siatki elementów skończonych. W ramach opisywanej analizy zbieżności wykonano dodatkowo model numeryczny, z rozmiarem siatki elementów skończonych równym 15 mm oraz zastosowaniem typów elementów skończonych bez redukcji liczby punktów całkowania wewnątrz elementów. Otrzymane wyniki pozostały zbieżne z wynikami przedstawionymi w tab. 4.2. Zaobserwowano jednak płynniejsze zachowanie się okładzin paneli warstwowych w strefach podporowych. Z uwagi na wydłużenie czasu obliczeń na akceptowalnym poziomie, w docelowych modelach numerycznych zdecydowano ostatecznie na zastosowanie:

- bryłowych elementów skończonych C3D8, o podstawowym rozmiarze równym 15 mm,
- powłokowych elementów skończonych S4, o podstawowym rozmiarze równym 15 mm.

4.4. Skręcanie swobodne

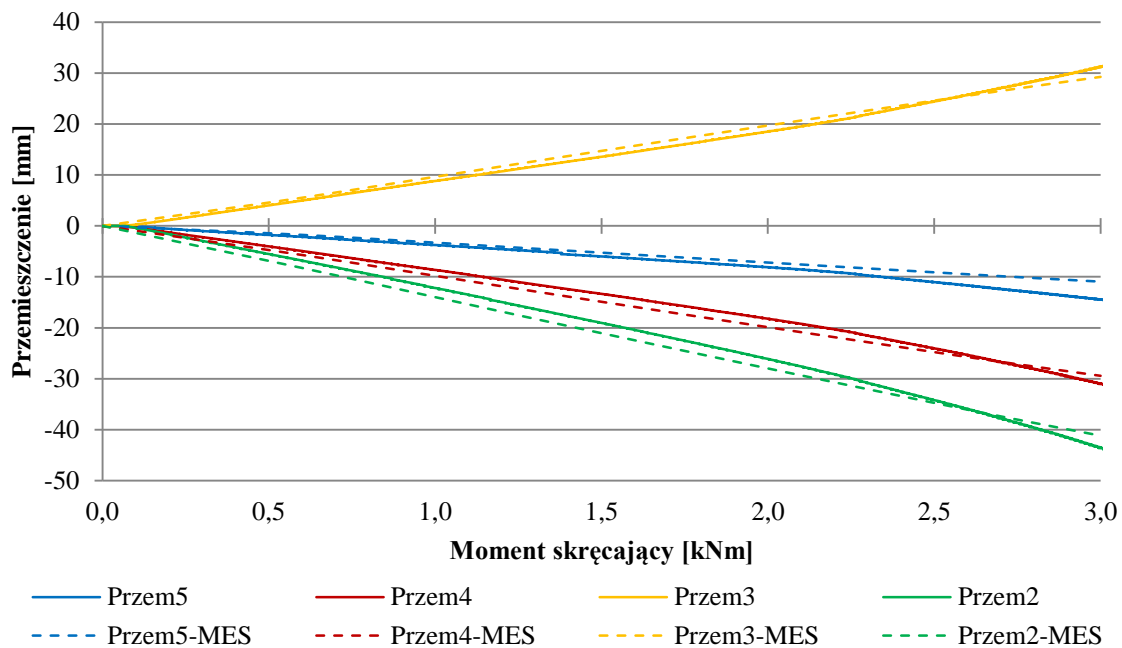
W ramach przeprowadzonych analiz numerycznych skręcania swobodnego paneli warstwowych wykonano modele numeryczne z odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia elementów. Przeprowadzono analizy wszystkich rozważanych w pracy przekrojów poprzecznych paneli warstwowych. Wyniki analiz wraz z graficznym przedstawieniem zachowania skręcanego elementu pokazano w kolejnych rozdziałach pracy na przykładzie panelu warstwowego SP_120_4100_1_1. Ogólny widok próbki SP_1_1 obciążonej momentem skręcającym M_x o wartości 3,0 kNm pokazano na rys. 4.10. Maksymalna wartość przemieszczenia pionowego u_z odczytana z analizy próbki SP_1_1 osiąga wartość równą 66,86 mm.



Rysunek 4.10. Przemieszczenia u_z próbki SP_1_1.

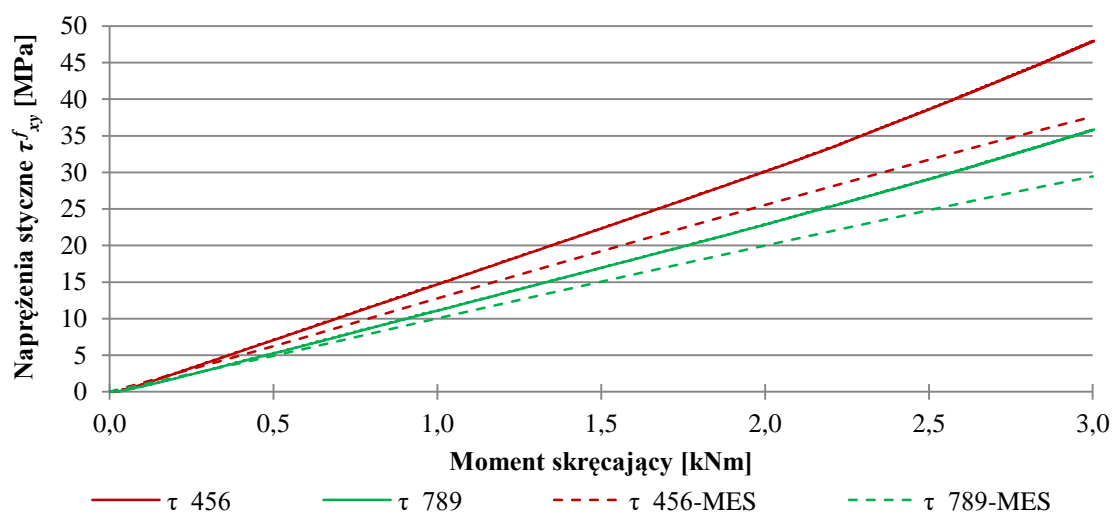
4.4.1 Kalibracja modelu z badaniem laboratoryjnym

Weryfikację poprawności opracowanego modelu numerycznego wykonano w oparciu o relację przemieszczenia pionowego punktów *Przem2*, *Przem3*, *Przem4* oraz *Przem5* (rys. 3.88) do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego. Relację tą dla próbki SP_1_1 pokazano na rys. 4.11. Liniami ciągłymi przedstawiono wyniki otrzymane z badania laboratoryjnego, liniami przerywanymi wyniki z analizy numerycznej.



Rysunek 4.11. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.

Przedstawione na powyższym wykresie krzywe obrazujące wartości przemieszczeń punktów rozmieszczonych na całej powierzchni skręcane go elementu zachowują dużą zgodność w pełnym zakresie obciążenia próbki. Podobną weryfikację poprawności modelu numerycznego wykonano na podstawie analizy naprężeń stycznych τ_{xy}^f w okładzinie panelu warstwowego (rys. 4.12). Liniami ciągłymi przedstawiono wyniki otrzymane z zapisu tensometrycznego, a liniami przerywanymi wyniki z analizy numerycznej.



Rysunek 4.12. Relacja naprężenie styczne τ_{xy}^f – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.

Lokalizacja punktów pomiarowych dla których wyznaczono przedstawione na powyższym wykresie wartości naprężeń stycznych została opisana na rys. 3.100. Poziom zgodności wyników przemieszczeń analizowanych punktów (rys. 4.11) stanowił podstawę, aby uznać przygotowany model numeryczny za wiarygodny. Wyniki naprężeń stycznych przedstawione na rys. 4.12 odczytane z modelu numerycznego są niższe, niż te wyznaczone na podstawie pomiarów tensometrycznych o około 10% - 20%. Należy wziąć jednak pod uwagę, że przy wyznaczaniu wartości naprężeń stycznych τ_{xy}^f w badaniu laboratoryjnym korzystano z zapisu odkształceń trzech punktów pomiarowych (rys. 3.105a), z których każdy może być obciążony nakładającym się na siebie niezależnym błędem pomiarowym. Biorąc to pod uwagę oraz dodatkowo uwzględniając warstwową budowę okładzin, która w pewien sposób także może zaburzać wyniki, uznano otrzymany poziom zgodności za zadowalający.

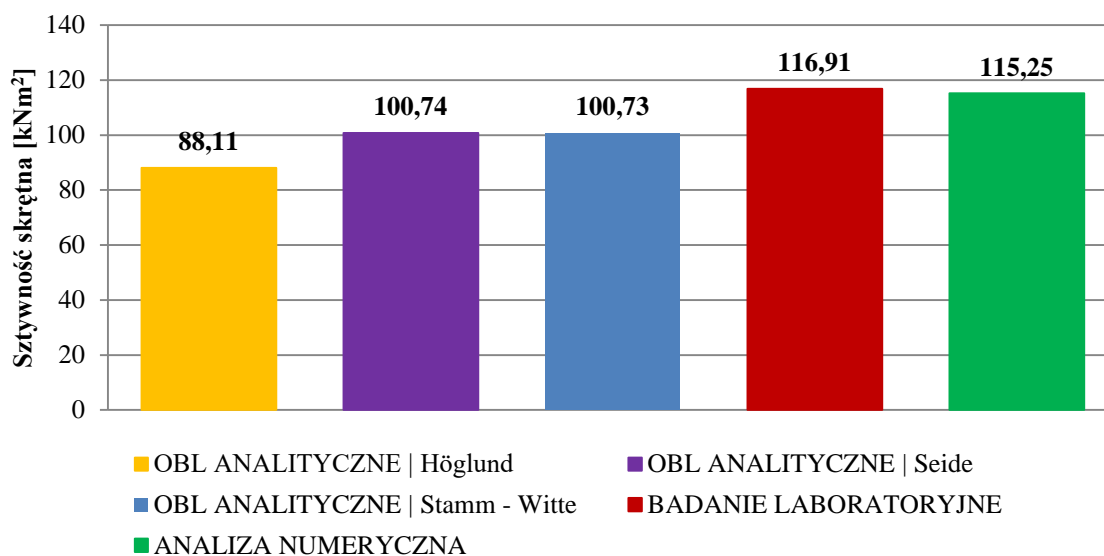
4.4.2 Sztywność skrętna

Sztywność skrętną GI_T^{SP-MES} przekroju poprzecznego analizowanego numerycznie panelu warstwowego wyznaczono tożsamo z metodologią analizy wyników badań laboratoryjnych, przedstawioną w rozdziale 3.3.2. Przeprowadzone obliczenia wykonano na podstawie zapisu wartości przemieszczeń *Przem2*, *Przem4* oraz *Przem5* (rys. 4.11) odczytanych z wcześniej zdefiniowanych węzłów modelu numerycznego. Znane wartości przemieszczeń analizowanych punktów posłużyły do określenia kątów obrotu przekrojów poprzecznych panelu warstwowego. Względna zmiana wartości kątów obrotu na długości skręcanego elementu, w odniesieniu do względnego przyrostu siły generującej obrót stanowi wartość sztywności skrętnej GI_T^{SP-MES} przekroju poprzecznego zamodelowanego numerycznie panelu warstwowego. Przyjęta do dalszych rozważań numeryczna sztywność skrętna została wyznaczona na podstawie wyników z punktów 2 oraz 4. Dla próbki SP_120_4100_1_1 otrzymano wartość sztywności równą:

$$GI_{T-MES}^{120/1000} = 115,25 \text{ kNm}^2. \quad (4.10)$$

Podobne założenie przyjęto wcześniej w przypadku analizy wyników badań laboratoryjnych. Bazowanie na tych samych punktach pomiarowych przy wyznaczaniu sztywności skrętnych pozwoliło w sposób bezpośredni porównywać ze sobą otrzymane wyniki. Na rys. 4.13 zostały zestawione sztywności skrętne panelu warstwowego

o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm oraz szerokości równej 1000 mm otrzymane z przeprowadzonych analiz laboratoryjnych i numerycznych. Dodatkowo na wykresie zostały pokazane także sztywności skrętne wyznaczone w sposób analityczny na podstawie teorii zaproponowanych przez: Seide (2.56), Stamma i Witte (2.61) oraz Höglunda (2.63).

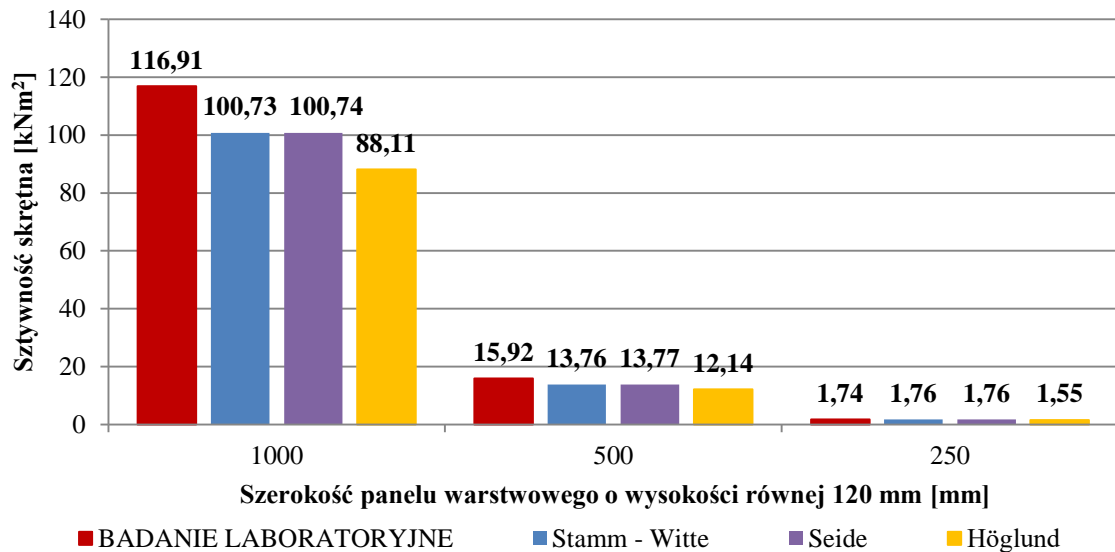


Rysunek 4.13. Sztywność skrętna panelu warstwowego o parametrach $H = 120$ mm, $B = 1000$ mm.

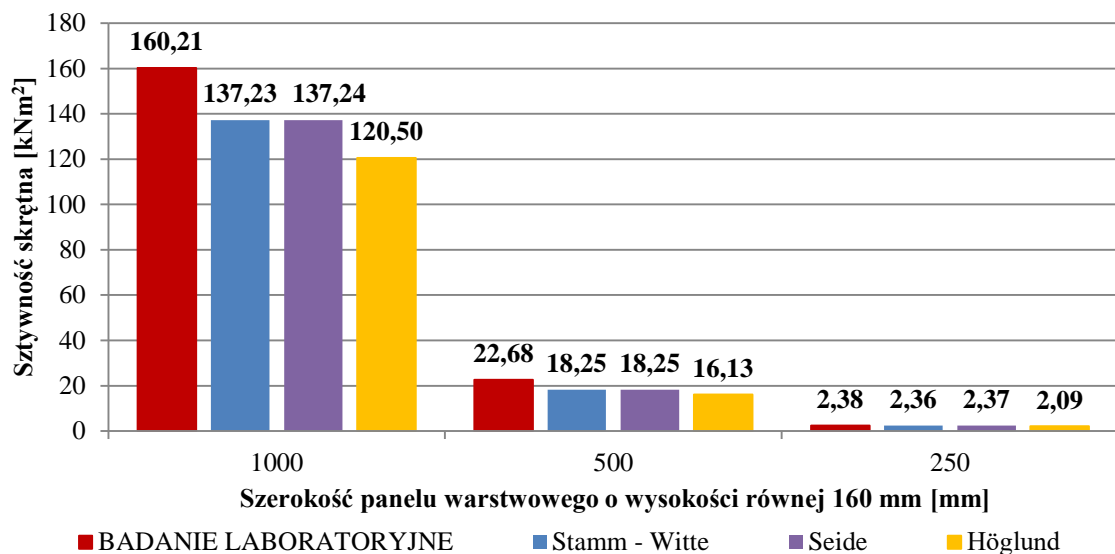
Przedstawione na rys. 4.13 wyniki potwierdzają dużą zgodność wykonanych analiz numerycznych z rzeczywistym badaniem laboratoryjnym. Sztywności skrętne panelu warstwowego wyznaczone laboratoryjnie i numerycznie osiągają podobne wartości i są o około 15% większe, niż sztywności skrętne wyznaczone analitycznie zgodnie z metodologiami Stamm'a i Witte'a oraz Seide. Otrzymane z analiz numerycznych i badań laboratoryjnych wyniki są także o ponad 30% wyższe, niż wyniki otrzymane z obliczeń analitycznych, stosując równanie (2.63) zaproponowane przez Höglunda.

Podobnych obserwacji dokonano na podstawie przedstawionych na rys. 4.14 oraz rys. 4.15 wyników sztywności skrętnych analizowanych w pracy przekrojów poprzecznych paneli warstwowch o wysokościach odpowiednio 120 mm i 160 mm. Zastosowanie równań przedstawionych przez Stamma i Witte oraz Seide do wyznaczenia wartości analitycznych sztywności skrętnych paneli warstwowch prowadzi do uzyskania wyników niższych o około 15% względem wartości sztywności wyznaczonych laboratoryjnie. Stosując równania zaproponowane przez Höglunda, wyznaczone wartości sztywności skrętnych będą od wartości wyznaczonych laboratoryjnie niższe o około 30%. Pewne odstępstwa od tych zależności zaobserwować

można w przypadku paneli warstwowych o szerokościach równych 250 mm, dla których różnice między poszczególnymi wynikami są mniejsze.



Rysunek 4.14. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 120$ mm.



Rysunek 4.15. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 160$ mm.

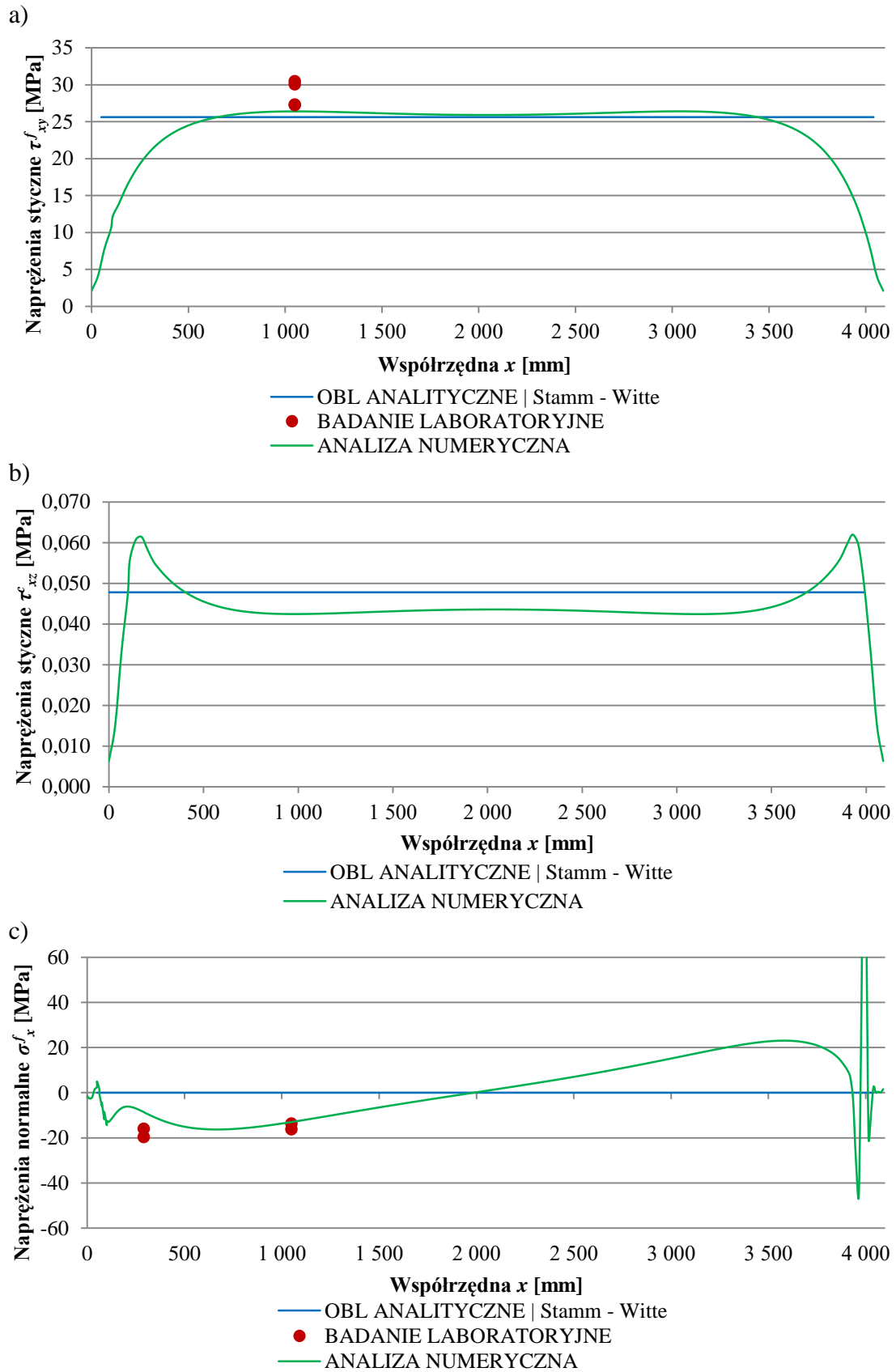
Przedstawione na rys. 4.13 – 4.15 wyniki wskazują na lepsze dopasowanie, do rzeczywistych wartości sztywności skrętnych wyznaczonych laboratoryjnie, teorii zaproponowanych przez Stamma i Witte oraz Seide, w odniesieniu do teorii opisanej przez Höglunda. Dla wszystkich analizowanych w pracy paneli warstwowych zaobserwowano powyższą zależność.

4.4.3 Analiza naprężeń

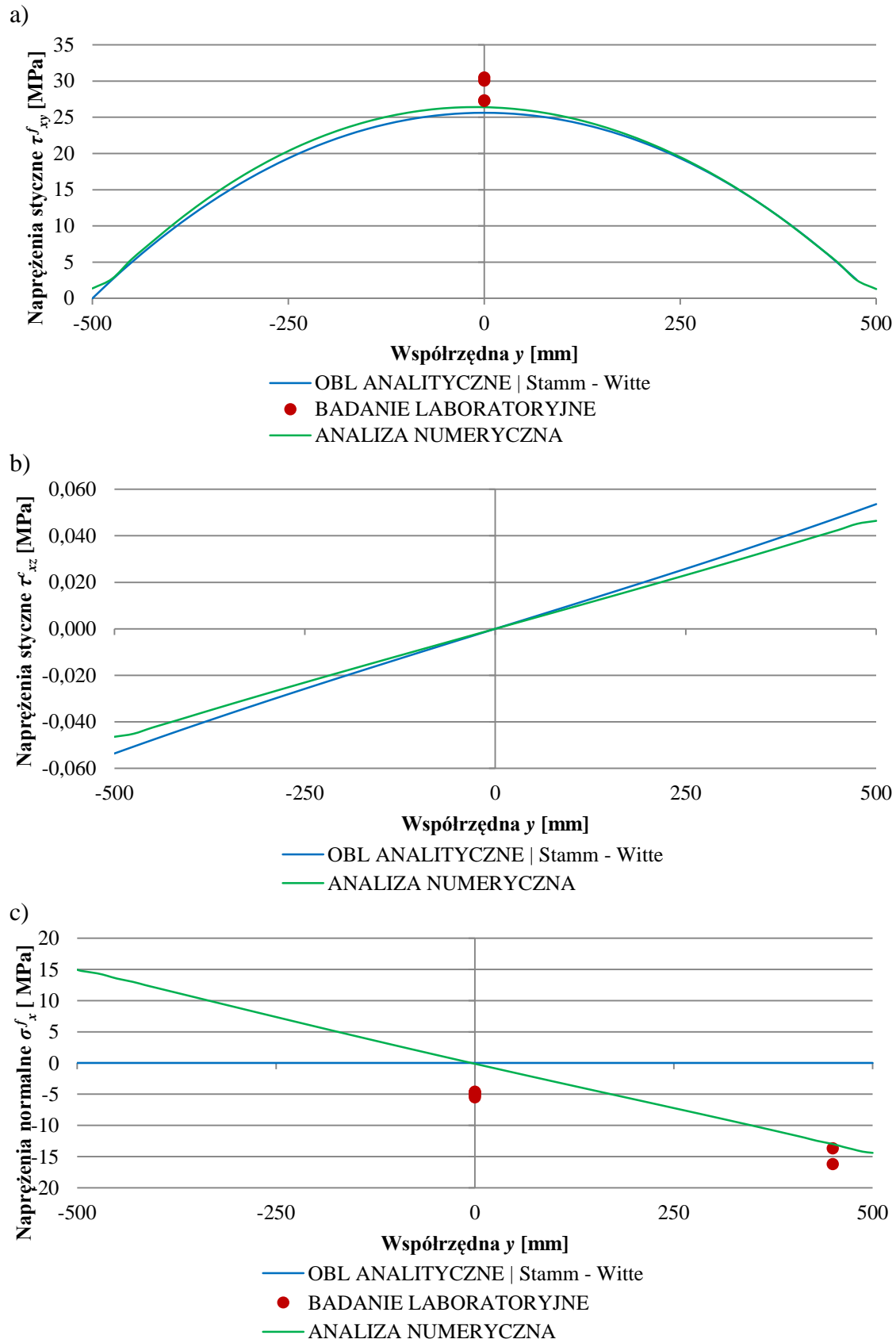
Na podstawie odpowiednio skalibrowanego z badaniem doświadczalnym modelu numerycznego wykonano szczegółową analizę rozkładu naprężeń wewnętrznych w skręcanym panelu warstwowym. Na rys. 4.16 - 4.17 przedstawiono przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_1_1, odpowiednio w przekrojach podłużnych i poprzecznych. Przedstawione na wykresach wartości naprężeń odpowiadają obciążeniu próbki momentem skręcającym o wartości 2,1 kNm. Kolorem zielonym oznaczono wyniki odczytane z modelu numerycznego, kolorem niebieskim wyniki obliczone analitycznie w oparciu o teorię Stamm'a i Witte'a, kolorem czerwonym wyniki otrzymane z badań laboratoryjnych. Numeryczne i analityczne wartości naprężeń przedstawiono za pomocą linii ciągłych z uwagi na ciągły charakter pomiaru analizowanych wartości. Wyniki badań laboratoryjnych oznaczono punktowo, zgodnie z lokalizacją czujników tensometrycznych zastosowanych w badaniach skręcanych paneli warstwowych. Poniższe wykresy przedstawiają wartości naprężeń wewnątrz górnej okładziny (ujemna współrzędna z) oraz ze środkowej części rdzenia (współrzędna $z = 0$ mm) panelu warstwowego.

Analizę rozkładu naprężeń wewnętrznych w kierunkach podłużnych (rys. 4.16) przeprowadzono w przekrojach, w których analizowane naprężenia osiągają po szerokości panelu warstwowego wartości maksymalne. Przedstawiono rozkład naprężeń stycznych τ_{xy}^f w górnej okładzinie w przekroju o współrzędnej $y = 0$ mm, oraz naprężeń normalnych σ_x^f w górnej okładzinie i stycznych τ_{xz}^e w rdzeniu w przekroju o współrzędnej $y = 450$ mm. Pomimo, że maksymalne wartości naprężeń normalnych w okładzinie i stycznych w rdzeniu osiągane są na krawędzi panelu warstwowego ($y = 500$ mm), do przedstawienia wyników wybrano przekrój odsunięty o 50 mm od krawędzi, z uwagi na lokalizację w tym przekroju czujników tensometrycznych. Z danych przedstawionych na rys. 4.16 a,c widać opisaną wcześniej dobrą zgodność wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych z tymi z obliczeń numerycznych. Z uwagi na lokalny charakter odczytu danych z badań laboratoryjnych, w dalszych analizach porównywane będą tylko rezultaty obliczeń analitycznych i numerycznych.

Naprężenia styczne τ_{xy}^f w okładzinie panelu warstwowego (rys. 4.16a) wyznaczone analitycznie pozostają w bardzo dużej zgodności z wynikami analiz numerycznych na przeważającej długości analizowanej próbki. Tylko na odcinkach przypodporowych, w odległościach do 500 mm od podpór, zaobserwować można rozbieżność pomiędzy wyznaczonymi wartościami naprężeń.



Rysunek 4.16. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_1_1, w przekrojach podłużnych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $y = 0$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^f , $y = 450$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $y = 450$ mm.



Rysunek 4.17. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_1_1, w przekrojach poprzecznych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $x = 1000$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^f , $x = 1000$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $x = 1000$ mm.

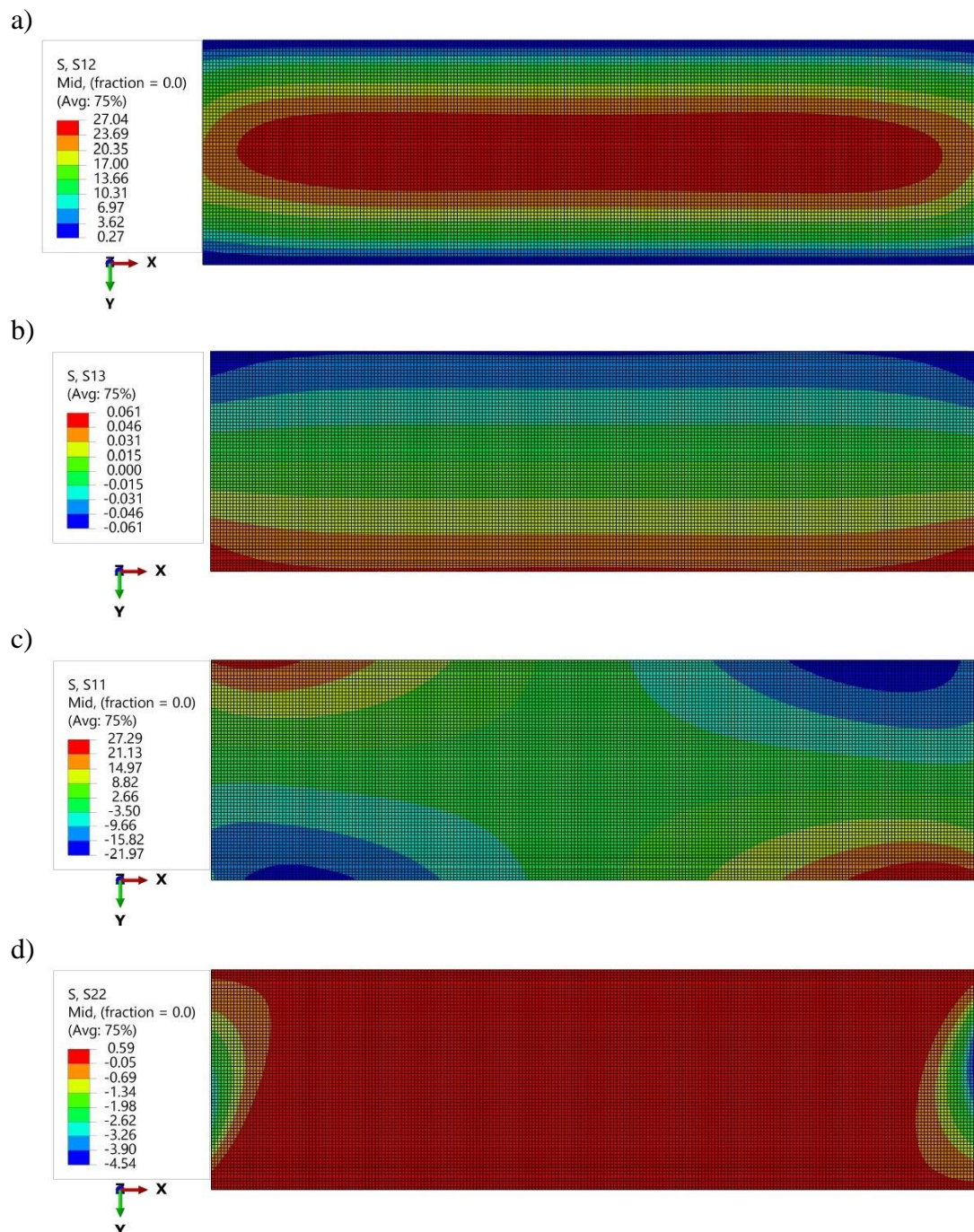
Podobną zależność można zaobserwować w odniesieniu do przebiegu naprężeń stycznych τ_{xz}^c w rdzeniu panelu warstwowego (rys. 4.16b). Największe różnice pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonymi analitycznie a tymi pochodzącymi z analiz numerycznych widać na pierwszych 500 mm w okolicy podpór skręcanego elementu. Lokalne wzrosty naprężeń stycznych w rdzeniu w odległości 150 mm od osi podpór związane są z silną deformacją rdzenia w przekrojach podporowych. W wewnętrznej części panelu warstwowego dochodzi do wygładzenia przebiegu naprężeń i ustabilizowania ich wartości na długości elementu.

