

**Politechnika Poznańska**  
**Wydział Inżynierii Mechanicznej**  
**Zakład Inżynierii Produkcji**



PRACA DOKTORSKA

*Optymalizacja parametrów procesu technologicznego  
chłodnicy powietrza w celu minimalizacji pozostałości  
topnika po procesie lutowania w kontrolowanej  
atmosferze*

**mgr inż. Sławomir Andrzej NADOLNY**

**Dyscyplina naukowa: Inżynieria mechaniczna**

Promotor:

**prof. dr hab. inż. Adam HAMROL**

Promotor pomocniczy:

**dr inż. Michał ROGALEWICZ**

Poznań 2025

# Spis treści

Nomenklatura .....	4
Streszczenie .....	5
Abstract .....	6
Wprowadzenie.....	7
1. Wymienniki ciepła.....	1
1.1 Znaczenie wymienników ciepła .....	1
1.2 Kompaktowe chłodnice.....	2
1.3 Chłodnica powietrza w układzie doładowania.....	4
2. Proces technologiczny aluminiowej chłodnicy powietrza.....	8
2.1 Schemat procesu.....	8
2.2 Materiał wejściowy .....	9
2.3 Proces formowania blach .....	10
2.4 Proces pakietowania .....	13
2.5 Proces nanoszenia topnika .....	14
2.6 Proces montażu .....	19
2.7 Proces lutowania .....	21
2.8 Proces kontroli.....	26
3. Pozostałość topnika w chłodnicy powietrza.....	30
3.1 Opis problemu i przegląd literatury .....	30
3.2 Czynniki w procesie technologicznym wpływające na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania chłodnicy powietrza.....	33
4. Cel, zadania i metody pomiarowe .....	37
4.1 Wnioski z analizy literatury .....	37
4.2 Cel, teza i etapy pracy .....	38
4.3 Metody badań.....	39
4.4 Metody pomiaru i analizy .....	39

4.5	Plan badań .....	47
5.	Opracowanie metody pomiaru ilości pozostałości topnika .....	49
5.1	Założenia .....	49
5.2	Spektrofotometria .....	52
5.3	Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM-EDS).....	54
5.4	Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC).....	58
5.5	Podsumowanie opracowanych metod oceny ilości pozostałości topnika .....	62
6.	Optymalizacja procesu technologicznego .....	64
6.1	Etapy badania .....	64
6.2	Badanie charakterystyki warstwy topnika.....	64
6.3	Badanie wpływu charakterystyki docisku na stopień zlutowania .....	68
6.4	Badanie wpływu konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na warunki termiczne procesu lutowania .....	70
6.5	Badanie wpływu gramatury topnika i temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika .....	74
6.6	Podsumowanie badań optymalizacyjnych .....	81
7.	Zastosowanie zaleceń w praktyce przemysłowej .....	85
7.1	Nowa maszyna do nanoszenia topnika.....	85
7.2	Symulacja procesu nanoszenia topnika.....	86
7.3	Analiza wyników eksperymentu .....	88
7.4	Próby technologiczne nowej maszyny do nanoszenia topnika .....	91
8.	Podsumowanie i wnioski .....	93
	Podziękowanie .....	95
	Literatura .....	95
	Spis rysunków .....	102
	Spis tabel .....	104

## Nomenklatura

<b>CAB</b>	Lutowanie w kontrolowanej atmosferze (ang. Controlled Atmosphere Brazing)
<b>FMEA</b>	Analiza przyczyn i skutków wad (ang. Process Failure Mode and Effects Analysis)
<b>AAS</b>	Atomowa spektrometria absorpcyjna (ang. Atomic Absorbtion Spectrometry)
<b>SEM</b>	Skaningowa mikroskopia elektronowa (ang. Scanning Electron Microscopy)
<b>EDS</b>	Spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii (ang. Energy Dispersive X-ray)
<b>(F+K)%</b>	Miara sumy stężenia pierwiastków fluoru i potasu wykorzystywana w pomiarach metodą SEM-EDS
<b>RLM</b>	Mikroskopia światła odbitego (ang. Reflected Light Microscopy)
<b>DIC</b>	Kontrast różnicowo-interferencyjny (ang. Differential Interference Contrast)
<b>Px%</b>	Miara ilości pozostałości topnika wykorzystywana w pomiarach metodą RLM-DIC
<b><math>\alpha</math></b>	Współczynnik korekty jasności zdjęć wykorzystywany w pomiarach metodą RLM-DIC
<b>TTC<sub>PA</sub></b>	Miara pola powierzchni wykresu zmian temperatury w czasie stosowana w metodzie fazowej analizy profilu lutowania (ang. Time-Temperature Cycle Phase Area)
<b>Stopień zlutowania</b>	Występowanie spoin lutowniczych pomiędzy komponentami w odniesieniu do wymagań dla danego wyrobu
<b>Profil lutowania</b>	Wykres zmian temperatury w czasie (ang. Heating Profile)

## Streszczenie

Niniejsza rozprawa podejmuje tematykę optymalizacji procesu technologicznego aluminiowej chłodnicy powietrza w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski, z uwzględnieniem kryteriów jakościowych, dotyczących obecności spoin lutowniczych oraz pozostałości po topniku lutowniczym. Celem pracy jest określenie warunków prowadzenia procesu, przy których ilość pozostałości topnika zostanie ograniczona (w stosunku do procesu obecnego) przy jednoczesnym spełnieniu stopnia zlutowania (obecności wymaganych spoin lutowniczych).

Przeprowadzona została dogłębna analiza procesu technologicznego chłodnicy powietrza, ze szczególnym uwzględnieniem procesów nanoszenia topnika, montażu oraz lutowania. Dokonano identyfikacji czynników mających wpływ na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika.

Opracowano innowacyjne metody oceny ilości pozostałości topnika:

- SEM-EDS - łączącą skaningową mikroskopię elektronową (SEM) z analizą składu chemicznego (EDS), pozwalającą na obserwację cząstek pozostałości topnika,
- RLM-DIC - wykorzystującą mikroskopię światła odbitego (RLM) z kontrastem różnicowo-interferencyjnym (DIC), pozwalającą na wykrywanie pozostałości topnika dzięki różnicom w odbijaniu światła.

Przeprowadzono badania:

- charakterystyki warstwy nanoszonego topnika dotyczące oceny jej równomierności,
- charakterystyki elementów dociskowych ramki lutowniczej na stopień zlutowania,
- wpływu konfiguracji wsadu w piecu na warunki termiczne procesu lutowania,
- wpływu gramatury topnika i temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika.

Przeprowadzono symulację procesu nanoszenia topnika oraz eksperyment umożliwiający identyfikację kluczowych czynników wpływających na równomierność pokrycia jego warstwy.

Na podstawie wyników badań opracowano zalecenia zmniejszenia gramatury topnika na pokrywach chłodnicy powietrza poniżej 3,8 [g/m<sup>2</sup>], zwiększenia maksymalnej temperatury lutowania do 606 [°C] oraz utrzymania szczelin montażowych w tolerancji 0,2 [mm]. Potencjał wdrożeniowy zaproponowanych rozwiązań technologicznych umożliwia ograniczenie ilości pozostałości topnika o 35% oraz wzrost stopnia zlutowania o 24%. Wskazano także kierunki dalszych badań, m.in. standaryzację opracowanych metod pomiarowych i optymalizację konstrukcji ramek lutowniczych.

## Abstract

This dissertation addresses the optimization of the technological process for aluminum charge air coolers at MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski, considering quality criteria related to the presence of brazed joints and flux residues. The aim of the study is to determine process conditions under which the amount of flux residue can be reduced (compared to the current process) while maintaining the required degree of brazing (presence of required brazed joints).

A thorough analysis of the coolers technological process was conducted, with particular emphasis on flux application, assembly, and brazing operations. Factors influencing the degree of brazing and the amount of flux residue were identified.

Innovative methods for evaluating flux residue were developed:

- SEM-EDS – combining Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), enabling observation of flux residue particles,
- RLM-DIC – using Reflected Light Microscopy (RLM) with Differential Interference Contrast (DIC), allowing detection of flux residues based on differences in light reflection.

The following studies were carried out:

- Analysis of the flux layer characteristics, focusing on its uniformity,
- Investigation of the effect of brazing jig pressure on joint formation,
- Study of the influence of load configuration on thermal conditions during brazing,
- Examination of the effect of flux grammage and brazing temperature on joint quality and the amount flux residue.

A simulation of the flux application process was carried out, along with an experiment aimed at identifying key factors influencing the uniformity of the flux layer coverage.

Based on the research results, recommendations were developed to reduce the flux mass on air cooler covers below 3.8 [g/m<sup>2</sup>], increase the maximum brazing temperature to 606 [°C], and maintain assembly gaps within a tolerance of 0.2 [mm]. The implementation potential of the proposed technological solutions enables a 35% reduction in the amount of flux residue and a 24% improvement in degree of brazing. Directions for further research were also indicated, including standardization of the developed measurement methods and optimization of brazing jig design.

## Wprowadzenie

Praca była prowadzona przy współpracy z firmą MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski. Jej przedmiotem jest proces technologiczny aluminiowych chłodnic powietrza stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Chłodnice te muszą charakteryzować się wysoką niezawodnością, trwałością oraz szczelnością. Jednym z czynników wpływających na spełnienie tych wymagań jest zapewnienie odpowiednich spoin lutowniczych pomiędzy komponentami, określane jako stopień zlutowania. Na jakość spoin wpływają m. in. geometria komponentów, proces ich montażu, ilość spoiwa i topnika oraz parametry procesu lutowania.

Ze względu na kompaktową konstrukcję chłodnicy powietrza, pozostałość stosowanego topnika może wchodzić w reakcję z cieczą chłodniczą, prowadząc do jej żelowania oraz utraty właściwości przepływowych i funkcjonalnych. W konsekwencji może to skutkować zatrzymaniem funkcji chłodzenia silnika, a tym samym jego przegrzaniem. W związku z tym, w procesie technologicznym chłodnic powietrza coraz większy nacisk jest stawiany na obniżanie ilości stosowanego topnika. Jego ograniczanie przekłada się jednak na wzrost liczby wyrobów niespełniających wymaganego stopnia zlutowania.

Niezapewnienie obecności wymaganych spoin lutowniczych pomiędzy komponentami wpływa negatywnie na właściwości funkcjonalne chłodnicy powietrza. Tego typu wady (poza nieszczelnością) mogą zostać wykryte dopiero na etapie eksploatacji, co oznacza kosztowne działania reklamacyjne.

Aby ograniczyć ilość odpadów, a tym samym koszty związane ze złomowaniem wyrobów wadliwych, konieczne jest znalezienie kompromisu, który pozwoli na minimalizację zarówno liczby wad związanych z niespełnieniem stopnia zlutowania, jak i zbyt dużej ilości pozostałości topnika. W związku z tym niezbędne jest wyznaczenie granicy minimalnej gramatury topnika, która przy zachowaniu optymalnych parametrów procesów poprzedzających pozwala na powstanie wymaganych spoin lutowniczych.

Badania jakości połączeń wewnątrz wymiennika oraz ilości pozostałości topnika są badaniami niszczącymi. Obecnie stosowana metoda pomiaru ilości pozostałości topnika jest kosztowna, przy jednocześnie ograniczonej informacji zwrotnej na temat jego formy wewnątrz chłodnicy powietrza. Metoda ta jest również czasochłonna, co dodatkowo ogranicza możliwość jej zastosowania w warunkach produkcji seryjnej. W związku z tym, na potrzeby badań przemysłowych niezbędne było opracowanie szybkiej i taniej metody oceny ilości pozostałości topnika.

Praca składa się z wprowadzenia oraz 8 rozdziałów:

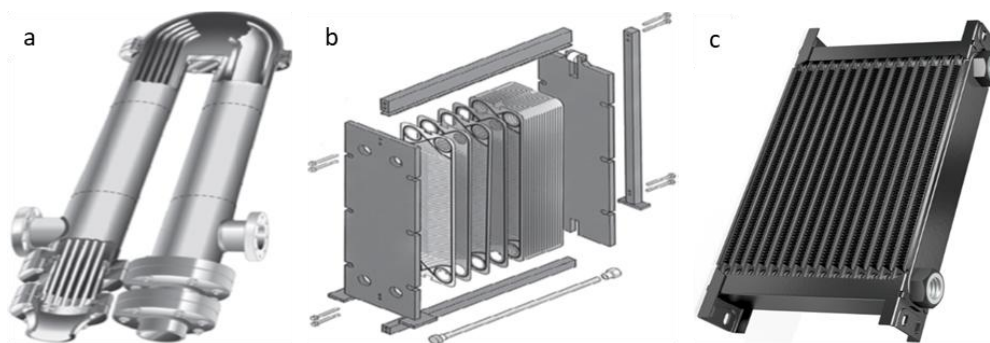
- Rozdział 1 - opisuje rodzaje oraz zastosowanie wymienników ciepła, a w szczególności chłodziaczy powietrza stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym.
- Rozdział 2 - zawiera opis procesu technologicznego chłodziaczy powietrza ze szczególnym zwróceniem uwagi na procesy nanoszenia topnika, montażu oraz lutowania w kontrolowanej atmosferze. Opisane są także wymagania jakościowe stawiane chłodziaczy powietrza oraz podstawowe sposoby kontroli ich spełnienia.
- Rozdział 3 - jest poświęcony definicji problemu pozostałości topnika, jego analizie literaturowej oraz związanym z nim związkom przyczynowo - skutkowym.
- Rozdział 4 - wyznacza cel naukowy i wdrożeniowy pracy, tezę oraz zadania badawcze. Opisuje zastosowane metody badawcze, pomiarowe i analityczne.
- Rozdział 5 - przedstawia opracowane autorskie metody pomiarowe ilości i formy pozostałości topnika.
- Rozdział 6 - opisuje badania nad zdefiniowanym problemem, których celem jest optymalizacja procesu technologicznego. Wyznacza zalecenia wdrożeniowe.
- Rozdział 7 - przedstawia działania umożliwiające spełnienie zaleceń wdrożeniowych.
- Rozdział 8 - zawiera podsumowanie oraz końcowe wnioski: poznawcze, praktyczne, wdrożeniowe, a także rekomendacje dotyczące dalszych kierunków badań.

# 1. Wymienniki ciepła

## 1.1 Znaczenie wymienników ciepła

Wymienniki ciepła znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, takich jak przemysł chemiczny, energetyczny, spożywczy, środowiskowy, odzysku ciepła, klimatyzacyjny oraz chłodniczy [1]. Szacuje się, że w krajach rozwiniętych ok. 15% zużycia energii elektrycznej przypada na działanie systemów wymiany ciepła [2]. W 2024 r. na rynku europejskim wprowadzono rozporządzenie 2024/1781 w sprawie ekoprojektu, wymuszając m.in. wydłużenie żywotności oraz zwiększenie efektywności energetycznej klimatyzatorów [3]. Podkreśla to jak istotne zagadnienie stanowi zrozumienie działania tych wyrobów, w tym optymalizacja ich wydajności.

Wymienniki ciepła różnią się zarówno cechami konstrukcyjnymi (gabaryty i stosowane materiały), jak i zasadą działania, czyli mechanizmem wymiany ciepła. Można je podzielić ze względu na typ konstrukcji, których przykłady zostały przedstawione na rysunku 1.1.



Rysunek 1.1. Przykłady konstrukcji wymienników ciepła: a) rurowe, b) płytkowe, c) niskotemperaturowe [4, 5]

Szczególne znaczenie wymienników ciepła obserwuje się w przemyśle motoryzacyjnym. W celu bardziej efektywnego zarządzania układem chłodzenia, w nowoczesnych pojazdach samochodowych wykorzystywane są działające niezależnie, równoległe układy chłodzenia składające się z różnych typów chłodziw. Minimalizuje to ryzyko awarii poszczególnych podsystemów i zwiększa efektywność zarządzania ciepłem [6]. Ze względu na zróżnicowane wymiary oraz masę wymienników ciepła, mają one istotny wpływ na projektowanie konstrukcji pojazdów. Wymuszają dostosowanie układu przestrzennego oraz kształtu nadwozia do wymagań ich montażu i efektywnego działania, co wpływa również na charakterystyki aerodynamiczne [7].