Nieco odmiennie wygląda relacja wyznaczonych analitycznie i numerycznie wartości naprężeń normalnych σ_x^f w okładzinie panelu warstwowego (rys. 4.16c). W przypadku skręcania swobodnego analitycznie wyznaczone wartości naprężeń normalnych skręcanych elementów osiągają we wszystkich punktach wewnętrznych zerowe wartości. Teoretyczna swoboda deplanacji przekrojów poprzecznych na całej długości elementu umożliwia swobodny przesuw punktów wewnętrznych po kierunku osi x , stąd wewnątrz próbki brak naprężeń normalnych po tym kierunku. Zastosowane w badaniach laboratoryjnych zabiegi minimalizujące tarcie nie eliminują go do zera. Dodatkowo, z uwagi na podatność rdzenia paneli warstwowych i jego lokalnie występujące wgniecenia na podporze dochodzi do częściowej blokady deplanacji skręcanych paneli warstwowych. Efektem tego są pojawiające się naprężenia normalne σ_x^f wewnątrz okładziny. Istotne jest to, że osiągnęte wartości naprężeń są kilka razy mniejsze niż wartości osiągnęte przy pełnej blokadzie deplanacji, co zostanie pokazane w rozdziale 4.5 pracy przy okazji analizy skręcania skrępowanego.

Podobne obserwacje zgodności wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych i analiz numerycznych oraz obliczeń analitycznych i analiz numerycznych można dokonać na podstawie rozkładu naprężeń wewnętrznych w przekrojach poprzecznych przedstawionych na rys. 4.17. Wszystkie wartości naprężeń wyznaczono w przekroju o współrzędnej $x = 1000$ mm. Warto podkreślić są symetryczne (względem podłużnej osi symetrii) rozkłady naprężeń. Zarówno naprężenia styczne w okładzinie τ_{xy}^f , jak i rdzeniu τ_{xz}^c panelu warstwowego wyznaczone analitycznie pozostają w dużej zgodności z wartościami naprężeń odczytanymi z analiz numerycznych na całej szerokości skręcanego elementu. Rozbieżności w wyznaczonych analitycznie i numerycznie wartościach naprężeń zaobserwować można w przypadku naprężeń normalnych σ_x^f w okładzinach (podobnie jak w przekrojach podłużnych).

4.4.4 Miejsca szczególne

W celu globalnego zobrazowania rozkładu naprężeń wewnętrznych w okładzinach i rdzeniu panelu warstwowego na rys. 4.18 przedstawiono mapy naprężeń na wewnętrznym fragmencie skręcanej próbki. Z pełnego gabarytu panelu warstwowego usunięte zostały 300 mm odcinki w sąsiedztwie podpór, w miejscach, w których występujące lokalne wzrosty naprężeń utrudniały wizualizację pozostałych wyników.



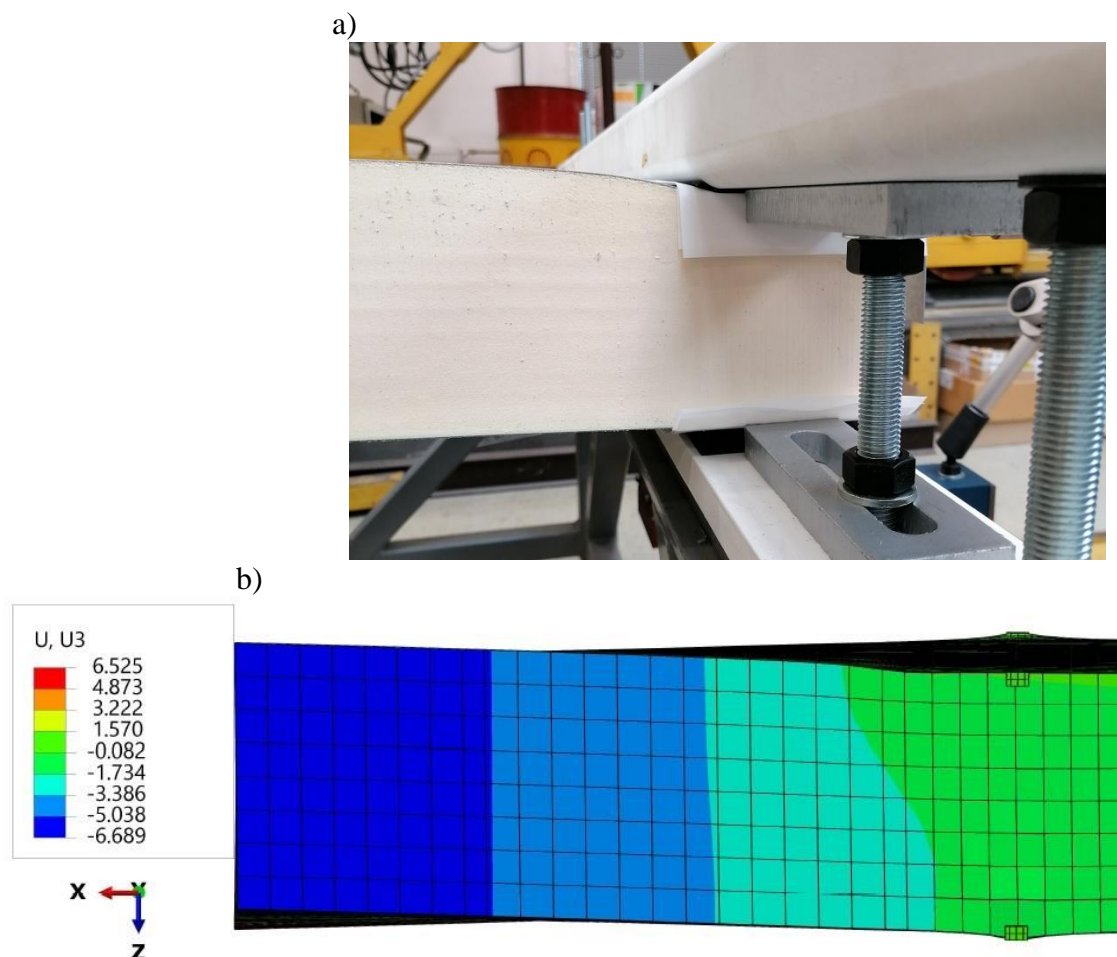
Rysunek 4.18. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_1_1: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , c) naprężenia normalne σ_x^f , d) naprężenia normalne σ_y^f .

Mapy naprężeń stycznych τ_{xy}^f w okładzinie (rys. 4.18a) oraz naprężeń stycznych τ_{xz}^c w rdzeniu panelu warstwowego (rys. 4.18b) obrazują w sposób powierzchniowy opisane w poprzednim rozdziale wyniki przedstawione w postaci wykresów. Jako uzupełnienie do wyników prezentowanych dla konkretnych przekrojów poprzecznych i podłużnych, na przedstawionych mapach naprężeń widać globalnie znaczący wpływ współrzędnej y na odczytywane wartości naprężeń oraz relatywnie stabilne wyniki na długości elementu (wzdłuż współrzędnej x). Zaobserwować można płynny wzrost wartości naprężeń stycznych w okładzinie, w jej wewnętrznej części, oraz wzrost wartości naprężeń stycznych rdzenia w sąsiedztwie krawędzi podłużnych próbki.

W przypadku prezentacji wyników naprężeń normalnych σ_x^f i σ_y^f przedstawione mapy naprężeń stanowią znaczące uzupełnienie przedstawionych wcześniej danych za pomocą wykresów w konkretnych przekrojach poprzecznych i podłużnych. Naprężenia normalne σ_x^f (rys. 4.18c) oraz normalne σ_y^f (rys. 4.18d) zmieniają się znacząco na długości i szerokości próbki, co w dużo czytelniejszy sposób można przedstawić za pomocą map naprężeń. Na przedstawionej na rys. 4.18c mapie naprężeń normalnych σ_x^f widać wyraźny wzrost tych naprężeń w sąsiedztwie krawędzi podłużnych próbki w bliskiej odległości od podpór skręcanego elementu. Naprężenia w punktach zlokalizowanych po przeciwnych stronach zarówno względem osi podłużnej x , jak i poprzecznej y osiągają zbliżone wartości, ale przeciwne znaki. Taki rozkład naprężeń spowodowany jest częściową blokadą deplanacji przekrojów podporowych skręcanego panelu warstwowego. Podobnie, nieregularność po szerokości i długości analizowanej próbki można zaobserwować w przypadku rozkładu naprężeń normalnych σ_y^f . Największe co do wartości bezwzględnej naprężenia normalne σ_y^f występują w bliskim sąsiedztwie podpór. Naprężenia te spowodowane są lokalnie występującym w obszarze podpór zginaniem okładzin w kierunku poprzecznym. Zginanie to wywołane jest nierównomiernym po szerokości elementu wgnieciem rdzenia na podporze. W odległości około 500 mm od podpory naprężenia normalne σ_y osiągają wartości poniżej 1,0 MPa.

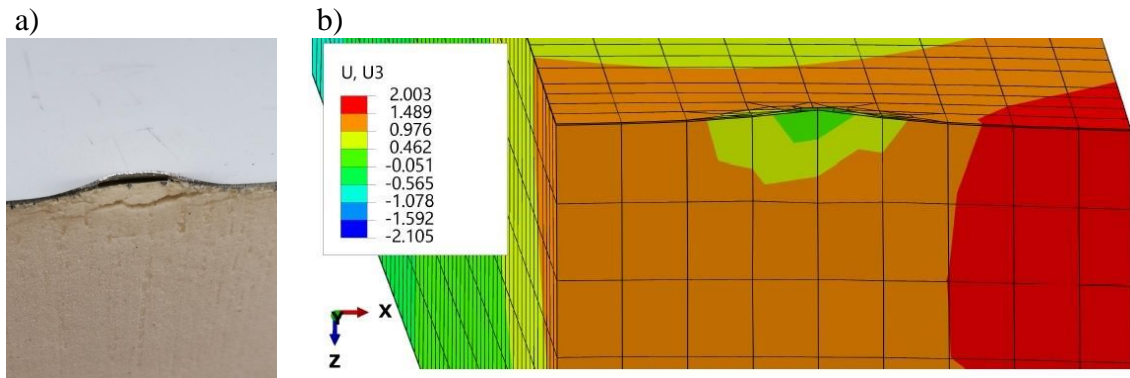
Częściowa blokada deplanacji podporowego przekroju poprzecznego, która odpowiada za pojawienie się w okładzinach panelu warstwowego naprężeń normalnych σ_x^f oraz zginanie poprzeczne okładziny, które odpowiada za pojawienie się w okładzinach naprężeń normalnych σ_y^f związane są z lokalnym zachowaniem skręcanego panelu warstwowego w strefach przypodporowych. Deformacja rdzenia

panelu warstwowego (rys. 4.19) powoduje zniekształcenie płaskich okładzin. Efektem tego jest wzrost ograniczenia przesuwu punktów panelu warstwowego po kierunku osi x . Poza ograniczeniem wywołanym tarcie, przesuw blokowany jest dodatkowo przez zapieranie się zdeformowanej okładziny o sztywne elementy podporowe.



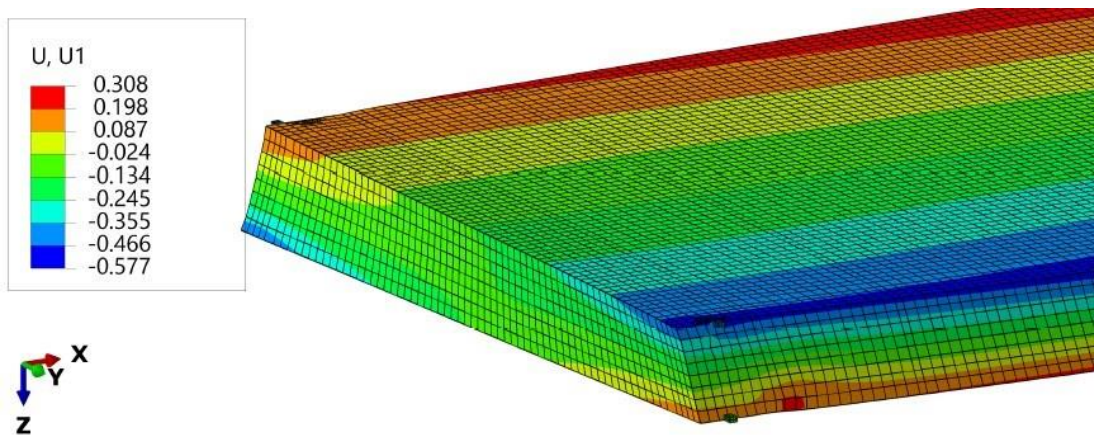
Rysunek 4.19. Wgniecenie rdzenia panelu warstwowego na podporze nieruchomej – wybrzuszenie okładziny: a) badanie laboratoryjne, b) model numeryczny.

Dodatkowym, lokalnym efektem podporowym wpływającym na pojawiające się w okładzinach panelu warstwowego naprężenia normalne jest wgniecenie okładziny wywołane jej kontaktem z poziomymi ogranicznikami na podporach (rys. 4.20). W miejscach kontaktu następuje silny wzrost wartości naprężeń wypadkowych w okładzinach oraz ich uplastycznienie i utrata płaskiego kształtu. W dalszej kolejności następuje stopniowe wgniatanie poziomych ograniczników w głąb panelu warstwowego. Deformacje te są efektem silnie lokalnym, pokazują przede wszystkim jak bardzo wrażliwe na tego typu koncentrację naprężeń są cienkie okładziny paneli warstwowych.



Rysunek 4.20. Wgniecenie okładziny panelu warstwowego na podporze nieruchomej:
a) badanie laboratoryjne, b) model numeryczny.

Pomimo częściowej blokady deplanacji przekroju poprzecznego skręcanego elementu przekrój podporowy panelu warstwowego ulega spaczeniu. Na rys. 4.21 przedstawiono fragment przypodporowy analizowanego elementu z przeskalowaną 50-krotnie deformacją po kierunku osi x . Przeskalowanie wartości deformacji ma na celu czytelniejsze zobrazowanie postaci deplanacji skręcanej próbki. Największych przemieszczeń podłużnych doznają węzły najbardziej oddalone od przecięcia osi symetrii przekroju poprzecznego skręcanego elementu. Punkty znajdujące się po przeciwnych stronach przekroju poprzecznego zarówno względem poprzecznej osi y , jak i pionowej osi z przemieszczają się po kierunku osi x w przeciwne strony.

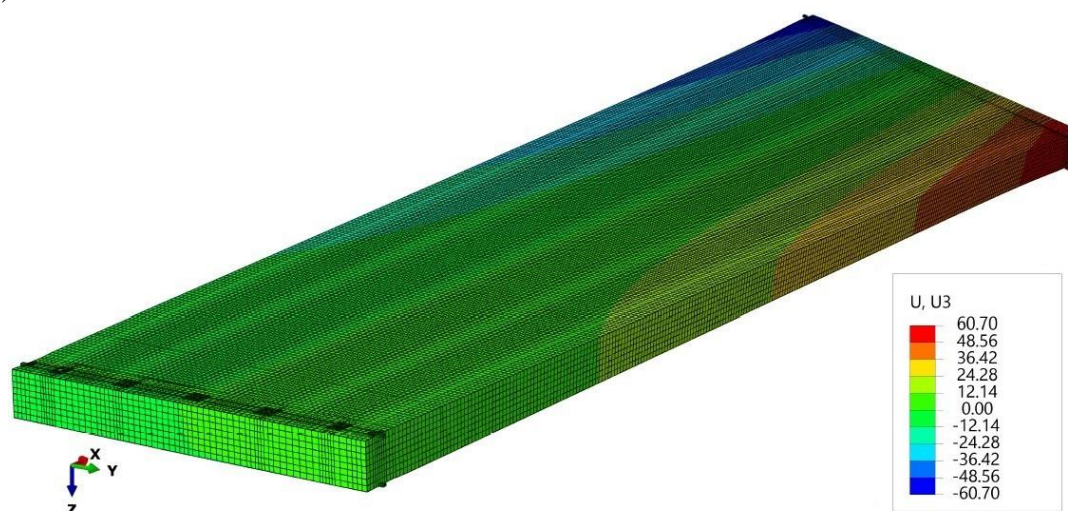


Rysunek 4.21. Deplanacja podporowego przekroju poprzecznego – przemieszczenia u_x .

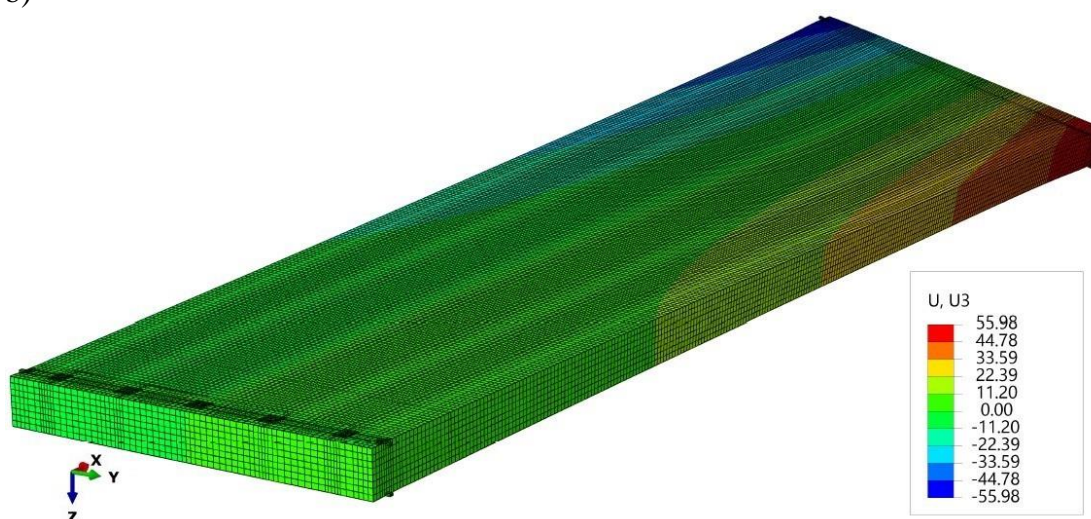
4.5. Skręcanie skrępowane

W ramach przeprowadzonych analiz numerycznych skręcania skrępowanego paneli warstwowych wykonano modele z odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia elementów oraz modele z zastosowaniem pełnej blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego. Przeprowadzono analizy wszystkich rozważanych w pracy przekrojów poprzecznych paneli warstwowych. Wyniki analiz, wraz z graficznym przedstawieniem zachowania skręcanego elementu, pokazano w kolejnych rozdziałach pracy na przykładzie panelu warstwowego SP_120_4100_2_1. Ogólny widok próbki SP_2_1 obciążonej momentem skręcającym M_x o wartości 3,0 kNm pokazano na rys. 4.22.

a)



b)

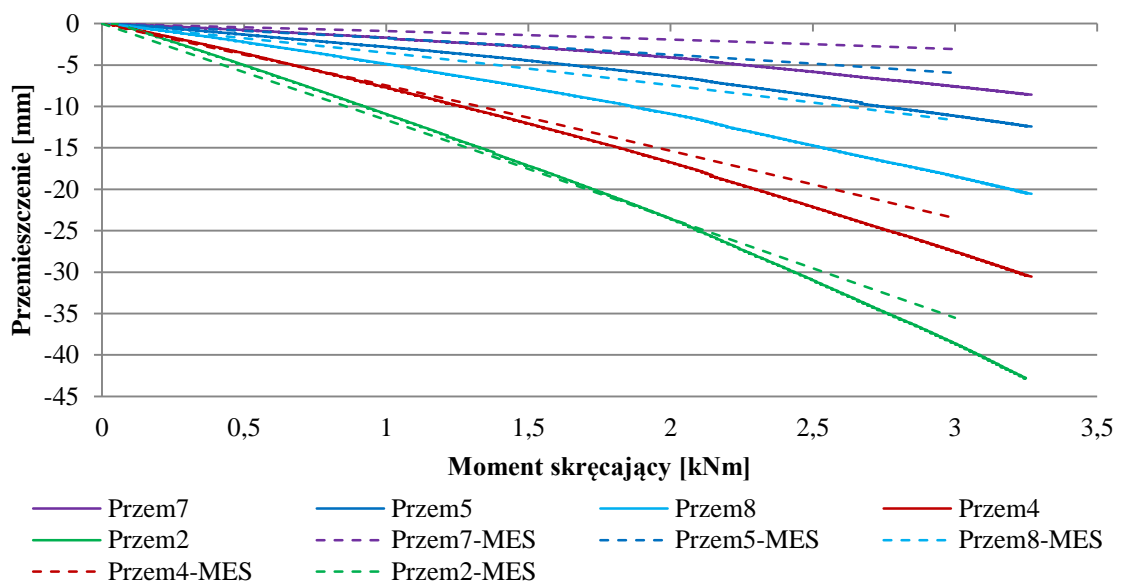


Rysunek 4.22. Przemieszczenia u_z próbki SP_2_1 z zastosowanymi na podparze nieruchomej warunkami brzegowymi: a) odzwierciedlającymi laboratoryjne warunki podparcia, b) z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego.

Przedstawione na powyższym rysunku wyniki obrazują redukcję wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych u_z panelu warstwowego w odniesieniu do wyników otrzymanych z analizy skręcania swobodnego (rys. 4.10). Maksymalne przemieszczenie pionowe próbki skręcanej swobodnie wynosiło 66,86 mm. W przypadku odzwierciedlenia laboratoryjnych warunków podparcia elementu (częściowa blokada deplanacji przekroju podporowego) redukcja maksymalnego przemieszczenia pionowego wynosi około 9,2% (wartość u_z równa 60,70 mm). W przypadku zastosowania pełnej blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego redukcja maksymalnego przemieszczenia pionowego dochodzi do 16,3% (wartość u_z równa 55,98 mm) Przedstawione wyniki pokazują, że pomimo zastosowania fizycznych łączników mechanicznych, blokujących częściowo swobodę deplanacji przekroju podporowego, zachowanie panelu warstwowego odbiega od pracy elementu z pełnym ograniczeniem możliwości spaczenia podporowego przekroju poprzecznego.

4.5.1 Analiza przemieszczeń

Weryfikację poprawności opracowanego modelu numerycznego (próbka SP_2_1 z odzwierciedleniem laboratoryjnych warunków podparcia elementu) wykonano w oparciu o relację przemieszczenia pionowego punktów *Przem2 – Przem5, Przem7* oraz *Przem8* (rys. 3.108) do momentu skręcającego generującego obrót panelu warstwowego. Relację tę dla próbki SP_2_1 pokazano na rys. 4.23. Liniami ciągłymi przedstawiono wyniki otrzymane z badania laboratoryjnego, liniami przerywanymi wyniki z analizy numerycznej.



Rysunek 4.23. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_2_1.

Przedstawione na powyższym wykresie krzywe na pierwszy rzut oka nie obrazują tak dobrej zgodności modelu numerycznego z wynikami otrzymanymi z badania laboratoryjnego, jaką otrzymano w przypadku analiz skręcania swobodnego. Wynika to przede wszystkim ze sposobu zamodelowania łączników mechanicznych na podporze nieruchomej. Rzeczywisty kształt prętów gwintowanych M16 został zamodelowany jako powierzchnia cylindryczna o odpowiedniej średnicy jej przekroju poprzecznego. Pomiędzy zamodelowaną powierzchnią łączników a okładzinami panelu warstwowego występował kontakt (rozdział 4.1.4) i ograniczenie przesuwu elementów wewnętrznych próbki po kierunku osi x od samego początku analizy. W rzeczywistości, z uwagi na występujący na łącznikach mechanicznych gwint, możliwy był częściowy przesuw pomiędzy stykającymi się elementami. Istotnym potwierdzeniem zgodności modelu numerycznego z rzeczywistym badaniem laboratoryjnym są przyrosty przemieszczeń pomiędzy konkretnymi punktami pomiarowymi, a nie same wartości przemieszczeń. Dodatkowo, o dobrym dopasowaniu modelu numerycznego do rzeczywistego badania świadczą przedstawione w kolejnym rozdziale analizy naprężeń wewnątrz górnej okładziny panelu warstwowego.

4.5.2 Analiza naprężeń

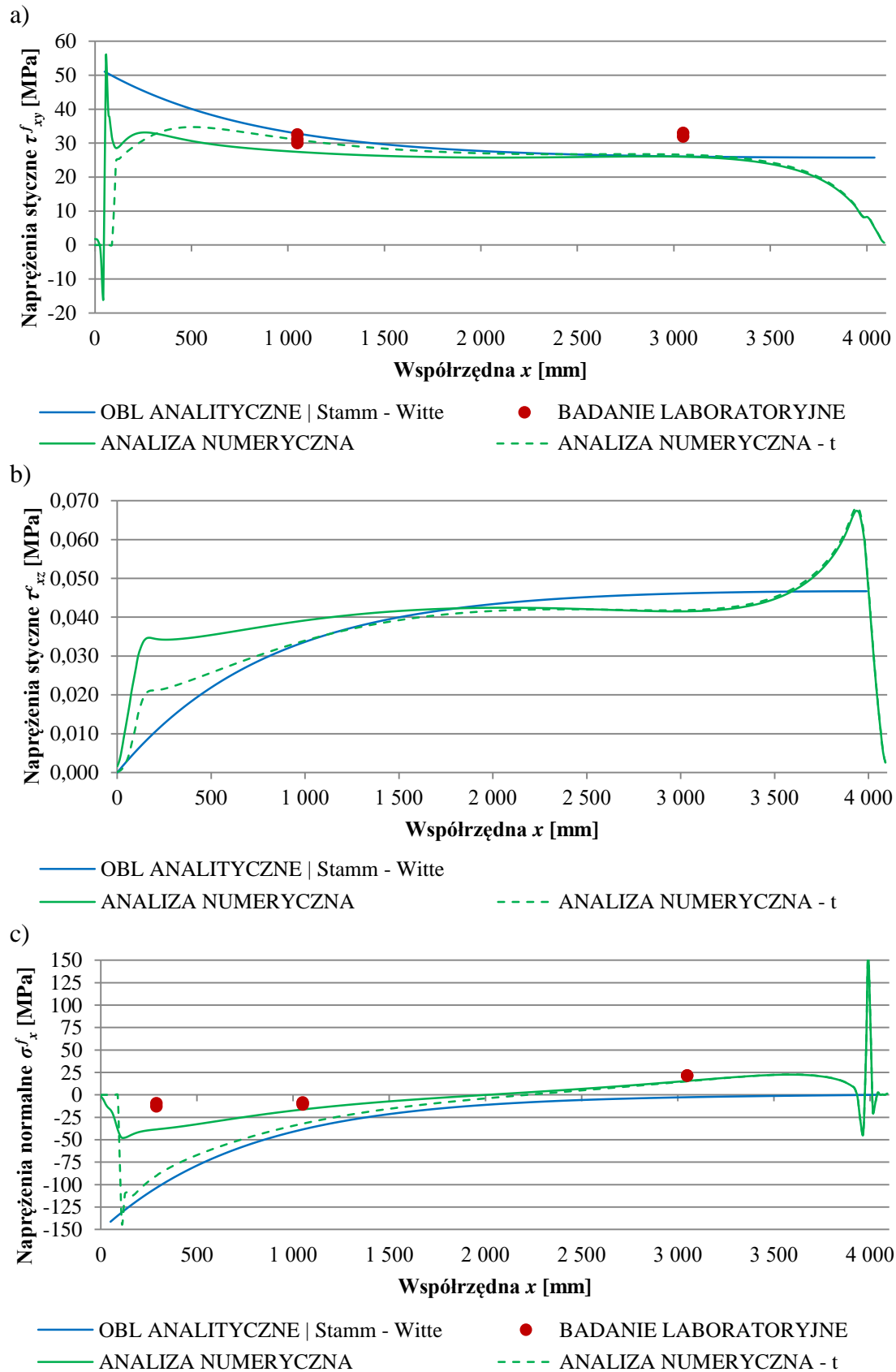
W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę rozkładu naprężeń wewnętrznych w skręcanym skrupowanie panelu warstwowym. Na rys. 4.22 i rys. 4.23 przedstawiono przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_2_1 odpowiednio w przekrojach podłużnych i poprzecznych. Przedstawione na wykresach wartości naprężeń odpowiadają obciążeniu próbki momentem skręcającym o wartości 2,1 kNm. Kolorem zielonym oznaczono wyniki odczytane z modeli numerycznych, kolorem niebieskim wyniki obliczone analitycznie w oparciu o teorię Stamma i Witte oraz równania naprężeń (2.71) i (2.72) dla przekroju cienkościennego. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki otrzymane z badań laboratoryjnych. Numeryczne i analityczne wartości naprężeń przedstawiono za pomocą linii ciągłych z uwagi na ciągły charakter pomiaru analizowanych wartości. Wyniki badań laboratoryjnych oznaczono punktowo zgodnie z lokalizacją czujników tensometrycznych zastosowanych w badaniach skręcanych paneli warstwowych. Z uwagi na zastosowane w opracowanych modelach numerycznych różne warunki podparcia elementu na podporze nieruchomej, wyniki z analiz numerycznych przedstawiono za pomocą dwóch różnych linii. Linia ciągłą przedstawiono wyniki z modelu z odzwierciedleniem

laboratoryjnych warunków podparcia, linią kreskową (przerywaną) przedstawiono wyniki z modelu z pełną blokadą deplanacji przekroju podporowego. Poniższe wykresy przedstawiają wartości naprężeń wewnątrz górnej okładziny (ujemna współrzędna z) oraz ze środkowej części rdzenia (współrzędna $z = 0$ mm) panelu warstwowego.

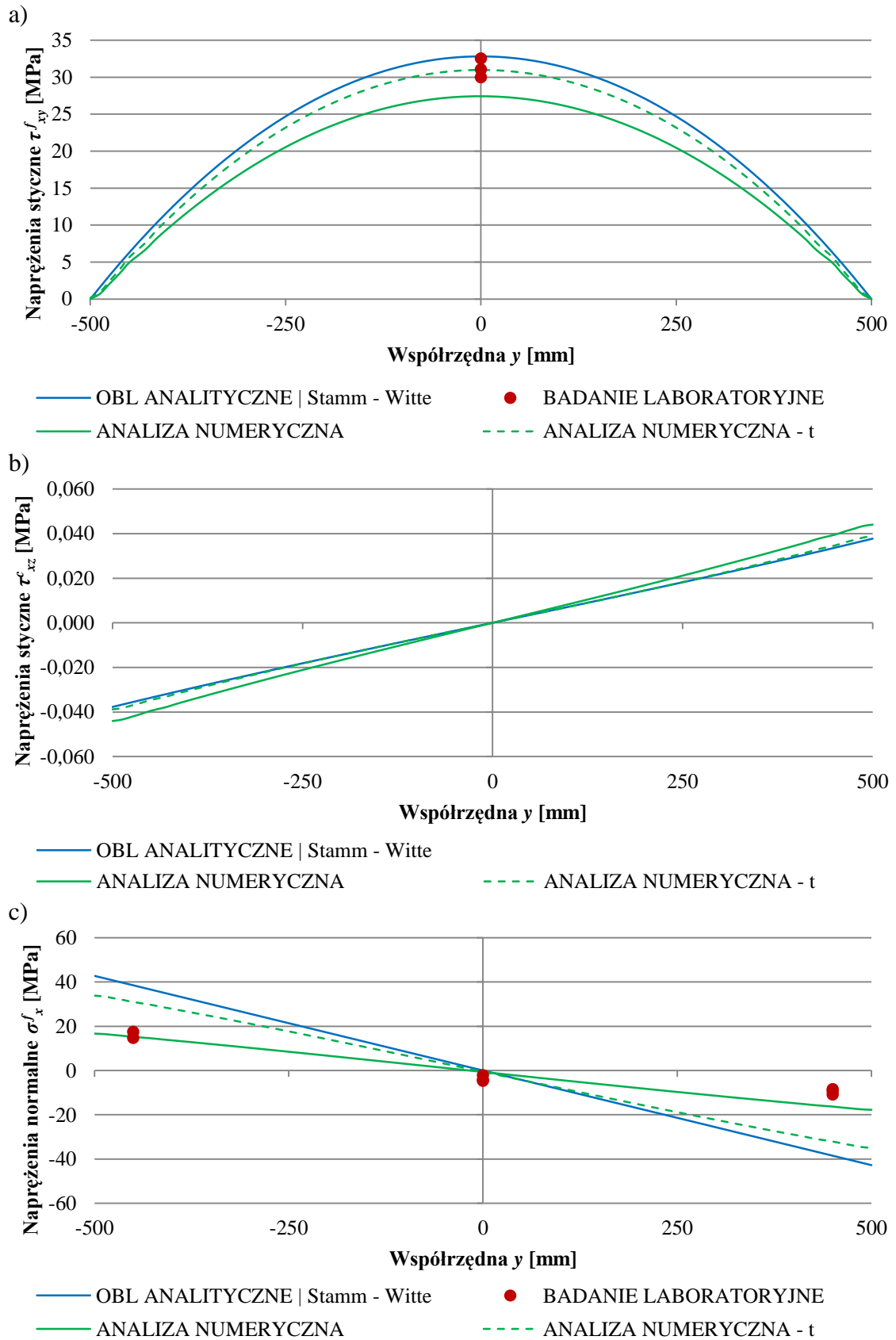
Analizę rozkładu naprężeń wewnętrznych przeprowadzono w tych samych przekrojach, w których analizowano przebieg naprężeń w próbkach skręcanych swobodnie. W przekrojach podłużnych (rys. 4.24) przedstawiono rozkład naprężeń stycznych τ_{xy}^f w górnej okładzinie w przekroju o współrzędnej $y = 0$ mm, oraz naprężeń normalnych σ_x^f w górnej okładzinie i stycznych τ_{xz}^c w rdzeniu w przekroju o współrzędnej $y = 450$ mm. Z danych przedstawionych na rys. 4.24 a,c widać dobrą zgodność wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych z tymi z obliczeń numerycznych z zastosowaniem laboratoryjnych warunków podparcia elementu. Z uwagi na lokalny charakter odczytu danych z badań laboratoryjnych, w dalszych analizach porównywane będą tylko rezultaty obliczeń analitycznych i numerycznych z uwzględnieniem obu wariantów zamocowania próbki na podporze nieruchomej.

Przebieg analizowanych naprężeń wewnętrznych na długości próbki, od połowy jej rozpiętości do końca zamocowanego swobodnie na podporze obrotowej, nie różni się znacząco od przebiegu naprężeń skręcanych swobodnie panelu warstwowego (rys. 4.16). Istotne różnice można zaobserwować na pozostałej części analizowanych elementów. Im bliżej podpory nieruchomej, na której blokowano swobodę deplanacji przekroju poprzecznego, tym obserwowano większe różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z analiz skręcania skrępowanego i opisywanego wcześniej skręcania swobodnego (rozdział 4.4.3). Dodatkowo, warte podkreślenia są znaczne różnice pomiędzy modelami skręcania skrępowanego z zastosowaniem laboratoryjnych warunków podparcia paneli warstwowych a modelami z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego elementu.

Wyznaczone analitycznie naprężenia styczne τ_{xz}^c w rdzeniu panelu warstwowego (rys. 4.24b) w przekroju podporowym, w którym zablokowana jest możliwość spaczenia przekroju poprzecznego próbki, osiągają wartości zerowe. W miarę wzrostu wartości współrzędnej x następuje płynny wzrost wartości naprężeń stycznych w rdzeniu. Wartości naprężeń odczytane z modelu numerycznego z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego w lepszy sposób odpowiadają wartościom naprężeń wyznaczonym analitycznie w odniesieniu do naprężeń odczytanych z modelu numerycznego z laboratoryjnymi warunkami zamocowania.



Rysunek 4.24. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_2_1, w przekrojach podłużnych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $y = 0$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^f , $y = 450$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $y = 450$ mm.



Rysunek 4.25. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_2_1, w przekrojach poprzecznych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $x = 1000$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^f , $x = 1000$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $x = 1000$ mm.

Nieco inaczej wygląda przebieg naprężeń stycznych τ_{xz}^f (rys. 4.24a) oraz normalnych σ_x^f (rys. 4.24c) w okładzinie panelu warstwowego. W przekroju podporowym, w którym blokowana jest deplanacja skręcanego elementu naprężenia te osiągają wartości ekstremalne. W miarę wzrostu wartości współrzędnej x następuje płynny spadek ich wartości. Podobnie jednak, jak w przypadku naprężeń stycznych w rdzeniu, analitycznie wyznaczonym wartościom naprężeń w okładzinie w lepszy sposób odpowiadają wartości odczytane z modelu numerycznego z pełną blokadą podporowego przekroju poprzecznego panelu warstwowego.

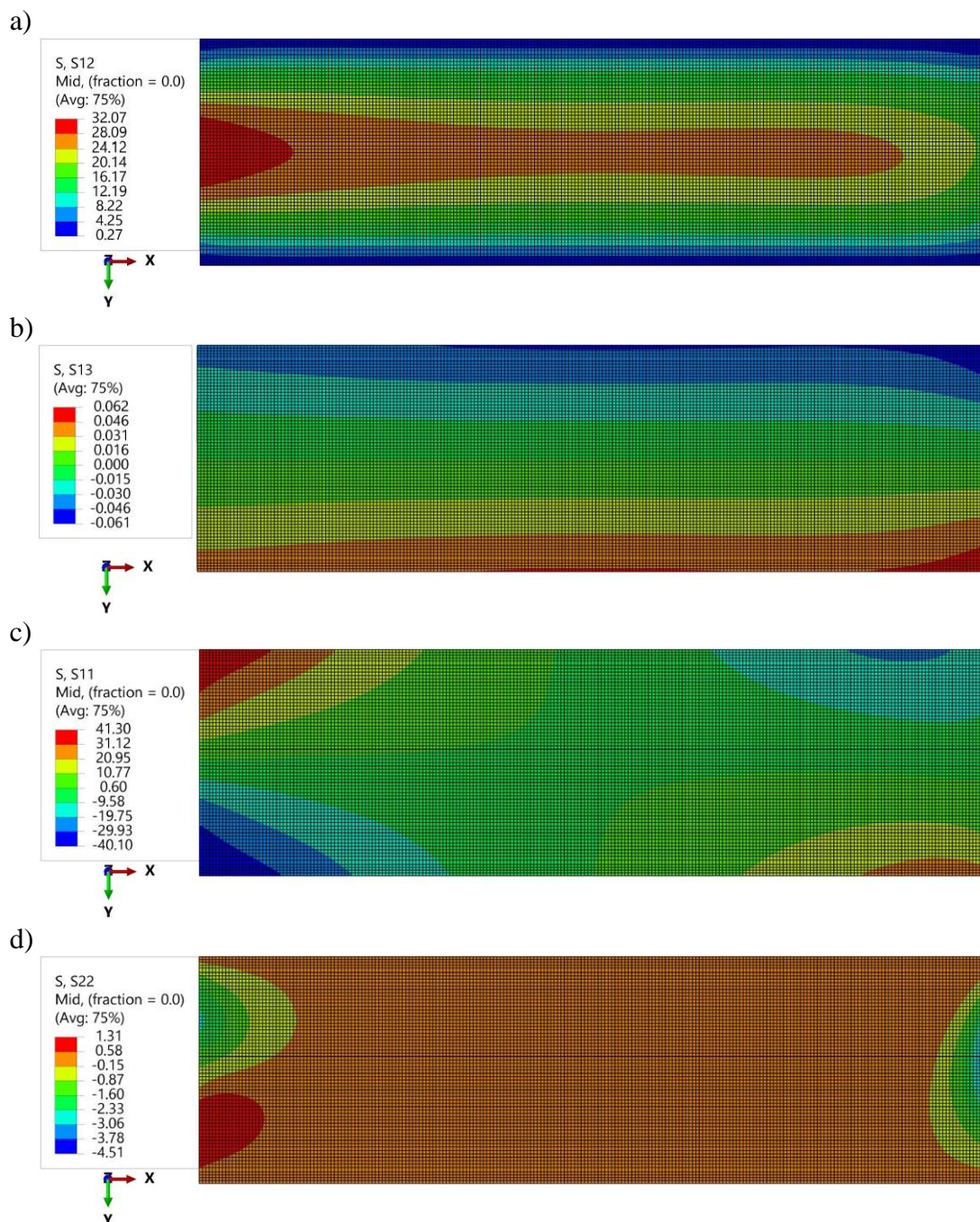
Podobnie jak w omówionych przekrojach podłużnych przedstawia się sytuacja przebiegu naprężeń wewnętrznych w przekrojach poprzecznych (rys. 4.25). Na całej szerokości skręcanego elementu, zarówno naprężenia styczne w okładzinie τ_{xy}^f , jak i rdzeniu τ_{xz}^c oraz normalne σ_x^f w okładzinie panelu warstwowego wyznaczone analitycznie pozostają w dużej zgodności z wartościami naprężeń odczytanymi z analiz numerycznych z modelu z pełną blokadą deplanacji próbki na podporze. Wyniki odczytane z modeli numerycznych z laboratoryjnymi warunkami podparcia panelu warstwowego odbiegają od pozostałych wyników dość wyraźnie. Przedstawione wyniki naprężeń skręcanych skrupowanie paneli warstwowych wskazują, że zastosowanie łączników mechanicznych do blokady deplanacji przekroju podporowego nie jest w pełni skuteczne.

4.5.3 Miejsca szczególne

W celu zobrazowania rozkładu naprężeń wewnętrznych w okładzinach i rdzeniu panelu warstwowego, na rys. 4.26 – 4.27 przedstawiono mapy naprężeń na wewnętrznym fragmencie skręcanej próbki. Z pełnego gabarytu panelu warstwowego usunięte zostały 300 mm odcinki w sąsiedztwie podpór, w miejscach, w których występujące lokalne wzrosty naprężeń utrudniały wizualizację pozostałych wyników. Rysunek 4.26 przedstawia wyniki pochodzące z modelu numerycznego z zastosowaniem laboratoryjnych warunków zamocowania panelu warstwowego na podporze. Wyniki pochodzące z modelu numerycznego z zastosowaniem pełnej blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego panelu warstwowego przedstawiono na rys. 4.27.

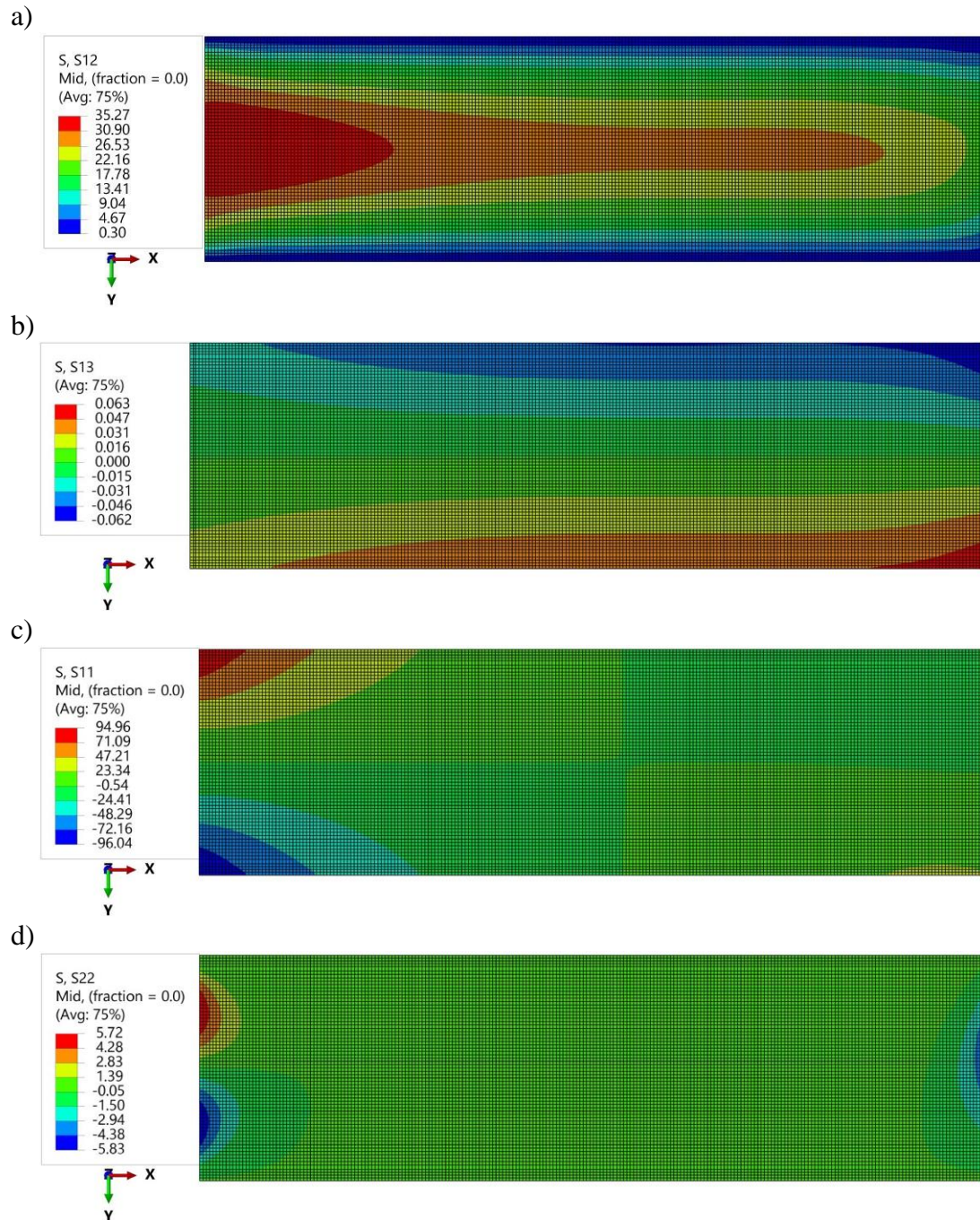
Przedstawione poniżej mapy naprężeń przedstawiają wpływ blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego na wartości i przebieg naprężeń, w zależności od zastosowanych warunków podparcia panelu warstwowego. Zastosowanie warunków podparcia próbki z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego

(rys. 4.27) przekłada się przede wszystkim na większe wartości naprężeń w okładzinach w strefie podporowej (z zablokowaną deplanacją) oraz na gwałtowniejszy spadek ich wartości (w porównaniu do próbki z laboratoryjnymi warunkami zamocowania na podporze – rys 4.26). Sposób zamocowania panelu warstwowego na podporze nieruchomej odgrywa kluczową rolę w zachowaniu skręcanego elementu.



Rysunek 4.26. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_2_1 z zastosowanymi na podporze nieruchomej laboratoryjnymi warunkami brzegowymi:

- a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^f ,
c) naprężenia normalne σ_{xx}^f , d) naprężenia normalne σ_{yy}^f .

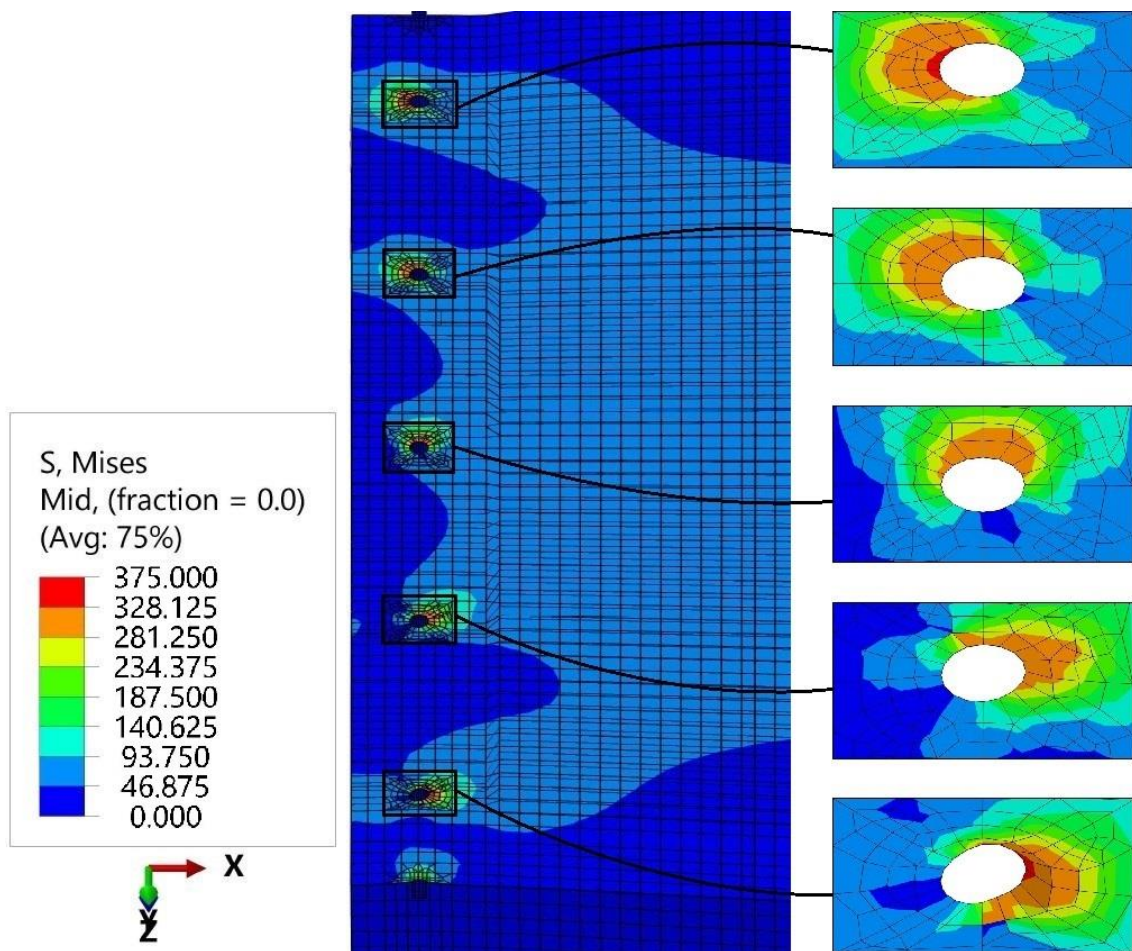


Rysunek 4.27. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_2_1 z zastosowaną na podporze nieruchomej pełną blokadą deplanacji przekroju poprzecznego:

- a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^f ,
c) naprężenia normalne σ_x^f , d) naprężenia normalne σ_y^f .

Przyczyny częściowej (pomimo zastosowanych łączników mechanicznych) blokady deplanacji przekroju poprzecznego skręcanego panelu warstwowego zostały opisane w rozdziale 3.3.6. W okolicy otworów montażowych, w cienkich okładzinach paneli warstwowych bardzo szybko dochodzi do osiągnięcia wartości naprężeń wypadkowych na poziomie granicy plastyczności materiału, z którego okładziny są

wykonane. Efektem tego jest lokalne uplastycznienie okładzin oraz ich deformacja. To z kolei przekłada się na zmniejszenie blokady deplanacji spowodowane powstającymi luzami w obrębie punktowego mocowania. Opisany efekt przedstawiono wcześniej na rys. 3.116 w postaci widoku strefy podporowej po przeprowadzonej próbie skręcania skrępowanego. Na rys. 4.28 pokazano to samo miejsce po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych w modelu z zastosowaniem laboratoryjnych warunków zamocowania panelu warstwowego.



Rysunek 4.28. Strefa podporowa panelu warstwowego SP_120_4100_2_1 przy obciążeniu równym 3,0 kNm.

5. Podsumowanie i wnioski

5.1. Podsumowanie

W literaturze przedmiotu [40, 67, 70] wskazać można trzy główne teorie (rozdział 2.2) opisujące zachowanie skręcanych swobodnie paneli warstwowych o sztywnych okładzinach i podatnym rdzeniu. W przypadku skręcania skrępowanego, przekrój warstwowy sprowadzany jest do postaci pręta cienkościennego (rozdział 2.3), w którym współpracujące ze sobą okładziny połączone są trwale za pomocą podatnego rdzenia [61]. W rozprawie przedstawiono wyprowadzenia równań opisujących zachowanie skręcanych swobodnie i skrępowanie paneli warstwowych oraz wyznaczono wartości ich sztywności skrętnej GI_T i sztywności giętno-skrętnej EI_ω .

W celu weryfikacji poprawności znanych modeli belkowych, opisujących odpowiedź mechaniczną skręcanych paneli warstwowych, wykonano badania laboratoryjne skręcania swobodnego oraz skrępowanego. Skonstruowano autorskie stanowisko badawcze do skręcania paneli warstwowych, na które zostało złożone zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP o udzielenie patentu na wynalazek. Rozpatrywany wniosek uzyskał pozytywną ocenę wstępną zgłoszonego rozwiązania, która podkreśla nowość rozwiązania w świetle stanu techniki, odpowiedni poziom wynalazczy zastrzeganego wynalazku oraz spełnienie wymogu przemysłowej stosowalności. Za pomocą opracowanego stanowiska badawczego wyznaczono rzeczywistą sztywność skrętną paneli warstwowych o gładkich, stalowych okładzinach i rdzeniu wykonanym z pianki poliizocyjanurowej (PIR). W celu weryfikacji poprawności działania stanowiska badawczego w pierwszej kolejności wykonane zostały badania pilotażowe dla próbki wzorcowej wykonanej z okrągłej rury stalowej. Badaniom docelowym poddano panele warstwowe o zróżnicowanej wysokości i szerokości przekroju poprzecznego. Wyniki otrzymanych sztywności skrętnych charakteryzowały się niskim współczynnikiem zmienności w obrębie próby laboratoryjnej. Na podstawie otrzymanych rezultatów możliwe jest jednoznaczne wskazanie teorii najlepiej opisującej zachowanie skręcanych swobodnie paneli warstwowych.

W przeprowadzonych próbach laboratoryjnych skręcania skrępowanego zastosowano blokadę deplanacji podporowego przekroju poprzecznego panelu warstwowego za pomocą łączników mechanicznych (prętów gwintowanych). Zastosowane warunki brzegowe podparcia elementu warstwowego skutkowały silną

koncentracją naprężeń w obszarach docisku okładzin paneli warstwowych do łączników. Efektem zastosowanego zamocowania były pojawiające się odkształcenia plastyczne w okładzinach i silna deformacja okładzin. Skutkowało to pojawiającymi się luzami i możliwością przesuwu paneli warstwowych po kierunku podłużnym skręcanego elementu. Przeprowadzone badania laboratoryjne wskazują na dużą wrażliwość okładzin na lokalne naprężenia spowodowane dociskiem okładzin do sztywnych łączników mechanicznych. Blokada deplanacji paneli była niepełna, co uniemożliwiło laboratoryjne wyznaczenie sztywności giętno-skrętnej zbliżonej do sztywności teoretycznej. Zastosowanie łączników mechanicznych na podporze panelu warstwowego nie prowadzi do skutecznego zablokowania możliwości spaczenia przekroju poprzecznego.

Przeprowadzone analizy numeryczne umożliwiły poznanie odpowiedzi mechanicznej skręcanych paneli warstwowych w pełnym zakresie ich pracy. Po odpowiedniej kalibracji modeli numerycznych z badaniami laboratoryjnymi, przygotowane bryłowo-powłokowe modele umożliwiły przeprowadzenie dodatkowych analiz miejsc szczególnych skręcanych paneli warstwowych. Wykonane w szerokim zakresie badania materiałowe posłużyły do zbudowania odpowiednich modeli materiałowych opisujących zachowanie okładzin i rdzenia paneli warstwowych. Duży nacisk położono na poprawną interpretację wyników modułu sprężystości podłużnej materiału okładzin. Z odpowiednim poziomem szczegółowości zamodelowano oparcie elementów warstwowych na podporach, uwzględniając wyznaczone z badań tribologicznych współczynniki tarcia łożysk ślizgowych. Dzięki przeprowadzonym na etapie planowania programu badań analizom wrażliwości zmiany parametrów materiałowych na zachowanie skręcanych paneli warstwowych, możliwe było skupienie największej uwagi na badaniach parametrów najbardziej znaczących.

Modele numeryczne skręcania swobodnego paneli warstwowych pozwoliły wskazać teorię najlepiej opisującą skręcanie swobodne konstrukcji warstwowych. Wyznaczone z analiz numerycznych sztywności skrętne paneli warstwowych osiągały wartości zbliżone do tych, które uzyskano w badaniach laboratoryjnych. Przygotowane modele pozwoliły poznać złożony stan naprężeń wewnątrz okładzin oraz rdzenia skręcanych paneli warstwowych.

Modele numeryczne skręcania skrępowanego z zastosowaniem laboratoryjnych warunków podparcia elementów wykazały niepełne ograniczenie możliwości spaczenia przekroju podporowego. Występujące w obrębie kontaktu okładzin paneli warstwowych

z łącznikami mechanicznymi lokalne koncentracje naprężeń powodowały deformacje plastyczne okładzin oraz, w konsekwencji, możliwość ograniczonego przesuwu okładzin paneli warstwowych po długości skręcanego elementu. Wartości naprężeń wewnętrznych odczytane z modeli skręcania skrępowanego z zastosowaniem laboratoryjnych warunków podparcia różniły się nieznacznie od tych odczytanych z modeli numerycznych paneli warstwowych skręcanych swobodnie.

W celu weryfikacji zachowania paneli warstwowych z pełną blokadą deplanacji przekroju poprzecznego wykonano analizy numeryczne, wprowadzając powierzchniowe warunki brzegowe ograniczające w pełni możliwość spaczenia przekroju podporowego. W przypadku tych modeli, w bliskim sąsiedztwie skrępowanego przekroju podporowego, zaobserwowano wyraźny wzrost wartości naprężeń normalnych i stycznych w okładzinach oraz spadek wartości naprężeń stycznych w rdzeniu skręcanego panelu warstwowego. Efekt ten jest wyraźnym potwierdzeniem pracy panelu warstwowego w schemacie skręcania skrępowanego. W skrępowanym przekroju podporowym, w okładzinach pojawiły się naprężenia normalne znacznych wartości wywołane giętno-skrętnym bimomentem oraz w ich następstwie – zwiększone w stosunku do skręcania swobodnego wartości naprężeń stycznych. Spadek wartości naprężeń stycznych w rdzeniu spowodowany był zmniejszeniem wpływu skręcania swobodnego w obrębie blokady deplanacji przekroju poprzecznego. Wyniki otrzymane z analiz numerycznych z pełną blokadą deplanacji przekroju poprzecznego pozostawały w dobrej zgodności z wynikami obliczonymi analitycznie skręcanie skrępowanie paneli warstwowych.

Opracowane modele numeryczne skręcania swobodnego, skrępowanego z zastosowaniem mechanicznych łączników w przekroju podporowym oraz skrępowanego z pełną blokadą deplanacji przekroju podporowego pozwoliły wskazać najodpowiedniejsze z inżynierskiego punktu widzenia modele analityczne opisujące zachowanie skręcanych paneli warstwowych.

5.2. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń analitycznych, badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych wyciągnięto następujące wnioski:

- w zakresie przemieszczeń oraz naprężeń, w przypadku skręcania swobodnego zachowanie paneli warstwowych najlepiej opisują teorie Stamma i Witte [70] oraz Seide [67],

- w zakresie przemieszczeń oraz naprężeń, w przypadku skręcania skrępowanego paneli warstwowych zastosowanie znajduje teoria skręcania prętów cienkościennych Własowa; ze sprowadzeniem przekroju warstwowego do postaci przekroju cienkościennego zbudowanego z wzajemnie współpracujących okładzin paneli warstwowych połączonych podatnym rdzeniem,
- zastosowanie teorii skręcania swobodnego paneli warstwowych Stamma i Witte [70] oraz Seide [67] prowadzi do wyznaczenia tych samych wartości sztywności skrętnych paneli warstwowych; z inżynierskiego punktu widzenia i praktycznego zastosowania teoria przedstawiona przez Stamma i Witte [70] jest prostsza w zastosowaniu,
- zastosowanie teorii skręcania skrępowanego Własowa, przy sprowadzeniu przekroju warstwowego do postaci przekroju cienkościennego prowadzi do wyznaczenia sztywności giętno-skrętnej paneli warstwowych,
- laboratoryjne wyznaczenie rzeczywistej sztywności skrętnej paneli warstwowych można przeprowadzić na autorskim stanowisku badawczym, dokonując pomiaru względnego przyrostu kąta obrotu przekroju poprzecznego skręcanego swobodnie elementu na jego długości, w odniesieniu do względnego przyrostu siły generującej obrót,
- całkowita blokada deplanacji podporowego przekroju poprzecznego z zastosowaniem fizycznych łączników mechanicznych jest z praktycznego punktu widzenia nieosiągalna; duża wrażliwość cienkich okładzin paneli warstwowych na naprężenia dociskowe w strefach kontaktu okładzin z łącznikami powoduje ich uplastycznienie i silne deformacje,
- pełna blokada deplanacji podporowego przekroju poprzecznego (odzwierciedlenie teoretycznych warunków podparcia skrępowanego) prowadzi do silnego wzrostu naprężeń normalnych i stycznych w okładzinach (w pobliżu blokady deplanacji),
- efektywny moduł sprężystości podłużnej okładziny zależy od jej warstwowej budowy; wartości wyznaczanych w badaniach wielkości materiałowych należy odnosić bezpośrednio do rzeczywistej budowy próbki,
- uwzględnienie podatności układu mocującego próbki rdzenia paneli warstwowych podczas statycznej próby rozciągania i ściskania materiału rdzenia prowadzi do uzyskania poprawnych wyników modułów sprężystości podłużnej materiału, zgodnych z wynikami otrzymanymi z optycznej analizy przemieszczeń (system ARAMIS),

Podsumowanie i wnioski

- proces produkcji paneli warstwowych wpływa na lokalizację zniszczenia beleczek warstwowych wycinanych wzdłuż kierunku podłużnego paneli podczas próby ścinania; do ścięcia rdzenia próbek dochodzi od strony wcześniejszej aplikacji płynnego rdzenia na posuwające się w procesie produkcji okładziny paneli warstwowych (rys. 3.29),
- parametrami materiałowymi mającymi istotne znaczenie na wartość sztywności skrętej panelu warstwowego są moduł ścinania materiału rdzenia w płaszczyźnie xz – G_{xz}^c oraz moduł ścinania materiału okładzin G^f ,
- naprężenia styczne τ_{xz}^c w rdzeniu są wywoływane częścią całkowitego momentu skręcającego pochodzącą od skręcania swobodnego $M_{S,V}$; wartości naprężeń stycznych na wysokości rdzenia utrzymują się na stałym poziomie; przebieg naprężeń po szerokości panelu warstwowego jest w przybliżeniu liniowy; wartości maksymalne otrzymywane są na powierzchniach zewnętrznych rdzenia,
- naprężenia styczne τ_{xy}^f w okładzinach wywołane są całkowitym momentem skręcającym panel warstwowy; część momentu skręcającego skojarzona ze skręcaniem swobodnym $M_{S,V}$, jak i ta skojarzona ze skręcaniem skrępowanym $M_{S,\omega}$, wpływa na sumaryczną wartość naprężeń stycznych w okładzinach; wartości naprężeń stycznych po grubości okładzin utrzymują się na relatywnie stałym poziomie; przebieg naprężeń po szerokości panelu warstwowego jest w przybliżeniu paraboliczny; wartości maksymalne otrzymywane są środkowej części okładzin,
- naprężenia normalne σ_x w okładzinach wywołane są częścią całkowitego momentu skręcającego pochodzącą od skręcania skrępowanego $M_{S,\omega}$; wartości naprężeń normalnych po grubości okładzin otrzymują się na relatywnie stałym poziomie; przebieg naprężeń po szerokości panelu warstwowego jest w przybliżeniu liniowy; wartości maksymalne otrzymywane są na krawędziach zewnętrznych okładzin.

Na podstawie zrealizowanego programu badań z zastosowaniem autorskiego stanowiska badawczego oraz przeprowadzonych analiz numerycznych, przedstawiając niniejsze podsumowanie i wnioski dowiedziono słuszności postawionych w rozprawie tez:

- możliwe jest skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego będzie określana sztywność skrętna panelu warstwowego w próbie swobodnego skręcania elementu,

- możliwe jest wyznaczenie prawidłowej odpowiedzi mechanicznej (pola przemieszczeń oraz rozkładu naprężeń wewnętrznych) panelu warstwowego, poddanego skręcaniu swobodnemu i skrępowanemu, za pomocą prostego modelu belkowego pod warunkiem znajomości sztywności skrętnej i giętno-skrętnej panelu,
- odpowiednio skalibrowany bryłowo-powłokowy model numeryczny umożliwia pełne rozpoznanie lokalnych zjawisk, zachodzących w skręcanych swobodnie i skrępowanie panelach warstwowych.

5.3. Plan dalszych prac

Opracowany program badań laboratoryjnych obejmował weryfikację zachowania skręcanych paneli warstwowych o gładkich, stalowych okładzinach i rdzeniu z pianki poliizocyanurowej (PIR). Panele warstwowe skręcano w schemacie skręcania swobodnego i skrępowanego.

Z uwagi na silne koncentracje naprężeń w okładzinach paneli warstwowych w obrębie łączników mechanicznych, zastosowanych w celu blokady deplanacji podporowego przekroju poprzecznego, nie wyznaczono laboratoryjnej sztywności giętno-skrętnej paneli warstwowych. W ramach dalszych prac dotyczących podjętego w rozprawie tematu skręcania paneli warstwowych planowana jest modyfikacja warunków brzegowych podparcia panelu warstwowego na podporze, na której blokowana jest deplanacja przekroju poprzecznego. Dzięki wprowadzonej modyfikacji oraz zrealizowaniu podobnego programu badań możliwe będzie wyznaczenie sztywności giętno-skrętnej paneli warstwowych. Badania te mogłyby laboratoryjnie potwierdzić wykonaną w rozprawie za pomocą analiz numerycznych weryfikację obliczeń analitycznych.

Stosowane w praktycznym użyciu łączniki mechaniczne powodują silną koncentrację naprężeń dociskowych w obrębie ich kontaktu z okładzinami paneli warstwowych. Z uwagi na powszechne stosowanie tego typu połączenia paneli warstwowych z ich podporami planowane jest opracowanie modelu połączenia podatnego powodującego częściową blokadę deplanacji przekroju podporowego. Model ten umożliwiłby nie tylko globalną weryfikację stanu granicznego nośności i użyteczności paneli warstwowych, ale także uzyskanie odpowiedzi na lokalne postacie zniszczenia okładzin w obrębie ich kontaktu z łącznikami.

Podsumowanie i wnioski

Dzięki uniwersalności autorskiego stanowiska badawczego polegającej na możliwości badania paneli warstwowych o różnej budowie przekroju poprzecznego planowane są badania laboratoryjne złożonych układów warstwowych. Planowane są prace dotyczące wyznaczenia sztywności skrętnej paneli warstwowych o okładzinach mikroprofilowanych i wysokoprofilowanych oraz dla paneli o rdzeniach wykonanych z materiałów o nieciągłej budowie strukturalnej (wełna mineralna, rdzenie typu plaster miodu, rdzenie wielowarstwowe).