Od końca XIX wieku wymienniki ciepła stosowane w przemyśle motoryzacyjnym były wykonywane głównie z mosiądzu, z zastosowaniem procesu lutowania miękkiego, którego temperatura nie przekraczała 450°C [8]. W celu zapewnienia szczelnego połączenia stosowane były spoiwa lutownicze<sup>1</sup> na osnowie Sn-Pb [9]. Jednak rozwój przemysłu motoryzacyjnego wymagał od wymienników ciepła redukcji objętości i wagi, przy jednoczesnym nacisku na zwiększanie ich wydajności [10]. W tym celu już od 1950 r. na popularności zyskały wymienniki ciepła wykonane z aluminium, a ich zastosowanie rosło wraz z rozwojem technologii ich produkcji [11].

Wybór aluminium jako materiału konstrukcyjnego wynika z jego niskiej masy właściwej, wysokiej wytrzymałości, odporności na korozję oraz korzystnych właściwości obróbkowych. Materiał ten sprawdza się w wymagających warunkach eksploatacyjnych, takich jak wilgotne środowisko, przy obecności wibracji, zmiennych temperatur i ciśnień roboczych [12]. Wysoka plastyczność, pojemność i przewodność cieplna aluminium poprawiają właściwości użytkowe tych wymienników ciepła, jednocześnie sprzyjając efektywnemu procesowi lutowania [11].

## 1.2 Kompaktowe chłodnice

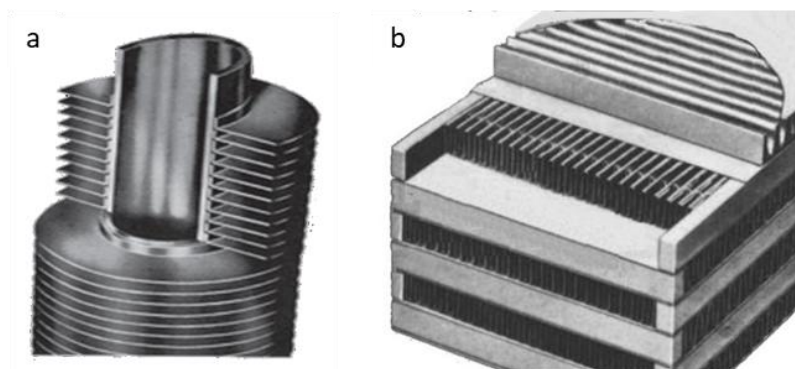
Dalszy rozwój wymienników ciepła wynika m.in. z wprowadzonej w 1999 r. międzynarodowej normy specyfikacji technicznej IATF 16949<sup>2</sup> [13]. Norma ta zawiera m. in. wymagania dotyczące doskonalenia wydajności cieplnej samochodowych wymienników ciepła. Wymaganie to może zostać zrealizowane poprzez redukcję ich gabarytów, co jest możliwe dzięki zastosowaniu kompaktowych chłodnic. Ich lekka konstrukcja zapewnia dużą powierzchnię wymiany ciepła na jednostkę objętości [14]. Kompaktowe chłodnice znajdują zastosowanie nie tylko w branży motoryzacyjnej, ale również w przemyśle lotniczo-kosmicznym, kriogenicznym, elektronicznym oraz systemach odzyskiwania i konwersji energii [14, 15].

Technologia kompaktowych chłodnic znana jest już od lat 60. XX wieku [16]. Jej rozwój doprowadził do powstania wielu odmian chłodnic, takich jak skraplacze, parowniki, chłodnice oleju czy chłodnice międzystopniowe [14]. Różnice konstrukcyjne pozwalają na klasyfikację tych urządzeń np. ze względu na typ kanału przepływowego. Wyróżnić można konstrukcje wykorzystujące rurki lub belki w połączeniu z różnymi typami żeber: prostymi, falistymi lub wykonanymi ze zwijanej taśmy, których przykłady zostały przedstawione na rysunku 1.2.

---

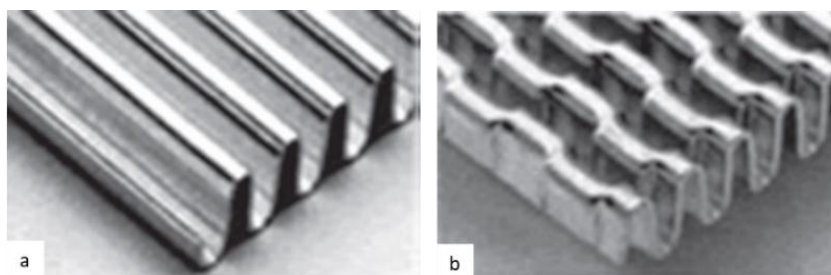
<sup>1</sup> Spoiwa lutownicze zostały opisane w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

<sup>2</sup> Norma IATF 16949 była aktualizowana w 2016 r.



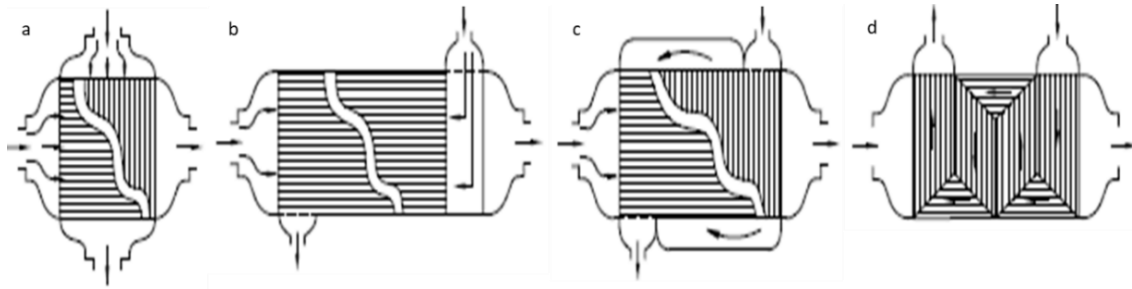
Rysunek 1.2. Kompaktowe chłodnice wymiany ciepła: a) konstrukcja rurka-żebro, b) konstrukcja belka-zwijana taśma [4]

Nowoczesne kompaktowe chłodnice pracują w zakresie temperatur od ok. 100 do 275 [°C] oraz ciśnień od 2,5 do 3,5 [bar] [12]. Osiągnięcie właściwego bilansu cieplnego w takich warunkach pracy, bez konieczności niepożądanego zwiększania gabarytów chłodnicy, możliwe jest na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest wzrost efektywnej powierzchni konwekcyjnej [17]. Uzyskuje się to dzięki zmianie geometrii (w tym chropowatości) zwijanej taśmy, której przykłady zostały przedstawione na rysunku 1.3.



Rysunek 1.3. Zwijana taśma stosowana w kompaktowych chłodnicach: a) gładka, b) ząbkowana [4]

Drugim sposobem osiągnięcia właściwego bilansu cieplnego kompaktowych chłodnic jest zmiana ułożenia walcowanej taśmy, w celu wywołania zaburzeń przepływu cieczy chłodniczej. Osiągnięcie przepływów wtórnych i turbulencji wewnątrz układu chłodzenia polepsza mieszanie cieczy chłodniczej oraz zwiększa równomierność rozprowadzenia temperatury [18]. Tak ułożoną zwijaną taśmę nazywa się „zaburzaczem” [4]. Zastosowanie zaburzaczy zwiększa stosunek powierzchni wymiany ciepła do objętości przepływającego czynnika chłodniczego: powyżej 700 [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] dla przepływu gazu [7] oraz 300 [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] dla przepływu cieczy [19]. W przypadku osiągnięcia wartości 10 000 [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] wymiennik ciepła klasyfikowany jest jako mikrowymiennik [14]. W kompaktowych chłodnicach rozróżnia się również kierunek przepływu cieczy chłodniczej, co zostało przedstawione na rysunku 1.4.



Rysunek 1.4. Podział kompaktowych wymienników ciepła ze względu na kierunek przepływu czynnika chłodniczego: a) krzyżowy, b) przeciwpądowy, c) krzyżowy przeciwpądowy, d) krzyżowy przeciwpądowy z wewnętrznym zawrotem [4]

Wybór geometrii oraz rodzaju przepływu dla kompaktowej chłodnicy jest zależny od jej temperatury roboczej, ciśnienia pracy oraz stosowanej cieczy chłodniczej. Muszą być one dopasowane do potrzeb wydajności cieplnej aby uniknąć tarcia, które jest odpowiedzialne za 90% strat ciśnienia w układzie chłodzenia [14].

### 1.3 Chłodnica powietrza w układzie doładowania

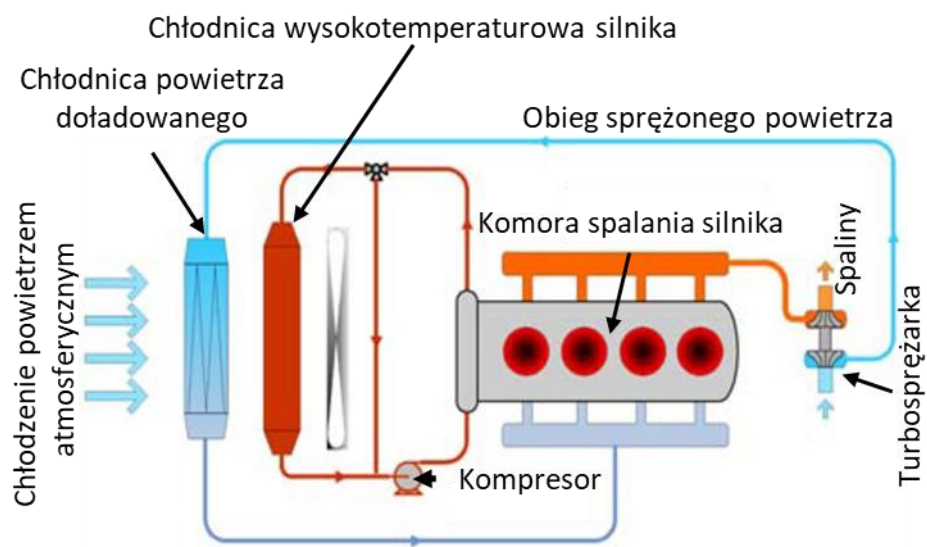
Jednym ze specyficznych typów kompaktowych chłodnic samochodowych są chłodnice powietrza zintegrowane z układami doładowania w silnikach spalinowych. Ich rozwój nabiera szczególnego znaczenia w świetle uchwalonej w roku 2023 r. ustawy (EU) 2019/851 [20] ustalającej normy emisji CO<sub>2</sub> dla przemysłu motoryzacyjnego na lata 2025-2029, a następnie ich zaostrzenie o blisko połowę w kolejnym okresie lat 2030-2034. Jednym ze sposobów spełnienia tych wymagań jest rozwój doładowania w silnikach spalinowych. Pozwala to zmniejszyć rozmiary jednostki napędowej dzięki redukcji objętości cylindrów o 25%. W ten sposób możliwe jest ograniczenie zużycia paliwa nawet o 10%, bezpośrednio obniżając emisję CO<sub>2</sub> [21]. Istotą stosowania doładowania w silnikach jest odzysk energii gazów wylotowych silnika, które osiągają temperatury w zakresie 820-850 [°C] dla silników diesla oraz 950-1050 [°C] dla silników benzynowych. Tak wysokie temperatury wymagają zastosowania chłodnic powietrza o wysokiej efektywności chłodzenia. Ze względu na różne konstrukcje układu doładowania oraz układu połączenia tych chłodnic, w literaturze technicznej stosowane są różne nazwy:

- Chłodnica międzystopniowa (ang. Intercooler lub Inter-stage cooler) - często stosowana nazwa chłodnicy umieszczonej pomiędzy kompresorem a komorą spalania silnika. Określenie to dodatkowo może wyróżniać chłodnice znajdujące się pomiędzy układem sekwencyjnym lub równoległym turbosprężarek oraz pomiędzy turbosprężarkami niskiego i wysokiego ciśnienia [21, 22, 23].

- Chłodnica końcowa (ang. Aftercooler lub Final cooler) – występuje pomiędzy kompresorem, a komorą spalania. Określenie to podkreśla dodatkową funkcję zapobiegania kondensacji wilgoci w układzie chłodzenia [4, 24].
- Chłodnica powietrza doładowanego (ang. Charge air cooler) – najczęściej stosowana nazwa ogólna na chłodnice połączone z kompresorem w układzie doładowania [4, 25].

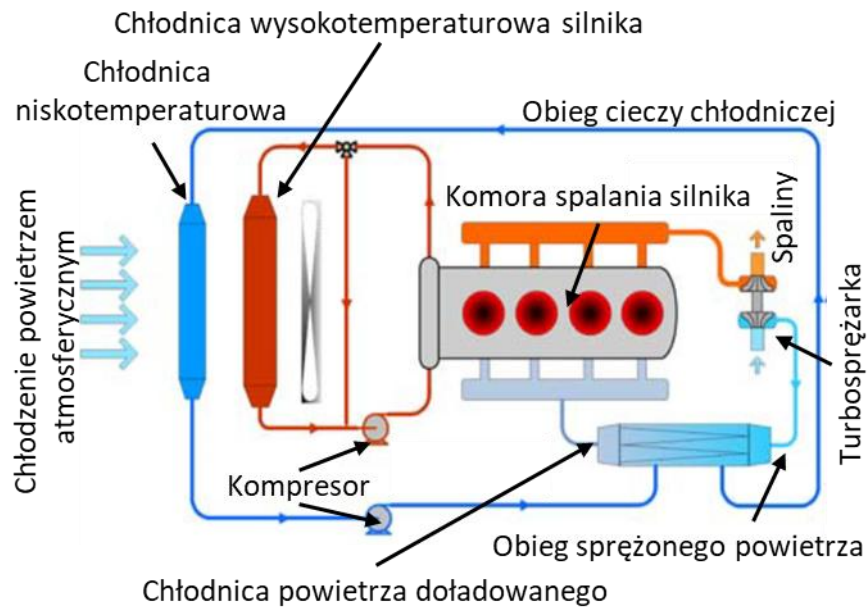
Chłodnice powietrza doładowanego można podzielić pod względem stosowanego czynnika chłodniczego na dwa układy:

- Układ powietrze-powietrze – stosowanym czynnikiem chłodniczym jest powietrze. Zwane są bezpośrednimi, ze względu na bezpośrednie połączenie chłodnicy powietrza zarówno z turbosprężarką, jak i komorą spalania silnika, co zostało przedstawione na rysunku 1.5. Są powszechnie stosowane w samochodach osobowych i lekkich pojazdach użytkowych [26].



Rysunek 1.5. Chłodnica powietrza doładowanego w układzie powietrze-powietrze (opracowanie własne na podstawie [27])

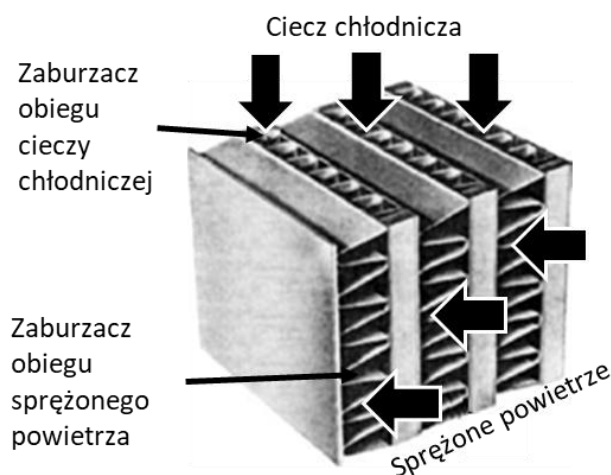
- Układ ciecz-powietrze – stosowanym czynnikiem chłodniczym jest ciecz. Zwane są pośrednimi ze względu na połączenie z chłodnicą niskotemperaturową. Wymagają zastosowania dodatkowego obiegu chłodzenia z kompresorem, co zostało przedstawione na rysunku 1.6. Znajdują zastosowanie w układach chłodzenia, gdzie istotne jest utrzymanie wysokiego ciśnienia roboczego [28].



Rysunek 1.6. Chłodnica powietrza doładowanego w układzie ciecz-powietrze (opracowanie własne na podstawie [27])

Zastosowanie dodatkowego obiegu chłodzenia pozwala na zwiększenie wydajności cieplnej przy jednoczesnym zmniejszeniu rozmiarów, w efekcie uzyskując istotną redukcję masy [29] Zmniejszenie gabarytów chłodnicy powietrza przekłada się na większą elastyczność jej rozmieszczenia pod maską pojazdu. Ułożenie blisko silnika umożliwia ograniczenie strat ciśnienia nawet o ~50% [11].