Literatura

- [N-1] PN-EN 10143:2008, *Blachy i taśmy stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły. Tolerancje wymiarów i kształtu.*
- [N-2] PN-EN 10346:2015-09, *Wyroby płaskie stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły do obróbki plastycznej na zimno. Warunki techniczne dostawy.*
- [N-3] PN-EN 10169+A1:2012, *Wyroby płaskie stalowe z powłoką organiczną naniesioną w sposób ciągły. Warunki techniczne dostawy.*
- [N-4] PN-EN ISO 6892-1:2020-05, *Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.*
- [N-5] PN-EN 14509:2013-12, *Samonośne izolacyjno-konstrukcyjne płyty warstwowe z dwustronną okładziną metalową. Wyroby fabryczne. Specyfikacje.*
- [N-6] PN-EN 10210-2:2019-06, *Kształtowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Tolerancje, wymiary i wielkości statyczne.*
- [1] *Abaqus Analysis User's Manual (6.12)*, Dassault Systèmes, 2012.
- [2] Ahmadi I., Three-dimensional stress analysis in torsion of laminated composite bar with general layer stacking, *European Journal of Mechanics / A Solids*, 2018, 72, 252-267.
- [3] Ahmed M. A., Evaluation of apparent shear modulus of multilayer PUF cored sandwich beams using novel experimental technique, *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5, 429-435.
- [4] Allen H. G., *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Pergamon Press, London, 1969.
- [5] Avilés F., Carlsson L. A., Browning G., Millay K., Investigation of the Sandwich Plate Twist Test, *Experimental Mechanics*, 2009, 49, 813-822.
- [6] Avilés F., Carlsson L. A., May-Pat A., A Shear-Corrected Formulation for the Sandwich Twist Specimen, *Experimental Mechanics*, 2012, 52, 17-23.
- [7] Avilés F., Couoh-Solis F., Carlsson L. A., Hernández-Pérez A., May-Pat A., Experimental determination of torsion and shear properties of sandwich panels and laminated composites by the plate twist test, *Composite Structures*, 2011, 93, 1923-1928.

Literatura

- [8] Banhart J., Seeliger H. W., Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications, *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10, 9, 793-802.
- [9] Barretta R., Luciano R., Willis J. R., On torsion of random composite beams, *Composite Structures*, 2015, 132, 915-922.
- [10] Bîrsan M., Sadowski T., Marsavina L., Linul E., Pietras D., Mechanical behavior of sandwich composite beams made of foams and functionally graded materials, *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50, 519-530.
- [11] Böttcher M., *Wand - Sandwichelemente mit Öffnungen*, Dissertation, TU Darmstadt, 2005.
- [12] Broo H., Lundgren K., Engström B., Shear and torsion interaction in prestressed hollow core units, *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57, 9, 521-533.
- [13] Cheng S., *Torsion of Rectangular Sandwich Plate*, Forest Products Laboratory, U. S. Department of Agriculture, No. 1871, 1959.
- [14] Cheng S., *Torsion of Sandwich Panels of Trapezoidal, Triangular, and Rectangular Cross Sections*, Forest Products Laboratory, U. S. Department of Agriculture, No. 1874, 1960.
- [15] Chuda-Kowalska M., Effect of foam's heterogeneity on the behaviour of sandwich panels, *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2019, 29, 4, 97-111.
- [16] Chuda-Kowalska M., *Metodyka eksperymentalnych badań trójwarstwowych płyt z cienkimi okładzinami*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2013.
- [17] Chuda-Kowalska M., Gajewski T., Garbowski T., Mechanical characterization of orthotropic elastic parameters of a foam by the mixed experimental-numerical analysis, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 53, 2, 383-394.
- [18] Chuda-Kowalska M., Garstecki A., Experimental study of anisotropic behavior of PU foam used in sandwich panels, *Steel and Composite Structures*, 2016, 20, 1, 43-56.
- [19] Chuda-Kowalska M., Garstecki A., Wyznaczanie stałych materiałowych dla płyt warstwowych z rdzeniem PUR, *Przegląd Budowlany*, 2012, 3, 67-72.
- [20] Chuda-Kowalska M., Malendowski M., The influence of rectangular openings on the structural behaviour of sandwich panels with anisotropic core, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 2016, 15, 3, 15-25.

- [21] Chuda-Kowalska M., Urbaniak M., Orthotropic parameters of PU foam used in sandwich panels, *Continous Media with Microstructure 2*, 2016.
- [22] CIB 378, *Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Openings*; International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, 2014.
- [23] Čuk M., Kosel F., Zrnić N., Jerman B., An Analysis of Continuous Sandwich Panels with Profiled Faces, *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 63, 12, 746-753.
- [24] Čuk M., Štih S., Jerman B., Finite Element Analysis of Sandwich Panels with Longitudinal Joints and Large Openings, *Technical Gazette*, 2013, 20, 2, 275-284.
- [25] Daniel I. M., Ishai O., *Engineering mechanics of composite materials*, Oxford University Press, Oxford, 2006.
- [26] Davalos J. F., Qiao P., Ramayanam V., Shan L., Robinson J., Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration, *Composite structures*, 2009, 88, 97-111.
- [27] Davalos J. F., Qiao P., Wang J., Salim H. A., Schlüssel J., Shear Moduli of Structural Composites from Torsion Tests, *Journal of Composite Materials*, 2002, 36, 10, 1151-1173.
- [28] Davies J. M., *Lightweight Sandwich Construction*, Blackwell Science Ltd, Oxford, 2001.
- [29] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., *Wytrzymałość materiałów. Tom I*, Wydanie III, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2003.
- [30] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., *Wytrzymałość materiałów. Tom II*, Wydanie II, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2000.
- [31] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J. K., Role of Transverse Shear Modulus in the Performance of Corrugated Materials, *Materials*, 2020, 13, 3791.
- [32] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J. K., Torsional and Transversal Stiffness of Orthotropic Sandwich Panels, *Materials*, 2020, 13, 5016.
- [33] Gawęcki A., *Mechanika materiałów i konstrukcji prętowych*, Politechnika Poznańska Alma Mater, Poznań, 2003.
- [34] Godzimirski J., Metodyka wykreślenia krzywej $\sigma = \sigma(\epsilon)$ z uwzględnieniem sztywności maszyny wytrzymałościowej, *Problemy Mechatroniki : uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 2014, 5, 4, 18, 59-70.
- [35] *GOM Correlate Professional Manual Basic*, GOM mbH, 2015.

Literatura

- [36] Gosowski B., *Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015.
- [37] Guillén-Rujano R., Avilés F., Vidal-Lesso A., Hernández-Pérez A., Closed-form solution and analysis of the plate twist test in sandwich and laminated composites, *Mechanics of Materials*, 2021, 155.
- [38] Hassinen P., Misiek T., Einfluss von Inhomogenitäten im Kernwerkstoff von Sandwichelementen auf die Tragfähigkeit, *Stahlbau*, 2012, 81, 12, 935-943.
- [39] Hoff N. J., *Bending and buckling of rectangular sandwich plates*, Report NACA no 2225, 1950.
- [40] Höglund T., *Load Bearing Strength of Sandwich Panel Walls with Window Openings*, Proceedings of IABSE Colloquium, IABSE Reports 49, Stockholm, 1986, 349-356.
- [41] James S. W., *Physics. 2nd ed.*, New Jersey: Pearson Education, 2004.
- [42] Jones R. M., *Mechanics of composite materials. 2nd ed.*, Taylor & Francis Group, 1999.
- [43] Lange J., Rädcl F., *Calculation Model determining mechanical strength of sandwich panels with openings with and without additional internal frame structure*, EASIE WP1 REPORT Deliverable 1.2, 2011.
- [44] Lagne J., Rädcl F., *Untersuchungen zur Torsion von Sandwichelementen*, Prüfbericht-Nr. 10-44p – intern, TU Darmstadt, 2010.
- [45] Li M., Wu L., Ma L., Xiong J., Guan Z., Torsion of carbon fiber composite pyramidal core sandwich plates, *Composite Structures*, 2011, 93, 2358-2367.
- [46] Magnucka-Blandzi E., Bending and buckling of a metal seven-layer beam with crosswise corrugated main core – Comparative analysis with sandwich beam, *Composite Structures*, 2018, 183, 35-41.
- [47] Metschkow B., Sandwich panels in shipbuilding, *Polish Maritime Research*, 2006, S1.
- [48] Modabberifar M., Roodi M., Souri E., Statistical Analysis of Parameters Effects on Maximum Strain and Torsion Angle of FRP Honeycomb Sandwich Panels Subjected to Torsion, *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, 9, 9, 1135-1140.
- [49] O’Hegarty R., Kinnane O., Review of precast concrete sandwich panels and their innovations, *Construction and Building Materials*, 2020, 233.

- [50] Paczos P., Wasilewicz P., Magnucka-Blandzi E., Experimental and numerical investigations of five-layered trapezoidal beams, *Composite Structures*, 2016, 145, 129-141.
- [51] Paczos P., Wichniarek R., Magnucki K., Three-point bending of sandwich beam with special structure of the core, *Composite Structures*, 2018, 201, 676-682.
- [52] Pajari M., *Pure torsion tests on single hollow core slabs*, VTT RESEARCH NOTES 2273, 2004.
- [53] Pianklang S., Muntongkaw S., Tangboriboon N., Modified thermal- and sound-absorption properties of plaster sandwich panels with natural rubber-latex compounds for building construction, *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139.
- [54] Plantema F. J., *Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells*, Jon Wiley & Sons, 1966.
- [55] Pozorska J., Pozorski Z., Analysis of the failure mechanism of the sandwich panel at the supports, *Procedia Engineering*, 2017, 177, 168-174.
- [56] Pozorska J., Pozorski Z., The influence of the core orthotropy on the wrinkling of sandwich panels, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 2015, 14, 4, 133-138.
- [57] Pozorska J., Pozorski Z., Janik Ł., Numerical simulations of structural behavior of sandwich panels subjected to concentrated static loads, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 2017, 16, 2, 113-121.
- [58] Pozorski Z., *Numerical analysis of sandwich panels subjected to torsion*, Selected Topics in Contemporary Mathematical Modeling, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 2017, 109-122.
- [59] Pozorski Z., *Sandwich panels in civil engineering – theory, testing and design*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2016.
- [60] Pozorski Z., Błaszczuk J., The analysis of the influence of core compression effect on the determination of the shear modulus of the sandwich panel core, *Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science*, 2012, 2, 11, 5-13.
- [61] Pozorski Z., Wojciechowski Sz., The Influence of Symmetrical Boundary Conditions on the Structural Behaviour of Sandwich Panels Subjected to Torsion, *Symmetry*, 2020, 12, 2093.

Literatura

- [62] Rädcl F., Lange J., *Eccentrically loaded sandwich elements*, Eurosteel 2011, Budapest, 2011.
- [63] Rädcl F., *Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Sandwichelementen mit Öffnungen*, Dissertation, TU Darmstadt, 2013.
- [64] Rutecki J., *Wytrzymałość konstrukcji cienkościennych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1957.
- [65] Salim H. A., Davalos J. F., Torsion of Open and Closed Thin-Walled Laminated Composite Sections, *Journal of Composite Materials*, 2005, 39, 6, 497-524.
- [66] Savoia M., Tullini N., Torsional response of inhomogeneous and multilayered composite beams, *Composite Structures*, 1993, 25, 587-594.
- [67] Seide P., On the Torsion of Rectangular Sandwich Plates, *Journal of Applied Mechanics*, 1956, 23(2), 191–194.
- [68] Smakosz Ł., Kreja I., Pozorski Z., Flexural behavior of composite structural insulated panels with magnesium oxide board facings, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20, 82-102.
- [69] Smardzewski J., Wooden sandwich panels with prismatic core – Energy absorbing capabilities, *Composite Structures*, 2019, 230.
- [70] Stamm K., Witte H., *Sandwichkonstruktionen – Berechnung, Fertigung, Ausführung*, Springer-Verlag, Wien, 1974.
- [71] Strobel F., *Sandwichelemente unter Torsionsbeanspruchung*, Bachelor-Thesis, TU Darmstadt, 2010.
- [72] Studziński R., Pozorski Z., Experimental and numerical analysis of sandwich panels with hybrid core, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2016, 20, 3, 271-286.
- [73] Studziński R., Pozorski Z., Garstecki A., Sensitivity analysis of sandwich beams and plates accounting for variable support conditions, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 2013, 61, 1.
- [74] Studziński R., Pozorski Z., Garstecki A., Structural behavior of sandwich panels with asymmetrical boundary conditions, *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 104, 227-234.
- [75] Swanson S. R., Torsion of laminated rectangular rods, *Composite structures*, 1998, 42, 23-31.
- [76] Taheri F., Hematiyan M. R., Torsional analysis of hollow members with sandwich wall, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2017, 19, 3, 317-347.

- [77] Vinson J. R., *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*, Technomic Publishing Company, 1999.
- [78] Wang Y., Liew J. Y. R., Lee S. C., Ultimate strength of steel–concrete–steel sandwich panels under lateral pressure loading, *Engineering Structures*, 2016, 115, 96-106.
- [79] Whitney J. M., Analysis of anisotropic laminated plates subjected to torsional loading, *Composites Engineering*, 1993, 3, 6, 567-582.
- [80] Whitney J. M., Kurtz R. D., Analysis of orthotropic laminated plates subjected to torsional loading, *Composites Engineering*, 1993, 3, 1, 83-97.
- [81] Xiang L., Gangyan L., Chun H. W., Min Y., Minimum-Weight Sandwich Structure Optimum Design Subjected to Torsional Loading, *Applied Composite Materials*, 2012, Volume 19, Issue 2, 117-126.
- [82] Zenkert D., *The Handbook of Sandwich Construction*, EMAS Publishing, 1997.
- [83] Zhao X., Tan L., Zhang F., Mechanical Behavior of Sandwich Panels with Hybrid PU Foam Core, *Advances in Civil Engineering*, 2020.

Spis rysunków

Rysunek 2.1. Jednorodny, izotropowy, liniowo-sprężysty pręt pryzmatyczny.....	23
Rysunek 2.2. Współrzędne pręta cienkościennego.	29
Rysunek 2.3. Obrót linii środkowej pręta cienkościennego o kąt φ	30
Rysunek 2.4. Zapis sił działających na wycięty fragment pręta cienkościennego.....	33
Rysunek 2.5. Schemat statyczny I.....	37
Rysunek 2.6. Schemat statyczny II.	37
Rysunek 2.7. Schemat statyczny III.	38
Rysunek 2.8. Budowa panelu warstwowego – Seide [6].	39
Rysunek 2.9. Budowa panelu warstwowego – Stamm i Witte [8].....	44
Rysunek 2.10. Fragment górnej okładziny – zapis równania równowagi [8].....	45
Rysunek 2.11. Budowa panelu warstwowego – Höglund [9]: a) budowa przekroju poprzecznego, b) niepracująca wewnętrzna część rdzenia, c) sprowadzona szerokość pracującej części rdzenia.	46
Rysunek 2.12. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 120$ mm.	47
Rysunek 2.13. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 160$ mm.	47
Rysunek 2.14. Budowa panelu warstwowego – sztywność giętno-skrętna: a) przekrój poprzeczny panelu warstwowego, b) przekrój zastępczy.	49
Rysunek 2.15. Charakterystyki wycinkowe panelu warstwowego: a) główna współrzędna wycinkowa, b) wycinkowy moment statyczny.	49
Rysunek 2.16. Przebieg naprężenia stycznych w okładzinie τ_{xy}^f , w przekroju poprzecznym.	51
Rysunek 2.17. Przebieg naprężenia stycznych w rdzeniu τ_{xz}^c , w przekroju poprzecznym.	52
Rysunek 3.1. Ułożenie oraz nazewnictwo próbek na arkuszu blachy dolnej okładziny płyty CH120.	53
Rysunek 3.2. Próbką laboratoryjna okładziny.....	55
Rysunek 3.3. Próbkę do pomiaru grubości warstwy antykorozyjnej: a) przed, b) w trakcie (zanurzenie próbki w szklanym naczyniu), c) po procesie usuwania warstwy organicznej.	56
Rysunek 3.4. Próbkę laboratoryjne okładzin: a) po wycięciu gabarytu z arkusza blachy, b) w trakcie procesu usuwania warstw organicznych, c) po usunięciu warstw organicznych.	57

Rysunek 3.5. Proces usuwania warstw organicznych: a) metoda mechaniczna, b) metoda chemiczna - aceton, c) metoda chemiczna - kwas lutowiczy.	58
Rysunek 3.6. Próba wytrzymałościowa rozciągania okładzin: a) próbki oryginalne bez usuwanych warstw organicznych, b) próbki po usunięciu warstw organicznych.	60
Rysunek 3.7. Jednoosiowe rozciąganie próbki o budowie warstwowej.....	60
Rysunek 3.8. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbki SP_120_BL_1 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne + warstwy organiczne).....	62
Rysunek 3.9. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbki SP_120_BL_1 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne).	62
Rysunek 3.10. Relacja naprężenie efektywne - odkształcenie próbek SP_120_BL_1 / SP_120_BL_8 (naprężenia obliczone dla układu warstw: stal + warstwy antykorozyjne + warstwy organiczne).....	64
Rysunek 3.11. Ułożenie próbek względem płyty warstwowej, przeznaczonych do badań: a) z odciętą okładziną, b) bez odcinania okładziny, (strzałką oznaczono kierunek produkcji płyt warstwowych).	65
Rysunek 3.12. Próbki przeznaczone do badań modułu sprężystości: a) schemat cięcia zgodny z rys. 3.11a, b) opis przykładowej próbki, c) schemat cięcia zgodny z rys. 3.11b.	67
Rysunek 3.13. Schemat pomiaru geometrii próbek.	69
Rysunek 3.14. Próbki w trakcie przygotowania do badania: a) rozciągania, b) ściskania.	69
Rysunek 3.15. Próbki przygotowane do badania: a) rozciągania, b) ściskania.	69
Rysunek 3.16. Próbki umieszczone w maszynie wytrzymałościowej w laboratoryjnej próbie: a) rozciągania, b) ściskania.....	70
Rysunek 3.17. Układ mocujący próbkę w laboratoryjnej próbie: a) rozciągania, b) ściskania.....	72
Rysunek 3.18. Relacja obciążenie układu – przemieszczenie trawersy w próbie rozciągania.	73
Rysunek 3.19. Relacja obciążenie układu – przemieszczenie trawersy w próbie ściskania.....	74
Rysunek 3.20. Mapa odkształcenia rozciąganej próbki SP_97 obciążonej siłą 600 N: a) ε_z^c , b) ε_y^c , (wymiar nieobciążonej próbki po kierunku obciążenia równy 119,15 mm)..	75

Rysunek 3.21. Mapa odkształcenia ściskanej próbki SP_103 obciążonej siłą 600 N: a) ε_z^c , b) ε_y^c , (wymiar nieobciążonej próbki po kierunku obciążenia równy 119,73 mm)..	76
Rysunek 3.22. Relacja naprężenie – odkształcenie przy rozciąganiu rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi z.....	77
Rysunek 3.23. Relacja naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi z.....	78
Rysunek 3.24. Relacja naprężenie – odkształcenie rdzenia płyty warstwowej CH120 po kierunku osi x.	79
Rysunek 3.25. Beleczka warstwowa do badania modułu ścinania rdzenia: a) w kierunku podłużnym płyty, b) w kierunku poprzecznym płyty, (oś x zgodna z kierunkiem produkcji płyt warstwowych).....	82
Rysunek 3.26. Ułożenie próbek względem płyty warstwowej: a) w kierunku podłużnym płyty, b) w kierunku poprzecznym płyty, (strzałką oznaczono kierunek produkcji płyt warstwowych).....	82
Rysunek 3.27. Przykładowy opis beleczek warstwowych.	83
Rysunek 3.28. Stanowisko badawcze do badania modułu ścinania rdzenia płyt warstwowych: a) schemat stanowiska, b) rzeczywista budowa stanowiska.	85
Rysunek 3.29. Ustawienie próbki w stanowisku przy badaniu modułu ścinania : a) G_{xz}^c – ustawienie oryginalne I, b) G_{xz}^c – ustawienie obrócone (lewo/prawo), c) G_{yz}^c – ustawienie oryginalne II, d) G_{yz}^c – ustawienie obrócone (góra/dół).	88
Rysunek 3.30. Postać zniszczenia beleczek warstwowych wycinanych wzdłuż kierunku podłużnego płyt: a) beleczki CH120, ustawienie oryginalne I, b) beleczki CH120, ustawienie obrócone (lewo/prawo), c) beleczki CH160, ustawienie oryginalne I, d) beleczki CH160, ustawienie obrócone (lewo/prawo).	88
Rysunek 3.31. Postać zniszczenia beleczek warstwowych wycinanych w poprzek kierunku podłużnego płyt: a) beleczki CH120, ustawienie oryginalne II, b) beleczki CH120, ustawienie obrócone (góra/dół).	89
Rysunek 3.32. Zapis relacji siła - przemieszczenie próbki SP_120_1000_1_1.....	89
Rysunek 3.33. Procentowy udział składników ugięcia na wartość ugięcia całkowitego próbki SP_120_1000_1_1.....	93
Rysunek 3.34. Moduł ścinania rdzenia G_{xz}^c próbek: SP_120_1000_1_1 / SP_120_1000_2_8.	94
Rysunek 3.35. Moduł ścinania rdzenia G_{xz}^c próbek: SP_160_1000_1_1 / SP_160_1000_2_8.	94

Rysunek 3.36 Moduł ścinania rdzenia G_{yz}^c próbek: SP_120_100_1_1 / SP_120_100_7_1.....	95
Rysunek 3.37 Moduł ścinania rdzenia G_{yz}^c próbek: SP_160_100_1_1 / SP_160_100_8_1.....	95
Rysunek 3.38. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na podporze.....	97
Rysunek 3.39. Odkształcenie powierzchni górnej beleczki na podporze.....	98
Rysunek 3.40. Warunki brzegowe podparcia modelu zginanej beleczki warstwowej..	99
Rysunek 3.41. Zapis relacji siła - przemieszczenie próbki SP_120_1000_1_1 – wraz z wynikami z analizy numerycznej.	100
Rysunek 3.42. Mapa naprężeń stycznych τ_{xz}^f w beleczce warstwowej – skala widoku 10:1.	101
Rysunek 3.43. Obciążony mimośrodowo panel warstwowy: a) zginanie i skręcanie, b) „czyste” zginanie, c) „czyste” skręcanie.....	102
Rysunek 3.44. Schemat statyczny badania – skręcanie swobodne.....	103
Rysunek 3.45. Schemat statyczny badania – skręcanie skrępowane.	103
Rysunek 3.46. Stanowisko do skręcania – Davalos [26].	104
Rysunek 3.47. Stanowisko do skręcania – Pajari [52].	105
Rysunek 3.48. Autorskie stanowisko do skręcania.....	105
Rysunek 3.49. Stanowisko laboratoryjne do skręcania paneli warstwowych: a) podpora nieobrotowa, b) podpora obrotowa.	107
Rysunek 3.50. Modyfikacja stanowiska badawczego do badania płyt o różnych wysokościach: a) obrotowe stanowisko badawcze, b) rama podporowa.....	107
Rysunek 3.51. Budowa ramy podporowej – nieobrotowa podpora skręcanej płyty warstwowej.	108
Rysunek 3.52. Łożysko ślizgowe: a) detal, b) łożysko liniowe.....	109
Rysunek 3.53. Blokada deplanacji na podporze: a) schemat podpory, b) rura dociskowa z płytą, c) stosowany szablon przy wykonywaniu otworów, d) otworowana podkładka EPDM.	109
Rysunek 3.54. Autorskie stanowisko do skręcania: a) rama podporowa z łożyskiem obrotowym, b) zamontowana tarcza obrotowa, d) kompletne stanowisko.....	112
Rysunek 3.55. Ślizgowe łożysko obrotowe: a) surowy materiał, b) trzpień łożyska, c) piasta łożyska, d) złożone łożysko.....	113

Rysunek 3.56. Zabezpieczenie obsługi stanowiska badawczego: a) blokada obrotu tarczy obrotowej, b) ograniczenie obrotu stanowiska za pomocą linek stalowych, c) stabilizacja stojaka siłownika.	114
Rysunek 3.57. Tribotester Brucker UMT-2: a) widok ogólny, b) widok przestrzeni roboczej.	114
Rysunek 3.58. Współczynnik tarcia łożyska ślizgowego (rys. 3.52).	115
Rysunek 3.59. Współczynnik tarcia łożyska obrotowego (rys. 3.6).	116
Rysunek 3.60. Model numeryczny łożyska obrotowego obciążonego ciężarem tarczy obrotowej: a) wartość naprężeń dociskowych [MPa], b) widok ogólny modelu.	117
Rysunek 3.61. Wartość naprężeń dociskowych w strefie kontaktu.	117
Rysunek 3.62. Badanie oporu ruchu stanowiska.	119
Rysunek 3.63. Badanie oporu ruchu stanowiska – dodatkowy balast.	120
Rysunek 3.64. Relacja siła – przemieszczenie podczas próby wysuwu tłoka dla próbki RuraM_1.	120
Rysunek 3.65. Relacja siła – przemieszczenie podczas próby wysuwu tłoka dla wszystkich prób.	122
Rysunek 3.66. Schemat rozkładu obciążenia w stanowisku badawczym.	122
Rysunek 3.67. Badanie sztywności tarczy stanowiska badawczego – schemat.	123
Rysunek 3.68. Badanie sztywności tarczy stanowiska badawczego.	124
Rysunek 3.69. Relacja siła rozporowa – przemieszczenie podczas próby sztywności stanowiska badawczego – zapis bezpośredni z próby.	125
Rysunek 3.70. Relacja siła rozporowa – przemieszczenie podczas próby sztywności stanowiska badawczego – wynik uśredniony.	126
Rysunek 3.71. Lokalizacja czujników przemieszczeń na tarczy obrotowej w trakcie trwania badań zasadniczych – schemat.	127
Rysunek 3.72. Lokalizacja czujników przemieszczeń na tarczy obrotowej w trakcie trwania badań zasadniczych: a) stanowisko w trakcie badania, b) stanowisko przed badaniem.	127
Rysunek 3.73. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 120 mm i szerokości 1000 mm w stanowisku.	129
Rysunek 3.74. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 160 mm i szerokości 1000 mm w stanowisku.	129
Rysunek 3.75. Wgniecenie okładziny na podporze spowodowane dociskiem poziomego ogranicznika: a) górna okładzina, b) dolna okładzina.	130

Rysunek 3.76. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 120 mm i szerokości 500 mm w stanowisku.	131
Rysunek 3.77. Sztywność zamocowania płyty o wysokości 160 mm i szerokości 500 mm w stanowisku.	131
Rysunek 3.78. Badanie materiałowe próbki do badania kalibracyjnego: a) próbka laboratoryjna, b) relacja naprężenie-odkształcenie badanej próbki laboratoryjnej.	135
Rysunek 3.79. Badanie kalibracyjne skręcania rury okrągłej: a) próbka laboratoryjna, b) schemat badania.....	137
Rysunek 3.80. Zamocowanie rury okrągłej na podporze: a) ruchomej - obrotowej, b) nieruchomej.	138
Rysunek 3.81. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej rury okrągłej.	139
Rysunek 3.82. Sztywność zamocowania rury okrągłej w stanowisku.....	141
Rysunek 3.83. Stanowisko badawcze przy maksymalnym wysuwie siłownika.....	142
Rysunek 3.84. Dostarczone do badań panele warstwowe.	143
Rysunek 3.85. Geometria przygotowanych do badań paneli warstwowych o szerokościach: a) 1000 mm, b) 500 mm, c) 250 mm.....	144
Rysunek 3.86. Opis paneli warstwowych.	144
Rysunek 3.87. Miejsca pomiaru geometrii próbek: a) długości i szerokości, b) wysokości, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki względem którego rozpoczynano pomiar).	147
Rysunek 3.88. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na próbce – skręcanie swobodne.	148
Rysunek 3.89. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.	149
Rysunek 3.90. Wyniki sztywności skrętnej w pełnym zakresie obciążenia próbki SP_1_1.....	151
Rysunek 3.91. Wgniecenie na podporze próbki SP_1_1.....	152
Rysunek 3.92. Relacja przemieszczenie – moment skręcający wgniecenia na podporze próbki SP_1_1.....	153
Rysunek 3.93. Relacja przemieszczenie <i>Przem3</i> – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.....	154
Rysunek 3.94. Wyniki sztywności skrętnej w pełnym zakresie obciążenia próbek, wyniki dla paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.	155

Rysunek 3.95. Sztywność skrętna paneli warstwowych.	156
Rysunek 3.96. Pomiar deplanacji podporowego przekroju poprzecznego próbki SP_16_1.	158
Rysunek 3.97. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_16_1.	158
Rysunek 3.98. Relacja przemieszczenie – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 250 mm.	159
Rysunek 3.99. Schemat zniszczenia panelu warstwowego SP_120_4100_8_2 w próbie skręcania swobodnego: a), b) panel zamocowany w stanowisku, c) widok rdzenia z góry.	160
Rysunek 3.100. Rozmieszczenie tensometrów na próbce: a) zapis ogólny, b) próbka SP_120_4100_1_1, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki, względem którego ustawiano próbkę).	161
Rysunek 3.101. Mocowanie czujników tensometrycznych: a) przygotowanie powierzchni, b) tensometr liniowy 1-LY11-10/120, c) rozeta tensometryczna 1-RY11-10/120.	163
Rysunek 3.102. Badania paneli warstwowych z zastosowaniem tensometrów: a) SP_120_4100_1_1, b) próbka SP_120_4100_8_1, c) próbka SP_120_4100_12_1, d) tensometry kompensacyjne próbka.	164
Rysunek 3.103. Stabilizacja pomiaru tensometrycznego – podgląd zapisu próby.	165
Rysunek 3.104. Stabilizacja pomiaru tensometrycznego – próbka SP_120_4100_1_1.	165
Rysunek 3.105. Oznaczenie punktów pomiarów tensometrycznych: a) rozeta, b,c) tensometr liniowy.	166
Rysunek 3.106. Naprężenia wewnętrzne w próbce SP_120_4100_1_1 przy obciążeniu równym 2,0 kNm.	167
Rysunek 3.107. Relacja naprężenia wewnętrzne – obciążenie dla próbki SP_120_4100_1_1: a) naprężenia normalne σ_x^f , b) naprężenia normalne σ_y^f , c) naprężenia styczne τ_{xy}^f	168
Rysunek 3.108. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń na próbce – skręcanie skrzepowane.	169
Rysunek 3.109. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_2_1.	170

Rysunek 3.110. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanych próbek SP_1_1 i SP_2_1.	171
Rysunek 3.111. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanych próbek SP_1_1 i SP_2_1 obrazujący wgniecenie próbek na podporze.	172
Rysunek 3.112. Relacja przemieszczenie <i>Przem3</i> – moment skręcający paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.	173
Rysunek 3.113. Badania paneli warstwowych z zastosowaniem tensometrów: próbka SP_120_4100_2_1.	174
Rysunek 3.114. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_2_1, (czarną kropką oznaczono punkt orientacyjny próbki, względem którego ustawiano próbkę).	175
Rysunek 3.115. Naprężenia wewnętrzne w próbce SP_120_4100_2_1 przy obciążeniu równym 2,0 kNm.	176
Rysunek 3.116. Strefa podporowa panelu warstwowego SP_120_4100_2_1 po przeprowadzonej próbie skręcani skrępowanego.	177
Rysunek 4.1. Warunki podparcia próbki SP_120_4100_1_1 w modelu numerycznym.	179
Rysunek 4.2. Warunki podparcia skręcanych swobodnie paneli warstwowych: a) podpora nieruchoma, b) podpora ruchoma – obrotowa, c) poziomy ogranicznik, d) podpora nieruchoma – stopnie swobody, e) podpora ruchoma – stopnie swobody.	180
Rysunek 4.3. Warunki podparcia paneli warstwowych skręcanych skrępowanie: a) laboratoryjne, b) z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego..	182
Rysunek 4.4. Próbka SP_120_4100_1_1 – budowa modelu.	182
Rysunek 4.5. Próbka SP_120_4100_1_1 – siatka MES.	183
Rysunek 4.6. Kontakt TIE pomiędzy poziomymi ogranicznikami, a sztywną ramą podporową.	186
Rysunek 4.7. Kontakt TIE pomiędzy okładzinami, a rdzeniem paneli warstwowych.	186
Rysunek 4.8. Kontakt SURFACE TO SURFACE pomiędzy: a) okładzinami paneli warstwowych, a ramą podporową, b) poziomymi ogranicznikami, a okładzinami paneli warstwowych, c) łącznikami mechanicznymi, a okładzinami paneli warstwowych.	188
Rysunek 4.9. Próbka SP_120_4100_1_1 – obciążenie.	188
Rysunek 4.10. Przemieszczenia u_z próbki SP_1_1.	193
Rysunek 4.11. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.	194

Rysunek 4.12. Relacja naprężenie styczne τ_{xy}^f – moment skręcający skręcanej próbki SP_1_1.	194
Rysunek 4.13. Sztywność skrętna panelu warstwowego o parametrach $H = 120$ mm, $B = 1000$ mm.	196
Rysunek 4.14. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 120$ mm.	197
Rysunek 4.15. Sztywność skrętna panelu warstwowego o wysokości $H = 160$ mm.	197
Rysunek 4.16. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_1_1, w przekrojach podłużnych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $y = 0$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , $y = 450$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $y = 450$ mm.	199
Rysunek 4.17. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_1_1, w przekrojach poprzecznych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $x = 1000$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , $x = 1000$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $x = 1000$ mm.	200
Rysunek 4.18. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_1_1: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , c) naprężenia normalne σ_x^f , d) naprężenia normalne σ_y^f	202
Rysunek 4.19. Wgniecenie rdzenia panelu warstwowego na podporze nieruchomej – wybrzuszenie okładziny: a) badanie laboratoryjne, b) model numeryczny.	204
Rysunek 4.20. Wgniecenie okładziny panelu warstwowego na podporze nieruchomej: a) badanie laboratoryjne, b) model numeryczny.	205
Rysunek 4.21. Deplanacja podporowego przekroju poprzecznego – przemieszczenia u_x	205
Rysunek 4.22. Przemieszczenia u_z próbki SP_2_1 z zastosowanymi na podporze nieruchomej warunkami brzegowymi: a) odzwierciedlającymi laboratoryjne warunki podparcia, b) z pełną blokadą deplanacji podporowego przekroju poprzecznego.	206
Rysunek 4.23. Relacja przemieszczenie – moment skręcający skręcanej próbki SP_2_1.	207
Rysunek 4.24. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_2_1, w przekrojach podłużnych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $y = 0$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , $y = 450$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $y = 450$ mm.	210
Rysunek 4.25. Przebieg naprężeń wewnętrznych obciążonej próbki SP_120_4100_2_1, w przekrojach poprzecznych: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , $x = 1000$ mm, b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , $x = 1000$ mm, c) naprężenia normalne σ_x^f , $x = 1000$ mm.	211
Rysunek 4.26. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_2_1 z zastosowanymi na podporze nieruchomej laboratoryjnymi	

warunkami brzegowymi: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , c) naprężenia normalne σ_x^f , d) naprężenia normalne σ_y^f 213

Rysunek 4.27. Mapy naprężeń wewnętrznych [MPa] obciążonej próbki SP_120_4100_2_1 z zastosowaną na podporze nieruchomej pełną blokadą deplanacji przekroju poprzecznego: a) naprężenia styczne τ_{xy}^f , b) naprężenia styczne τ_{xz}^c , c) naprężenia normalne σ_x^f , d) naprężenia normalne σ_y^f 214

Rysunek 4.28. Strefa podporowa panelu warstwowego SP_120_4100_2_1 przy obciążeniu równym 3,0 kNm. 215

Spis tabel

Tabela 2.1. Zestawienie warunków brzegowych skrajnych przekrojów pręta.....	36
Tabela 2.2. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny I.	37
Tabela 2.3. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny II.	38
Tabela 2.4. Zestawienie funkcji opisujących zachowanie pręta – schemat statyczny III.	38
Tabela 3.1. Zestawienie uśrednionych grubości poszczególnych warstw próbek okładzin.	59
Tabela 3.2. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej próbek okładzin.	63
Tabela 3.3. Zestawienie próbek do badań modułu sprężystości – płyta warstwowa CH120.	67
Tabela 3.4. Zestawienie próbek do badań modułu sprężystości – płyta warstwowa CH160.	68
Tabela 3.5. Współczynnik Poissona ν_{zy}^c materiału rdzenia.....	79
Tabela 3.6. Zestawienie modułów sprężystości rdzenia.	80
Tabela 3.6-cd. Zestawienie modułów sprężystości rdzenia.....	81
Tabela 3.7. Gęstość rdzenia paneli warstwowych.....	81
Tabela 3.8. Zestawienie modułów ścinania rdzenia G_{xz}^c	93
Tabela 3.9. Zestawienie modułów ścinania rdzenia G_{yz}^c	93
Tabela 3.10. Zestawienie wytrzymałości rdzenia na ścianie $f_{v,xz}^c$	97
Tabela 3.11. Zestawienie prób wysuwu tłoka siłownika.....	119
Tabela 3.12. Zestawienie wyników prób wysuwu tłoka siłownika.....	121
Tabela 3.13. Zestawienie próbek dla których dokonywano pomiaru sztywności tarczy obrotowej.....	128
Tabela 3.14. Zestawienie paneli warstwowych o wysokości przekroju poprzecznego równej 120 mm.....	145
Tabela 3.15. Zestawienie paneli warstwowych o wysokości przekroju poprzecznego równej 160 mm.....	146
Tabela 3.16. Sztywność skrętna paneli warstwowych o parametrach: H = 120 mm, B = 1000 mm.....	155
Tabela 3.17. Sztywność skrętna paneli warstwowych.	156
Tabela 3.18. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_1_1.	162

Tabela 3.19. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_2_1.....	175
Tabela 4.1. Wpływ parametrów materiałowych na zachowanie skręcanego panelu warstwowego.	190
Tabela 4.2. Wpływ rozmiaru siatki MES na zbieżność wyników skręcanych paneli warstwowych.	192

Załączniki

Załącznik A – pomiary próbek

Tabela A.1. Zestawienie szerokości **B** i długości **L** paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość panelu warstwowego: B						Długość panelu warstwowego: L					
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]
SP_120_4100_1_1	SP_1	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	0,0	0,000	4099,0	4100,0	4099,0	4099,3	0,6	0,000
SP_120_4100_2_1	SP_2	1001,0	1001,0	1000,0	1000,7	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_120_4100_3_1	SP_3	1000,0	1001,0	1000,0	1000,3	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_120_4100_4_1	SP_4	999,0	999,0	999,0	999,0	0,0	0,000	4098,0	4099,0	4099,0	4098,7	0,6	0,000
SP_120_4100_5_1	SP_5	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	0,0	0,000	4100,0	4101,0	4100,0	4100,3	0,6	0,000
SP_120_4100_6_1	SP_6	1000,0	999,0	998,0	999,0	1,0	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_120_4100_7_1	SP_7	998,0	999,0	999,0	998,7	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_120_4100_8_1	SP_8	501,0	501,0	501,0	501,0	0,0	0,000	4098,0	4099,0	4098,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_8_2	SP_9	501,0	501,0	500,0	500,7	0,6	0,001	4098,0	4099,0	4098,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_9_1	SP_10	502,0	501,0	501,0	501,3	0,6	0,001	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000
SP_120_4100_9_2	SP_11	501,0	501,0	501,0	501,0	0,0	0,000	4098,0	4098,0	4099,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_10_1	SP_12	501,0	501,0	501,0	501,0	0,0	0,000	4098,0	4099,0	4098,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_10_2	SP_13	499,0	500,0	501,0	500,0	1,0	0,002	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_120_4100_11_1	SP_14	501,0	500,0	501,0	500,7	0,6	0,001	4098,0	4099,0	4098,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_11_2	SP_15	501,0	501,0	501,0	501,0	0,0	0,000	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000

Tabela A.1-cd. Zestawienie szerokości **B** i długości **L** paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość panelu warstwowego: B						Długość panelu warstwowego: L					
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]
SP_120_4100_12_1	SP_16	251,0	250,0	250,0	250,3	0,6	0,002	4098,0	4098,0	4099,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_12_2	SP_17	251,0	251,0	250,0	250,7	0,6	0,002	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_120_4100_12_3	SP_18	252,0	250,0	251,0	251,0	1,0	0,004	4099,0	4098,0	4098,0	4098,3	0,6	0,000
SP_120_4100_12_4	SP_19	251,0	251,0	251,0	251,0	0,0	0,000	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_120_4100_13_1	SP_20	251,0	250,0	250,0	250,3	0,6	0,002	4098,0	4099,0	4099,0	4098,7	0,6	0,000
SP_120_4100_13_2	SP_21	251,0	251,0	251,0	251,0	0,0	0,000	4098,0	4099,0	4099,0	4098,7	0,6	0,000
SP_120_4100_13_3	SP_22	251,0	251,0	251,0	251,0	0,0	0,000	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_120_4100_13_4	SP_23	252,0	251,0	251,0	251,3	0,6	0,002	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000
SP_160_4100_1_1	SP_24	998,0	998,0	1000,0	998,7	1,2	0,001	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_160_4100_2_1	SP_25	1000,0	999,0	1000,0	999,7	0,6	0,001	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000
SP_160_4100_3_1	SP_26	1000,0	999,0	1000,0	999,7	0,6	0,001	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000
SP_160_4100_4_1	SP_27	1000,0	999,0	1000,0	999,7	0,6	0,001	4099,0	4099,0	4099,0	4099,0	0,0	0,000
SP_160_4100_5_1	SP_28	999,0	997,0	998,0	998,0	1,0	0,001	4098,0	4098,0	4098,0	4098,0	0,0	0,000
SP_160_4100_6_1	SP_29	1000,0	998,0	1000,0	999,3	1,2	0,001	4099,0	4098,0	4099,0	4098,7	0,6	0,000
SP_160_4100_7_1	SP_30	1000,0	999,0	999,0	999,3	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4100,0	4100,7	0,6	0,000

Tabela A.1-cd. Zestawienie szerokości **B** i długości **L** paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość panelu warstwowego: B						Długość panelu warstwowego: L					
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]
SP_160_4100_8_1	SP_31	500,0	499,0	500,0	499,7	0,6	0,001	4100,0	4101,0	4101,0	4100,7	0,6	0,000
SP_160_4100_8_2	SP_32	500,0	500,0	501,0	500,3	0,6	0,001	4100,0	4100,0	4100,0	4100,0	0,0	0,000
SP_160_4100_9_1	SP_33	500,0	501,0	501,0	500,7	0,6	0,001	4100,0	4100,0	4101,0	4100,3	0,6	0,000
SP_160_4100_9_2	SP_34	500,0	500,0	501,0	500,3	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_160_4100_10_1	SP_35	501,0	500,0	501,0	500,7	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_160_4100_10_2	SP_36	474,0	474,0	474,0	474,0	0,0	0,000	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_160_4100_11_1	SP_37	501,0	500,0	500,0	500,3	0,6	0,001	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_160_4100_11_2	SP_38	501,0	501,0	501,0	501,0	0,0	0,000	4101,0	4101,0	4101,0	4101,0	0,0	0,000
SP_160_4100_12_1	SP_39	251,0	251,0	251,0	251,0	0,0	0,000	4100,0	4100,0	4100,0	4100,0	0,0	0,000
SP_160_4100_12_2	SP_40	251,0	249,0	250,0	250,0	1,0	0,004	4100,0	4100,0	4100,0	4100,0	0,0	0,000
SP_160_4100_12_3	SP_41	251,0	250,0	250,0	250,3	0,6	0,002	4100,0	4100,0	4100,0	4100,0	0,0	0,000
SP_160_4100_12_4	SP_42	251,0	250,0	251,0	250,7	0,6	0,002	4099,0	4100,0	4100,0	4099,7	0,6	0,000
SP_160_4100_13_1	SP_43	250,0	249,0	250,0	249,7	0,6	0,002	4101,0	4101,0	4100,0	4100,7	0,6	0,000
SP_160_4100_13_2	SP_44	250,0	249,0	250,0	249,7	0,6	0,002	411,0	4100,0	4101,0	2870,7	2130,1	0,742
SP_160_4100_13_3	SP_45	250,0	250,0	250,0	250,0	0,0	0,000	4100,0	4100,0	4100,0	4100,0	0,0	0,000
SP_160_4100_13_4	SP_46	250,0	250,0	250,0	250,0	0,0	0,000	4100,0	4100,0	4101,0	4100,3	0,6	0,000

Tabela A.2. Zestawienie wysokości H paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość panelu warstwowego: H														\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}					
SP_120_4100_1_1	SP_1	120,77	120,39	120,99	120,24	120,17	120,34	120,46	119,78	120,57	120,67	120,61	120,22	120,43	0,32	0,003		
SP_120_4100_2_1	SP_2	120,84	120,37	120,92	120,31	120,48	120,54	120,40	119,84	120,31	120,35	120,21	120,21	120,40	0,29	0,002		
SP_120_4100_3_1	SP_3	120,63	120,36	120,66	119,90	120,95	120,48	120,41	119,80	120,13	120,79	120,18	120,20	120,37	0,35	0,003		
SP_120_4100_4_1	SP_4	120,63	120,43	120,64	120,28	120,25	120,21	120,28	119,76	120,11	120,52	120,33	120,35	120,32	0,24	0,002		
SP_120_4100_5_1	SP_5	120,48	120,25	120,55	120,04	119,98	120,01	120,11	119,76	120,01	120,11	120,10	120,22	120,14	0,22	0,002		
SP_120_4100_6_1	SP_6	120,42	120,27	120,48	120,09	120,19	119,96	120,01	119,81	120,12	119,93	119,94	119,98	120,10	0,21	0,002		
SP_120_4100_7_1	SP_7	120,38	119,94	120,32	120,39	120,20	120,22	120,60	120,75	120,90	120,38	120,48	120,33	120,41	0,25	0,002		
SP_120_4100_8_1	SP_8	119,79	120,49	120,50	119,86	119,91	120,10	120,47	120,39	119,92	119,92	120,12	119,98	120,12	0,27	0,002		
SP_120_4100_8_2	SP_9	120,15	120,15	120,41	120,31	120,57	120,38	120,24	120,05	120,00	119,69	119,68	119,73	120,11	0,29	0,002		
SP_120_4100_9_1	SP_10	120,36	120,51	120,70	120,10	120,42	120,32	120,26	119,89	120,21	119,80	119,76	119,61	120,16	0,33	0,003		
SP_120_4100_9_2	SP_11	120,94	120,59	120,88	120,09	120,18	120,13	120,05	120,31	120,29	119,97	120,03	120,21	120,31	0,33	0,003		
SP_120_4100_10_1	SP_12	120,49	120,45	120,47	119,93	120,19	120,21	120,17	120,06	119,95	119,62	119,63	119,48	120,05	0,34	0,003		
SP_120_4100_10_2	SP_13	120,88	120,60	120,38	119,90	120,04	120,02	119,99	120,10	120,56	119,88	120,09	120,14	120,22	0,32	0,003		
SP_120_4100_11_1	SP_14	120,74	120,96	121,01	119,93	120,42	119,98	120,44	119,96	120,10	120,06	119,95	119,71	120,27	0,43	0,004		
SP_120_4100_11_2	SP_15	120,90	120,75	121,00	119,56	120,16	119,76	120,12	120,23	120,32	119,84	120,14	119,54	120,19	0,49	0,004		

Tabela A.2-cd. Zestawienie wysokości H paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość panelu warstwowego: H													\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_5 [mm]	H_6 [mm]	H_7 [mm]	H_8 [mm]	H_9 [mm]	H_{10} [mm]	H_{11} [mm]	H_{12} [mm]	[mm]	[mm]	[-]	
SP_120_4100_12_1	SP_16	120,41	120,86	120,18	119,27	119,36	119,44	119,82	120,40	119,64	120,60	120,48	120,58	120,09	0,55	0,005	
SP_120_4100_12_2	SP_17	119,74	120,56	119,81	119,52	119,27	119,81	119,75	120,39	119,59	119,63	119,36	119,24	119,72	0,40	0,003	
SP_120_4100_12_3	SP_18	120,19	120,77	120,01	119,75	120,10	120,12	120,18	120,77	120,26	119,93	119,64	119,86	120,13	0,35	0,003	
SP_120_4100_12_4	SP_19	120,05	120,62	120,22	119,97	120,05	120,15	119,70	120,31	119,64	119,77	119,64	119,50	119,97	0,33	0,003	
SP_120_4100_13_1	SP_20	120,29	120,69	120,00	119,16	119,25	119,20	119,81	120,30	119,68	120,37	120,34	120,29	119,95	0,52	0,004	
SP_120_4100_13_2	SP_21	119,83	120,67	120,10	119,75	119,86	119,68	119,85	120,32	119,64	119,28	119,10	119,30	119,78	0,44	0,004	
SP_120_4100_13_3	SP_22	120,33	120,91	120,73	119,70	119,50	119,70	120,49	120,40	119,70	119,64	119,49	119,92	120,04	0,50	0,004	
SP_120_4100_13_4	SP_23	119,85	120,47	119,80	119,90	120,12	120,10	119,61	120,25	119,76	119,34	119,43	119,39	119,84	0,36	0,003	
SP_160_4100_1_1	SP_24	160,15	159,73	160,22	160,34	160,44	160,34	160,79	160,34	161,12	160,68	160,15	160,40	160,39	0,35	0,002	
SP_160_4100_2_1	SP_25	160,30	159,84	160,34	160,43	160,37	160,50	160,78	160,40	161,00	160,48	160,37	160,70	160,46	0,29	0,002	
SP_160_4100_3_1	SP_26	159,89	159,11	159,92	159,78	159,99	159,82	160,43	159,73	160,60	159,71	160,00	159,89	159,91	0,37	0,002	
SP_160_4100_4_1	SP_27	159,66	159,15	159,97	159,48	159,97	159,77	160,19	159,57	160,14	159,54	159,70	159,49	159,72	0,30	0,002	
SP_160_4100_5_1	SP_28	160,41	159,77	160,22	160,42	160,16	160,38	160,61	160,07	160,92	160,24	160,33	160,43	160,33	0,28	0,002	
SP_160_4100_6_1	SP_29	160,18	159,88	160,36	160,25	160,29	160,33	160,43	160,10	160,67	160,35	160,16	160,33	160,28	0,19	0,001	
SP_160_4100_7_1	SP_30	159,70	159,19	159,60	159,64	159,55	159,54	160,40	159,60	160,47	159,70	159,87	159,79	159,75	0,36	0,002	

Tabela A.2-cd. Zestawienie wysokości H paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość panelu warstwowego: H														\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}	\bar{x}	s	ν		
SP_160_4100_8_1	SP_31	160,12	160,02	159,45	159,35	159,33	159,53	159,26	159,62	159,57	160,16	160,06	159,99	159,71	0,34	0,002		
SP_160_4100_8_2	SP_32	159,75	160,15	159,60	160,09	159,93	159,88	159,21	159,43	159,04	159,62	159,43	159,48	159,63	0,34	0,002		
SP_160_4100_9_1	SP_33	159,47	159,83	159,85	159,40	160,43	160,20	159,70	160,11	159,81	160,01	160,38	159,00	159,85	0,42	0,003		
SP_160_4100_9_2	SP_34	159,99	160,38	160,50	160,02	160,14	160,10	159,70	160,08	159,73	160,43	160,56	160,37	160,17	0,29	0,002		
SP_160_4100_10_1	SP_35	160,40	160,66	160,68	160,65	160,49	160,31	160,21	160,29	159,96	160,17	160,13	160,14	160,34	0,24	0,001		
SP_160_4100_10_2	SP_36	159,93	160,24	158,81	159,01	160,36	159,97	159,69	160,30	160,00	160,62	160,75	159,51	159,93	0,60	0,004		
SP_160_4100_11_1	SP_37	160,32	160,76	160,23	160,11	160,16	160,05	160,10	160,30	159,64	160,35	160,48	159,92	160,20	0,28	0,002		
SP_160_4100_11_2	SP_38	160,43	160,39	160,54	160,36	160,63	160,43	160,12	160,29	160,41	159,67	160,10	160,24	160,30	0,25	0,002		
SP_160_4100_12_1	SP_39	160,60	161,04	159,50	160,84	160,51	160,52	160,84	161,25	160,16	160,58	160,29	160,21	160,53	0,46	0,003		
SP_160_4100_12_2	SP_40	160,23	161,35	159,74	160,14	160,25	160,37	160,10	161,06	159,79	160,60	160,52	160,68	160,40	0,48	0,003		
SP_160_4100_12_3	SP_41	159,88	161,18	160,20	160,12	159,99	160,04	160,08	161,09	160,03	160,07	160,19	160,32	160,27	0,42	0,003		
SP_160_4100_12_4	SP_42	159,71	161,45	160,11	160,57	160,72	160,44	159,47	160,98	159,81	160,52	160,79	159,92	160,37	0,58	0,004		
SP_160_4100_13_1	SP_43	160,12	161,31	159,93	160,84	160,91	160,99	160,10	161,11	159,64	160,99	160,89	160,99	160,65	0,55	0,003		
SP_160_4100_13_2	SP_44	160,02	161,39	159,84	160,95	160,96	160,72	159,80	160,96	160,01	160,86	160,58	160,70	160,57	0,52	0,003		
SP_160_4100_13_3	SP_45	159,80	161,34	160,13	160,62	160,53	160,61	160,64	161,15	160,14	160,80	160,63	160,52	160,58	0,42	0,003		
SP_160_4100_13_4	SP_46	159,70	160,96	160,08	160,60	160,59	160,63	159,95	160,92	159,58	160,60	160,30	160,61	160,38	0,45	0,003		

Tabela A.3. Zestawienie grubości antykorozyjnej powłoki zewnętrznej okładzin $t_{z,out}^f$ paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość antykorozyjnej powłoki zewnętrznej okładzin: $t_{z,out}^f$														\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	$t_{z,out,1}^f$ [μm]	$t_{z,out,2}^f$ [μm]	$t_{z,out,3}^f$ [μm]	$t_{z,out,4}^f$ [μm]	$t_{z,out,5}^f$ [μm]	$t_{z,out,6}^f$ [μm]	$t_{z,out,7}^f$ [μm]	$t_{z,out,8}^f$ [μm]	$t_{z,out,9}^f$ [μm]	$t_{z,out,10}^f$ [μm]	$t_{z,out,11}^f$ [μm]	$t_{z,out,12}^f$ [μm]	[mm]	[mm]	[-]		
SP_120_BL-z_1	SP_295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
SP_120_BL-z_2	SP_296	28,1	25,7	24,7	23,3	25,6	26,8	24,9	27,6	25,2	27,3	27,6	28,0	0,026	0,002	0,059		
SP_120_BL-z_3	SP_297	23,3	26,4	24,4	24,2	24,2	23,4	25,8	26,0	23,1	27,5	25,0	27,3	0,025	0,002	0,061		
SP_120_BL-z_4	SP_298	24,8	25,9	25,3	25,6	25,8	25,2	25,0	24,3	27,9	27,7	26,2	25,5	0,026	0,001	0,042		
SP_120_BL-z_5	SP_299	26,2	24,4	25,6	26,0	26,2	28,4	23,9	25,5	23,8	26,2	27,7	25,7	0,026	0,001	0,053		
SP_120_BL-z_6	SP_300	23,4	22,8	23,7	23,9	25,7	21,8	26,2	25,4	24,2	22,9	26,0	26,4	0,024	0,002	0,063		
														panel CH120 ($n = 60$)				
														0,025	0,002	0,060		
SP_160_BL-z_1	SP_301	29,4	33,0	30,8	27,2	27,0	26,4	28,9	26,2	25,3	26,0	29,3	30,3	0,028	0,002	0,083		
SP_160_BL-z_2	SP_302	28,1	29,3	27,1	25,7	28,3	27,8	29,9	25,9	32,2	24,8	28,7	28,9	0,028	0,002	0,072		
SP_160_BL-z_3	SP_303	30,1	29,6	28,7	25,2	26,1	23,6	26,9	27,5	30,1	26,5	25,8	26,6	0,027	0,002	0,075		
SP_160_BL-z_4	SP_304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
SP_160_BL-z_5	SP_305	26,1	25,7	25,5	24,1	20,8	25,7	25,7	20,5	23,1	25,6	27,8	27,1	0,025	0,002	0,092		
SP_160_BL-z_6	SP_306	24,7	26,3	24,6	26,0	28,8	28,0	25,2	24,0	24,2	27,0	26,9	28,3	0,026	0,002	0,063		
														panel CH160 ($n = 60$)				
														0,027	0,002	0,089		

Tabela A.4. Zestawienie grubości antykorozyjnej powłoki wewnętrznej okładzin $t_{z,in}^f$ paneli warstwowych CHI20 i CHI160.

Nazwa próbki		Grubość antykorozyjnej powłoki wewnętrznej okładzin: $t_{z,in}^f$													\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	$t_{z,in,1}^f$ [μm]	$t_{z,in,2}^f$ [μm]	$t_{z,in,3}^f$ [μm]	$t_{z,in,4}^f$ [μm]	$t_{z,in,5}^f$ [μm]	$t_{z,in,6}^f$ [μm]	$t_{z,in,7}^f$ [μm]	$t_{z,in,8}^f$ [μm]	$t_{z,in,9}^f$ [μm]	$t_{z,in,10}^f$ [μm]	$t_{z,in,11}^f$ [μm]	$t_{z,in,12}^f$ [μm]	[mm]	[mm]	[-]	
SP_120_BL-z_1	SP_295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SP_120_BL-z_2	SP_296	27,4	25,9	27,7	26,0	25,6	25,3	26,8	25,1	25,0	27,1	27,9	24,8	0,026	0,001	0,043	
SP_120_BL-z_3	SP_297	28,6	29,4	27,9	33,5	29,1	28,3	28,2	26,8	28,4	25,9	29,2	28,5	0,029	0,002	0,064	
SP_120_BL-z_4	SP_298	26,7	24,2	27,9	28,5	28,4	29,1	25,8	28,4	29,1	25,6	27,1	28,6	0,027	0,002	0,057	
SP_120_BL-z_5	SP_299	28,6	27,7	29,6	28,0	30,3	27,6	28,8	27,1	25,6	28,1	31,6	27,0	0,028	0,002	0,057	
SP_120_BL-z_6	SP_300	28,2	28,0	31,9	30,3	28,3	33,5	31,5	31,3	26,9	28,8	29,4	25,2	0,029	0,002	0,080	
panel CHI20 (n = 60)																	
SP_160_BL-z_1	SP_301	22,4	26,1	23,9	23,6	20,3	21,3	24,4	23,7	24,2	23,3	23,2	21,7	0,023	0,002	0,067	
SP_160_BL-z_2	SP_302	23,5	23,2	26,2	22,7	21,9	24,2	22,4	23,2	23,8	24,5	24,6	26,6	0,024	0,001	0,060	
SP_160_BL-z_3	SP_303	27,7	23,1	24,2	23,5	24,9	25,7	25,0	26,5	24,9	25,7	25,7	25,5	0,025	0,001	0,050	
SP_160_BL-z_4	SP_304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SP_160_BL-z_5	SP_305	26,6	26,5	26,6	27,5	25,4	25,7	26,3	27,3	25,3	26,2	26,2	22,2	0,026	0,001	0,052	
SP_160_BL-z_6	SP_306	26,2	25,1	29,0	26,3	26,4	26,7	26,3	26,4	25,8	26,1	26,6	26,0	0,026	0,001	0,035	
panel CHI160 (n = 60)																	
														0,025	0,002	0,071	

Tabela A.5. Zestawienie sumarycznej grubości antykorozyjnej i organicznej powłoki zewnętrznej okładzin t_{out}^f paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość sumaryczna antykorozyjnej i organicznej powłoki zewnętrznej okładzin: t_{out}^f										
Pełna	Skrócona	$t_{out,1}^f$ [μm]	$t_{out,2}^f$ [μm]	$t_{out,3}^f$ [μm]	$t_{out,4}^f$ [μm]	$t_{out,5}^f$ [μm]	$t_{out,6}^f$ [μm]	$t_{out,7}^f$ [μm]	$t_{out,8}^f$ [μm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]
SP_120_BL_1	271	53,5	55,6	52,5	53,6	54,9	54,2	52,5	53,4	0,054	0,001	0,020
SP_120_BL_2	272	56,3	52,5	54,5	53,5	54,9	52,4	53,1	54,6	0,054	0,001	0,025
SP_120_BL_3	273	53,1	52,4	53,6	53,3	54,1	53,9	52,0	52,1	0,053	0,001	0,015
SP_120_BL_4	274	52,7	51,4	52,0	52,2	54,7	54,9	52,2	53,8	0,053	0,001	0,025
SP_120_BL_5	275	52,7	53,8	54,3	53,8	53,3	56,5	52,3	52,0	0,054	0,001	0,027
SP_120_BL_6	276	50,2	53,2	53,2	53,4	52,6	53,9	50,2	52,1	0,052	0,001	0,027
SP_120_BL_7	277	49,0	51,9	53,4	54,0	52,3	54,1	49,6	53,0	0,052	0,002	0,037
SP_120_BL_8	278	51,9	52,3	53,3	56,6	53,7	54,3	51,7	53,9	0,053	0,002	0,030
panel CH120 ($n = 64$)												
SP_160_BL_1	279	54,6	55,1	53,3	52,3	55,6	56,1	52,3	54,4	0,054	0,001	0,027
SP_160_BL_2	280	56,0	56,5	58,0	57,2	57,3	58,0	57,6	55,4	0,057	0,001	0,017
SP_160_BL_3	281	55,4	53,9	55,0	54,4	52,8	54,4	54,7	57,0	0,055	0,001	0,022
SP_160_BL_4	282	53,1	51,9	55,5	54,5	54,9	54,3	51,6	52,8	0,054	0,001	0,027

Tabela A.5-cd. Zestawienie sumarycznej grubości antykorozyjnej i organicznej powłoki zewnętrznej okładzin t_{out}^f paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość sumaryczna antykorozyjnej i organicznej powłoki zewnętrznej okładzin: t_{out}^f											
Pełna	Skrócona	$t_{out,1}^f$ [μm]	$t_{out,2}^f$ [μm]	$t_{out,3}^f$ [μm]	$t_{out,4}^f$ [μm]	$t_{out,5}^f$ [μm]	$t_{out,6}^f$ [μm]	$t_{out,7}^f$ [μm]	$t_{out,8}^f$ [μm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	
SP_160_BL_5	283	52,0	52,1	52,4	53,3	55,6	54,7	53,2	53,4	0,053	0,001	0,024	
SP_160_BL_6	284	52,6	53,3	53,5	53,1	56,6	54,1	53,0	54,0	0,054	0,001	0,023	
SP_160_BL_7	285	52,0	51,6	54,2	53,1	52,2	51,0	52,3	49,8	0,052	0,001	0,025	
SP_160_BL_8	286	52,5	54,5	55,9	54,1	53,4	56,0	53,1	52,4	0,054	0,001	0,026	
panel CH160 (n = 64)													
SP_120_BL_9	287	27,4	25,0	25,9	26,8	27,8	27,7	25,7	24,3	0,026	0,001	0,049	
SP_120_BL_10	288	27,7	25,0	23,0	26,0	27,7	25,0	23,9	26,4	0,026	0,002	0,066	
SP_120_BL_11	289	23,4	26,0	28,5	26,9	26,5	27,7	27,2	26,1	0,027	0,002	0,057	
SP_120_BL_12	290	22,5	25,7	25,1	24,6	26,3	25,2	24,1	21,9	0,024	0,002	0,063	
SP_120_BL_13	291	24,7	26,7	26,3	27,3	26,8	26,6	24,8	26,9	0,026	0,001	0,037	
SP_120_BL_14	292	28,2	29,0	29,3	30,4	27,5	27,8	25,7	27,0	0,028	0,001	0,052	
SP_120_BL_15	293	28,6	26,6	27,6	28,2	26,0	22,5	23,8	27,1	0,026	0,002	0,081	
SP_120_BL_16	294	26,1	25,6	26,6	27,8	27,2	23,5	24,6	23,9	0,026	0,002	0,061	
panel CH120 (n = 64)													
											0,026	0,002	0,067

Tabela A.6. Zestawienie sumarycznej grubości antykorozyjnej i organicznej powłoki wewnętrznej okładzin t_{in}^f paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość sumaryczna antykorozyjnej i organicznej powłoki wewnętrznej okładzin: t_{in}^f											
Pełna	Skrócona	$t_{in,1}^f$ [μm]	$t_{in,2}^f$ [μm]	$t_{in,3}^f$ [μm]	$t_{in,4}^f$ [μm]	$t_{in,5}^f$ [μm]	$t_{in,6}^f$ [μm]	$t_{in,7}^f$ [μm]	$t_{in,8}^f$ [μm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	
SP_120_BL_1	271	36,9	36,6	37,8	36,7	39,3	37,2	37,1	34,6	0,037	0,001	0,035	
SP_120_BL_2	272	35,2	33,8	35,2	36,7	34,5	35,7	32,2	33,0	0,035	0,001	0,043	
SP_120_BL_3	273	33,8	34,0	37,5	36,2	35,0	35,9	33,4	34,5	0,035	0,001	0,040	
SP_120_BL_4	274	37,5	38,8	39,5	40,5	36,8	37,1	35,0	35,5	0,038	0,002	0,051	
SP_120_BL_5	275	31,1	35,7	37,7	38,9	39,4	37,4	34,2	37,6	0,037	0,003	0,075	
SP_120_BL_6	276	30,8	34,1	37,7	40,0	40,5	38,2	37,4	38,0	0,037	0,003	0,086	
SP_120_BL_7	277	30,9	35,7	37,9	38,4	38,5	39,0	39,4	37,0	0,037	0,003	0,075	
SP_120_BL_8	278	31,7	34,7	37,7	39,5	38,5	36,0	36,9	35,7	0,036	0,002	0,067	
panel CH120 ($n = 64$)													
SP_160_BL_1	279	32,7	36,5	33,0	36,9	33,4	34,2	32,9	36,0	0,034	0,002	0,051	
SP_160_BL_2	280	35,3	32,6	34,1	34,3	32,2	32,9	32,3	31,0	0,033	0,001	0,042	
SP_160_BL_3	281	32,3	32,2	33,3	36,4	33,1	31,6	30,4	34,1	0,033	0,002	0,055	
SP_160_BL_4	282	33,6	33,9	36,6	35,5	36,2	37,4	32,2	33,7	0,035	0,002	0,052	

Tabela A.6-cd. Zestawienie sumarycznej grubości antykorozyjnej i organicznej powłoki wewnętrznej okładzin t_{in}^f paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość sumaryczna antykorozyjnej i organicznej powłoki wewnętrznej okładzin: t_{in}^f										
Pełna	Skrócona	$t_{in,1}^f$ [μm]	$t_{in,2}^f$ [μm]	$t_{in,3}^f$ [μm]	$t_{in,4}^f$ [μm]	$t_{in,5}^f$ [μm]	$t_{in,6}^f$ [μm]	$t_{in,7}^f$ [μm]	$t_{in,8}^f$ [μm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]
SP_160_BL_5	283	30,5	34,4	36,2	35,0	35,0	36,4	34,0	33,9	0,034	0,002	0,053
SP_160_BL_6	284	29,5	34,9	34,9	35,1	36,1	38,0	33,1	34,4	0,035	0,002	0,071
SP_160_BL_7	285	30,1	32,8	34,9	35,7	37,6	38,9	32,9	35,1	0,035	0,003	0,081
SP_160_BL_8	286	32,0	35,0	36,2	37,3	38,6	39,2	36,8	35,7	0,036	0,002	0,062
panel CH160 ($n = 64$)												
SP_120_BL_9	287	24,5	24,7	28,0	28,3	28,0	24,6	23,3	25,2	0,026	0,002	0,076
SP_120_BL_10	288	22,6	22,5	28,0	24,1	26,5	23,8	22,2	22,3	0,024	0,002	0,090
SP_120_BL_11	289	20,3	20,4	24,7	25,5	25,2	25,0	22,2	23,2	0,023	0,002	0,092
SP_120_BL_12	290	24,6	22,6	24,4	25,6	23,2	25,1	21,3	26,8	0,024	0,002	0,073
SP_120_BL_13	291	27,2	24,2	25,4	23,9	23,6	24,5	26,6	25,2	0,025	0,001	0,051
SP_120_BL_14	292	23,0	22,7	23,6	24,4	25,8	26,5	25,5	27,0	0,025	0,002	0,065
SP_120_BL_15	293	27,2	27,3	24,3	25,8	29,5	28,3	24,8	26,7	0,027	0,002	0,065
SP_120_BL_16	294	21,6	23,2	25,5	24,8	25,0	26,0	24,2	25,5	0,024	0,001	0,059
panel CH120 ($n = 64$)												
		0,025										
		0,002										
		0,079										

Tabela A.7. Zestawienie szerokości wiosełka okładzin B_w paneli warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość wiosełka okładzin: B_w							
Pełna	Skrócona	$B_{w,1}$ [mm]	$B_{w,2}$ [mm]	$B_{w,3}$ [mm]	$B_{w,4}$ [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]	
SP_120_BL_1	271	19,95	19,92	19,92	19,93	19,93	0,01	0,001	
SP_120_BL_2	272	20,00	19,98	19,94	19,98	19,98	0,03	0,001	
SP_120_BL_3	273	19,94	19,93	19,93	19,94	19,94	0,01	0,000	
SP_120_BL_4	274	19,95	19,94	19,97	19,98	19,96	0,02	0,001	
SP_120_BL_5	275	19,93	19,96	19,96	19,95	19,95	0,01	0,001	
SP_120_BL_6	276	19,96	19,97	19,98	19,99	19,98	0,01	0,001	
SP_120_BL_7	277	19,95	19,99	19,97	19,98	19,97	0,02	0,001	
SP_120_BL_8	278	19,97	19,98	19,99	19,98	19,98	0,01	0,000	
		panel CH120 ($n = 64$)							
SP_160_BL_1	279	19,95	19,96	19,98	19,95	19,96	0,01	0,001	
SP_160_BL_2	280	19,97	19,99	19,97	19,98	19,98	0,01	0,000	
SP_160_BL_3	281	19,93	19,91	19,90	19,93	19,92	0,02	0,001	
SP_160_BL_4	282	19,92	19,94	19,97	19,95	19,95	0,02	0,001	

Tabela A.7-cd. Zestawienie szerokości wiosełka okładzin B_w paneli warstwowych CHI20 i CHI60.