Zapewnienie szczelności chłodnicy powietrza doładowanego, stosowanej w układzie ciecz-powietrze, jest możliwe dzięki zamkniętemu obiegowi cieczy chłodniczej. Można go uzyskać poprzez zastosowanie pakietu wymiany ciepła przedstawionego na rysunku 1.7.



Rysunek 1.7. Pakiet wymiany ciepła stosowany w pośredniej chłodnicy powietrza (opracowanie własne na podstawie [30])

Pakiet wymiany ciepła jest zbudowany z naprzemiennie ułożonych warstw zaburzaczy i rurek [31]. Jego jednolita geometria pozwala na bezpośrednie skalowanie chłodnicy powietrza w zależności od wymagań funkcjonalnych [15]. Możliwe jest to poprzez zwiększanie ilości kompletów rurek z zaburzaczem oraz zwiększanie ich długości i szerokości. Pakiet wymiany ciepła znajduje się w obudowie, składającej się z płyt sitowych (obieg sprężonego powietrza) oraz pokryw (obieg cieczy chłodniczej), co zostało przedstawione na rysunku 1.8.



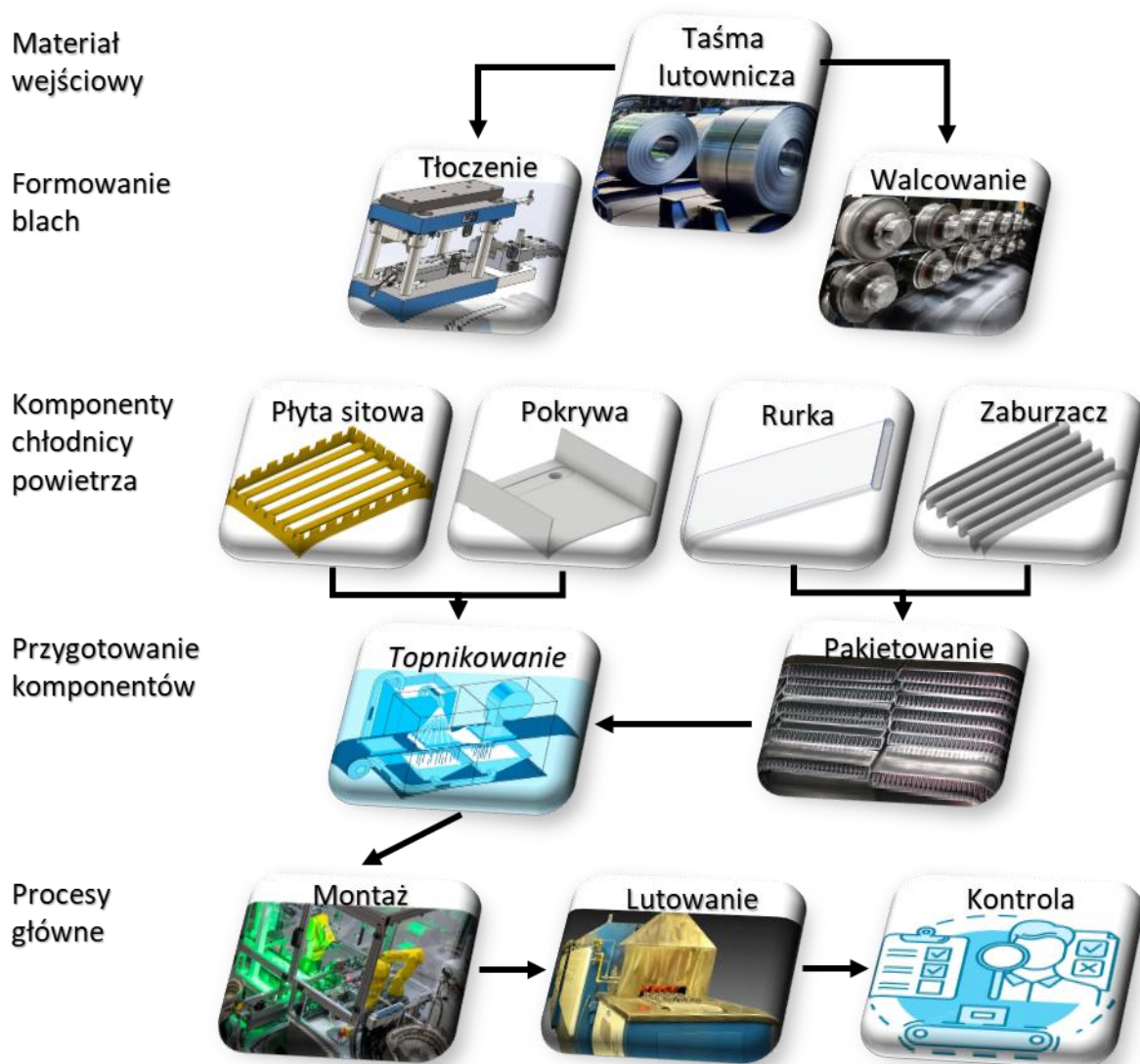
Rysunek 1.8. Budowa chłodnicy powietrza doładowanego w układzie ciecz-powietrze [32]

Dzięki zastosowaniu przepływu krzyżowego lub przeciwpłdowego w pośredniej chłodnicy powietrza możliwe jest obniżenie temperatury sprężonego powietrza z poziomu  $\sim 150-200$  [°C] do poziomu  $\sim 5-10$  [°C] powyżej temperatury cieczy chłodniczej. Jest to znacząca poprawa w stosunku do chłodnic bezpośrednich, gdzie temperatura sprężonego powietrza osiąga poziom o  $15-20$  [°C] poniżej temperatury powietrza chłodzącego (atmosferycznego) [30]. Zastosowanie chłodnicy powietrza doładowanego pozwala na zwiększenie zawartości tlenu biorącego udział w procesie spalania w zakresie 43-260%, w zależności od temperatury roboczej stosowanego czynnika chłodniczego [33]. W dalszej części pracy termin „chłodnica powietrza” będzie odnosił się do pośredniej chłodnicy powietrza doładowanego.

## 2. Proces technologiczny aluminiowej chłodnicy powietrza

### 2.1 Schemat procesu

Uproszczony schemat procesu technologicznego chłodnicy powietrza<sup>3</sup> produkowanej w firmie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski został przedstawiony na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1. Uproszczony schemat procesu technologicznego chłodnicy powietrza (opracowanie własne)

<sup>3</sup> Omawiana chłodnica powietrza została opisana w 1.3 Chłodnica powietrza w układzie doładowania, s. 4.

Proces rozpoczyna się od kontroli materiału wejściowego, który następnie jest kształtowany w komponenty za pomocą metod formowania blach. Następnie komponenty zostają przygotowane do procesów głównych, które stanowią wąskie gardło<sup>4</sup>.

## 2.2 Materiał wejściowy

Powszechnie stosowanym materiałem wejściowym w przemyśle motoryzacyjnym jest aluminium, ze względu na jego korzystne właściwości takie jak niewielka masa właściwa i wysoka przewodność cieplna. Aluminium charakteryzuje się również dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, takimi jak formowalność, odporność na korozję oraz stosunkowo niska cena [29, 34]. Wybrane właściwości materiału wejściowego można modyfikować poprzez dobór pierwiastków stopowych, tworząc stop aluminium [35]. Jednym z przyjętych sposobów klasyfikacji zawartości pierwiastków w stopach aluminium jest 4-cyfrowe oznaczenie, gdzie pierwsza cyfra oznacza główny pierwiastek stopowy. Wyróżnia się serie 1XXX – dodatki o stężeniu poniżej 1%; 2XXX – Cu; 3XXX – Mn; 4XXX – Si; 5XXX – Mg; 6XXX – Mg<sub>2</sub>Si; 7XXX – Zn [36].

W produkcji chłodziw powietrza w przemyśle motoryzacyjnym najczęściej wykorzystuje się stopy aluminium EN AW-3003 oraz EN AW-3005 [11, 35]. Stężenie manganu powyżej 1% oraz stężenie cynku poniżej 0,1% pozwalają na zwiększenie wytrzymałości oraz odporności na korozję [37, 38]. Pomimo braku magnezu w standardowym stopie EN AW-3003, jego dodatek w stężeniu do 1% powoduje niemal dwukrotny wzrost granicy plastyczności [39]. Dodatkowo umożliwia utwardzenie wydzieleniowe poprzez tworzenie cząstek Mg<sub>2</sub>Si, co przekłada się na zwiększoną wytrzymałość stopu [37]. Jest to szczególnie istotne w przypadku komponentów poddawanych procesom tłoczenia i walcowania.

Aby umożliwić powstawanie spoin lutowniczych w procesie lutowania<sup>5</sup> pomiędzy komponentami wymagane jest dostarczenie dodatkowego materiału w postaci stopu o niższej temperaturze topnienia niż ich materiał bazowy komponentów. Powinien się on charakteryzować się zbliżonym składem chemicznym, w tym zbliżonymi potencjałami korozyjnymi<sup>6</sup> oraz podatnością na formowanie [29]. Warunki te spełniają stopy aluminium z serii 4XXX, w których obecność siluminów (Al-Si) wpływa na obniżenie temperatury

---

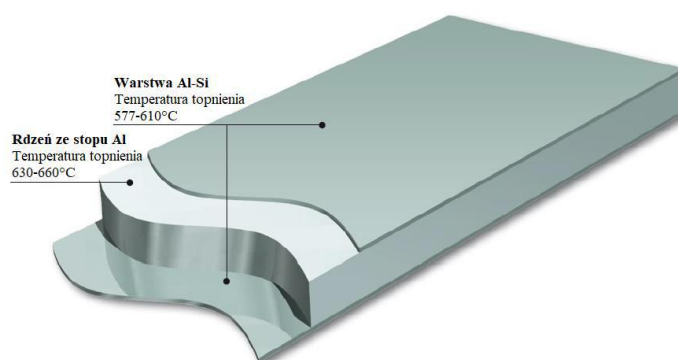
<sup>4</sup> Wąskie gardło procesu to etap procesu technologicznego, który ogranicza przepustowość całej linii produkcyjnej [166].

<sup>5</sup> Proces lutowania i powstawanie spoiny lutowniczej zostały opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>6</sup> Potencjał korozyjny to wartość napięcia elektrochemicznego, która opisuje skłonność danego metalu lub stopu do korozji.

topnienia oraz zwiększenie ich lejuści<sup>7</sup> [40]. Najczęściej stosowanym spoiwem lutowniczym w produkcji chłdnic powietrza jest podeutektyczna kompozycja EN AW-4343 (~7,5% Si), rzadziej EN AW-4045 (~10% Si) lub EN AW-4047 (~12 Si) [35]. Ich temperatury topnienia to odpowiednio: 577-613 [°C]; 575-591 [°C]; 575-582 [°C] [9, 41, 42]. Ich dokładny skład jest opisany w normie ISO 17672 [43].

Dostarczenie spoiwa do procesu lutowania możliwe jest poprzez jego platerowanie<sup>8</sup> na powierzchni stopów aluminium. W ten sposób uzyskuje się tzw. „taśmę lutowniczą” (ang. Brazing Sheet), przedstawioną na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2. Taśma lutownicza [2]

W celu zwiększenia ochrony przeciwkorozyjnej oraz mechanicznej możliwe jest zastosowanie dodatkowych warstw separacyjnych, których grubość zwykle wynosi od 5 do 15% grubości komponentu [9].

### 2.3 Proces formowania blach

Komponenty chłdnicy powietrza są wytwarzane za pomocą procesów formowania blach. W celu zachowania właściwości fizykochemicznych materiału (przewodności cieplnej i odporności na utlenianie) stosuje się obróbkę plastyczną na zimno<sup>9</sup> w postaci procesów tłoczenia i walcowania [44].

Proces tłoczenia jest wszechstronnie stosowaną technologią formowania blach w przemyśle motoryzacyjnym, umożliwiając wytwarzanie 60–65% części samochodowych [45, 46]. Wykorzystuje cienkościenną blachę o grubości od 0,4 do 6 [mm] [44]. Kluczowymi

<sup>7</sup> Znaczenie lejuści zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>8</sup> Platerowanie to proces technologiczny polegający na pokrywaniu powierzchni jednego metalu cienką warstwą innego metalu.

<sup>9</sup> Obróbka plastyczna na zimno to proces kształtowania metali bez podgrzewania. Odbywa się w temperaturze pokojowej lub nieznacznie podwyższonej, powodując umocnienie materiału i poprawę dokładności wymiarowej.

elementami narzędzi tłoczących są matryca<sup>10</sup> i stempel<sup>11</sup>. Procesy tłoczenia można podzielić ze względu na mechanikę obróbki blachy na [44]:

- cięcie otwarte - polega na odcinaniu mniejszych fragmentów blachy wzdłuż otwartej linii cięcia,
- wykrawanie - polega na wycinaniu zamkniętego konturu, gdzie wycięty materiał (wykroj) jest wykorzystywany w dalszych operacjach tłoczenia,
- przebijanie - polega na wycinaniu zamkniętego konturu, gdzie wykroj stanowi odpad,
- gięcie - polega na zginaniu blachy pod kątem i nadaniu jej oczekiwanego kształtu,
- wytłaczanie - polega na wciąganiu krążka blachy (wykroju o wysokości przewyższającej jej promień) do wnęki matrycy, gdzie grubość blachy pozostaje niezmienną.

W celu umożliwienia masowej produkcji komponentów do aluminiowych chłodnic powietrza wykorzystywane są tłoczniiki progresywne. Pozwalają one wykonywać różne kombinacje powyższych operacji w jednym cyklu tłoczenia [47]. Aby poprawić przepływ materiału do wnęki matrycy oraz zmniejszyć zużycie i zatarcie narzędzi, wymagane jest stosowanie środków smarnych [48]. Istotnym utrudnieniem procesu tłoczenia jest zjawisko sprężynowania, które występuje po odciążeniu materiału i polega na częściowym powrocie blachy do pierwotnego kształtu [49]. Zastosowanie tłoczniiki progresywnej pozwala na ograniczenie negatywnych konsekwencji deformacji sprężystych. Wynika to z niewielkich zmian kształtu blachy (w zakresie odpowiadającym grubości wykroju) w następujących operacjach [46], co zostało przedstawione na rysunku 2.3



Rysunek 2.3. Wytłoczka<sup>12</sup> kształtowana w tłoczniiki progresywnej [50]

---

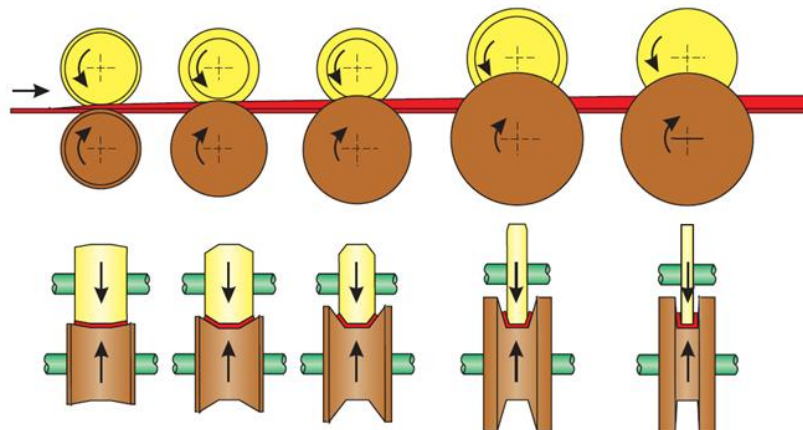
<sup>10</sup> Matryca to nieruchoma część narzędzia zawierająca wnękę nadającą kształt obrabianemu materiałowi.

<sup>11</sup> Stempel to ruchomy element, który naciska na blachę, powodując jej plastyczne ukształtowanie zgodnie z geometrią matrycy.

<sup>12</sup> Wytłoczka to element blachy będący efektem obróbki plastycznej na zimno.

Proces walcowania jest najczęściej stosowaną i najbardziej ekonomiczną metodą formowania blach [44]. Polega na wywieraniu naprężenia ściskającego pomiędzy dwoma obracającymi się walcami<sup>13</sup>, umożliwiając redukcję grubości materiału wejściowego. Ze względu na kształt przekroju poprzecznego materiału wyjściowego wyróżnia się dwa typy walcowania: płaskie<sup>14</sup> i kształtowe<sup>15</sup>. Natomiast ze względu na temperaturę procesu rozróżnia się walcowanie na gorąco i na zimno. Walcowanie na gorąco odbywa się powyżej temperatury rekrytalizacji i pozwala na redukcję grubości materiału do około 2 [mm]. Walcowanie na zimno odbywa się poniżej temperatury rekrytalizacji i umożliwia uzyskanie grubości nawet do 0,2 [mm]. Dla aluminium charakterystycznym procesem jest walcowanie folii, które pozwala zmniejszyć grubość materiału wejściowego do 6 [μm] [51].

Dzięki zastosowaniu różnych kompletów walców w walcarkach tandemowych możliwe jest również kształtowanie geometrii zwijanej taśmy<sup>16</sup> [51]. Odbywa się to zazwyczaj poprzez walcowanie kształtowe na zimno [52]. Polega ono na stopniowym kształtowaniu aluminiowej taśmy poprzez przeprowadzenie jej przez zestaw walców profilujących, co zostało przedstawione na rysunku 2.4.



Rysunek 2.4. Walcowanie profili – widok boczny oraz przekrój formowanej taśmy [53]

Aby umożliwić poprawny przebieg procesu walcowania, wymagane jest stosowanie środków smarnych. Pozwalają one na redukcję tarcia oraz zużycia walców, a w przypadku wysokich temperatur pomagają w odprowadzaniu ciepła [54].

<sup>13</sup> Walec to element roboczy walcarki mający formę obracającego się cylindra.

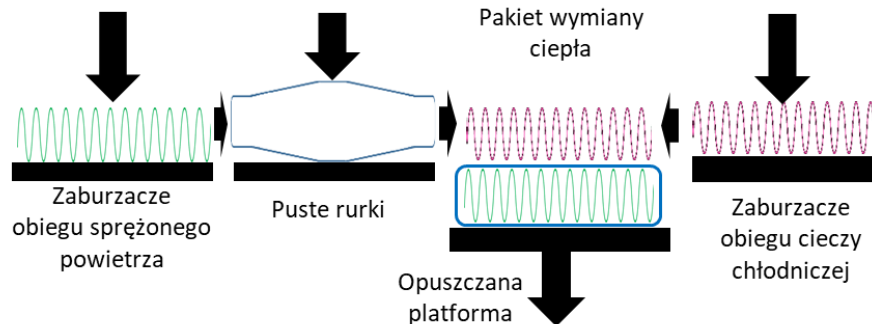
<sup>14</sup> Walcowanie płaskie to proces wykorzystujący gładkie walce w celu uzyskania płaskiego kształtu.

<sup>15</sup> Walcowanie kształtowe to proces wykorzystujący walce profilowane w celu uzyskania określonej geometrii.

<sup>16</sup> Znaczenie i rodzaje zwijanej taśmy zostały opisane w 1.2 Kompaktowe chłodnice, s. 2.

## 2.4 Proces pakietowania

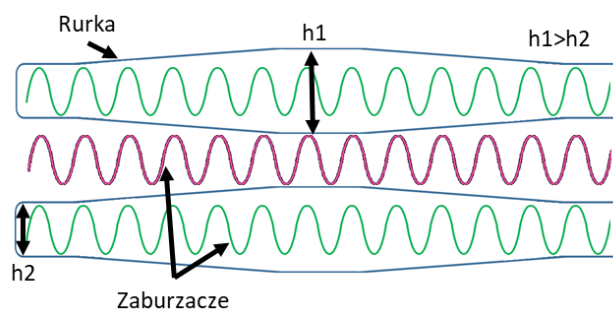
Proces pakietowania polega na kompletowaniu pakietu wymiany ciepła, zgodnie ze schematem widocznym na rysunku 2.5.



Rysunek 2.5. Schemat procesu pakietowania (opracowanie własne)

W procesie pakietowania wykorzystywane są maszyny z siłownikami, które umieszczają zaburzacze obiegu sprężonego powietrza wewnątrz rurek. Następne „wypełnione” rurki układane są naprzemiennie z warstwami zaburzaczy obiegu cieczy chłodniczej. W ten sposób następuje skompletowanie pakietu wymiany ciepła, rozdzielając osobne obiegi: sprężonego powietrza (rurka z zaburzaczem) oraz cieczy chłodniczej (warstwa zaburzacza).

Istotnym utrudnieniem procesu pakietowania jest baryłkowany kształt rurek, który został przedstawiony na rysunku 2.6.



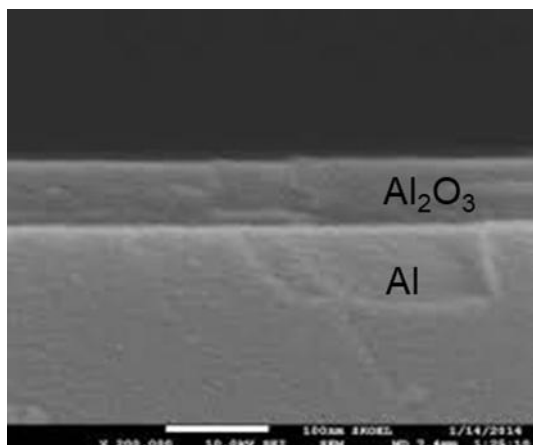
Rysunek 2.6. Baryłkowany kształt rurek stosowanych w pakiecie wymiany ciepła (opracowanie własne)

Wysokość środkowej części rurek ( $h_1$ ) przewyższa wysokość zaburzaczy ( $h_2$ ). Powoduje to oddziaływanie siły elastyczności podczas ściskania pakietu wymiany ciepła<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Znaczenie siły elastyczności podczas ściskania pakietu wymiany ciepła zostało opisane w 2.6 Proces montażu, s. 19.

## 2.5 Proces nanoszenia topnika

Na powierzchni stopów aluminium, natychmiast po kontakcie z tlenem, samoistnie powstaje warstwa tlenku glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [34, 55], co zostało przedstawione na rysunku 2.7.



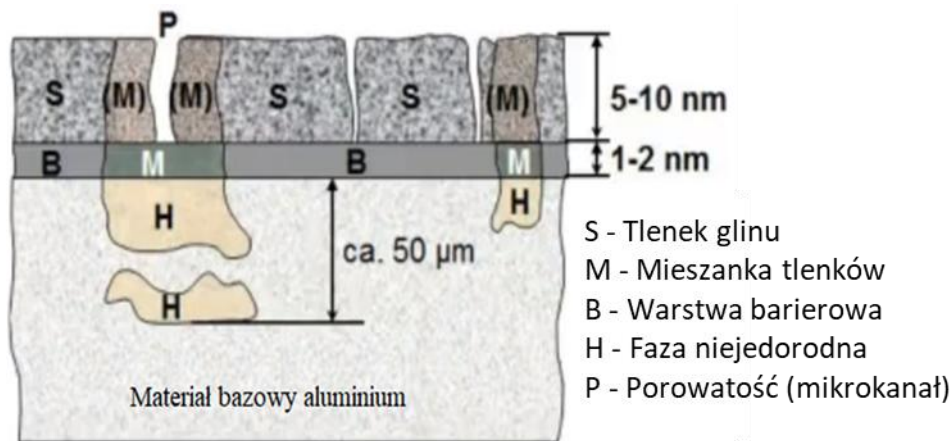
Rysunek 2.7. Warstwa tlenku glinu na powierzchni aluminium [56]

Warstwa tlenku glinu występuje w postaci amorficznego agregatu nieuporządkowanych cząsteczek [57]. Grubość tej warstwy po kontakcie z powietrzem atmosferycznym wynosi  $\sim 4$  [nm], a po nagraniu do temperatury 500-600 [°C] osiąga do 200 [nm] [34, 41]. Tlenek glinu jest stabilny chemicznie, a jego temperatura topnienia sięga 2060°C [35]. Ponieważ temperatura topnienia tlenku glinu jest znacznie wyższa niż temperatura topnienia stopu aluminium ( $\sim 660$  [°C]), jego roztopienie w procesie lutowania<sup>18</sup> jest niemożliwe [34]. Warstwa tlenku glinu jest bardzo trudno zwilżalna<sup>19</sup> przez metale w stanie ciekłym oraz powstrzymuje dyfuzję krzemu<sup>20</sup> [34]. Z tego powodu wymaga mechanicznego lub chemicznego usunięcia [58]. Mechaniczne usunięcie warstwy tlenku glinu jest możliwe poprzez zastosowanie nacisku, jednak proces ten musi przebiegać w atmosferze pozbawionej tlenu [59]. Natomiast usunięcie chemiczne jest powszechnie stosowaną metodą w procesach lutowania i odbywa się za pomocą topnika lutowniczego [58]. Działanie topnika zostało wyjaśnione na podstawie rysunku 2.8.

<sup>18</sup> Proces lutowania został opisany w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>19</sup> Zwilżalność to zdolność cieczy do rozprzestrzeniania się po powierzchni ciała stałego.

<sup>20</sup> Dyfuzja krzemu jest kluczowym zjawiskiem w procesie lutowania wpływającym na powstawanie spoin.



Rysunek 2.8. Schemat struktury warstwy tlenków na powierzchni aluminium [59]

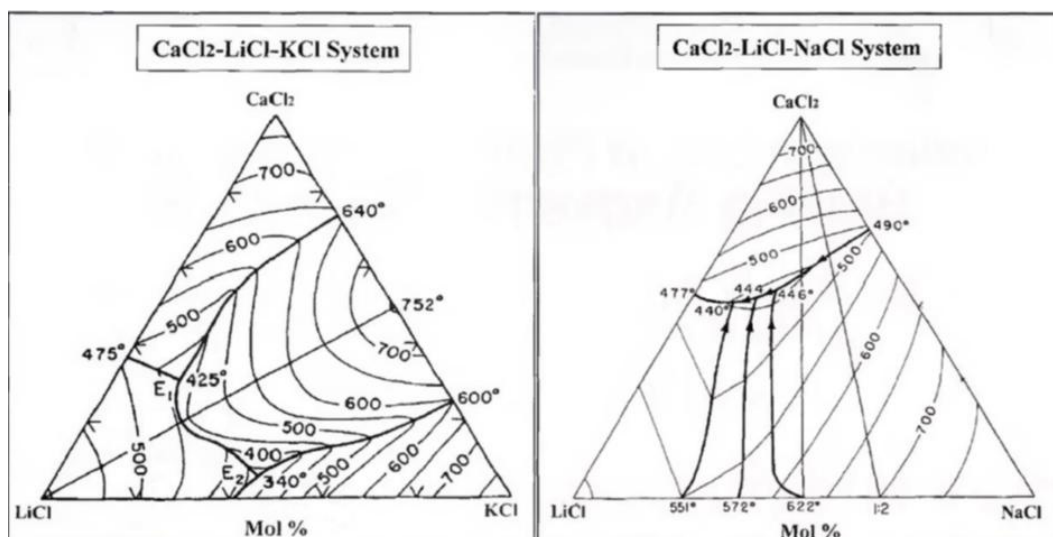
Topnik, po osiągnięciu temperatury likwidus, charakteryzuje się niskim napięciem powierzchniowym. Umożliwia to jego wpłynięcie mikrokanalami (P), które powstają w związku z różnicą rozszerzalności cieplnej warstwy tlenków i materiału bazowego. W ten sposób topnik wnika pod warstwę barierową taśmy lutowniczej<sup>21</sup> (B), docierając do warstwy niejednorodnej (H) materiału bazowego. W efekcie tlenek glinu (S) jest unoszony i rozpraszany, umożliwiając dyfuzję krzemu [35]. Stopiony topnik zabezpiecza powierzchnię, zapobiegając ponownemu utlenieniu powierzchni przed schłodzeniem poniżej temperatury solidus [9]. Dzięki właściwościom zwilżającym topnik umożliwia swobodne rozplwanie się spoiwa, co sprzyja tworzeniu spoiny lutowniczej [60]. Istotnym czynnikiem wpływającym na zwilżanie powierzchni jest jej czystość. Obecność tlenków, środków smarnych i innych zanieczyszczeń hamuje zwilżanie, ograniczając tym samym rozprzestrzenianie się topnika.

Topniki lutownicze dzieli się na aktywne (korozyjne) oraz obojętne (niekorozyjne). Topniki korozyjne zawierają chlorki, takie jak NaCl, KCl, LiCl oraz niewielkie ilości fluorków, np. NaF lub AlF<sub>3</sub> [61]. Cząsteczki te wymagają dodatkowych procesów oczyszczania w celu uniknięcia korozji elektrolitycznej<sup>22</sup> [61]. Temperatura równowagi fazowej<sup>23</sup> tych topników zależy od ich składu (zawartości potasu lub sodu) i mieści się w zakresie od 340 do 752 [°C], co zostało przedstawione na rysunku 2.9 [62].

<sup>21</sup> Taśma lutownicza została opisana w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

<sup>22</sup> Korozja elektrolityczna to proces degradacji materiału spowodowany obecnością resztek aktywnych związków, które w obecności wilgoci i prądu elektrycznego inicjują lokalne reakcje elektrochemiczne.

<sup>23</sup> Równowaga fazowa to stan, w którym różne fazy substancji współistnieją w stabilnych proporcjach.



Rysunek 2.9. Schematy równowagi fazowej topników korozyjnych [62]

Topniki niekorozyjne bazują na fluoroglinianie potasu  $\text{KAlF}_4$ . Ich pozostałość jest pozbawiona właściwości higroskopijnych i z założenia nie wymaga dodatkowych operacji czyszczenia po lutowaniu [63]. Szerokie zastosowanie topników niekorozyjnych zostało rozpowszechnione wraz z procesem NOCOLOK<sup>®</sup> na początku lat 80. XX wieku [64].

Proces NOCOLOK<sup>®</sup> wywodzi się z brytyjskiego patentu nr 1 055 914 przyznanego firmie Societe Des Soudures Castolin SA, opublikowanego w 1967 r. [65], dla kombinacji zawartości związków 53–55%  $\text{AlF}_3$  i 45–47%  $\text{KF}$ . Na jego podstawie, w 1976 r., Alcan Research and Development Limited uzyskało patent w USA nr 3 951 328 [66] dla kombinacji zawartości związków 45–65%  $\text{AlF}_3$  i 35–55%  $\text{KF}$ .

Topnik wykorzystywany w procesie NOCOLOK<sup>®</sup> jest eutektyką związków  $\text{KAlF}_4$ - $\text{K}_3\text{AlF}_6$ . Występuje w postaci białego, niehigroskopijnego proszku o określonym rozkładzie wielkości cząsteczek [67]. Charakteryzuje się niską rozpuszczalnością w wodzie, w zakresie od 1,5 do 4,5 [g/l] [2]. Temperatura fazy likwidus topnika mieści się w zakresie od 565 do 572 [°C], czyli poniżej temperatury topnienia spoiw z serii 4XXX (~577 [°C]). Umożliwia to poprawny przebieg procesu lutowania [64, 68]. Obecność zanieczyszczeń, środków smarnych lub substancji aktywnych na powierzchni komponentów, takich jak  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaF}$  lub  $\text{CaF}_2$ , może zmieniać temperaturę likwidus topnika o  $\pm 5$ –10 [°C] [69, 70, 71, 72].

Aby umożliwić poprawne działanie topnika, zawartości magnezu w stopie aluminium nie powinna przekraczać stężenia 0,3% [58]. Wynika to oddziaływania magnezu w podwyższonej temperaturze, który dyfunduje do powierzchni materiału, gdzie łączy się z tlenem [35]. Powstały w ten sposób tlenek magnezu ( $\text{MgO}$ ) reaguje z topnikiem, tworząc związki  $\text{K}_2\text{MgF}_4$  oraz  $\text{MgF}_2$  [73, 74]. Powoduje to zmniejszenie ilości „nieskażonego” topnika (zdolnego

rozproszyć tlenki z powierzchni lutowanego materiału [9]) oraz zwiększenie jego temperatury topnienia (utrudniając proces lutowania) [60]. W przypadku zawartości magnezu w stopie aluminium na zakresie od 0,6 do 0,8 [wt%] zaleca się stosowanie topnika z dodatkiem cezu (maksymalnie 2 [wt%]) [9]. Taka zawartość cezu pozwala częściowo neutralizować cząsteczki magnezu, prowadząc do powstania związków takich jak  $\text{CsMgF}_3$  i  $\text{Cs}_4\text{Mg}_3\text{F}_{10}$  [9]. Domieszki cezu zmniejszają temperaturę topnienia topnika do zakresu od 545 do 570 [°C], ułatwiając proces lutowania [75].

Powierzchnie komponentów po procesie nanoszenia topnika powinny charakteryzować się równomierną warstwą topnika. Przykład takiego pokrycia został przedstawiony na rysunku 2.10.