Nazwa próbki		Szerokość wiosełka okładzin: B_w							\bar{x}	s	ν
Pełna	Skrócona	$B_{w,1}$ [mm]	$B_{w,2}$ [mm]	$B_{w,3}$ [mm]	$B_{w,4}$ [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	ν [-]			
SP_160_BL_5	283	20,00	20,01	20,01	20,02	20,01	0,01	0,000			
SP_160_BL_6	284	19,95	19,97	19,97	19,98	19,97	0,01	0,001			
SP_160_BL_7	285	19,93	19,96	19,95	19,96	19,95	0,01	0,001			
SP_160_BL_8	286	19,93	19,96	19,91	19,95	19,94	0,02	0,001			
panel CHI160 ($n = 64$)											
SP_120_BL_9	287	19,96	19,89	19,88	19,92	19,91	0,04	0,002			
SP_120_BL_10	288	19,93	19,89	19,81	19,83	19,87	0,06	0,003			
SP_120_BL_11	289	19,90	19,94	19,90	19,86	19,90	0,03	0,002			
SP_120_BL_12	290	19,90	19,92	19,92	19,92	19,92	0,01	0,001			
SP_120_BL_13	291	19,97	19,95	19,99	19,98	19,97	0,02	0,001			
SP_120_BL_14	292	19,98	19,95	19,97	20,03	19,98	0,03	0,002			
SP_120_BL_15	293	19,95	19,98	19,99	19,97	19,97	0,02	0,001			
SP_120_BL_16	294	19,97	19,99	20,00	19,96	19,98	0,02	0,001			
panel CHI120 ($n = 64$)											
							19,94	0,05	0,003		

Tabela A.8. Zestawienie szerokości B beleczek warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość beleczek warstwowych: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_5 [mm]	B_6 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]
SP_120_1000_1_1	SP_47	100,35	100,49	100,46	100,17	100,45	100,18	100,35	0,14	0,001
SP_120_1000_1_2	SP_48	100,33	100,44	100,43	100,14	100,26	100,41	100,34	0,12	0,001
SP_120_1000_1_3	SP_49	100,26	100,47	100,45	100,17	100,36	100,32	100,34	0,11	0,001
SP_120_1000_1_4	SP_50	100,68	100,65	100,85	100,49	100,47	100,70	100,64	0,14	0,001
SP_120_1000_1_5	SP_51	100,63	100,73	100,53	100,59	100,57	100,45	100,58	0,09	0,001
SP_120_1000_1_6	SP_52	100,36	100,50	100,20	100,36	100,35	100,06	100,31	0,15	0,002
SP_120_1000_1_7	SP_53	100,53	100,37	100,44	100,26	100,29	100,43	100,39	0,10	0,001
SP_120_1000_1_8	SP_54	100,95	100,56	100,52	100,45	100,17	100,36	100,50	0,26	0,003
SP_120_1000_2_1	SP_55	100,73	100,74	100,74	100,65	100,75	100,74	100,73	0,04	0,000
SP_120_1000_2_2	SP_56	100,69	100,77	100,65	100,64	100,69	100,61	100,68	0,06	0,001
SP_120_1000_2_3	SP_57	100,62	100,82	100,68	100,62	100,66	100,73	100,69	0,08	0,001
SP_120_1000_2_4	SP_58	100,28	100,37	100,29	100,11	100,13	100,10	100,21	0,11	0,001
SP_120_1000_2_5	SP_59	100,25	100,15	100,24	100,07	100,00	100,07	100,13	0,10	0,001
SP_120_1000_2_6	SP_60	100,10	100,25	100,32	100,09	100,13	100,23	100,19	0,09	0,001
SP_120_1000_2_7	SP_61	100,07	100,15	100,05	99,99	100,06	99,93	100,04	0,07	0,001
SP_120_1000_2_8	SP_62	100,63	100,22	100,31	100,13	99,94	100,17	100,23	0,23	0,002
SP_160_1000_1_1	SP_63	100,60	100,72	100,64	100,72	100,71	100,52	100,65	0,08	0,001
SP_160_1000_1_2	SP_64	100,68	100,78	100,60	100,56	100,52	100,46	100,60	0,12	0,001
SP_160_1000_1_3	SP_65	100,70	100,70	100,48	100,44	100,35	100,43	100,52	0,15	0,001
SP_160_1000_1_4	SP_66	100,62	100,64	100,49	100,40	100,52	100,18	100,48	0,17	0,002
SP_160_1000_1_5	SP_67	100,60	100,56	100,32	100,54	100,47	100,14	100,44	0,18	0,002
SP_160_1000_1_6	SP_68	100,36	100,56	100,50	100,36	100,39	100,46	100,44	0,08	0,001
SP_160_1000_1_7	SP_69	100,62	100,47	100,52	100,15	100,44	100,37	100,43	0,16	0,002
SP_160_1000_1_8	SP_70	100,97	100,36	100,46	100,50	100,21	99,76	100,38	0,40	0,004
SP_160_1000_2_1	SP_71	100,64	100,58	100,66	100,55	100,66	100,57	100,61	0,05	0,000
SP_160_1000_2_2	SP_72	100,63	100,78	100,55	100,43	100,47	100,48	100,56	0,13	0,001
SP_160_1000_2_3	SP_73	100,69	100,70	100,50	100,48	100,34	100,22	100,49	0,19	0,002

Tabela A.8-cd. Zestawienie szerokości B beleczek warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość beleczek warstwowych: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_5 [mm]	B_6 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]
SP_160_1000_2_4	SP_74	100,53	100,44	100,46	100,45	100,40	100,26	100,42	0,09	0,001
SP_160_1000_2_5	SP_75	100,51	100,46	100,48	100,41	100,31	100,18	100,39	0,13	0,001
SP_160_1000_2_6	SP_76	100,44	100,24	100,02	100,46	100,20	99,91	100,21	0,22	0,002
SP_160_1000_2_7	SP_77	100,55	100,47	100,32	100,16	100,32	100,22	100,34	0,15	0,001
SP_160_1000_2_8	SP_78	100,37	100,10	100,47	100,05	100,02	99,87	100,15	0,23	0,002
SP_120_100_1_1	SP_79	99,93	99,95	99,81	99,84	99,86	99,74	99,86	0,08	0,001
SP_120_100_2_1	SP_80	99,89	100,01	99,67	99,65	99,92	99,63	99,80	0,16	0,002
SP_120_100_3_1	SP_81	100,08	100,09	100,13	100,00	99,98	100,06	100,06	0,06	0,001
SP_120_100_4_1	SP_82	99,87	100,25	100,10	99,79	100,20	99,91	100,02	0,19	0,002
SP_120_100_5_1	SP_83	100,10	100,29	100,34	100,06	100,26	100,19	100,21	0,11	0,001
SP_120_100_6_1	SP_84	100,11	100,29	100,20	100,06	99,96	100,09	100,12	0,11	0,001
SP_120_100_7_1	SP_85	100,50	100,01	100,06	100,00	99,67	99,82	100,01	0,28	0,003
SP_120_100_8_1	SP_86	99,96	99,58	100,03	99,96	99,70	100,04	99,88	0,19	0,002
SP_160_100_1_1	SP_175	101,05	101,16	101,01	101,22	101,02	101,01	101,08	0,09	0,001
SP_160_100_2_1	SP_176	101,49	101,10	101,31	100,92	100,77	100,76	101,06	0,30	0,003
SP_160_100_3_1	SP_177	101,24	100,85	100,91	100,57	100,94	100,88	100,90	0,21	0,002
SP_160_100_4_1	SP_178	100,65	101,13	101,24	101,05	100,86	100,94	100,98	0,21	0,002
SP_160_100_5_1	SP_179	101,15	101,35	101,28	101,08	101,12	101,28	101,21	0,11	0,001
SP_160_100_6_1	SP_180	101,18	101,26	100,98	101,14	100,95	100,88	101,07	0,15	0,001
SP_160_100_7_1	SP_181	101,00	101,21	101,06	100,89	100,96	101,04	101,03	0,11	0,001
SP_160_100_8_1	SP_182	101,01	101,06	100,94	100,84	100,95	100,93	100,96	0,08	0,001

Tabela A.9. Zestawienie grubości D beleczek warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość beleczek warstwowych: D						
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$D^{*})$ [mm]
SP_120_1000_1_1	SP_47	119,49	119,96	120,04	119,83	0,30	0,002	119,86
SP_120_1000_1_2	SP_48	119,62	119,90	119,74	119,75	0,14	0,001	119,79
SP_120_1000_1_3	SP_49	119,72	120,00	119,58	119,77	0,21	0,002	119,83
SP_120_1000_1_4	SP_50	119,86	119,91	119,59	119,79	0,17	0,001	119,82
SP_120_1000_1_5	SP_51	119,46	119,98	119,30	119,58	0,36	0,003	119,68
SP_120_1000_1_6	SP_52	119,48	119,80	119,45	119,58	0,19	0,002	119,63
SP_120_1000_1_7	SP_53	119,54	119,46	119,70	119,57	0,12	0,001	119,54
SP_120_1000_1_8	SP_54	119,84	119,65	119,74	119,74	0,10	0,001	119,72
SP_120_1000_2_1	SP_55	119,56	119,86	119,60	119,67	0,16	0,001	119,72
SP_120_1000_2_2	SP_56	119,26	119,39	119,11	119,25	0,14	0,001	119,29
SP_120_1000_2_3	SP_57	119,33	119,39	119,20	119,31	0,10	0,001	119,33
SP_120_1000_2_4	SP_58	119,18	119,70	119,38	119,42	0,26	0,002	119,49
SP_120_1000_2_5	SP_59	119,18	119,72	119,08	119,33	0,34	0,003	119,43
SP_120_1000_2_6	SP_60	119,14	119,74	119,17	119,35	0,34	0,003	119,45
SP_120_1000_2_7	SP_61	119,11	119,64	119,30	119,35	0,27	0,002	119,42
SP_120_1000_2_8	SP_62	119,23	119,53	119,26	119,34	0,17	0,001	119,39
SP_160_1000_1_1	SP_63	158,97	158,84	159,80	159,20	0,52	0,003	159,11
SP_160_1000_1_2	SP_64	158,77	158,59	158,41	158,59	0,18	0,001	158,59
SP_160_1000_1_3	SP_65	158,75	158,67	158,48	158,63	0,14	0,001	158,64
SP_160_1000_1_4	SP_66	158,68	158,65	158,54	158,62	0,07	0,000	158,63
SP_160_1000_1_5	SP_67	158,72	158,65	158,65	158,67	0,04	0,000	158,67
SP_160_1000_1_6	SP_68	158,64	158,72	159,03	158,80	0,21	0,001	158,78
SP_160_1000_1_7	SP_69	158,81	158,83	159,06	158,90	0,14	0,001	158,88
SP_160_1000_1_8	SP_70	158,70	158,96	159,57	159,08	0,45	0,003	159,05
SP_160_1000_2_1	SP_71	158,33	159,15	158,70	158,73	0,41	0,003	158,83
SP_160_1000_2_2	SP_72	158,26	158,99	158,32	158,52	0,41	0,003	158,64
SP_160_1000_2_3	SP_73	158,13	158,81	158,43	158,46	0,34	0,002	158,55

Tabela A.9-cd. Zestawienie grubości D belezek warstwowych CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość belezek warstwowych: D						
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^* [mm]
SP_160_1000_2_4	SP_74	158,23	158,77	158,26	158,42	0,30	0,002	158,51
SP_160_1000_2_5	SP_75	158,32	158,73	158,64	158,56	0,22	0,001	158,61
SP_160_1000_2_6	SP_76	158,20	159,07	158,63	158,63	0,44	0,003	158,74
SP_160_1000_2_7	SP_77	158,38	158,92	158,70	158,67	0,27	0,002	158,73
SP_160_1000_2_8	SP_78	158,50	158,93	158,99	158,81	0,27	0,002	158,84
SP_120_100_1_1	SP_79	119,75	118,51	119,22	119,16	0,62	0,005	119,00
SP_120_100_2_1	SP_80	119,15	118,31	119,00	118,82	0,45	0,004	118,69
SP_120_100_3_1	SP_81	119,12	118,62	119,27	119,00	0,34	0,003	118,91
SP_120_100_4_1	SP_82	119,40	118,75	119,41	119,19	0,38	0,003	119,08
SP_120_100_5_1	SP_83	119,25	118,43	119,32	119,00	0,49	0,004	118,86
SP_120_100_6_1	SP_84	119,21	118,47	119,23	118,97	0,43	0,004	118,85
SP_120_100_7_1	SP_85	119,14	118,33	119,06	118,84	0,45	0,004	118,72
SP_120_100_8_1	SP_86	119,31	118,58	119,45	119,11	0,47	0,004	118,98
SP_160_100_1_1	SP_175	158,78	157,78	158,85	158,47	0,60	0,004	158,30
SP_160_100_2_1	SP_176	158,60	157,76	158,63	158,33	0,49	0,003	158,19
SP_160_100_3_1	SP_177	158,73	157,83	158,62	158,39	0,49	0,003	158,25
SP_160_100_4_1	SP_178	158,76	158,13	159,02	158,64	0,46	0,003	158,51
SP_160_100_5_1	SP_179	158,46	157,66	158,61	158,24	0,51	0,003	158,10
SP_160_100_6_1	SP_180	158,38	157,46	158,45	158,10	0,55	0,003	157,94
SP_160_100_7_1	SP_181	158,29	157,63	158,38	158,10	0,41	0,003	157,98
SP_160_100_8_1	SP_182	158,41	157,56	158,44	158,14	0,50	0,003	157,99
*) $D = \left[\frac{(D_1 + D_3)}{2} + D_2 \right] / 2$								

Tabela A.10. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	B^{*j} [mm]
SP_120_100_10_1	SP_95	100,27	100,43	100,24	100,27	100,00	100,24	0,15	0,002	100,15
SP_120_100_10_2	SP_96	100,49	100,28	100,26	100,07	100,02	100,22	0,19	0,002	100,15
SP_120_100_10_3	SP_97	100,39	100,35	100,30	100,01	99,87	100,18	0,23	0,002	100,07
SP_120_100_10_4	SP_98	100,38	100,31	100,09	100,08	99,92	100,16	0,19	0,002	100,07
SP_120_100_10_5	SP_99	100,50	100,44	100,13	100,22	100,09	100,28	0,18	0,002	100,21
SP_120_100_10_6	SP_100	100,38	100,62	100,14	100,34	100,11	100,32	0,21	0,002	100,24
SP_120_100_10_7	SP_101	100,48	100,60	100,26	100,50	100,10	100,39	0,20	0,002	100,28
SP_120_100_10_8	SP_102	100,46	100,55	100,49	100,34	100,22	100,41	0,13	0,001	100,34
SP_120_100_11_1	SP_103	100,26	100,62	100,26	100,50	100,15	100,36	0,19	0,002	100,28
SP_120_100_11_2	SP_104	100,45	100,48	100,37	100,19	100,10	100,32	0,17	0,002	100,24
SP_120_100_11_3	SP_105	100,34	100,67	100,24	100,63	100,31	100,44	0,20	0,002	100,39
SP_120_100_11_4	SP_106	100,70	100,73	100,42	100,57	100,31	100,55	0,18	0,002	100,46
SP_120_100_11_5	SP_107	100,72	100,85	100,61	100,69	100,23	100,62	0,23	0,002	100,47
SP_120_100_11_6	SP_108	100,65	100,63	100,58	100,52	100,31	100,54	0,14	0,001	100,45
SP_120_100_11_7	SP_109	100,63	100,69	100,55	100,46	100,32	100,53	0,15	0,001	100,45
SP_120_100_11_8	SP_110	100,67	100,59	100,51	100,52	100,29	100,52	0,14	0,001	100,43
SP_120_100_13_1	SP_119	100,15	100,25	100,07	100,36	100,41	100,25	0,14	0,001	100,31
SP_120_100_13_2	SP_120	100,24	100,49	100,15	100,30	100,50	100,34	0,15	0,002	100,40
SP_120_100_13_3	SP_121	100,21	100,27	100,18	100,32	100,60	100,32	0,17	0,002	100,42
SP_120_100_13_4	SP_122	100,11	100,27	100,26	100,36	100,56	100,31	0,17	0,002	100,41
SP_120_100_13_5	SP_123	100,23	100,36	100,22	100,45	100,55	100,36	0,14	0,001	100,43
SP_120_100_13_6	SP_124	100,22	100,31	100,29	100,37	100,54	100,35	0,12	0,001	100,42
SP_120_100_13_7	SP_125	100,31	100,23	100,25	100,38	100,49	100,33	0,11	0,001	100,39
SP_120_100_14_1	SP_126	100,28	100,29	100,08	100,22	100,58	100,29	0,18	0,002	100,40
SP_120_100_14_2	SP_127	100,17	100,32	100,12	100,24	100,48	100,27	0,14	0,001	100,35
SP_120_100_14_3	SP_128	100,07	100,24	100,11	100,23	100,48	100,23	0,16	0,002	100,32
SP_120_100_14_4	SP_129	100,10	99,99	100,04	100,28	100,47	100,18	0,20	0,002	100,29

Tabela A.10-cd. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	$B_{\bar{s}r}$ [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	B^{*j} [mm]
SP_120_100_14_5	SP_130	99,95	100,16	100,12	100,01	100,57	100,16	0,24	0,002	100,32
SP_120_100_14_6	SP_131	100,11	100,11	100,01	100,13	100,47	100,17	0,18	0,002	100,28
SP_120_100_14_7	SP_132	100,03	100,15	100,02	100,11	100,44	100,15	0,17	0,002	100,26
SP_120_100_15_1	SP_133	99,97	100,15	100,07	100,21	99,53	99,99	0,27	0,003	99,82
SP_120_100_15_2	SP_134	100,15	99,95	100,24	100,11	99,45	99,98	0,31	0,003	99,78
SP_120_100_15_3	SP_135	99,93	100,03	100,08	100,16	99,33	99,91	0,33	0,003	99,69
SP_120_100_15_4	SP_136	100,09	99,92	100,16	99,98	99,20	99,87	0,39	0,004	99,62
SP_120_100_15_5	SP_137	99,95	99,78	100,10	99,88	99,20	99,78	0,35	0,003	99,56
SP_120_100_15_6	SP_138	99,90	99,87	99,98	100,05	99,24	99,81	0,33	0,003	99,60
SP_120_100_15_7	SP_139	99,86	99,89	99,97	99,96	99,34	99,80	0,26	0,003	99,63
SP_120_100_16_1	SP_140	99,75	99,95	99,88	99,97	99,52	99,81	0,19	0,002	99,70
SP_120_100_16_2	SP_141	100,03	99,86	100,24	100,08	99,34	99,91	0,35	0,003	99,70
SP_120_100_16_3	SP_142	99,79	99,77	100,02	99,94	99,26	99,76	0,30	0,003	99,57
SP_120_100_16_4	SP_143	99,93	99,76	99,88	99,78	99,10	99,69	0,34	0,003	99,47
SP_120_100_16_5	SP_144	99,62	99,46	99,48	99,39	98,71	99,33	0,36	0,004	99,10
SP_120_100_16_6	SP_145	99,63	99,61	100,00	99,68	98,99	99,58	0,37	0,004	99,36
SP_120_100_16_7	SP_146	99,59	99,54	99,85	99,81	99,20	99,60	0,26	0,003	99,45
SP_120_100_17_1	SP_147	100,32	100,14	100,22	100,16	100,53	100,27	0,16	0,002	100,37
SP_120_100_17_2	SP_148	100,34	100,13	100,14	100,16	100,59	100,27	0,20	0,002	100,39
SP_120_100_17_3	SP_149	100,33	100,33	100,26	100,18	100,58	100,34	0,15	0,001	100,43
SP_120_100_17_4	SP_150	100,29	100,26	100,20	100,22	100,62	100,32	0,17	0,002	100,43
SP_120_100_17_5	SP_151	100,26	100,27	100,26	100,22	100,65	100,33	0,18	0,002	100,45
SP_120_100_17_6	SP_152	100,10	100,08	100,10	100,00	100,52	100,16	0,21	0,002	100,30
SP_120_100_17_7	SP_153	100,17	100,19	100,27	100,25	100,51	100,28	0,14	0,001	100,37
SP_120_100_18_1	SP_154	100,24	100,09	100,14	100,14	100,54	100,23	0,18	0,002	100,35
SP_120_100_18_2	SP_155	100,24	100,23	100,11	100,13	100,55	100,25	0,18	0,002	100,36
SP_120_100_18_3	SP_156	100,22	100,10	100,12	100,15	100,55	100,23	0,19	0,002	100,35

Tabela A.10-cd. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	B^{*j} [mm]
SP_120_100_18_4	SP_157	100,25	100,16	100,05	99,94	100,51	100,18	0,22	0,002	100,31
SP_120_100_18_5	SP_158	100,21	100,09	100,03	100,20	100,53	100,21	0,19	0,002	100,33
SP_120_100_18_6	SP_159	100,07	99,95	100,10	100,13	100,61	100,17	0,25	0,003	100,34
SP_120_100_18_7	SP_160	100,15	100,12	99,99	99,98	100,51	100,15	0,22	0,002	100,29
SP_120_100_19_1	SP_161	99,83	100,01	100,13	100,06	99,48	99,90	0,26	0,003	99,74
SP_120_100_19_2	SP_162	99,99	100,04	100,23	100,15	99,45	99,97	0,31	0,003	99,78
SP_120_100_19_3	SP_163	99,80	99,85	100,04	100,06	99,31	99,81	0,30	0,003	99,62
SP_120_100_19_4	SP_164	100,11	99,95	100,24	100,16	99,34	99,96	0,36	0,004	99,73
SP_120_100_19_5	SP_165	99,68	99,63	100,26	100,01	99,19	99,75	0,41	0,004	99,54
SP_120_100_19_6	SP_166	99,85	99,89	100,11	100,02	99,39	99,85	0,28	0,003	99,68
SP_120_100_19_7	SP_167	99,81	99,72	99,96	99,92	99,32	99,75	0,26	0,003	99,59
SP_120_100_20_1	SP_168	100,01	100,02	100,02	100,09	99,32	99,89	0,32	0,003	99,68
SP_120_100_20_2	SP_169	99,88	99,83	100,03	99,84	99,38	99,79	0,24	0,002	99,64
SP_120_100_20_3	SP_170	99,81	99,83	100,03	100,06	99,36	99,82	0,28	0,003	99,65
SP_120_100_20_4	SP_171	99,96	99,85	100,01	99,85	99,21	99,78	0,32	0,003	99,56
SP_120_100_20_5	SP_172	99,70	99,67	99,83	99,92	99,22	99,67	0,27	0,003	99,50
SP_120_100_20_6	SP_173	99,75	99,72	99,92	99,88	99,14	99,68	0,31	0,003	99,48
SP_120_100_20_7	SP_174	99,95	99,72	99,91	99,84	99,36	99,76	0,24	0,002	99,61
SP_160_100_9_1	SP_183	101,06	100,99	101,02	101,03	100,83	100,99	0,09	0,001	100,93
SP_160_100_9_2	SP_184	101,12	100,95	101,13	101,02	100,80	101,00	0,14	0,001	100,93
SP_160_100_9_3	SP_185	101,11	100,95	101,03	100,92	100,88	100,98	0,09	0,001	100,94
SP_160_100_9_4	SP_186	101,16	100,95	101,20	100,91	100,79	101,00	0,17	0,002	100,92
SP_160_100_9_5	SP_187	101,17	101,03	101,09	100,89	100,78	100,99	0,16	0,002	100,91
SP_160_100_9_6	SP_188	101,10	100,99	101,15	100,98	100,90	101,02	0,10	0,001	100,98
SP_160_100_9_7	SP_189	101,12	101,03	101,12	101,04	100,77	101,02	0,14	0,001	100,92
SP_160_100_9_8	SP_190	101,05	100,98	101,11	100,89	100,79	100,96	0,13	0,001	100,90
SP_160_100_10_1	SP_191	101,08	101,01	101,06	101,03	100,77	100,99	0,13	0,001	100,91

Tabela A.10-cd. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	$B_{\bar{s}r}$ [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	B^{*j} [mm]
SP_160_100_10_2	SP_192	101,09	101,10	101,09	101,02	100,87	101,03	0,10	0,001	100,97
SP_160_100_10_3	SP_193	101,10	101,06	101,08	100,97	100,80	101,00	0,12	0,001	100,93
SP_160_100_10_4	SP_194	101,12	101,07	101,12	100,99	100,88	101,04	0,10	0,001	100,98
SP_160_100_10_5	SP_195	101,14	101,05	101,11	101,02	100,86	101,04	0,11	0,001	100,97
SP_160_100_10_6	SP_196	101,10	101,11	101,09	101,04	100,89	101,05	0,09	0,001	100,99
SP_160_100_10_7	SP_197	101,18	101,10	101,16	100,98	100,97	101,08	0,10	0,001	101,04
SP_160_100_10_8	SP_198	101,10	101,01	101,05	101,00	100,89	101,01	0,08	0,001	100,97
SP_160_100_13_1	SP_215	100,16	99,90	100,60	100,24	100,26	100,23	0,25	0,003	100,24
SP_160_100_13_2	SP_216	100,04	99,70	100,41	100,29	100,22	100,13	0,28	0,003	100,17
SP_160_100_13_3	SP_217	100,01	99,59	100,40	100,08	100,17	100,05	0,30	0,003	100,10
SP_160_100_13_4	SP_218	100,01	99,72	100,38	100,16	100,15	100,08	0,24	0,002	100,11
SP_160_100_13_5	SP_219	100,10	99,80	100,37	100,19	100,25	100,14	0,21	0,002	100,18
SP_160_100_13_6	SP_220	100,09	99,77	100,44	100,15	100,40	100,17	0,27	0,003	100,26
SP_160_100_13_7	SP_221	100,15	100,06	100,46	100,22	100,36	100,25	0,16	0,002	100,29
SP_160_100_14_1	SP_222	100,22	100,19	100,28	100,21	100,67	100,31	0,20	0,002	100,45
SP_160_100_14_2	SP_223	100,22	100,35	100,23	100,37	100,68	100,37	0,19	0,002	100,49
SP_160_100_14_3	SP_224	100,22	100,27	100,33	100,18	100,66	100,33	0,19	0,002	100,46
SP_160_100_14_4	SP_225	100,41	100,31	100,40	100,29	100,60	100,40	0,12	0,001	100,48
SP_160_100_14_5	SP_226	100,39	100,24	100,28	100,24	100,73	100,38	0,21	0,002	100,51
SP_160_100_14_6	SP_227	100,34	100,26	100,26	100,15	100,73	100,35	0,22	0,002	100,49
SP_160_100_14_7	SP_228	100,38	100,29	100,14	100,18	100,62	100,32	0,19	0,002	100,43
SP_160_100_15_1	SP_229	99,83	100,04	99,85	99,99	99,34	99,81	0,28	0,003	99,63
SP_160_100_15_2	SP_230	100,28	100,12	100,50	100,35	99,61	100,17	0,34	0,003	99,96
SP_160_100_15_3	SP_231	100,04	100,07	100,16	100,10	99,63	100,00	0,21	0,002	99,86
SP_160_100_15_4	SP_232	100,09	100,05	100,26	100,36	99,49	100,05	0,34	0,003	99,84
SP_160_100_15_5	SP_233	99,96	100,00	100,31	100,12	99,58	99,99	0,27	0,003	99,84
SP_160_100_15_6	SP_234	100,00	100,14	100,00	100,13	99,37	99,93	0,32	0,003	99,72

Tabela A.10-cd. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	B^{*j} [mm]
SP_160_100_15_7	SP_235	99,85	99,88	100,17	99,96	99,39	99,85	0,29	0,003	99,68
SP_160_100_16_1	SP_236	99,54	99,96	99,90	99,91	99,22	99,71	0,32	0,003	99,52
SP_160_100_16_2	SP_237	100,20	100,22	100,28	100,30	99,65	100,13	0,27	0,003	99,95
SP_160_100_16_3	SP_238	99,82	99,81	100,22	99,83	99,46	99,83	0,27	0,003	99,69
SP_160_100_16_4	SP_239	100,10	100,18	100,18	100,12	99,54	100,02	0,27	0,003	99,84
SP_160_100_16_5	SP_240	100,07	100,04	100,07	100,06	99,44	99,94	0,28	0,003	99,75
SP_160_100_16_6	SP_241	99,85	99,89	99,92	100,07	99,30	99,81	0,29	0,003	99,62
SP_160_100_16_7	SP_242	99,87	99,90	100,18	100,03	99,24	99,84	0,36	0,004	99,62
SP_160_100_17_1	SP_243	100,24	100,16	100,44	100,40	100,86	100,42	0,27	0,003	100,59
SP_160_100_17_2	SP_244	100,46	100,16	100,53	100,51	100,86	100,50	0,25	0,002	100,64
SP_160_100_17_3	SP_245	100,32	100,23	100,51	100,60	100,88	100,51	0,25	0,003	100,65
SP_160_100_17_4	SP_246	100,29	100,20	100,53	100,49	100,87	100,48	0,26	0,003	100,62
SP_160_100_17_5	SP_247	100,07	100,12	100,12	100,33	100,71	100,27	0,27	0,003	100,44
SP_160_100_17_6	SP_248	100,31	100,14	100,35	100,40	100,81	100,40	0,25	0,002	100,56
SP_160_100_17_7	SP_249	100,12	100,18	100,25	100,33	100,81	100,34	0,28	0,003	100,52
SP_160_100_18_1	SP_250	100,85	100,43	100,92	100,46	100,04	100,54	0,36	0,004	100,35
SP_160_100_18_2	SP_251	100,74	100,32	100,66	100,42	101,12	100,65	0,31	0,003	100,83
SP_160_100_18_3	SP_252	100,49	100,34	100,58	100,42	100,92	100,55	0,22	0,002	100,69
SP_160_100_18_4	SP_253	100,82	100,35	100,50	100,34	101,23	100,65	0,38	0,004	100,87
SP_160_100_18_5	SP_254	100,41	100,16	100,71	100,45	100,99	100,54	0,32	0,003	100,71
SP_160_100_18_6	SP_255	100,32	100,27	100,59	100,37	101,02	100,51	0,31	0,003	100,70
SP_160_100_18_7	SP_256	100,63	100,37	100,75	100,56	101,06	100,67	0,26	0,003	100,82
SP_160_100_19_1	SP_257	100,13	99,95	100,14	100,10	99,41	99,95	0,31	0,003	99,75
SP_160_100_19_2	SP_258	101,06	100,11	101,06	100,43	101,06	100,74	0,45	0,004	100,86
SP_160_100_19_3	SP_259	101,21	100,54	100,18	100,19	101,09	100,64	0,49	0,005	100,81
SP_160_100_19_4	SP_260	101,22	100,45	101,25	100,55	101,08	100,91	0,38	0,004	100,97
SP_160_100_19_5	SP_261	101,42	100,48	101,20	100,38	101,10	100,92	0,46	0,005	100,99

Tabela A.10-cd. Zestawienie szerokości B próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Szerokość próbek rdzenia: B								
Pełna	Skrócona	B_1 [mm]	B_2 [mm]	B_3 [mm]	B_4 [mm]	B_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$B^{*})$ [mm]
SP_160_100_19_6	SP_262	101,21	100,36	101,40	100,63	101,27	100,97	0,45	0,004	101,09
SP_160_100_19_7	SP_263	100,95	100,28	101,31	100,58	100,92	100,81	0,39	0,004	100,85
SP_160_100_20_1	SP_264	100,89	99,98	101,04	100,33	101,05	100,66	0,48	0,005	100,81
SP_160_100_20_2	SP_265	100,12	100,04	100,09	99,86	99,54	99,93	0,24	0,002	99,78
SP_160_100_20_3	SP_266	100,16	100,29	100,12	100,08	99,31	99,99	0,39	0,004	99,74
SP_160_100_20_4	SP_267	100,39	100,40	100,01	99,99	99,53	100,06	0,36	0,004	99,86
SP_160_100_20_5	SP_268	99,85	99,89	99,93	99,77	99,58	99,80	0,14	0,001	99,72
SP_160_100_20_6	SP_269	99,95	99,97	100,09	100,02	99,61	99,93	0,19	0,002	99,81
SP_160_100_20_7	SP_270	100,16	99,96	100,07	100,16	100,62	100,19	0,25	0,003	100,35
$*) B = \left[\frac{(B_1+B_2+B_3+B_4)}{4} + B_{sr} \right] / 2$										

Tabela A.11. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^{*} [mm]
SP_120_100_10_1	SP_95	100,59	100,81	100,44	100,70	99,10	100,33	0,70	0,007	99,87
SP_120_100_10_2	SP_96	100,55	100,55	100,53	100,47	99,00	100,22	0,68	0,007	99,76
SP_120_100_10_3	SP_97	100,67	100,64	100,64	100,71	99,24	100,38	0,64	0,006	99,95
SP_120_100_10_4	SP_98	100,65	100,61	100,58	100,54	99,10	100,30	0,67	0,007	99,85
SP_120_100_10_5	SP_99	100,65	100,73	100,54	100,59	99,04	100,31	0,71	0,007	99,83
SP_120_100_10_6	SP_100	100,66	100,80	100,54	100,77	99,00	100,35	0,76	0,008	99,85
SP_120_100_10_7	SP_101	100,59	100,73	100,51	100,63	99,00	100,29	0,73	0,007	99,81
SP_120_100_10_8	SP_102	100,64	100,86	100,37	100,68	98,96	100,30	0,77	0,008	99,80
SP_120_100_11_1	SP_103	100,67	100,76	100,44	100,66	99,17	100,34	0,66	0,007	99,90
SP_120_100_11_2	SP_104	100,56	100,52	100,49	100,53	99,20	100,26	0,59	0,006	99,86
SP_120_100_11_3	SP_105	100,63	100,65	100,54	100,61	99,28	100,34	0,60	0,006	99,94
SP_120_100_11_4	SP_106	100,62	100,67	100,54	100,61	99,24	100,34	0,61	0,006	99,93
SP_120_100_11_5	SP_107	100,57	100,70	100,49	100,54	99,14	100,29	0,65	0,006	99,86
SP_120_100_11_6	SP_108	100,58	100,73	100,46	100,59	99,15	100,30	0,65	0,006	99,87
SP_120_100_11_7	SP_109	100,49	100,63	100,50	100,61	99,12	100,27	0,65	0,006	99,84
SP_120_100_11_8	SP_110	100,61	100,51	100,44	100,41	99,17	100,23	0,60	0,006	99,83
SP_120_100_13_1	SP_119	99,85	100,25	100,02	100,18	99,51	99,96	0,30	0,003	99,79
SP_120_100_13_2	SP_120	100,40	100,22	100,23	100,07	99,56	100,10	0,32	0,003	99,90
SP_120_100_13_3	SP_121	99,99	100,08	99,87	100,07	99,36	99,87	0,30	0,003	99,68
SP_120_100_13_4	SP_122	100,05	100,08	100,08	99,98	99,24	99,89	0,36	0,004	99,64
SP_120_100_13_5	SP_123	100,11	100,19	99,74	100,03	99,33	99,88	0,35	0,004	99,67
SP_120_100_13_6	SP_124	99,99	100,07	99,98	100,09	99,63	99,95	0,19	0,002	99,83
SP_120_100_13_7	SP_125	100,13	99,97	100,10	99,97	99,57	99,95	0,22	0,002	99,81
SP_120_100_14_1	SP_126	100,07	100,11	100,34	100,38	99,41	100,06	0,39	0,004	99,82
SP_120_100_14_2	SP_127	100,10	100,10	99,98	100,19	99,41	99,96	0,31	0,003	99,75
SP_120_100_14_3	SP_128	99,86	99,96	99,74	100,10	99,34	99,80	0,29	0,003	99,63
SP_120_100_14_4	SP_129	99,88	100,14	99,72	100,01	99,31	99,81	0,32	0,003	99,62

Tabela A.11-cd. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^{*j} [mm]
SP_120_100_14_5	SP_130	99,89	99,85	99,77	99,83	99,30	99,73	0,24	0,002	99,57
SP_120_100_14_6	SP_131	99,64	99,62	99,61	99,67	99,18	99,54	0,20	0,002	99,41
SP_120_100_14_7	SP_132	99,73	99,61	99,66	99,85	99,18	99,61	0,25	0,003	99,45
SP_120_100_15_1	SP_133	100,46	100,41	100,61	100,51	100,12	100,42	0,18	0,002	100,31
SP_120_100_15_2	SP_134	100,34	100,32	100,83	101,20	100,19	100,58	0,43	0,004	100,43
SP_120_100_15_3	SP_135	100,86	100,81	100,38	100,44	100,23	100,54	0,28	0,003	100,43
SP_120_100_15_4	SP_136	100,33	100,42	100,50	100,58	100,17	100,40	0,16	0,002	100,31
SP_120_100_15_5	SP_137	100,73	100,84	100,42	100,33	100,24	100,51	0,26	0,003	100,41
SP_120_100_15_6	SP_138	100,52	100,45	100,66	100,75	100,26	100,53	0,19	0,002	100,43
SP_120_100_15_7	SP_139	100,33	100,44	100,53	100,80	100,22	100,46	0,22	0,002	100,37
SP_120_100_16_1	SP_140	100,32	100,38	100,68	100,74	100,10	100,44	0,27	0,003	100,32
SP_120_100_16_2	SP_141	100,57	100,63	100,31	100,28	99,88	100,33	0,30	0,003	100,16
SP_120_100_16_3	SP_142	100,23	100,26	100,48	100,51	100,19	100,33	0,15	0,001	100,28
SP_120_100_16_4	SP_143	100,53	100,55	100,20	100,18	99,90	100,27	0,27	0,003	100,13
SP_120_100_16_5	SP_144	100,29	100,31	100,25	99,98	100,08	100,18	0,14	0,001	100,14
SP_120_100_16_6	SP_145	100,60	100,15	100,21	100,14	100,02	100,22	0,22	0,002	100,15
SP_120_100_16_7	SP_146	100,04	100,34	100,36	100,36	100,01	100,22	0,18	0,002	100,14
SP_120_100_17_1	SP_147	100,91	100,37	100,59	100,47	100,28	100,52	0,24	0,002	100,43
SP_120_100_17_2	SP_148	100,98	100,60	100,63	100,48	100,24	100,59	0,27	0,003	100,46
SP_120_100_17_3	SP_149	100,26	101,05	100,33	100,74	100,06	100,49	0,40	0,004	100,33
SP_120_100_17_4	SP_150	100,50	100,59	100,45	100,62	100,18	100,47	0,17	0,002	100,36
SP_120_100_17_5	SP_151	100,42	100,72	100,33	100,67	100,20	100,47	0,22	0,002	100,37
SP_120_100_17_6	SP_152	100,47	100,50	100,34	100,66	100,20	100,43	0,17	0,002	100,35
SP_120_100_17_7	SP_153	100,81	100,23	100,56	100,39	100,19	100,44	0,26	0,003	100,34
SP_120_100_18_1	SP_154	100,55	100,77	100,60	100,65	100,06	100,53	0,27	0,003	100,35
SP_120_100_18_2	SP_155	100,48	100,94	100,76	100,35	100,13	100,53	0,32	0,003	100,38
SP_120_100_18_3	SP_156	100,16	100,36	100,23	100,19	99,90	100,17	0,17	0,002	100,07

Tabela A.11-cd. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^* [mm]
SP_120_100_18_4	SP_157	100,39	100,41	100,13	100,39	99,99	100,26	0,19	0,002	100,16
SP_120_100_18_5	SP_158	100,11	100,71	100,56	100,37	100,22	100,39	0,24	0,002	100,33
SP_120_100_18_6	SP_159	100,43	101,18	100,40	100,45	100,20	100,53	0,38	0,004	100,41
SP_120_100_18_7	SP_160	100,25	100,66	100,57	100,55	100,11	100,43	0,24	0,002	100,31
SP_120_100_19_1	SP_161	100,83	100,26	100,25	100,30	100,31	100,39	0,25	0,002	100,36
SP_120_100_19_2	SP_162	100,81	100,46	100,62	100,36	100,44	100,54	0,18	0,002	100,50
SP_120_100_19_3	SP_163	100,45	100,60	100,45	100,45	100,21	100,43	0,14	0,001	100,35
SP_120_100_19_4	SP_164	100,26	100,44	100,48	100,54	100,21	100,39	0,14	0,001	100,32
SP_120_100_19_5	SP_165	100,80	100,43	100,33	100,46	99,99	100,40	0,29	0,003	100,25
SP_120_100_19_6	SP_166	100,58	100,40	100,64	100,72	100,45	100,56	0,13	0,001	100,52
SP_120_100_19_7	SP_167	100,97	100,46	100,22	100,45	100,32	100,48	0,29	0,003	100,42
SP_120_100_20_1	SP_168	101,03	100,40	100,25	100,17	100,13	100,40	0,37	0,004	100,30
SP_120_100_20_2	SP_169	100,82	100,41	100,24	100,34	100,38	100,44	0,22	0,002	100,42
SP_120_100_20_3	SP_170	100,94	100,33	100,25	100,28	100,47	100,45	0,28	0,003	100,46
SP_120_100_20_4	SP_171	100,49	100,87	100,46	100,58	100,13	100,51	0,27	0,003	100,37
SP_120_100_20_5	SP_172	100,24	101,06	100,25	100,49	100,25	100,46	0,35	0,004	100,38
SP_120_100_20_6	SP_173	101,13	100,59	100,34	100,29	100,32	100,53	0,35	0,004	100,45
SP_120_100_20_7	SP_174	101,00	100,46	100,45	100,37	100,50	100,56	0,25	0,003	100,54
SP_160_100_9_1	SP_183	101,25	101,21	101,10	101,11	100,03	100,94	0,51	0,005	100,60
SP_160_100_9_2	SP_184	101,36	101,25	101,02	101,07	99,65	100,87	0,70	0,007	100,41
SP_160_100_9_3	SP_185	101,40	101,41	101,12	101,03	99,87	100,97	0,64	0,006	100,56
SP_160_100_9_4	SP_186	101,41	101,37	100,94	101,04	99,69	100,89	0,70	0,007	100,44
SP_160_100_9_5	SP_187	101,29	101,22	100,93	100,99	99,54	100,79	0,72	0,007	100,32
SP_160_100_9_6	SP_188	101,15	101,12	100,91	100,78	99,47	100,69	0,70	0,007	100,23
SP_160_100_9_7	SP_189	101,06	101,03	100,90	100,91	99,49	100,68	0,67	0,007	100,23
SP_160_100_9_8	SP_190	101,12	101,00	100,76	100,74	99,40	100,60	0,69	0,007	100,15
SP_160_100_10_1	SP_191	101,28	101,32	101,10	101,17	100,02	100,98	0,54	0,005	100,62

Tabela A.11-cd. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^{*j} [mm]
SP_160_100_10_2	SP_192	101,34	101,26	101,20	101,14	99,83	100,95	0,63	0,006	100,53
SP_160_100_10_3	SP_193	101,34	101,47	101,07	101,11	99,86	100,97	0,64	0,006	100,55
SP_160_100_10_4	SP_194	101,47	101,39	101,10	100,97	99,81	100,95	0,67	0,007	100,52
SP_160_100_10_5	SP_195	101,17	101,22	100,88	101,01	99,65	100,79	0,65	0,006	100,36
SP_160_100_10_6	SP_196	101,25	101,22	100,95	100,97	99,67	100,81	0,65	0,006	100,38
SP_160_100_10_7	SP_197	101,07	101,03	100,97	100,95	99,56	100,72	0,65	0,006	100,28
SP_160_100_10_8	SP_198	101,20	101,20	100,81	100,93	99,55	100,74	0,69	0,007	100,29
SP_160_100_13_1	SP_215	100,29	100,42	100,14	100,35	99,53	100,15	0,36	0,004	99,92
SP_160_100_13_2	SP_216	100,37	100,46	100,14	100,36	99,88	100,24	0,23	0,002	100,11
SP_160_100_13_3	SP_217	100,25	100,37	100,00	100,34	99,86	100,16	0,22	0,002	100,05
SP_160_100_13_4	SP_218	100,15	100,24	100,03	100,30	99,78	100,10	0,21	0,002	99,98
SP_160_100_13_5	SP_219	100,12	100,32	99,96	100,29	99,54	100,05	0,32	0,003	99,86
SP_160_100_13_6	SP_220	100,21	100,20	100,07	100,13	99,57	100,04	0,27	0,003	99,86
SP_160_100_13_7	SP_221	100,05	100,33	99,88	99,98	99,30	99,91	0,38	0,004	99,68
SP_160_100_14_1	SP_222	100,26	100,30	100,41	100,43	99,56	100,19	0,36	0,004	99,96
SP_160_100_14_2	SP_223	100,49	100,64	100,31	100,38	99,75	100,31	0,34	0,003	100,10
SP_160_100_14_3	SP_224	100,27	100,47	100,12	100,28	99,66	100,16	0,31	0,003	99,97
SP_160_100_14_4	SP_225	99,89	100,09	99,91	100,28	99,58	99,95	0,26	0,003	99,81
SP_160_100_14_5	SP_226	100,13	100,28	100,12	100,18	99,52	100,05	0,30	0,003	99,85
SP_160_100_14_6	SP_227	99,81	100,29	99,92	100,40	99,40	99,96	0,40	0,004	99,75
SP_160_100_14_7	SP_228	100,04	100,05	99,98	100,22	99,42	99,94	0,31	0,003	99,75
SP_160_100_15_1	SP_229	100,46	100,42	100,50	100,65	100,20	100,45	0,16	0,002	100,35
SP_160_100_15_2	SP_230	100,40	100,25	100,60	100,57	100,20	100,40	0,18	0,002	100,33
SP_160_100_15_3	SP_231	100,40	100,33	100,54	100,76	100,26	100,46	0,20	0,002	100,38
SP_160_100_15_4	SP_232	100,74	100,89	100,45	100,46	100,09	100,53	0,31	0,003	100,36
SP_160_100_15_5	SP_233	100,39	100,42	100,59	100,57	100,14	100,42	0,18	0,002	100,32
SP_160_100_15_6	SP_234	100,58	100,55	100,49	100,57	100,07	100,45	0,22	0,002	100,31

Tabela A.11-cd. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	D^* [mm]
SP_160_100_15_7	SP_235	100,58	100,76	100,37	100,20	100,08	100,40	0,28	0,003	100,28
SP_160_100_16_1	SP_236	100,09	100,10	100,60	100,21	99,98	100,20	0,24	0,002	100,12
SP_160_100_16_2	SP_237	100,00	99,95	100,12	100,19	100,06	100,06	0,10	0,001	100,06
SP_160_100_16_3	SP_238	100,31	100,29	100,60	100,58	100,05	100,37	0,23	0,002	100,25
SP_160_100_16_4	SP_239	100,57	100,40	100,70	100,78	100,17	100,52	0,24	0,002	100,39
SP_160_100_16_5	SP_240	100,72	100,52	100,49	100,55	99,98	100,45	0,28	0,003	100,28
SP_160_100_16_6	SP_241	100,73	100,61	100,66	100,64	100,05	100,54	0,28	0,003	100,36
SP_160_100_16_7	SP_242	100,59	100,58	100,65	100,64	100,08	100,51	0,24	0,002	100,35
SP_160_100_17_1	SP_243	100,36	100,63	100,40	100,50	100,11	100,40	0,19	0,002	100,29
SP_160_100_17_2	SP_244	100,51	100,64	100,31	100,71	100,10	100,45	0,25	0,002	100,32
SP_160_100_17_3	SP_245	100,67	100,58	100,35	100,69	100,25	100,51	0,20	0,002	100,41
SP_160_100_17_4	SP_246	100,44	100,55	100,14	100,32	100,22	100,33	0,16	0,002	100,29
SP_160_100_17_5	SP_247	100,40	100,59	100,34	100,63	100,01	100,39	0,25	0,002	100,25
SP_160_100_17_6	SP_248	100,43	100,60	100,31	100,72	100,00	100,41	0,28	0,003	100,26
SP_160_100_17_7	SP_249	100,37	100,51	100,44	100,50	100,12	100,39	0,16	0,002	100,29
SP_160_100_18_1	SP_250	100,45	100,46	100,45	100,40	100,07	100,37	0,17	0,002	100,26
SP_160_100_18_2	SP_251	100,57	100,41	100,45	100,49	100,17	100,42	0,15	0,002	100,33
SP_160_100_18_3	SP_252	100,56	100,54	100,54	100,56	100,10	100,46	0,20	0,002	100,33
SP_160_100_18_4	SP_253	100,14	101,04	100,43	100,69	100,09	100,48	0,40	0,004	100,33
SP_160_100_18_5	SP_254	100,53	100,49	100,38	100,46	100,07	100,39	0,19	0,002	100,27
SP_160_100_18_6	SP_255	100,45	100,45	100,47	100,54	100,08	100,40	0,18	0,002	100,28
SP_160_100_18_7	SP_256	100,77	100,15	100,52	100,26	100,19	100,38	0,26	0,003	100,31
SP_160_100_19_1	SP_257	100,69	101,00	100,58	100,59	100,24	100,62	0,27	0,003	100,48
SP_160_100_19_2	SP_258	100,50	100,51	100,57	100,67	100,13	100,48	0,20	0,002	100,35
SP_160_100_19_3	SP_259	100,59	100,42	100,34	100,52	100,25	100,42	0,14	0,001	100,36
SP_160_100_19_4	SP_260	100,58	100,57	100,56	100,56	100,13	100,48	0,20	0,002	100,35
SP_160_100_19_5	SP_261	100,44	100,65	100,58	100,59	100,41	100,53	0,10	0,001	100,49

Tabela A.11-cd. Zestawienie grubości D próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Grubość próbek rdzenia: D								
Pełna	Skrócona	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$D^{*})$ [mm]
SP_160_100_19_6	SP_262	100,50	100,55	100,58	100,64	100,15	100,48	0,19	0,002	100,36
SP_160_100_19_7	SP_263	100,50	100,62	100,15	100,72	100,14	100,43	0,27	0,003	100,32
SP_160_100_20_1	SP_264	100,44	100,24	100,33	100,42	100,25	100,34	0,09	0,001	100,30
SP_160_100_20_2	SP_265	100,59	100,54	100,60	100,64	100,06	100,49	0,24	0,002	100,33
SP_160_100_20_3	SP_266	100,52	100,51	100,54	100,65	100,13	100,47	0,20	0,002	100,34
SP_160_100_20_4	SP_267	100,47	100,46	100,53	100,31	100,36	100,43	0,09	0,001	100,40
SP_160_100_20_5	SP_268	100,47	100,44	100,54	100,50	100,22	100,43	0,13	0,001	100,35
SP_160_100_20_6	SP_269	100,20	100,28	101,02	100,61	100,35	100,49	0,33	0,003	100,44
SP_160_100_20_7	SP_270	100,61	100,54	100,48	100,55	100,22	100,48	0,15	0,002	100,38
*) $D = \left[\frac{(D_1 + D_2 + D_3 + D_4)}{4} + D_{sr} \right] / 2$										

Tabela A.12. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	H^* [mm]
SP_120_100_10_1	SP_95	119,21	119,33	118,90	119,13	119,05	119,12	0,16	0,001	119,10
SP_120_100_10_2	SP_96	119,30	119,15	119,07	119,45	118,87	119,17	0,22	0,002	119,06
SP_120_100_10_3	SP_97	119,48	119,26	119,28	119,46	118,92	119,28	0,22	0,002	119,15
SP_120_100_10_4	SP_98	119,52	119,30	119,20	119,47	119,32	119,36	0,13	0,001	119,35
SP_120_100_10_5	SP_99	119,64	119,09	119,09	119,39	119,27	119,30	0,23	0,002	119,29
SP_120_100_10_6	SP_100	119,42	119,13	119,25	119,45	119,36	119,32	0,13	0,001	119,34
SP_120_100_10_7	SP_101	119,37	119,14	119,10	119,35	119,38	119,27	0,14	0,001	119,31
SP_120_100_10_8	SP_102	119,39	119,16	119,17	119,50	119,43	119,33	0,16	0,001	119,37
SP_120_100_11_1	SP_103	119,93	119,73	119,45	120,05	119,66	119,76	0,23	0,002	119,73
SP_120_100_11_2	SP_104	119,91	119,73	119,46	120,09	119,44	119,73	0,28	0,002	119,62
SP_120_100_11_3	SP_105	120,00	119,73	119,56	119,83	119,63	119,75	0,17	0,001	119,71
SP_120_100_11_4	SP_106	119,80	119,74	119,50	119,80	119,53	119,67	0,15	0,001	119,62
SP_120_100_11_5	SP_107	120,04	119,61	119,47	120,10	119,53	119,75	0,30	0,002	119,67
SP_120_100_11_6	SP_108	119,93	119,50	119,61	119,93	119,74	119,74	0,19	0,002	119,74
SP_120_100_11_7	SP_109	119,99	119,79	119,64	120,09	119,60	119,82	0,21	0,002	119,74
SP_120_100_11_8	SP_110	120,04	119,55	119,66	119,81	119,57	119,73	0,20	0,002	119,67
SP_120_100_13_1	SP_119	112,73	112,50	112,85	112,88	112,22	112,64	0,28	0,002	112,48
SP_120_100_13_2	SP_120	109,48	109,45	109,06	109,28	109,21	109,30	0,17	0,002	109,26
SP_120_100_13_3	SP_121	111,98	111,82	110,95	111,20	110,66	111,32	0,56	0,005	111,07
SP_120_100_13_4	SP_122	112,00	112,11	111,68	112,05	111,13	111,79	0,41	0,004	111,55
SP_120_100_13_5	SP_123	112,75	112,49	112,03	112,36	111,71	112,27	0,41	0,004	112,06
SP_120_100_13_6	SP_124	112,04	112,20	112,30	112,43	111,41	112,08	0,40	0,004	111,83
SP_120_100_13_7	SP_125	112,24	112,08	111,95	112,24	111,38	111,98	0,36	0,003	111,75
SP_120_100_14_1	SP_126	111,96	112,03	111,17	111,82	110,90	111,58	0,51	0,005	111,32
SP_120_100_14_2	SP_127	112,24	112,07	111,79	112,00	111,34	111,89	0,35	0,003	111,68
SP_120_100_14_3	SP_128	112,29	111,98	111,69	111,80	110,96	111,74	0,49	0,004	111,45
SP_120_100_14_4	SP_129	112,13	112,10	112,10	112,15	111,32	111,96	0,36	0,003	111,72

Tabela A.12-cd. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$H^{*})$ [mm]
SP_120_100_14_5	SP_130	112,13	113,09	113,22	111,84	111,93	112,44	0,66	0,006	112,25
SP_120_100_14_6	SP_131	112,43	112,13	112,31	112,43	111,53	112,17	0,38	0,003	111,93
SP_120_100_14_7	SP_132	112,51	112,18	111,94	112,00	111,38	112,00	0,41	0,004	111,77
SP_120_100_15_1	SP_133	100,33	100,53	100,43	100,39	100,67	100,47	0,13	0,001	100,55
SP_120_100_15_2	SP_134	100,29	100,46	100,40	100,36	100,67	100,44	0,14	0,001	100,52
SP_120_100_15_3	SP_135	100,18	100,57	100,35	100,25	100,75	100,42	0,24	0,002	100,54
SP_120_100_15_4	SP_136	100,23	100,61	100,41	100,47	100,70	100,48	0,18	0,002	100,57
SP_120_100_15_5	SP_137	100,34	100,52	100,51	100,32	100,77	100,49	0,18	0,002	100,60
SP_120_100_15_6	SP_138	100,19	100,33	100,19	100,36	100,54	100,32	0,14	0,001	100,40
SP_120_100_15_7	SP_139	100,37	100,46	100,37	100,39	100,82	100,48	0,19	0,002	100,61
SP_120_100_16_1	SP_140	99,75	99,69	99,92	99,97	99,56	99,78	0,17	0,002	99,70
SP_120_100_16_2	SP_141	99,49	99,61	99,89	99,77	99,42	99,64	0,19	0,002	99,56
SP_120_100_16_3	SP_142	99,61	99,60	99,86	99,68	99,42	99,63	0,16	0,002	99,55
SP_120_100_16_4	SP_143	99,42	99,72	99,80	99,67	99,43	99,61	0,17	0,002	99,54
SP_120_100_16_5	SP_144	99,14	99,29	99,76	99,67	99,46	99,46	0,26	0,003	99,46
SP_120_100_16_6	SP_145	100,01	100,43	100,14	100,07	100,48	100,23	0,21	0,002	100,32
SP_120_100_16_7	SP_146	100,56	100,50	100,34	100,06	100,69	100,43	0,24	0,002	100,53
SP_120_100_17_1	SP_147	100,19	100,16	100,20	100,40	99,50	100,09	0,34	0,003	99,87
SP_120_100_17_2	SP_148	100,35	100,24	100,11	100,07	99,62	100,08	0,28	0,003	99,91
SP_120_100_17_3	SP_149	100,02	100,04	100,14	99,95	99,57	99,94	0,22	0,002	99,80
SP_120_100_17_4	SP_150	100,15	100,07	100,01	99,83	99,53	99,92	0,25	0,002	99,77
SP_120_100_17_5	SP_151	99,97	100,10	99,92	99,81	99,52	99,86	0,22	0,002	99,74
SP_120_100_17_6	SP_152	100,04	100,05	100,00	99,88	99,53	99,90	0,22	0,002	99,76
SP_120_100_17_7	SP_153	99,83	99,88	99,84	99,70	99,41	99,73	0,19	0,002	99,61
SP_120_100_18_1	SP_154	99,79	100,00	100,22	99,87	99,32	99,84	0,33	0,003	99,65
SP_120_100_18_2	SP_155	100,25	100,27	100,18	99,87	99,56	100,03	0,31	0,003	99,85
SP_120_100_18_3	SP_156	99,95	99,95	100,03	99,81	99,35	99,82	0,27	0,003	99,64

Tabela A.12-cd. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	H^* [mm]
SP_120_100_18_4	SP_157	99,67	99,97	99,94	99,59	99,18	99,67	0,32	0,003	99,49
SP_120_100_18_5	SP_158	100,00	99,92	99,94	99,80	99,34	99,80	0,27	0,003	99,63
SP_120_100_18_6	SP_159	99,65	99,75	99,81	99,77	99,31	99,66	0,20	0,002	99,53
SP_120_100_18_7	SP_160	99,75	99,89	99,83	99,54	99,33	99,67	0,23	0,002	99,54
SP_120_100_19_1	SP_161	100,20	100,26	100,17	100,12	100,49	100,25	0,14	0,001	100,34
SP_120_100_19_2	SP_162	100,18	100,18	100,19	100,18	100,52	100,25	0,15	0,002	100,35
SP_120_100_19_3	SP_163	100,23	100,41	100,28	100,18	100,56	100,33	0,15	0,002	100,42
SP_120_100_19_4	SP_164	100,17	100,36	100,24	100,20	100,57	100,31	0,16	0,002	100,41
SP_120_100_19_5	SP_165	100,21	100,10	100,23	100,27	100,57	100,28	0,18	0,002	100,39
SP_120_100_19_6	SP_166	100,35	100,26	100,18	100,28	100,61	100,34	0,16	0,002	100,44
SP_120_100_19_7	SP_167	100,14	100,27	100,23	100,22	100,57	100,29	0,17	0,002	100,39
SP_120_100_20_1	SP_168	100,15	100,08	100,07	100,04	100,43	100,15	0,16	0,002	100,26
SP_120_100_20_2	SP_169	100,18	100,23	100,14	100,00	100,55	100,22	0,20	0,002	100,34
SP_120_100_20_3	SP_170	100,11	100,10	100,02	100,01	100,53	100,15	0,22	0,002	100,30
SP_120_100_20_4	SP_171	100,08	100,09	100,00	100,08	100,54	100,16	0,22	0,002	100,30
SP_120_100_20_5	SP_172	100,08	100,31	100,05	100,08	100,54	100,21	0,21	0,002	100,34
SP_120_100_20_6	SP_173	100,14	100,39	100,12	99,92	100,53	100,22	0,24	0,002	100,34
SP_120_100_20_7	SP_174	100,17	100,23	100,12	100,05	100,56	100,23	0,20	0,002	100,35
SP_160_100_9_1	SP_183	159,80	159,43	159,00	159,44	159,63	159,46	0,30	0,002	159,52
SP_160_100_9_2	SP_184	159,46	159,04	158,95	159,22	159,10	159,15	0,20	0,001	159,13
SP_160_100_9_3	SP_185	159,39	158,80	158,72	159,15	159,12	159,04	0,27	0,002	159,07
SP_160_100_9_4	SP_186	159,06	158,75	158,67	159,04	158,91	158,89	0,17	0,001	158,90
SP_160_100_9_5	SP_187	159,08	158,58	158,40	158,84	158,80	158,74	0,26	0,002	158,76
SP_160_100_9_6	SP_188	159,18	158,69	158,68	158,97	158,97	158,90	0,21	0,001	158,93
SP_160_100_9_7	SP_189	159,23	158,79	158,68	159,03	159,08	158,96	0,22	0,001	159,01
SP_160_100_9_8	SP_190	159,37	158,75	158,88	159,13	159,06	159,04	0,24	0,001	159,05
SP_160_100_10_1	SP_191	160,02	159,72	159,49	159,88	159,87	159,80	0,20	0,001	159,82

Tabela A.12-cd. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$H^{*})$ [mm]
SP_160_100_10_2	SP_192	159,94	159,47	159,21	159,69	159,40	159,54	0,28	0,002	159,49
SP_160_100_10_3	SP_193	159,73	159,33	159,12	159,76	159,32	159,45	0,28	0,002	159,40
SP_160_100_10_4	SP_194	159,77	159,31	159,00	159,71	159,37	159,43	0,31	0,002	159,41
SP_160_100_10_5	SP_195	159,74	159,24	158,93	159,52	159,24	159,33	0,31	0,002	159,30
SP_160_100_10_6	SP_196	159,81	159,21	159,05	159,53	159,33	159,39	0,29	0,002	159,37
SP_160_100_10_7	SP_197	159,89	159,35	159,17	159,75	159,29	159,49	0,31	0,002	159,42
SP_160_100_10_8	SP_198	159,85	159,35	159,28	159,70	159,42	159,52	0,24	0,002	159,48
SP_160_100_13_1	SP_215	151,94	151,10	149,67	150,41	149,98	150,62	0,91	0,006	150,38
SP_160_100_13_2	SP_216	151,41	151,01	150,92	151,55	150,44	151,07	0,44	0,003	150,83
SP_160_100_13_3	SP_217	151,63	151,22	151,01	151,80	150,63	151,26	0,47	0,003	151,02
SP_160_100_13_4	SP_218	151,66	151,33	151,01	151,58	150,63	151,24	0,43	0,003	151,01
SP_160_100_13_5	SP_219	151,70	151,35	151,49	151,80	150,82	151,43	0,38	0,003	151,20
SP_160_100_13_6	SP_220	151,83	151,47	151,03	151,29	150,57	151,24	0,47	0,003	150,99
SP_160_100_13_7	SP_221	151,86	151,72	151,54	151,62	150,89	151,53	0,38	0,002	151,29
SP_160_100_14_1	SP_222	152,03	151,28	151,46	152,22	151,05	151,61	0,50	0,003	151,40
SP_160_100_14_2	SP_223	151,76	151,54	151,34	151,87	150,82	151,47	0,41	0,003	151,22
SP_160_100_14_3	SP_224	152,08	151,52	151,55	151,95	150,88	151,60	0,47	0,003	151,33
SP_160_100_14_4	SP_225	151,79	151,74	151,61	152,10	150,75	151,60	0,51	0,003	151,28
SP_160_100_14_5	SP_226	152,30	151,94	151,70	152,32	151,13	151,88	0,49	0,003	151,60
SP_160_100_14_6	SP_227	152,18	151,90	152,02	152,29	151,22	151,92	0,42	0,003	151,66
SP_160_100_14_7	SP_228	152,06	152,08	151,76	151,92	150,95	151,75	0,47	0,003	151,45
SP_160_100_15_1	SP_229	100,21	100,33	100,28	100,13	100,65	100,32	0,20	0,002	100,44
SP_160_100_15_2	SP_230	100,31	100,28	100,30	100,37	100,90	100,43	0,26	0,003	100,61
SP_160_100_15_3	SP_231	100,36	100,33	100,31	100,29	100,75	100,41	0,19	0,002	100,54
SP_160_100_15_4	SP_232	100,23	100,14	100,24	100,29	100,68	100,32	0,21	0,002	100,45
SP_160_100_15_5	SP_233	100,29	100,30	100,46	100,26	100,69	100,40	0,18	0,002	100,51
SP_160_100_15_6	SP_234	100,29	100,35	100,40	100,32	100,68	100,41	0,16	0,002	100,51

Tabela A.12-cd. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	H^* [mm]
SP_160_100_15_7	SP_235	100,28	100,13	100,25	100,34	100,69	100,34	0,21	0,002	100,47
SP_160_100_16_1	SP_236	100,03	100,20	100,25	100,01	100,68	100,23	0,27	0,003	100,40
SP_160_100_16_2	SP_237	100,28	100,03	100,14	100,13	100,64	100,24	0,24	0,002	100,39
SP_160_100_16_3	SP_238	100,23	100,41	100,16	100,33	100,77	100,38	0,24	0,002	100,53
SP_160_100_16_4	SP_239	100,17	100,42	100,14	100,30	100,71	100,35	0,23	0,002	100,48
SP_160_100_16_5	SP_240	100,58	100,46	100,15	100,28	100,84	100,46	0,27	0,003	100,60
SP_160_100_16_6	SP_241	100,27	100,38	100,15	100,32	100,73	100,37	0,22	0,002	100,51
SP_160_100_16_7	SP_242	100,32	100,45	100,19	100,36	100,75	100,41	0,21	0,002	100,54
SP_160_100_17_1	SP_243	99,88	100,00	100,10	99,94	99,48	99,88	0,24	0,002	99,73
SP_160_100_17_2	SP_244	100,24	100,22	100,26	100,02	99,87	100,12	0,17	0,002	100,03
SP_160_100_17_3	SP_245	100,17	100,15	100,14	99,94	99,83	100,05	0,15	0,002	99,97
SP_160_100_17_4	SP_246	100,02	99,92	100,05	100,05	99,71	99,95	0,14	0,001	99,86
SP_160_100_17_5	SP_247	99,92	100,04	100,03	99,87	99,67	99,91	0,15	0,002	99,82
SP_160_100_17_6	SP_248	99,79	99,95	99,86	99,93	99,54	99,81	0,17	0,002	99,71
SP_160_100_17_7	SP_249	99,81	99,90	99,87	99,78	99,42	99,76	0,19	0,002	99,63
SP_160_100_18_1	SP_250	99,97	99,94	100,11	100,03	99,49	99,91	0,24	0,002	99,75
SP_160_100_18_2	SP_251	100,09	100,12	100,19	100,09	99,68	100,03	0,20	0,002	99,90
SP_160_100_18_3	SP_252	100,10	100,16	100,17	99,92	99,76	100,02	0,18	0,002	99,92
SP_160_100_18_4	SP_253	99,92	99,75	99,99	99,76	99,50	99,78	0,19	0,002	99,68
SP_160_100_18_5	SP_254	99,94	99,75	99,92	99,77	99,66	99,81	0,12	0,001	99,75
SP_160_100_18_6	SP_255	99,87	99,75	99,91	99,76	99,50	99,76	0,16	0,002	99,66
SP_160_100_18_7	SP_256	99,66	99,79	99,84	99,61	99,39	99,66	0,18	0,002	99,56
SP_160_100_19_1	SP_257	100,26	100,43	100,25	100,39	100,99	100,46	0,30	0,003	100,66
SP_160_100_19_2	SP_258	99,95	100,17	100,19	99,93	99,64	99,98	0,22	0,002	99,85
SP_160_100_19_3	SP_259	100,08	100,08	100,14	99,98	99,77	100,01	0,15	0,001	99,92
SP_160_100_19_4	SP_260	100,19	100,08	100,02	99,94	99,70	99,99	0,18	0,002	99,88
SP_160_100_19_5	SP_261	100,17	100,12	99,97	100,00	99,86	100,02	0,12	0,001	99,96

Tabela A.12-cd. Zestawienie wysokości H próbek rdzenia CH120 i CH160.