Rysunek 2.10. Pokrycie komponentów warstwą topnika [76]

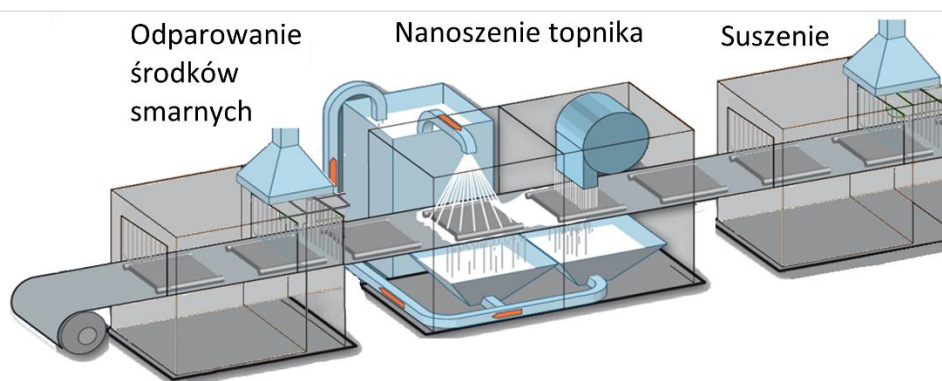
Pokrycie komponentów topnikiem określa się poprzez gramaturę, oznaczającą masę topnika przypadającą na jednostkę powierzchni. Pozwala to uzyskać wartości uniwersalne dla chłodziw powietrza, niezależnie od ich rozmiarów. Minimalna gramatura topnika na powierzchni komponentów wymagana do rozproszenia powłoki tlenku glinu szacowana jest na 2 [g/m<sup>2</sup>]. Jednak uwzględniając potencjalną obecność wilgoci, środków smarnych, cząsteczek tlenu, czy zawartości pierwiastków magnezu<sup>24</sup>, zazwyczaj stosuje się 5 [g/m<sup>2</sup>], a w szczególnych przypadkach nawet do 10 [g/m<sup>2</sup>] [29]. Zwiększenie gramatury nanoszonego topnika pozwala kompensować nieoptymalne warunki procesu, takie jak niekorzystne warunki atmosferyczne, zbyt niska lub zbyt wysoka temperatura lutowania, skomplikowana geometria połączeń, niedopasowanie szczelin kapilarnych<sup>25</sup> czy obecność zanieczyszczeń powierzchni [29, 77]. Na przykładzie opisywanego procesu technologicznego można wyróżnić dwie metody nanoszenia topnika:

- Selektywne topnikowanie - wykorzystuje farbę topnikową (ang. Paint Flux), będąca wodną zawiesiną topnika o stężeniu 20-45% ze środkami adhezyjnymi o stężeniu

<sup>24</sup> Znaczenie obecności magnezu w taśmie lutowniczej zostało opisane w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

<sup>25</sup> Znaczenie szczelin kapilarnych zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

5-15% [9]. Metoda ta pozwala na nanoszenie topnika w dokładnie określonej gramaturze [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] bezpośrednio po procesie tłoczenia. Selekttywne topnikowanie wymaga przeprowadzenia operacji termicznego usuwania środków smarnych w temperaturze ok.  $130\text{ }^\circ\text{C}$  [2], które stosowane są w procesach tłoczenia oraz walcowania<sup>26</sup>. Ze względu na wykorzystanie wody demineralizowanej w farbie topnikowej, wymagana jest również faza suszenia. Odbywa się ona w zakresie temperatur od  $200$  do  $300\text{ }^\circ\text{C}$  i umożliwia odparowanie fazy ciekłej farby topnikowej. Natomiast faza stała spoiwa (środki adhezyjne) jest odparowywana dopiero w trakcie procesu lutowania, w zakresie temperatur od  $350$  do  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . Schemat przebiegu metody selektywnego topnikowania został przedstawiony na rysunku 2.11.



Rysunek 2.11. Schemat procesu selektywnego topnikowania [2]

- Nanoszenie pasty - wykorzystuje topnik o stężeniu w zakresie od 5 do 60% w postaci pasty o lepkości w zakresie od 500 do 50 000 [ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ]. Charakteryzuje się niskimi właściwościami sedymentacji ciał stałych i długim okresem przechowywania (do kilku tygodni) oraz minimalnym spływaniem, nawet na powierzchniach pionowych [78]. Topnik w postaci pasty bazuje na alkoholach, co umożliwia nanoszenie również na powierzchnie nieodtłuszczone [9]. W metodzie nanoszenia pasty możliwe jest zastosowanie dodatku spoiwa w formie proszku, co jest szczególnie istotne w przypadku użycia blach aluminiowych niezawierających spoiwa [79]. Postać pasty umożliwia dozowanie przy użyciu urządzeń pneumatycznych lub pompy wyporowej, co zostało przedstawione na rysunku 2.12.

<sup>26</sup> Znaczenie środków smarnych zostało opisane w 2.3 Proces formowania blach, s. 10.

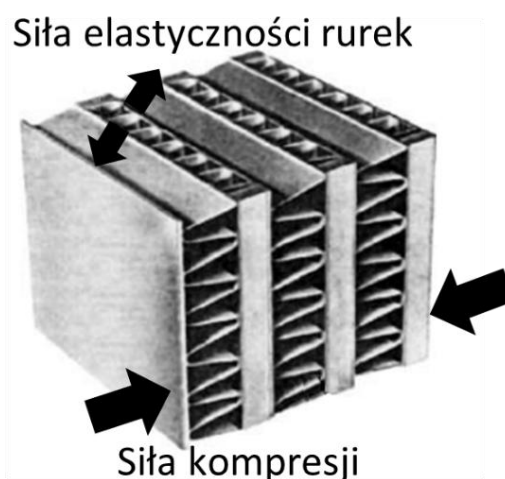


Rysunek 2.12. Nanoszenie topnika w formie pasty [78]

Metoda nanoszenia pasty pozwala na precyzyjne pokrycie topnikiem wybranych obszarów komponentów, co jest szczególnie istotne w przypadku ich skomplikowanej geometrii.

## 2.6 Proces montażu

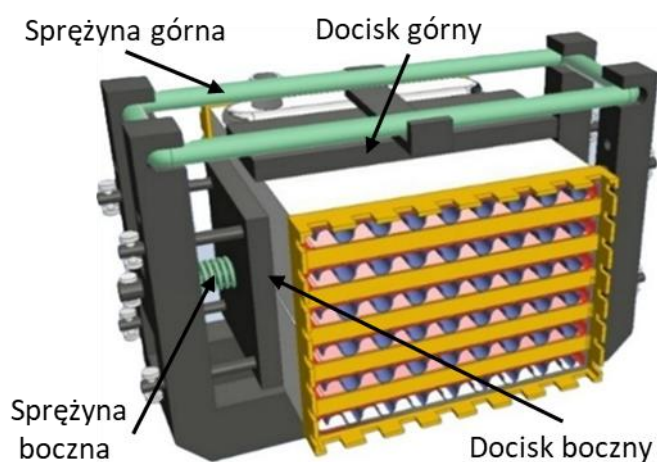
Proces montażu przygotowuje chłodnicę powietrza do procesu lutowania. Wpływa na zapewnienie powtarzalności oraz jakości połączeń, co przekłada się na niski poziom wyrobów wadliwych [80]. Proces montażu w produkcji seryjnej odbywa się za pomocą zautomatyzowanych stanowisk [29]. Pozwalają one na montaż komponentów w odpowiedniej kolejności i kontrolowanych warunkach. Ze względu na baryłkowany kształt rurek<sup>27</sup>, zamknięcie pakietu wymiany ciepła w obudowie wymaga zastosowania siły kompresji, która przeciwdziała sile elastyczności rurek, co zostało przedstawione na rysunku 2.13.



Rysunek 2.13. Siła elastyczności rurek oraz siła kompresji w pakiecie wymiany ciepła (opracowanie własne na podstawie [30])

<sup>27</sup> Baryłkowany kształt rurek został opisany w rozdziale 2.4 Proces pakietowania, s. 13.

Wymaganą siłę kompresji uzyskuje się poprzez zastosowanie ramki lutowniczej. Jej zadaniem jest utrzymanie geometrycznych parametrów połączeń między komponentami [4]. Nadmierna siła kompresji w procesie montażu prowadzi do uszkodzeń mechanicznych komponentów w postaci wklęsłych wgnieceń [29, 81]. Ramki lutownicze powinny mieć elastyczne mocowanie w postaci sprężyn, które umożliwiają kompensację zmian wymiarowych pod wpływem temperatury. Muszą również zapewniać podparcie komponentów narażonych na odkształcenie pod wpływem własnego ciężaru [58, 81]. Siłę kompresji w ramach lutowniczych zapewnia układ elementów dociskowych, które zostały przedstawione na rysunku 2.14.



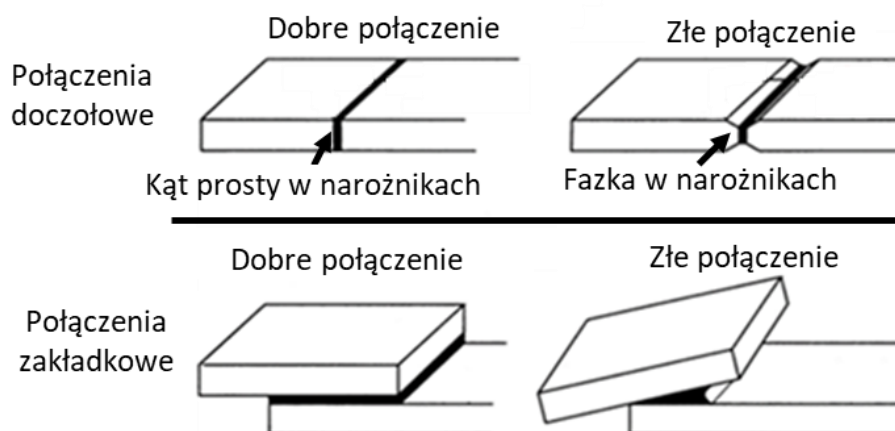
Rysunek 2.14. Elementy dociskowe ramki lutowniczej (opracowanie własne)

Siła sprężyn musi być dobrana tak, aby umożliwić utrzymanie szczeliny kapilarnej<sup>28</sup> podczas topnienia spoiwa lutowniczego, nie powodując jednocześnie uszkodzeń mechanicznych w postaci wgnieceń. Zadanie to jest utrudnione przez czynniki takie jak tolerancje wymiarowe komponentów (różnice w rzeczywistych wymiarach) oraz rozszerzalność cieplna chłodnicy powietrza podczas wzrostu temperatury [82]. Obszary ramki lutowniczej, które są w bezpośrednim kontakcie z warstwą spoiwa, wymagają pokrycia pastą utleniającą. Zapobiega ona powstawaniu defektów powierzchni poprzez reakcję ze spoiwem<sup>29</sup>. Pasta ta ulega spaleniowi podczas procesu lutowania i wymaga dodatkowego oczyszczenia ramki przed jej ponownym użyciem.

<sup>28</sup> Znaczenie szczeliny kapilarnej zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>29</sup> Spoiwo w taśmie lutowniczej zostało opisane w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

Prawidłowy montaż chłodnic powietrza w ramkach lutowniczych wymaga zachowania odpowiednich parametrów geometrycznych połączeń między komponentami. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje połączeń, które zostały przedstawione na rysunku 2.15.



Rysunek 2.15. Podstawowe rodzaje połączeń komponentów w chłodnicach powietrza [58]

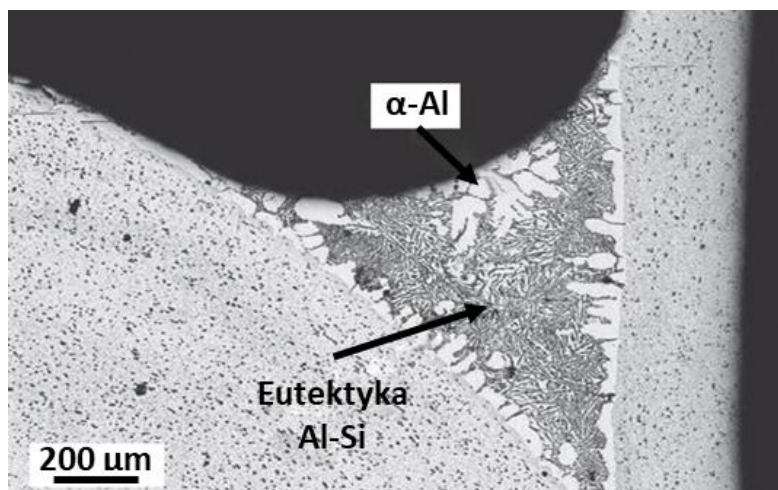
Połączenia zakładkowe są preferowane ze względu na pozytywny wpływ na wytrzymałość chłodnicy powietrza [58]. Efekt zwiększenia wytrzymałości można uzyskać również poprzez fazowanie, stopniowanie lub inne modyfikacje połączeń, tak aby długość zakładki była co najmniej trzykrotnie większa niż grubość cieńszego komponentu [83].

## 2.7 Proces lutowania

Lutowanie jest procesem, który umożliwia powstanie wiązania na poziomie atomowym pomiędzy dwoma metalowymi komponentami. W tym celu wykorzystuje się trzeci materiał o niższej temperaturze topnienia, zwany spoiwem lutowniczym [84]. Lutowanie przebiega w zakresie temperatur topnienia spoiwa<sup>30</sup>, a poniżej temperatury topnienia materiału bazowego [85]. Zależnie od temperatury procesu rozróżnia się: lutowanie miękkie (ang. Soldering) poniżej 450 [°C], oraz lutowanie twarde (ang. Brazing) powyżej 450 [°C] [84]. Roztopione spoiwo ulega zwilżeniu, a w wyniku zjawiska jego płynięcia dochodzi do dyfuzji pierwiastków krzemu do materiału bazowego [85, 86, 87]. Po ochłodzeniu spoiwo zastyga w postaci spoiny lutowniczej<sup>31</sup>, składającej się z eutektycznej struktury Al-Si, widocznej na rysunku 2.16.

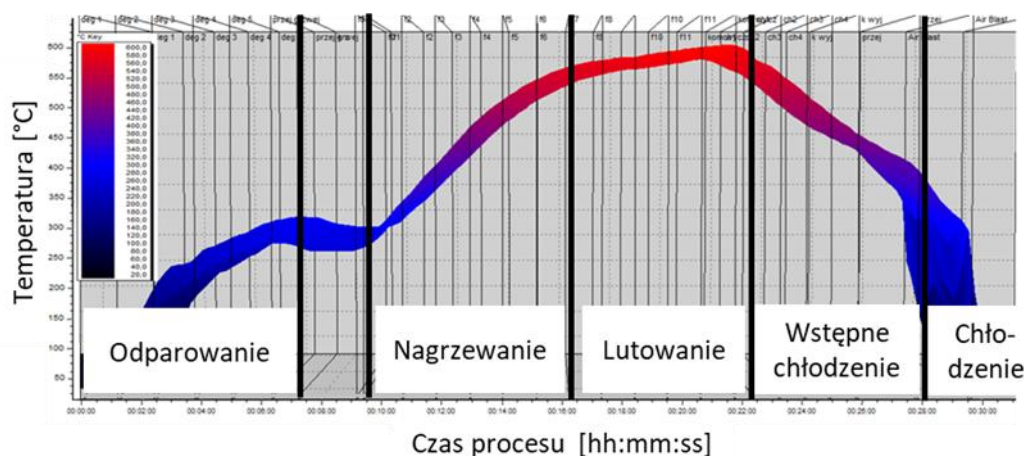
<sup>30</sup> Zakres temperatury topnienia spoiwa został opisany w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

<sup>31</sup> Zdolność materiałów do tworzenia trwałej spoiny określa się mianem lutowności [86, 165].



Rysunek 2.16. Struktura spoiny lutowniczej [29]

Wiodącą technologią lutowania twardego aluminiowych chłodziw powietrza w przemyśle motoryzacyjnym jest lutowanie w kontrolowanej atmosferze (CAB, ang. Controlled Atmosphere Brazing) [58, 62, 88]. Przebiega w atmosferze gazu obojętnego (zazwyczaj azotu), przy zawartości tlenu nieprzekraczającej 100 [ppm] oraz wilgotności poniżej 128 [ppm] (punkt rosy poniżej  $-40$  [°C]) [89]. Utrzymanie odpowiednich warunków procesu jest istotne, gdyż zwiększenie zawartości tlenu do 2000 [ppm] oraz wzrost punktu rosy do  $-18$  [°C] prowadzą do wad jakościowych spoiny takich jak skrócenie jej długości, nieregularny kształt czy zmiana mikrostruktury [90]. Celem procesu lutowania w kontrolowanej atmosferze jest doprowadzenie łączonych komponentów do temperatury dyfuzji krzemu, przy lokalnych różnicach temperatury nieprzekraczających  $\pm 3$  [°C] [29]. Zmiany temperatury materiałów w czasie są rejestrowane za pomocą profilu lutowania (ang. Heating profile lub Time-Temperature Cycle), którego przykład został przedstawiony na rysunku 2.17.



Rysunek 2.17. Profil lutowania w procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze (opracowanie własne na podstawie [91])

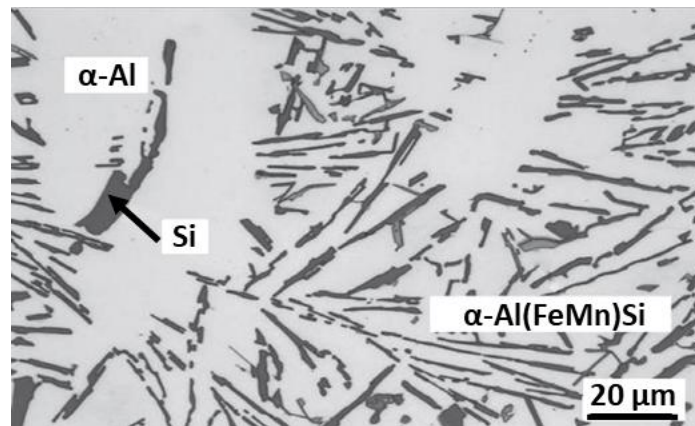
Zależnie od osiągniętych temperatur w czasie, profil lutowania można podzielić na następujące po sobie fazy:

- Faza odparowania - jej rolą jest odparowanie wilgoci oraz obecnych na powierzchni komponentów środków smarnych, które są pozostałością po procesach formowania blach<sup>32</sup>. Środki te mogą zaburzać atmosferę w dalszych komorach pieca oraz mogą ulec spaleniowi pozostawiając ciemne odbarwienia na powierzchni komponentów [81].
- Faza nagrzewania - służy do konwekcyjnego nagrzania chłodnicy powietrza do temperatury początku nadtopień stosowanego topnika (~577 [°C]) [79]. Nagrzewanie materiału powinno odbywać się możliwie szybko, aby uzyskać stabilność rozkładu temperatur. Zazwyczaj prędkość nagrzewania od temperatury otoczenia do 500 [°C] jest na poziomie 45 [°C/min] [58]. Zwiększona zawartość krzemu lub większa ilość spoiwa lutowniczego będą skutkować wydłużeniem procesu nagrzewania, ze względu na energię potrzebną na przemianę fazową po osiągnięciu temperatury likwidus [9]. Czas trwania tej fazy wpływa na procesy dyfuzji magnezu oraz manganu (powyżej temperatury 425 [°C]) [9, 92, 93].
- Faza lutowania - służy do radiacyjnego rozgrzania całej chłodnicy powietrza w celu umożliwienia intensywnej dyfuzji krzemu podczas płynięcia spoiwa pomiędzy łączonymi komponentami [79]. Wymaga zachowania atmosfery azotowej, aby zapobiec utlenianiu powierzchni aluminium. Zakres temperatury fazy lutowania mieści się w przedziale od 590 do 610 [°C] [94]. Nadmierna temperatura lub zbyt długi czas trwania fazy lutowania mogą powodować nadtopienie materiału bazowego oraz erozję, przy jednoczesnym zwiększeniu kosztów zużycia energii [29, 95]. Z tego powodu czas trwania fazy lutowania powinien mieścić się w zakresie 3-5 [min] [58].
- Faza wstępnego chłodzenia - wciąż wymaga atmosfery azotowej. Służy do zapoczątkowania procesu krystalizacji spoiwa lutowniczego [96]. W celu minimalizacji ryzyka deformacji złączy zaleca się, aby szybkość chłodzenia do temperatury 550 [°C] była niska (~1 [°C/s]) [29, 81].
- Faza chłodzenia - odbywa się w powietrzu atmosferycznym, dzięki czemu pozwala na powstanie warstwy tlenku glinu na powierzchni komponentów. Warstwa ta chroni chłodnicę powietrza przed korozją. Zaleca się, by chłodzenie odbywało się możliwie szybko, gdyż sprzyja to tworzeniu faz  $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  oraz  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$  (w przypadku

---

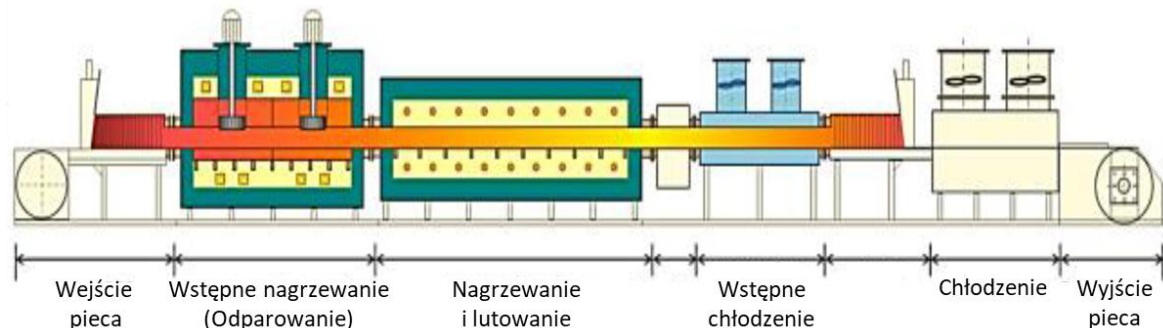
<sup>32</sup> Znaczenie środków smarnych zostało opisane w 2.3 Proces formowania blach, s. 10.

stosowania stopów zawierających mangan) [97], których przykład został przedstawiony na rysunku 2.18. W efekcie poprawie ulegają właściwości ochronne chłodnicy powietrza, zarówno przeciwkorozyjne, jak i mechaniczne, w tym wytrzymałość zmęczeniowa oraz odporność na pękanie [29, 97].



Rysunek 2.18. Mikrostruktura spoiny lutowniczej po szybkim chłodzeniu [29]

Dostosowanie profilu lutowania do geometrii chłodnicy powietrza wymaga zastosowania specjalistycznego pieca tunelowego [77, 80], którego przykład został przedstawiony na rysunku 2.19.

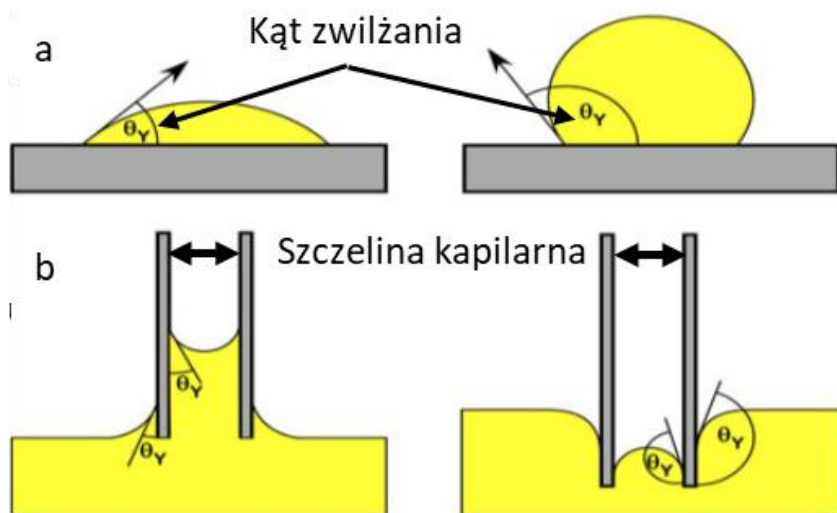


Rysunek 2.19. Budowa pieca tunelowego [91]

Piec tunelowy umożliwia produkcję wielkoseryjną chłodnic powietrza o zbliżonych wymiarach [29], co przekłada się na wysoką wydajność procesu lutowania w kontrolowanej atmosferze [9, 29, 58]. Podgrzewanie wsadu (chłodnic powietrza wraz z ramkami lutowniczymi) odbywa się za pomocą kombinacji różnych elementów grzewczych, takich jak palniki gazowe oraz grzałki oporowe. W przypadku palników dominującym mechanizmem przekazywania ciepła jest konwekcja, natomiast dla grzałek oporowych jest to promieniowanie [98]. W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania wsadu, piec tunelowy podzielony jest na następujące po sobie niezależne komory, w których kontrolowane są zarówno atmosfera, jak i temperatura. W efekcie uzyskiwany jest profil lutowania, który powinien być indywidualnie

dostosowany do masy i materiału wsadu. Jednak zmiana ustawień pieca wiąże się z istotną bezwładnością cieplną, co skutkuje czasochłonną stabilizacją temperatury [99]. Z tego powodu często stosuje się uniwersalny profil lutowania (odpowiadające mu ustawienia temperatur w komorach) dla wsadów o zbliżonych rozmiarach [100].

Poprawny przebieg procesu lutowania wymaga, aby spoiwo przemieściło się do szczeliny pomiędzy równoległe ułożonymi komponentami pod wpływem napięcia powierzchniowego [101]. W tym celu wykorzystywana jest lejność spoiwa<sup>33</sup>, która rozpoczyna się gdy ponad 60% jego objętości przejdzie do stanu likwidus pod wpływem temperatury [64]. Na to zjawisko wpływają czynniki takie jak zwilżalność<sup>34</sup> spoiwa, jego lepkość czy reaktywność metalurgiczna<sup>35</sup> stosowanych materiałów wejściowych<sup>36</sup> [85]. Zwilżalność stopu mierzy się za pomocą kąta Younga [ $\theta_Y$ ] pomiędzy powierzchnią stałą a styczną do kropli spoiwa w stanie likwidus, co zostało przedstawione na rysunku 2.20 a). Kąt Younga poniżej  $90^\circ$  sprzyja oddziaływaniu kapilarnemu. Wpływa w ten sposób na zdolność cieczy do wnikania w szczeliny, niezależnie od działania sił grawitacji [102], co zostało przedstawione na rysunku 2.20 b).



Rysunek 2.20. Właściwości lejności spoiwa: a) zwilżalność, b) oddziaływanie kapilarne [103]

Warunkiem prawidłowego przebiegu zjawiska kapilarnego w procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze jest utrzymanie szerokości szczelin kapilarnych pomiędzy komponentami w zakresie od 0,10 do 0,15 [mm] [35, 90]. Taka wielkość szczelin pozwala

<sup>33</sup> Lejność to właściwość stopu lutowniczego opisująca jego zdolność do rozplływania się po powierzchni lutowanej i tworzenia jednorodnej, dobrze przylegającej spoiny.

<sup>34</sup> Poprzez zwilżalność rozumie się zdolność cieczy do rozprzestrzeniania się po powierzchni ciała stałego.

<sup>35</sup> Reaktywność metalurgiczna to zdolność materiału do wchodzenia w reakcje chemiczne z innymi substancjami.

<sup>36</sup> Stosowane materiały wejściowe zostały opisane w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

uzyskać złącze bardziej odporne na pęknięcia, o lepszych właściwościach mechanicznych. Natomiast przekroczenie tego zakresu utrudnia powstawanie spoin i obniża ich twardość [35]. Dla komponentów wykonanych z taśmy lutowniczej zalecany jest bezpośredni kontakt pomiędzy nimi, tak by szerokość szczeliny kapilarnej nie przekraczała 0,05 [mm] [58]. Wynika to z zastosowania platerowanej warstwy spoiwa<sup>37</sup>, która po rozpuszczeniu zmniejsza grubość taśmy o około 10% [29].

## 2.8 Proces kontroli

Celem procesu kontroli chłodzińców powietrza jest zapewnienie ich zgodności z wymaganiami technicznymi oraz normami, takimi jak:

- norma PN-EN 12799:2003 [104] - „Klasyfikacja badań niszczących i nieniszczących”, opisująca sposoby przygotowania złączy próbnych oraz wymagania dotyczące urządzeń badawczych,
- norma PN-EN ISO 18279:2008 [105] - „Lutowanie twarde - Niezgodności w złączach lutowanych na twardo”, klasyfikująca ich rodzaj, kształt i obszar występowania,
- norma PN-EN 12797:2002 [106] - „Lutowanie twarde - Badania niszczące złączy lutowanych na twardo”, charakteryzująca spoiny lutownicze wraz z metodami oceny ich jakości,
- norma PN-EN 1048:2014-12 [107] - „Wymienniki ciepła - Chłodzińce cieczy chłodzone powietrzem („chłodzińce suche)”, opisująca procedury badawcze dotyczące wydajności cieplnej i parametrów eksploatacyjnych wymienników ciepła.

W ramach procesu kontroli, stanowiącej końcowy etap procesu technologicznego chłodzińcy powietrza, możliwe jest zastosowanie jedynie badań niszczących [108]. Zaliczają się do nich ocena wizualna, test szczelności oraz weryfikacja zgodności wymiarowej:

- Ocena wizualna - jest podstawowym badaniem niszczącym [104, 108]. Polega na weryfikacji, czy chłodzińca powietrza nie została uszkodzona w trakcie następujących operacji procesu technologicznego. Umożliwia m. in. identyfikację odbarwień, zarysowań czy załazków korozji, których przykład został przedstawiony na rysunku 2.21.

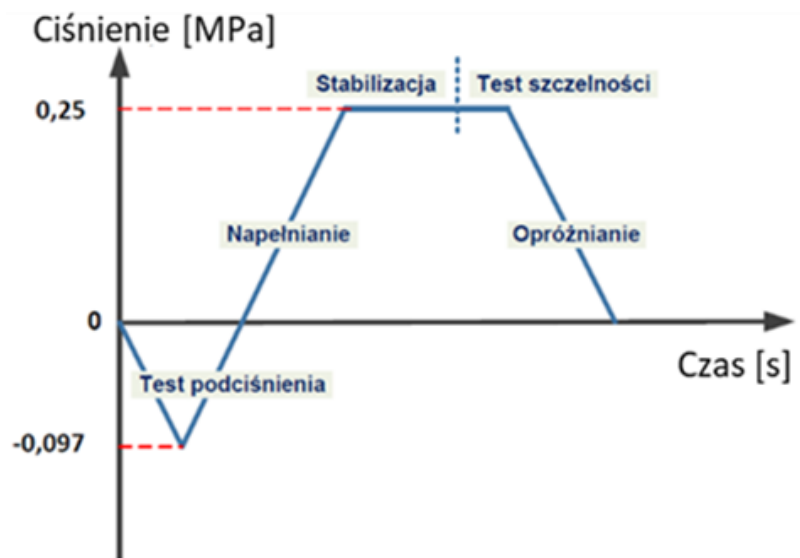
---

<sup>37</sup> Platerowana warstwa spoiwa została opisana w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.



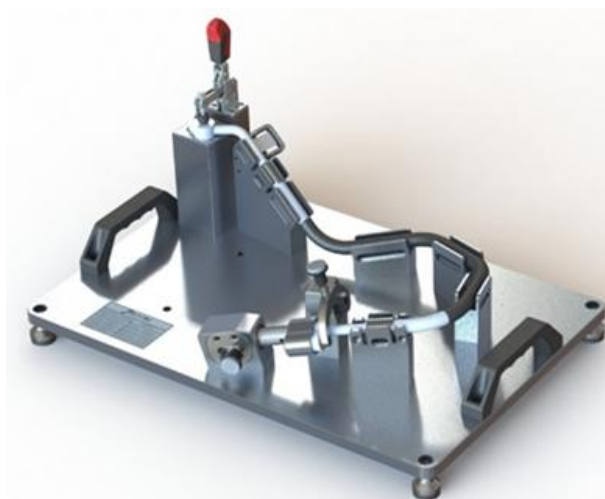
Rysunek 2.21. Korozja na komponentach aluminiowych po procesie lutowania (opracowanie własne)

- Test szczelności - pozwala na analizę różnicy ciśnień podczas przebiegu testu podciśnienia  $-0,097$  [MPa], po którym następuje test ciśnienia  $0,25$  [MPa] [109], co zostało przedstawione na rysunku 2.22.