Nazwa próbki		Wysokość próbek rdzenia: H								
Pełna	Skrócona	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_3 [mm]	H_4 [mm]	H_{sr} [mm]	\bar{x} [mm]	s [mm]	v [-]	$H^{*})$ [mm]
SP_160_100_19_6	SP_262	100,19	100,15	100,24	100,09	99,75	100,08	0,19	0,002	99,96
SP_160_100_19_7	SP_263	100,21	100,24	100,17	100,04	99,76	100,08	0,20	0,002	99,96
SP_160_100_20_1	SP_264	99,87	99,81	99,87	99,97	99,52	99,81	0,17	0,002	99,70
SP_160_100_20_2	SP_265	100,32	100,42	100,22	100,37	100,87	100,44	0,25	0,003	100,60
SP_160_100_20_3	SP_266	100,07	100,30	100,31	100,21	100,87	100,35	0,31	0,003	100,55
SP_160_100_20_4	SP_267	100,20	100,21	100,14	100,35	100,74	100,33	0,24	0,002	100,48
SP_160_100_20_5	SP_268	100,19	100,40	100,32	100,21	100,70	100,36	0,21	0,002	100,49
SP_160_100_20_6	SP_269	99,99	99,93	99,17	99,01	100,64	99,75	0,66	0,007	100,08
SP_160_100_20_7	SP_270	100,01	100,03	99,86	99,90	99,61	99,88	0,17	0,002	99,78
SP_160_100_19_6	SP_262	100,19	100,15	100,24	100,09	99,75	100,08	0,19	0,002	99,96

*) $H = \left[\frac{(H_1+H_2+H_3+H_4)}{4} + H_{sr} \right] / 2$

Tabela A.13. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_1_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 450 ; -60) []
2	(240 ; 430 ; -60) [-]
3	(1000 ; 450 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) [-]
6	(1000 ; 0 ; -60) [/]
7	(3000 ; 250 ; -60) []
8	(3000 ; 250 ; -60) [-]
9	(3000 ; 250 ; -60) [/]

Tabela A.14. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_2_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 450 ; -60) []
2	(240 ; 430 ; -60) [-]
3	(1000 ; 450 ; -60) []
4	(1000 ; -450 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) []
6	(1000 ; 0 ; -60) [-]
7	(1000 ; 0 ; -60) [/]
8	(3000 ; 450 ; -60) []
9	(3000 ; -450 ; -60) []
10	(3000 ; 0 ; -60) []
11	(3000 ; 0 ; -60) [-]
12	(3000 ; 0 ; -60) [/]

Tabela A.15. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_3_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 0 ; -60) []
2	(1000 ; 0 ; -60) [-]
3	(1000 ; 0 ; -60) [/]
4	(1000 ; 0 ; 60) []
5	(1000 ; 0 ; 60) [-]
6	(1000 ; 0 ; 60) [/]

Tabela A.16. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_4_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 450 ; -60) []
2	(1000 ; 0 ; -60) []
3	(1000 ; 0 ; -60) [-]
4	(1000 ; 0 ; -60) [/]
5	(1000 ; 450 ; 60) []
6	(1000 ; 0 ; 60) []
7	(1000 ; 0 ; 60) [-]
8	(1000 ; 0 ; 60) [/]

Tabela A.17. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_8_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 200 ; -60) []
2	(240 ; 180 ; -60) [-]
3	(1000 ; 0 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) [-]
5	(1000 ; 0 ; -60) [/]
6	(3000 ; 125 ; -60) []
7	(3000 ; 125 ; -60) [-]
8	(3000 ; 125 ; -60) [/]

Tabela A.18. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_9_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 200 ; -60) []
2	(240 ; 180 ; -60) [-]
3	(1000 ; 200 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) [-]
6	(1000 ; 0 ; -60) [/]
7	(3000 ; 200 ; -60) []
8	(3000 ; 0 ; -60) []
9	(3000 ; 0 ; -60) [-]
10	(3000 ; 0 ; -60) [/]

Tabela A.19. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_10_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 0 ; -60) []
2	(1000 ; 0 ; -60) [-]
3	(1000 ; 0 ; -60) [/]

Tabela A.20. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_11_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 200 ; -60) []
2	(1000 ; 0 ; -60) []
3	(1000 ; 0 ; -60) [-]
4	(1000 ; 0 ; -60) [/]

Tabela A.21. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_12_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 75 ; -60) []
2	(240 ; 55 ; -60) [-]
3	(1000 ; 0 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) [-]
5	(1000 ; 0 ; -60) [/]
6	(3000 ; 62,5 ; -60) []
7	(3000 ; 62,5 ; -60) [-]
8	(3000 ; 62,5 ; -60) [/]

Tabela A.22. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_120_4100_13_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(240 ; 75 ; -60) []
2	(240 ; 55 ; -60) [-]
3	(1000 ; 75 ; -60) []
4	(1000 ; 0 ; -60) []
5	(1000 ; 0 ; -60) [-]
6	(1000 ; 0 ; -60) [/]
7	(3000 ; 75 ; -60) []
8	(3000 ; 0 ; -60) []
9	(3000 ; 0 ; -60) [-]
10	(3000 ; 0 ; -60) [/]

Tabela A.23. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_1_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 450 ; -80) []
2	(320 ; 430 ; -80) [-]
3	(1000 ; 450 ; -80) []
4	(1000 ; 0 ; -80) []
5	(1000 ; 0 ; -80) [-]
6	(1000 ; 0 ; -80) [/]
7	(3000 ; 250 ; -80) []
8	(3000 ; 250 ; -80) [-]
9	(3000 ; 250 ; -80) [/]

Tabela A.24. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_2_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 450 ; -80) []
2	(320 ; 430 ; -80) [-]
3	(1000 ; 450 ; -80) []
4	(1000 ; -450 ; -80) []
5	(1000 ; 0 ; -80) []
6	(1000 ; 0 ; -80) [-]
7	(1000 ; 0 ; -80) [/]
8	(3000 ; 450 ; -80) []
9	(3000 ; -450 ; -80) []
10	(3000 ; 0 ; -80) []
11	(3000 ; 0 ; -80) [-]
12	(3000 ; 0 ; -80) [/]

Tabela A.25. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_3_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 0 ; -80) []
2	(1000 ; 0 ; -80) [-]
3	(1000 ; 0 ; -80) [/]
4	(1000 ; 0 ; 80) []
5	(1000 ; 0 ; 80) [-]
6	(1000 ; 0 ; 80) [/]

Tabela A.26. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_4_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 450 ; -80) []
2	(1000 ; 0 ; -80) []
3	(1000 ; 0 ; -80) [-]
4	(1000 ; 0 ; -80) [/]
5	(1000 ; 450 ; 80) []
6	(1000 ; 0 ; 80) []
7	(1000 ; 0 ; 80) [-]
8	(1000 ; 0 ; 80) [/]

Tabela A.27. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_8_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 200 ; -80) []
2	(320 ; 180 ; -80) [-]
3	(1000 ; 0 ; -80) []
4	(1000 ; 0 ; -80) [-]
5	(1000 ; 0 ; -80) [/]
6	(3000 ; 125 ; -80) []
7	(3000 ; 125 ; -80) [-]
8	(3000 ; 125 ; -80) [/]

Tabela A.28. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_9_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 200 ; -80) []
2	(320 ; 180 ; -80) [-]
3	(1000 ; 200 ; -80) []
4	(1000 ; 0 ; -80) []
5	(1000 ; 0 ; -80) [-]
6	(1000 ; 0 ; -80) [/]
7	(3000 ; 200 ; -80) []
8	(3000 ; 0 ; -80) []
9	(3000 ; 0 ; -80) [-]
10	(3000 ; 0 ; -80) [/]

Tabela A.29. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_10_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 0 ; -80) []
2	(1000 ; 0 ; -80) [-]
3	(1000 ; 0 ; -80) [/]

Tabela A.30. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_11_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(1000 ; 200 ; -80) []
2	(1000 ; 0 ; -80) []
3	(1000 ; 0 ; -80) [-]
4	(1000 ; 0 ; -80) [/]

Tabela A.31. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_12_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 75 ; -80) []
2	(320 ; 55 ; -80) [-]
3	(1000 ; 0 ; -80) []
4	(1000 ; 0 ; -80) [-]
5	(1000 ; 0 ; -80) [/]
6	(3000 ; 62,5 ; -80) []
7	(3000 ; 62,5 ; -80) [-]
8	(3000 ; 62,5 ; -80) [/]

Tabela A.32. Rozmieszczenie tensometrów na próbce SP_160_4100_13_1.

Numer tensometru	Lokalizacja i kierunek tensometru [mm]
1	(320 ; 75 ; -80) []
2	(320 ; 55 ; -80) [-]
3	(1000 ; 75 ; -80) []
4	(1000 ; 0 ; -80) []
5	(1000 ; 0 ; -80) [-]
6	(1000 ; 0 ; -80) [/]
7	(3000 ; 75 ; -80) []
8	(3000 ; 0 ; -80) []
9	(3000 ; 0 ; -80) [-]
10	(3000 ; 0 ; -80) [/]

Załącznik B – wyniki badań materiałowych

Tabela B.1. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej okładzin.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	$E_{t,f}^f$ [GPa]	$E_{t,sz}^f$ [GPa]
SP_120_BL_1	SP_271	187,63	202,45
SP_120_BL_2	SP_272	204,45	219,54
SP_120_BL_3	SP_273	199,46	213,99
SP_120_BL_4	SP_274	203,33	219,29
SP_120_BL_5	SP_275	189,32	203,97
SP_120_BL_6	SP_276	196,30	211,19
SP_120_BL_7	SP_277	186,52	200,60
SP_120_BL_8	SP_278	193,43	208,27
SP_160_BL_1	SP_279	188,92	203,61
SP_160_BL_2	SP_280	195,33	211,16
SP_160_BL_3	SP_281	200,27	215,38
SP_160_BL_4	SP_282	197,92	213,23
SP_160_BL_5	SP_283	204,56	220,05
SP_160_BL_6	SP_284	198,55	213,82
SP_160_BL_7	SP_285	200,50	215,24
SP_160_BL_8	SP_286	196,16	212,18
SP_120_BL_9	SP_287	200,46	200,46
SP_120_BL_10	SP_288	200,10	200,10
SP_120_BL_11	SP_289	202,55	202,55
SP_120_BL_12	SP_290	194,09	194,09
SP_120_BL_13	SP_291	188,25	188,25
SP_120_BL_14	SP_292	213,79	213,79
SP_120_BL_15	SP_293	216,73	216,73
SP_120_BL_16	SP_294	209,25	209,25

Tabela B.2. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	E^c [MPa]
SP_120_100_10_1	SP_95	4,49
SP_120_100_10_2	SP_96	4,18
SP_120_100_10_3	SP_97	4,19
SP_120_100_10_4	SP_98	4,23
SP_120_100_10_5	SP_99	4,19
SP_120_100_10_6	SP_100	4,17
SP_120_100_10_7	SP_101	4,06
SP_120_100_10_8	SP_102	4,01
SP_120_100_11_1	SP_103	4,92
SP_120_100_11_2	SP_104	4,50
SP_120_100_11_3	SP_105	4,57
SP_120_100_11_4	SP_106	4,59
SP_120_100_11_5	SP_107	4,47
SP_120_100_11_6	SP_108	4,54
SP_120_100_11_7	SP_109	4,45
SP_120_100_11_8	SP_110	4,44
SP_120_100_13_1	SP_119	4,09
SP_120_100_13_2	SP_120	4,24
SP_120_100_13_3	SP_121	4,16
SP_120_100_13_4	SP_122	4,22
SP_120_100_13_5	SP_123	4,18
SP_120_100_13_6	SP_124	4,04
SP_120_100_13_7	SP_125	3,99
SP_120_100_14_1	SP_126	4,36
SP_120_100_14_2	SP_127	4,17
SP_120_100_14_3	SP_128	4,22
SP_120_100_14_4	SP_129	4,36
SP_120_100_14_5	SP_130	4,34
SP_120_100_14_6	SP_131	4,17
SP_120_100_14_7	SP_132	4,21

Tabela B.2-cd. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	E^c [MPa]
SP_120_100_15_1	SP_133	19,04
SP_120_100_15_2	SP_134	18,10
SP_120_100_15_3	SP_135	18,45
SP_120_100_15_4	SP_136	18,11
SP_120_100_15_5	SP_137	18,78
SP_120_100_15_6	SP_138	17,62
SP_120_100_15_7	SP_139	18,98
SP_120_100_16_1	SP_140	16,11
SP_120_100_16_2	SP_141	14,86
SP_120_100_16_3	SP_142	14,10
SP_120_100_16_4	SP_143	13,85
SP_120_100_16_5	SP_144	14,40
SP_120_100_16_6	SP_145	16,53
SP_120_100_16_7	SP_146	16,85
SP_120_100_17_1	SP_147	6,54
SP_120_100_17_2	SP_148	6,62
SP_120_100_17_3	SP_149	6,38
SP_120_100_17_4	SP_150	6,19
SP_120_100_17_5	SP_151	6,11
SP_120_100_17_6	SP_152	6,22
SP_120_100_17_7	SP_153	6,44
SP_120_100_18_1	SP_154	5,56
SP_120_100_18_2	SP_155	5,70
SP_120_100_18_3	SP_156	5,58
SP_120_100_18_4	SP_157	5,26
SP_120_100_18_5	SP_158	5,23
SP_120_100_18_6	SP_159	5,44
SP_120_100_18_7	SP_160	5,68

Tabela B.2-cd. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	E^c [MPa]
SP_120_100_19_1	SP_161	-
SP_120_100_19_2	SP_162	-
SP_120_100_19_3	SP_163	-
SP_120_100_19_4	SP_164	-
SP_120_100_19_5	SP_165	-
SP_120_100_19_6	SP_166	-
SP_120_100_19_7	SP_167	-
SP_120_100_20_1	SP_168	-
SP_120_100_20_2	SP_169	-
SP_120_100_20_3	SP_170	-
SP_120_100_20_4	SP_171	-
SP_120_100_20_5	SP_172	-
SP_120_100_20_6	SP_173	-
SP_120_100_20_7	SP_174	-
SP_160_100_9_1	SP_183	4,84
SP_160_100_9_2	SP_184	4,46
SP_160_100_9_3	SP_185	4,23
SP_160_100_9_4	SP_186	4,17
SP_160_100_9_5	SP_187	4,07
SP_160_100_9_6	SP_188	4,10
SP_160_100_9_7	SP_189	4,16
SP_160_100_9_8	SP_190	4,16
SP_160_100_10_1	SP_191	4,68
SP_160_100_10_2	SP_192	4,29
SP_160_100_10_3	SP_193	4,14
SP_160_100_10_4	SP_194	4,08
SP_160_100_10_5	SP_195	4,03
SP_160_100_10_6	SP_196	4,06
SP_160_100_10_7	SP_197	3,53
SP_160_100_10_8	SP_198	3,74

Tabela B.2-cd. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	E^c [MPa]
SP_160_100_13_1	SP_215	4,44
SP_160_100_13_2	SP_216	4,20
SP_160_100_13_3	SP_217	4,05
SP_160_100_13_4	SP_218	4,08
SP_160_100_13_5	SP_219	4,10
SP_160_100_13_6	SP_220	4,12
SP_160_100_13_7	SP_221	4,06
SP_160_100_14_1	SP_222	4,47
SP_160_100_14_2	SP_223	4,12
SP_160_100_14_3	SP_224	4,03
SP_160_100_14_4	SP_225	3,96
SP_160_100_14_5	SP_226	4,02
SP_160_100_14_6	SP_227	4,09
SP_160_100_14_7	SP_228	4,17
SP_160_100_15_1	SP_229	-
SP_160_100_15_2	SP_230	-
SP_160_100_15_3	SP_231	-
SP_160_100_15_4	SP_232	-
SP_160_100_15_5	SP_233	18,91
SP_160_100_15_6	SP_234	18,69
SP_160_100_15_7	SP_235	19,50
SP_160_100_16_1	SP_236	16,98
SP_160_100_16_2	SP_237	16,30
SP_160_100_16_3	SP_238	15,98
SP_160_100_16_4	SP_239	15,83
SP_160_100_16_5	SP_240	15,86
SP_160_100_16_6	SP_241	15,93
SP_160_100_16_7	SP_242	16,26

Tabela B.2-cd. Zestawienie modułu sprężystości podłużnej rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	E^c [MPa]
SP_160_100_17_1	SP_243	5,36
SP_160_100_17_2	SP_244	5,58
SP_160_100_17_3	SP_245	5,89
SP_160_100_17_4	SP_246	5,99
SP_160_100_17_5	SP_247	5,81
SP_160_100_17_6	SP_248	5,89
SP_160_100_17_7	SP_249	5,56
SP_160_100_18_1	SP_250	5,52
SP_160_100_18_2	SP_251	5,54
SP_160_100_18_3	SP_252	5,66
SP_160_100_18_4	SP_253	5,64
SP_160_100_18_5	SP_254	5,65
SP_160_100_18_6	SP_255	5,54
SP_160_100_18_7	SP_256	5,46
SP_160_100_19_1	SP_257	-
SP_160_100_19_2	SP_258	6,31
SP_160_100_19_3	SP_259	6,21
SP_160_100_19_4	SP_260	6,48
SP_160_100_19_5	SP_261	6,34
SP_160_100_19_6	SP_262	6,20
SP_160_100_19_7	SP_263	6,00
SP_160_100_20_1	SP_264	5,55
SP_160_100_20_2	SP_265	-
SP_160_100_20_3	SP_266	-
SP_160_100_20_4	SP_267	-
SP_160_100_20_5	SP_268	-
SP_160_100_20_6	SP_269	-
SP_160_100_20_7	SP_270	5,66

Tabela B.3. Zestawienie współczynnika Poissona ν_{zy} rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	ν_{zy}^c [-]
SP_120_100_13_1	SP_119	0,301
SP_120_100_13_2	SP_120	-
SP_120_100_13_3	SP_121	-
SP_120_100_13_4	SP_122	0,328
SP_120_100_13_5	SP_123	0,330
SP_120_100_13_6	SP_124	0,328
SP_120_100_13_7	SP_125	0,319
SP_120_100_14_1	SP_126	-
SP_120_100_14_2	SP_127	0,221
SP_120_100_14_3	SP_128	0,228
SP_120_100_14_4	SP_129	0,250
SP_120_100_14_5	SP_130	-
SP_120_100_14_6	SP_131	-
SP_120_100_14_7	SP_132	-

Tabela B.4. Gęstość rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	ρ^c [kg/m ³]
SP_120_100_14_1	SP_126	37,11
SP_120_100_14_2	SP_127	37,03
SP_120_100_14_3	SP_128	37,17
SP_120_100_14_4	SP_129	37,27
SP_120_100_14_5	SP_130	37,46
SP_120_100_14_6	SP_131	37,46
SP_120_100_14_7	SP_132	37,33
SP_120_100_16_1	SP_140	36,91
SP_120_100_16_2	SP_141	37,02
SP_120_100_16_3	SP_142	37,02
SP_120_100_16_4	SP_143	37,12
SP_120_100_16_5	SP_144	36,88
SP_120_100_16_6	SP_145	36,86
SP_120_100_16_7	SP_146	36,96
SP_120_100_18_1	SP_154	37,07
SP_120_100_18_2	SP_155	36,98
SP_120_100_18_3	SP_156	37,18
SP_120_100_18_4	SP_157	37,22
SP_120_100_18_5	SP_158	37,09
SP_120_100_18_6	SP_159	37,30
SP_120_100_18_7	SP_160	37,35
SP_120_100_20_1	SP_168	37,11
SP_120_100_20_2	SP_169	37,05
SP_120_100_20_3	SP_170	37,05
SP_120_100_20_4	SP_171	36,92
SP_120_100_20_5	SP_172	36,92
SP_120_100_20_6	SP_173	36,70
SP_120_100_20_7	SP_174	36,82

Tabela B.4-cd. Gęstość rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	ρ^c [kg/m ³]
SP_160_100_14_1	SP_222	38,81
SP_160_100_14_2	SP_223	38,92
SP_160_100_14_3	SP_224	38,69
SP_160_100_14_4	SP_225	38,76
SP_160_100_14_5	SP_226	38,65
SP_160_100_14_6	SP_227	38,68
SP_160_100_14_7	SP_228	38,75
SP_160_100_16_1	SP_236	38,59
SP_160_100_16_2	SP_237	38,64
SP_160_100_16_3	SP_238	38,62
SP_160_100_16_4	SP_239	38,52
SP_160_100_16_5	SP_240	38,56
SP_160_100_16_6	SP_241	38,22
SP_160_100_16_7	SP_242	38,21
SP_160_100_18_1	SP_250	38,66
SP_160_100_18_2	SP_251	38,39
SP_160_100_18_3	SP_252	38,44
SP_160_100_18_4	SP_253	38,27
SP_160_100_18_5	SP_254	38,32
SP_160_100_18_6	SP_255	38,35
SP_160_100_18_7	SP_256	38,34
SP_160_100_20_1	SP_264	38,29
SP_160_100_20_2	SP_265	38,33
SP_160_100_20_3	SP_266	38,36
SP_160_100_20_4	SP_267	38,31
SP_160_100_20_5	SP_268	38,38
SP_160_100_20_6	SP_269	38,27
SP_160_100_20_7	SP_270	38,20

Tabela B.5. Zestawienie modułu ścinania G_{xz}^c rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	G_{xz}^c [MPa]
SP_120_1000_1_1	SP_47	2,93
SP_120_1000_1_2	SP_48	2,84
SP_120_1000_1_3	SP_49	2,80
SP_120_1000_1_4	SP_50	2,87
SP_120_1000_1_5	SP_51	2,87
SP_120_1000_1_6	SP_52	2,79
SP_120_1000_1_7	SP_53	2,77
SP_120_1000_1_8	SP_54	2,84
SP_120_1000_2_1	SP_55	2,85
SP_120_1000_2_2	SP_56	2,79
SP_120_1000_2_3	SP_57	2,81
SP_120_1000_2_4	SP_58	2,87
SP_120_1000_2_5	SP_59	2,79
SP_120_1000_2_6	SP_60	2,77
SP_120_1000_2_7	SP_61	2,70
SP_120_1000_2_8	SP_62	2,79
SP_160_1000_1_1	SP_63	2,83
SP_160_1000_1_2	SP_64	2,82
SP_160_1000_1_3	SP_65	2,77
SP_160_1000_1_4	SP_66	2,76
SP_160_1000_1_5	SP_67	2,76
SP_160_1000_1_6	SP_68	2,84
SP_160_1000_1_7	SP_69	2,79
SP_160_1000_1_8	SP_70	2,89
SP_160_1000_2_1	SP_71	2,99
SP_160_1000_2_2	SP_72	2,82
SP_160_1000_2_3	SP_73	2,77
SP_160_1000_2_4	SP_74	2,76
SP_160_1000_2_5	SP_75	2,78
SP_160_1000_2_6	SP_76	2,73
SP_160_1000_2_7	SP_77	2,79
SP_160_1000_2_8	SP_78	2,89

Tabela B.6. Zestawienie modułu ścinania G_{yz}^c rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	G_{yz}^c [MPa]
SP_120_100_1_1	SP_79	1,80
SP_120_100_2_1	SP_80	1,74
SP_120_100_3_1	SP_81	1,84
SP_120_100_4_1	SP_82	1,84
SP_120_100_5_1	SP_83	1,85
SP_120_100_6_1	SP_84	1,86
SP_120_100_7_1	SP_85	1,82
SP_160_100_1_1	SP_175	1,78
SP_160_100_2_1	SP_176	1,75
SP_160_100_3_1	SP_177	1,76
SP_160_100_4_1	SP_178	1,78
SP_160_100_5_1	SP_179	1,83
SP_160_100_6_1	SP_180	1,80
SP_160_100_7_1	SP_181	1,79
SP_160_100_8_1	SP_182	1,82

Tabela B.7. Zestawienie wytrzymałości na ścinania f_{xz}^e rdzenia.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	f_{xz}^e [MPa]
SP_120_1000_1_1	SP_47	89,97
SP_120_1000_1_2	SP_48	91,61
SP_120_1000_1_3	SP_49	91,66
SP_120_1000_1_4	SP_50	89,03
SP_120_1000_1_5	SP_51	84,02
SP_120_1000_1_6	SP_52	87,18
SP_120_1000_1_7	SP_53	88,38
SP_120_1000_1_8	SP_54	89,43
SP_120_1000_2_1	SP_55	87,04
SP_120_1000_2_2	SP_56	88,15
SP_120_1000_2_3	SP_57	89,60
SP_120_1000_2_4	SP_58	86,79
SP_120_1000_2_5	SP_59	81,59
SP_120_1000_2_6	SP_60	85,40
SP_120_1000_2_7	SP_61	86,86
SP_120_1000_2_8	SP_62	86,13
SP_160_1000_1_1	SP_63	71,96
SP_160_1000_1_2	SP_64	72,16
SP_160_1000_1_3	SP_65	72,93
SP_160_1000_1_4	SP_66	73,32
SP_160_1000_1_5	SP_67	72,92
SP_160_1000_1_6	SP_68	73,50
SP_160_1000_1_7	SP_69	72,39
SP_160_1000_1_8	SP_70	74,29
SP_160_1000_2_1	SP_71	75,89
SP_160_1000_2_2	SP_72	75,87
SP_160_1000_2_3	SP_73	76,21
SP_160_1000_2_4	SP_74	76,10
SP_160_1000_2_5	SP_75	76,44
SP_160_1000_2_6	SP_76	78,44
SP_160_1000_2_7	SP_77	76,66
SP_160_1000_2_8	SP_78	77,43

Załącznik C – wyniki badań skręcania paneli warstwowych

Tabela C.1. Zestawienie sztywności skrętnej paneli warstwowych.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	GI_T [kNm ²]
SP_120_4100_1_1	SP_1_1	104,25
SP_120_4100_1_1	SP_1_2	111,20
SP_120_4100_3_1	SP_3_1	113,47
SP_120_4100_3_1	SP_3_2	116,45
SP_120_4100_5_1	SP_5_1	131,10
SP_120_4100_5_1	SP_5_2	113,88
SP_120_4100_7_1	SP_7_1	123,22
SP_120_4100_7_1	SP_7_2	121,68
SP_120_4100_8_1	SP_8_1	15,94
SP_120_4100_8_1	SP_8_2	16,47
SP_120_4100_8_2	SP_9_1	16,02
SP_120_4100_8_2	SP_9_2	-
SP_120_4100_10_1	SP_12_1	15,94
SP_120_4100_10_1	SP_12_2	15,13
SP_120_4100_10_2	SP_13_1	16,06
SP_120_4100_10_2	SP_13_2	15,85
SP_120_4100_12_1	SP_16_1	2,35
SP_120_4100_12_1	SP_16_2	2,07
SP_120_4100_12_2	SP_17_1	1,44
SP_120_4100_12_2	SP_17_2	1,59
SP_120_4100_12_3	SP_18_1	1,55
SP_120_4100_12_3	SP_18_2	1,73
SP_120_4100_12_4	SP_19_1	1,58
SP_120_4100_12_4	SP_19_2	1,57

Tabela C.1-cd. Zestawienie sztywności skrętnej paneli warstwowych.

Pełna nazwa próbki	Skrócona nazwa próbki	GI_T [kNm ²]
SP_160_4100_1_1	SP_24_1	146,14
SP_160_4100_1_1	SP_24_2	157,39
SP_160_4100_3_1	SP_26_1	167,76
SP_160_4100_3_1	SP_26_2	168,12
SP_160_4100_5_1	SP_28_1	157,75
SP_160_4100_5_1	SP_28_2	158,73
SP_160_4100_7_1	SP_30_1	154,83
SP_160_4100_7_1	SP_30_2	170,99
SP_160_4100_8_1	SP_31_1	23,44
SP_160_4100_8_1	SP_31_2	24,49
SP_160_4100_8_2	SP_32_1	22,30
SP_160_4100_8_2	SP_32_2	22,91
SP_160_4100_10_1	SP_35_1	21,07
SP_160_4100_10_1	SP_35_2	21,85
SP_160_4100_10_2	SP_36_1	18,49
SP_160_4100_10_2	SP_36_2	18,65
SP_160_4100_12_1	SP_39_1	2,36
SP_160_4100_12_1	SP_39_2	2,31
SP_160_4100_12_2	SP_40_1	2,61
SP_160_4100_12_2	SP_40_2	2,55
SP_160_4100_12_3	SP_41_1	2,01
SP_160_4100_12_3	SP_41_2	2,17
SP_160_4100_12_4	SP_42_1	2,53
SP_160_4100_12_4	SP_42_2	2,54