Rysunek 2.22. Rozkład ciśnienia w funkcji czasu podczas testu szczelności [91]

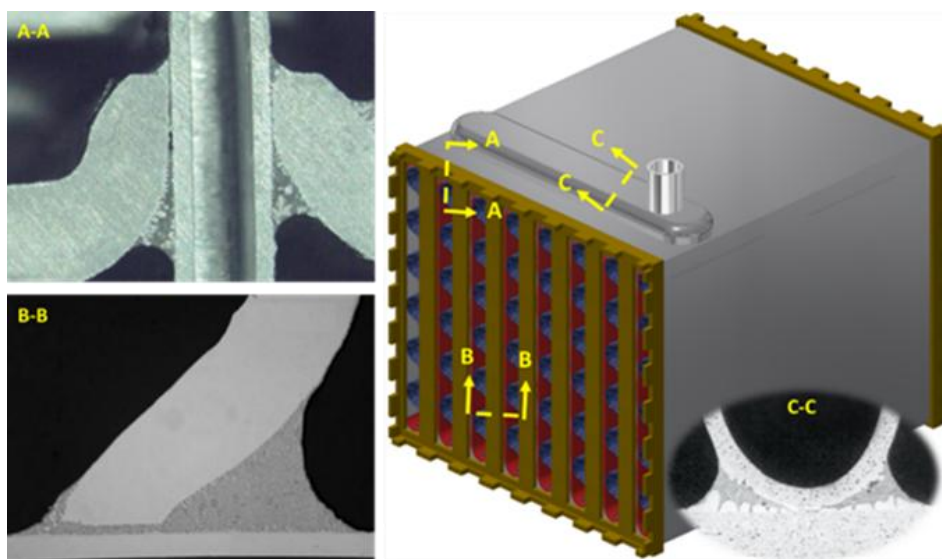
- Weryfikacja zgodności wymiarowej - odbywa się za pomocą sprawdzianów kształtu, których przykład został przedstawiony na rysunku 2.23.



Rysunek 2.23. Sprawdzian kształtu wykorzystywany w ocenie zgodności wymiarowej [110]

Potwierdzenie zgodności chłodzińców powietrza z normami wymaga również cyklicznych badań niszczących [58], takich jak makrografia spoin oraz test ciśnienia rozrywającego:

- Makrografia spoin lutowanych - stosowana jest w celu oceny jakości spoin, czyli m.in. ich długości, nadtopień materiału rodzimego, porowatości oraz mikrostruktury [9, 105]. Na rysunku 2.24 widoczny jest przykładowy przekrój dwóch obszarów spoin zewnętrznych<sup>38</sup> (A-A połączenie płyty sitowej z pokrywą; B-B połączenie rurki z płytą sitową) oraz obszaru spoin wewnętrznych<sup>39</sup> (C-C połączenie pokrywy z rurką).



Rysunek 2.24. Makrografia spoin zewnętrznych (A-A; B-B) i wewnętrznych (C-C) w chłodzińcy powietrza (opracowanie własne na podstawie [91])

<sup>38</sup> Obecność spoin zewnętrznych jest warunkiem uzyskania szczelności chłodzińcy powietrza

<sup>39</sup> Obecność spoin wewnętrznych wpływa na wytrzymałość mechaniczną chłodzińcy powietrza. w zależności od określonych wymagań zależnych od warunków użytkowych oraz gabarytów, akceptowalny jest określony poziom niespełnienia stopnia zlutowania dla połączeń wewnętrznych.

- Test rozrywania - odbywa się w komorze do rozrywania, gdzie chłodnica powietrza zostaje podłączona do pompy ciśnieniowej<sup>40</sup>, co zostało przedstawione na rysunku 2.25.



Rysunek 2.25. Test rozrywania aluminiowej chłodnicy w komorze rozrywającej [111]

Do chłodnicy podawane jest powietrze aż do osiągnięcia ciśnienia, przy którym zostanie ona rozerwana. Test rozrywania (ciśnienia rozrywającego) bazuje na dyrektywie 2014/68/UE [112], gdzie badane wymienniki ciepła muszą wytrzymać pięciokrotność ciśnienia roboczego przez co najmniej jedną minutę.

---

<sup>40</sup> Pompa ciśnieniowa to urządzenie, które za pomocą ruchu tłoka, membrany lub wirnika wtłacza ciecz lub gaz do układu pod wysokim ciśnieniem, umożliwiając sterowanie wartością ciśnienia.

### 3. Pozostałość topnika w chłodnicy powietrza

#### 3.1 Opis problemu i przegląd literatury

W eksploatacji chłodnicy do kluczowych czynników decydujących o jej użyteczności należą:

- stopień zlutowania - wpływa na szczelność oraz wytrzymałość chłodnicy powietrza, a tym samym na jej funkcjonalność,
- czystość wewnętrzna – rozumiana jako ilość pozostałości topnika, która oddziałuje na efektywność pracy chłodnicy powietrza.

W kontekście tych wymagań, szczególnego znaczenia nabiera proces nanoszenia topnika. Zwiększenie gramatury nanoszonego topnika<sup>41</sup> pozwala kompensować niekorzystne warunki procesu<sup>42</sup>, ułatwiając uzyskanie stopnia zlutowania. Jednak po zakończeniu procesu lutowania w kontrolowanej atmosferze<sup>43</sup> na powierzchni komponentów pozostaje niehigroskopijna warstwa pozostałości topnika o grubości 1–2 [ $\mu\text{m}$ ] [2, 9, 12].

Pozostałość topnika stanowi zanieczyszczenie wewnątrz chłodnicy powietrza, którego negatywne skutki nabierają coraz większego znaczenia w przemyśle motoryzacyjnym [113]. Można je podzielić następująco:

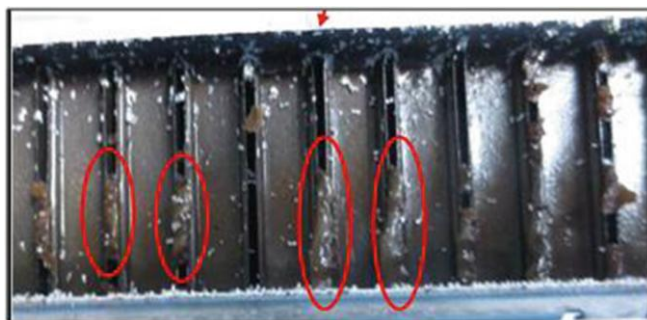
- Wpływ na wydajność - cząsteczki pozostałości topnika stanowią dodatkową barierę izolacyjną. Powoduje to zmniejszenie efektywnej powierzchni wymiany ciepła, co skutkuje obniżeniem wydajności termicznej chłodnicy powietrza [88].
- Wpływ na przepływ - obecność cząsteczek pozostałości topnika może powodować tworzenie się osadów, które blokują kanały przepływu cieczy chłodniczej [9, 88, 114, 115, 116]. Skutkiem jest niepożądany spadek ciśnienia w układzie chłodzenia, wynikający z zaburzenia przepływu cieczy chłodniczej [14], co przedstawiono na rysunku 3.1.

---

<sup>41</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>42</sup> Do niekorzystnych warunków procesu technologicznego zaliczają się: niekorzystne warunki atmosferyczne, zbyt niska lub zbyt wysoka temperatura lutowania, skomplikowana geometria połączeń, niedopasowanie szczelin kapilarnych oraz obecność zanieczyszczeń powierzchni.

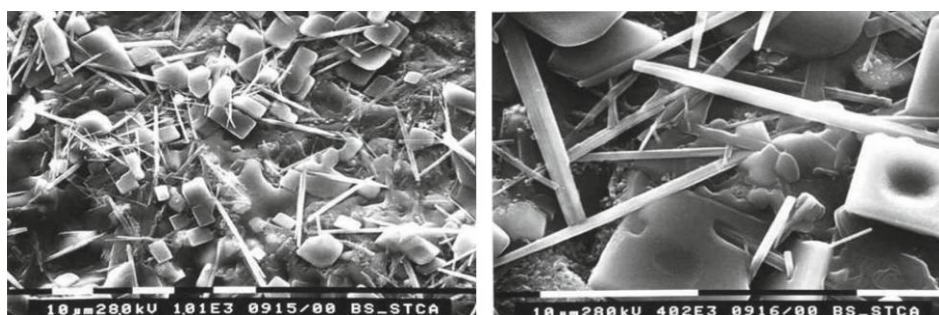
<sup>43</sup> Proces lutowania w kontrolowanej atmosferze został opisany w 2.7 Proces lutowania, s. 21.



Rysunek 3.1. Zapychanie kanałów chłodnicy powietrza przez pozostałość topnika [63]

- Wpływ na korozję - nadmiar pozostałości topnika może destabilizować ciecz chłodniczą, prowadząc do wytrącania jej składników ochronnych [117]. Do składników tych należą przede wszystkim azotyny, azotany, molibdeniany i krzemiany [114]. W efekcie dochodzi do akumulacji cząsteczek zawierających osady pozostałości topnika, co sprzyja powstawaniu ognisk korozyjnych [88].
- Wpływ na właściwości chemiczne - pozostałość topnika może wchodzić w negatywne reakcje z cieczami chłodniczymi, a szczególnie stosowanymi w nich nanododatkami. Reakcja ta prowadzi do żelowania, zwiększenia lepkości cieczy chłodniczej oraz obniżenia jej lejukości [88, 113, 116]. Skutki mogą też obejmować: odbarwienie cieczy chłodniczej, powstawanie amoniaku, wzrost wartości pH, czy szybkie zużycie nieorganicznych inhibitorów korozji [114].

Pozostałość topnika występuje w postaci płytek o kwadratowym kształcie i wymiarach w zakresie od 10 do 20 [ $\mu\text{m}$ ] (fluoroglinian potasu) oraz igieł (fluorek magnezu) [63], co zostało przedstawione na rysunku 3.2. Dokładna struktura pozostałości topnika zależy od wielu czynników, takich jak: atmosfera procesu lutowania (obecność tlenu i wilgoci), profil lutowania<sup>44</sup> oraz skład pierwiastkowy taśmy lutowniczej<sup>45</sup> [95].



Rysunek 3.2. Pozostałość topnika obserwowana metodą skaningowej mikroskopii elektronowej [63]

<sup>44</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>45</sup> Taśma lutownicza została opisana w 2.2 Materiał wejściowy, s. 9.

Obecność pozostałości topnika po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze została odnotowana już w 1983 r., gdzie Claydon et al. [77] przypisywali jej wręcz właściwości ochronne, hamujące korozję. W kolejnych dekadach panowało przekonanie o braku konieczności usuwania warstwy pozostałości topnika. Pogląd taki został wyrażony np. W 2001 r. przez Garcia et al. [75]. W 2007 r. Zaldivar et al. określili limit akceptowalnej ilości pozostałości topnika po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze w ilości 2 g na 1 kg cieczy chłodniczej. W 2011 r. Gray et al. [73] analizowali morfologię pozostałości topnika, wskazując spadek odporności korozyjnej przy stosowaniu wysokiej gramatury topnika 10-20 [g/m<sup>2</sup>]. W 2014 r. Alverson et al. [114] wykazali wpływ pozostałości topnika na degradację cieczy chłodniczej oraz tworząc osady powodujące korozję. W 2015 r. Cocian i Popa [118] opisali metodę pomiaru pozostałości topnika poprzez pomiar anionów potasu, za pomocą której w 2016 r. Bourgeais i Demarcq [63] kontynuowali badania nad redukcją ilości pozostałości topnika z wykorzystaniem procesów płukania. Nowsze badania koncentrowały się na poprawie właściwości materiałów lutowniczych (Jin, 2021 [96]; Gao et al. 2022 [95]).

Istotne znaczenie ograniczania ilości cząsteczek stałych pozostałości topnika wynika ze stosowanych cieczy chłodniczych, a w szczególności zawartych w nich dodatków, w tym nanocząsteczek [115]. W 2009 r. Kanjirakat et al. [119] przypisali wzrost niepożądaną lepkości cieczy chłodniczej zjawisku agregacji cząstek stałych w układzie chłodzenia. W 2014 r. Zeinali Heris et al. [120] podsumowali szereg badań nad nanocieczami<sup>46</sup>, zwracając uwagę na znaczenie takich parametrów jak: objętość cząstek stałych, ich morfologia, kształt i wielkość. Pourfarhang et al. [121] wykazali wzrost tarcia międzycząsteczkowego<sup>47</sup> w glikolu etylenowym<sup>48</sup> w zakresie 3-18% w zależności od wzrostu stężenia cząstek stałych w zakresach od 0,1 do 0,8%. W 2015 r. Li et al. [122] zauważyli, że lepkość nanocieczy ma istotny wpływ na spadek ciśnienia w układzie chłodzenia, co przekłada się na trudności w pompowaniu cieczy chłodniczej i jej urabialność<sup>49</sup>. Jednocześnie podkreślili, że zakres badań nad właściwościami reologicznymi nanocieczy jest wciąż niekompletny. W 2017 r. Akbari et al. [123] odnotowali wzrost lepkości dynamicznej<sup>50</sup> glikolu etylenowego o 116% przy zwiększeniu stężenia cząstek stałych z 0,1% do 3%. W 2021 r. Huy et al. [124] opisali wpływ dodatków inhibitorów korozji w cieczy chłodniczej na poprawę trwałości komponentów układu chłodzenia. W 2025 r.

---

<sup>46</sup> Nanociecz to zawiesina nanocząstek w cieczy bazowej, która wykazują zwiększoną przewodność cieplną, lepsze właściwości smarne i wyższą efektywność wymiany ciepła [125].

<sup>47</sup> Tarcie międzycząsteczkowe to opór ruchu cząsteczek, wpływa na lepkość oraz zachowanie przepływu cieczy.

<sup>48</sup> Glikol etylenowy to najczęściej stosowana ciecz chłodnicza w układach chłodzenia [124].

<sup>49</sup> Urabialność cieczy chłodniczej to jej zdolność do łatwego przepływu i mieszania w układzie chłodzenia.

<sup>50</sup> Lepkość dynamiczna to miara oporu cieczy wobec przepływu, wynikająca z tarcia.

Pundkar et al. [125] opisali znaczenie nanocieczy w układach chłodzenia z podkreśleniem konieczności uwzględnienia ich kompatybilności ze stosowanymi cieczami chłodniczymi.

### 3.2 Czynniki w procesie technologicznym wpływające na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania chłodnicy powietrza

Jak już kilkakrotnie podkreślono, spośród wielu wymagań jakościowych<sup>51</sup> chłodnica powietrza musi spełniać dwa wymagania główne, dotyczące: stopnia zlutowania łączonych komponentów oraz ilości pozostałości topnika<sup>52</sup>. Stopień zlutowania musi zapewniać szczelność chłodnicy powietrza, a pozostałość topnika musi być jak najmniejsza. Jednak zmniejszanie ilości pozostałości topnika poprzez obniżenie gramatury topnika<sup>53</sup> wpływa negatywnie na stopień zlutowania<sup>54</sup>. W literaturze zostało stwierdzone, że potencjalnie istnieje możliwość obniżenia ilości pozostałości topnika poprzez zmianę warunków lutowania, jednak nie zostało to dotychczas zbadane [117]. Pozostałość topnika jest problemem uniwersalnym w przemyśle motoryzacyjnym, jednak jej negatywna interakcja z cieczą chłodniczą została podkreślona w literaturze dopiero w 2014 r. [114]. Jej znaczenie rośnie na znaczeniu wraz z obecnym rozwojem nanocieczy. Wiodącą metodą ograniczania ilości pozostałości topnika w przemyśle motoryzacyjnym jest stosowanie dodatkowych procesów płukania [63].

Aby opisać problem w syntetyczny sposób przygotowany został diagram Ishikawy, przedstawiony na rysunku 3.3, ilustrujący wpływ czynników procesu technologicznego chłodnicy powietrza na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania. Dzięki graficznemu przedstawieniu zależności umożliwia on identyfikację i analizę przyczyn problemów jakościowych w procesach produkcyjnych [126].

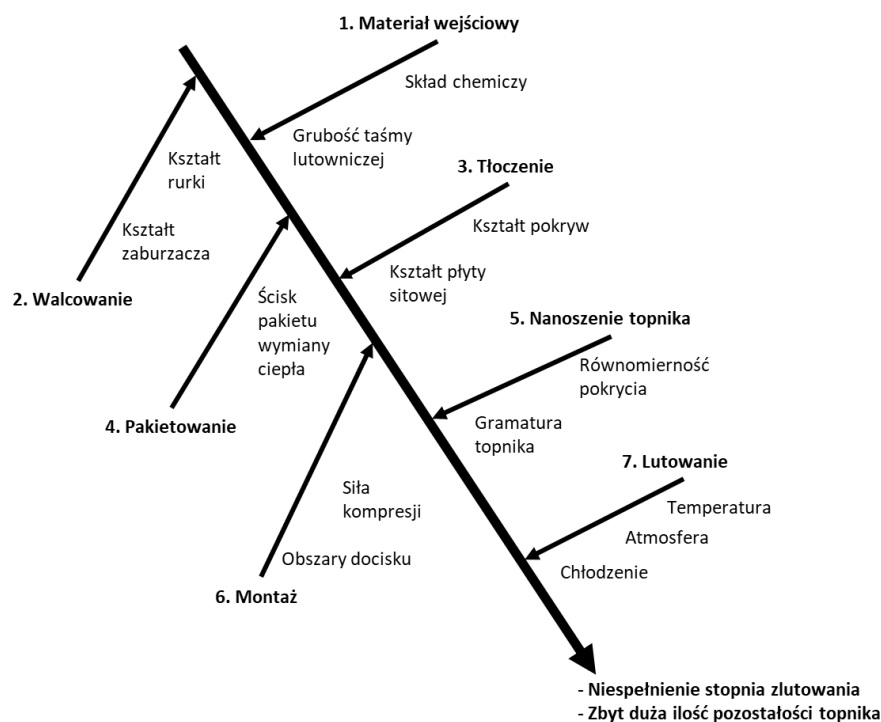
---

<sup>51</sup> Wymagania jakościowe chłodnicy powietrza zostały opisane w 2.8 Proces kontroli, s. 26.

<sup>52</sup> Pozostałość topnika została opisana w 3.1 Opis problemu i przegląd literatury, s. 30.

<sup>53</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>54</sup> Wpływ gramatury topnika na stopień zlutowania zostały opisane w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s. 14.



Rysunek 3.3. Analiza przyczynowo-skutkowa czynników procesowych wpływających na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika (opracowanie własne)

Diagram został opracowany we współpracy z zespołem ekspertów, w skład którego wchodził technolog procesu, inżynierowie produktu i jakości, kierownicy produkcji, technicy, audytorzy oraz operatorzy. Zostały na nim sklasyfikowane czynniki wpływające na niespełnienie wymagań jakościowych z podziałem na następujące po sobie operacje w procesie technologicznym chłodnicy powietrza.

Znaczenie sklasyfikowanych czynników procesowych zostało ocenione z zastosowaniem analizy FMEA<sup>55</sup> procesu, która jest szeroko wykorzystywana w przemyśle motoryzacyjnym do systematycznej analizy przyczyn i skutków wad oraz opanowania szczególnie trudnych procesów [127]. Służy ona do wskazania czynników, które mogą wpływać na niespełnienie wymagań jakościowych wyrobu gotowego [126]. Zgodnie z metodologią FMEA, aktualizowaną w 2019 r. przez AIAG oraz VDA<sup>56</sup> [128], w analizie FMEA-P uwzględnione zostały wady (potencjalne sposoby powstania niezgodności procesowych) oraz ich skutki (konsekwencje wystąpienia niezgodności procesowych). Zostały one ocenione w skali od 1 do

<sup>55</sup> FMEA – Analiza przyczyn i skutków wad (ang. Failure Mode and Effects Analysis). Można wyróżnić analizę dla konstrukcji (FMEA-D) oraz dla procesu (FMEA-P).

<sup>56</sup> AIAG (Automotive Industry Action Group); VDA (Verband der Automobilindustrie).

10 pod względem: istotności skutku (S)<sup>57</sup>, prawdopodobieństwa wystąpienia (O)<sup>58</sup> oraz wykrywalności (D)<sup>59</sup>. Na podstawie oceny tych czynników został wyznaczony priorytet działań (AP)<sup>60</sup>, co zostało przedstawione w tabeli 3.1. Określenia w kolumnie „wada” stanowią uszczegółowienie czynników procesowych określonych w diagramie Ishikawy.

Tabela 3.1. Analiza FMEA-P dla problemu minimalizacji pozostałości topnika przy maksymalizacji stopnia zlutowania (opracowanie własne)

Etap procesu	Wada	Skutek	S	O	D	AP
Kontrola materiału wejściowego	Niewłaściwy skład chemiczny stopu	Niewłaściwe zlutowanie, erozja połączeń	7	2	3	L
	Niejednorodny skład	Niewłaściwe zlutowanie, erozja połączeń	6	2	3	L
	Grubość całkowita poza tolerancją	Uszkodzenia mechaniczne	5	2	2	L
	Niedomiary warstwy spoiwa	Niewłaściwe zlutowanie	5	2	4	L
	Nadmiar warstwy spoiwa	Erozja połączeń	7	2	4	L
Walcowanie	Zbyt wysokie fale zaburzacza	Niemontowalność w pakiecie wymiany ciepła	7	3	4	L
	Niewłaściwy kształt fal zaburzacza	Niewłaście zlutowanie	6	3	4	L
	Zbyt długi zaburzacz	Niemontowalność w pakiecie wymiany ciepła	7	2	2	L
	Grat po cięciu zaburzacza	Niewłaście zlutowanie	5	3	4	L
	Rozwarta rurka	Niewłaście zlutowanie	6	2	4	L
Niewłaściwy kształt rurki	Niemontowalność w płycie sitowej	5	2	4	L	
Tłoczenie	Niewłaściwy kształt kanału	Zaburzony przepływ cieczy chłodniczej	4	2	4	L
	Niewłaściwy kształt otworów	Nieszczelność na połączeniu z rurką	5	2	4	L
	Nieodpowiedni kąt odgięcia pokrywy	Niemontowalność w płycie sitowej	4	3	5	L
	Grat na ściankach bocznych pokrywy	Nieszczelność na połączeniu pokryw	4	2	5	L
	Niewłaściwa podziałka płyty sitowej	Nieszczelność na połączeniu z rurką	7	2	4	L
Pakietowanie	Zbyt duże ściśnięcie pakietu	Nieszczelność połączenia z płytą sitową	6	3	3	L
	Niedopasowanie podawania komponentów	Uszkodzenie mechaniczne zaburzaczy	4	2	3	L
	Podwójna warstwa zaburzacza	Niemontowalność pakietu	8	1	2	L
	Niewłaściwe obszary docisku rurki	Uszkodzenie mechaniczne rurki	6	2	3	L
Nanoszenie topnika	Za dużo topnika na komponentach	Niezdolna czystość wewnętrzna	7	5	8	H
	Za mało topnika na komponentach	Niewłaście zlutowanie	7	4	8	H
	Za duży rozrzut gramatury topnika	Niewłaściwe zlutowanie, niezgodna czystość wewnętrzna	7	5	8	H
Montaż	Za duża kompresja	Uszkodzenia mechaniczne	8	6	4	M
	Za mała kompresja	Niewłaście zlutowanie	6	5	4	M
	Błędne parametry maszyny montującej	Uszkodzenia mechaniczne	6	3	4	L
	Niewłaściwe obszary docisku pokryw	Uszkodzenie mechaniczne, niewłaściwe zlutowanie	6	5	4	M
Lutowanie	Zbyt niska temperatura	Niewłaście zlutowanie	7	5	5	H
	Zbyt wysoka temperatura	Niewłaście zlutowanie, erozja	7	5	5	H
	Zbyt duża wilgotność	Niewłaście zlutowanie	7	2	3	L
	Zbyt dużo tlenu	Niewłaście zlutowanie	7	2	3	L
	Zbyt szybkie chłodzenie	Niewłaście zlutowanie, kruche spoiny	6	2	3	L
	Zbyt wolne chłodzenie	Niewłaście zlutowanie, erozja	6	2	3	L

<sup>57</sup> Istotność skutku, gdzie: 10 oznacza zagrożenie dla bezpieczeństwa; 1 oznacza niezauważalny wpływ na właściwości wyrobu.

<sup>58</sup> Prawdopodobieństwo wystąpienia, gdzie: 10 oznacza że wystąpienie wady jest nieuniknione; 1 oznacza że wystąpienie wady jest praktycznie niemożliwe.

<sup>59</sup> Wykrywalność, gdzie: 10 oznacza brak żadnej możliwości wykrycia wystąpienia wady; 1 oznacza pewność wykrycia wady w przypadku jej wystąpienia.

<sup>60</sup> Podział priorytetu działań korygujących: wysoki (H) - działanie wymagane natychmiast; średni (M) - działanie zalecane; niski (L) - działanie opcjonalne.

W ramach pogłębionej analizy zostało stwierdzone, że ze wszystkich czynników wyznaczonych w analizie FMEA-P największe znaczenie (najwyższy priorytet działań AP) dla uzyskania wysokiego stopnia zlutowania oraz małej ilości pozostałości topnika mają:

- gramatura topnika i jej rozrzut<sup>61</sup>,
- siła kompresji i obszar docisku ramek lutowniczych<sup>62</sup>,
- profil lutowania<sup>63</sup>.

Wymienione czynniki będą przedmiotem dalszych badań.

---

<sup>61</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>62</sup> Znaczenie elementów dociskowych ramek lutowniczych zostało opisane w 2.6 Proces montażu, s. 19.

<sup>63</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

## 4. Cel, zadania i metody pomiarowe

### 4.1 Wnioski z analizy literatury

Na podstawie przedstawionego w poprzednich rozdziałach przeglądu literatury, konsultacji przeprowadzonych w środowisku przemysłowym oraz obserwacji i doświadczeń w firmie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski można stwierdzić, iż:

1. Pozostałość topnika w chłodnicy po procesie lutowania prowadzi do obniżenia sprawności chłodnicy, ryzyka blokowania kanałów przepływowych oraz przyspieszonej degradacji cieczy chłodniczej skutkującej korozją. Stanowi to istotny problem dla niezawodności i trwałości układów chłodzenia w przemyśle motoryzacyjnym.
2. Istotne znaczenie problemu pozostałości topnika wynika z rozwoju cieczy chłodniczych (w tym nanocieczy), gdzie należy uwzględnić ich reaktywność z cząsteczkami stałymi pozostałości topnika.
3. Producenci chłodnic powietrza w przemyśle motoryzacyjnym dążą do redukcji ilości pozostałości topnika najczęściej metodą „prób i błędów”, kierując się doświadczeniem zawodowym oraz intuicją.
4. W literaturze naukowej i fachowej przedstawione są badania dotyczące rozwoju materiałów wejściowych oraz cieczy chłodniczych uwzględniając ich znaczenie dla problemu pozostałości topnika. Brak jednak badań dotyczących wpływu parametrów procesu technologicznego na ilość i formę pozostałości topnika.
5. Problem pozostałości topnika nabiera szczególnej wagi w świetle rygorystycznych norm dla wymienników ciepła, np. IATF 16949 (wymagania dotyczące doskonalenia wydajności cieplnej samochodowych wymienników ciepła) czy ustawy (EU) 2019/851 (normy emisji CO<sub>2</sub> dla przemysłu motoryzacyjnego).
6. Pozostałość topnika w chłodnicy jest także problemem w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski. Nadmiar pozostałości topnika jest możliwy do usunięcia za pomocą procesu płukania, jednak wiąże się on z dodatkowymi operacjami w procesie technologicznym oraz wymaga zastosowania czynników chemicznych szkodliwych dla środowiska.
7. Z analizy literatury przedmiotu oraz z przeprowadzonej w rozdziale 3 analizy problemu wynika, że w procesie technologicznym na pozostałość topnika wpływ mają przede wszystkim procesy nanoszenia topnika, montażu oraz lutowania.

## 4.2 Cel, teza i etapy pracy

Przedstawione powyżej spostrzeżenia upoważniają do sformułowania użytecznego celu pracy w postaci: **redukcja ilości pozostałości topnika w chłodnicach powietrza wytwarzanych w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski o 10%, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego stopnia ich zlutowania.**

**Osiągnięcie celu użytecznego wymaga przeprowadzenia serii analiz oraz eksperymentów. Ich wynikiem będzie osiągnięcie celu naukowego pracy i zweryfikowanie tezy, że redukcję ilości pozostałości topnika można uzyskać kontrolując i odpowiednio dobierając czynniki procesowe wskazane w rozdziale 3, tj. gramaturę warstwy topnika<sup>64</sup>, siłę kompresji ramek lutowniczych<sup>65</sup> oraz kontrolę profilu lutowania<sup>66</sup>.**

Realizacja wyznaczonych celów pracy wymagała zrealizowania wymienionych poniżej etapów pracy:

1. Analiza problemu, określenie celu, tezy pracy oraz planu badań.

Analiza problemu na podstawie badania literatury oraz stosowanych norm technicznych związanych z konstrukcją oraz wytwarzaniem chłodziw samochodowych. Etap ten obejmuje także analizę przyczynowo-skutkową problemu pozostałości topnika<sup>67</sup>.

2. Opracowanie metod pomiaru ilości pozostałości topnika.

Opracowanie innowacyjnych metod pomiaru pozostałości topnika w związku z dużą czasochłonnością i wysokimi kosztami metody pomiaru dostępnej w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski. Etap ten uwzględnia analizę stosowanej metody pomiarowej oraz opracowanie nowej, bardziej efektywnej, a jednocześnie dostarczającej informacji wystarczających do realizacji celu pracy.

3. Planowanie i przeprowadzenie badań.

Planowanie i przeprowadzenie serii eksperymentów umożliwiających opracowanie wytycznych odnośnie doboru czynników procesu prowadzących do redukcji pozostałości topnika. Etap ten obejmuje również wykazanie tezy naukowej pracy.

4. Zastosowanie zaleceń w praktyce przemysłowej

Wdrożenie opracowanych wytycznych i wykazanie osiągnięcia użytecznego celu pracy

---

<sup>64</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>65</sup> Kompresja ramek lutowniczych została opisana w 2.6 *Proces montażu*, s. 19.

<sup>66</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) zostało opisane w 2.7 *Proces lutowania*, s. 21.

<sup>67</sup> Analiza problemu została opisana w 3.2 *Czynniki w procesie technologicznym wpływające na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania chłodziw powietrza*, s. 33.

### 4.3 Metody badań

W pracy zastosowano zarówno jakościowe jak i ilościowe metody badań. Metody jakościowe wykorzystano do identyfikacji i analizy przyczyn problemów procesowych, natomiast metody ilościowe posłużyły do ich szczegółowej oceny i weryfikacji na podstawie danych liczbowych.

Z metod jakościowych zastosowano narzędzia inżynierii jakości, w szczególności diagram Ishikawy oraz analizę FMEA-P. Narzędzia te posłużyły do analizy problemu i wskazania głównych czynników procesu mających wpływ na ilość pozostałości topnika oraz stopień zlutowania chłodnicy powietrza (zastosowano je w rozdziale 3).

Z metod ilościowych wiodącymi metodami były eksperymenty oraz badania symulacyjne. W pracy zastosowano klasyczne metody planowania eksperymentów - pełen eksperyment czynnikowy na dwóch i trzech poziomach z równą i nierówną liczbą replikacji. Posłużyły one do zbadania wpływu gramatury topnika i maksymalnej temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika (plan  $3^2$ ) oraz w celu weryfikacji wpływu czynników geometrii pokrywy oraz ciśnienia roboczego procesu nanoszenia topnika na jego gramaturę i rozrzut grubości jego warstwy (plan  $2^2$ ).

W pracy zastosowano również badania symulacyjne procesu nanoszenia topnika. Ich rezultatem był model komputerowy, z którego wyniki wykorzystano w zaprojektowanym eksperymencie. Miał on na celu analizę czynników istotnych dla rozrzutu gramatury pomiędzy pokrywami w partiach produkcyjnych (plan  $2^4$ ).

### 4.4 Metody pomiaru i analizy

Ze względu na złożoność konstrukcji chłodnicy powietrza i jej procesu technologicznego, a także różnorodne wymagania jakościowe<sup>68</sup>, w pracy stosowano wiele różnorodnych metod pomiaru i analizy. Można je podzielić na trzy grupy:

- a) metody stosowane w przedsiębiorstwie,
- b) metody opracowane na potrzeby realizowanych badań,
- c) innowacyjne metody pomiaru pozostałości topnika

Ad. a) Metody stosowane w przedsiębiorstwie:

---

<sup>68</sup> Wymagania jakościowe chłodnicy powietrza zostały opisane w 2.8 Proces kontroli, s. 26.

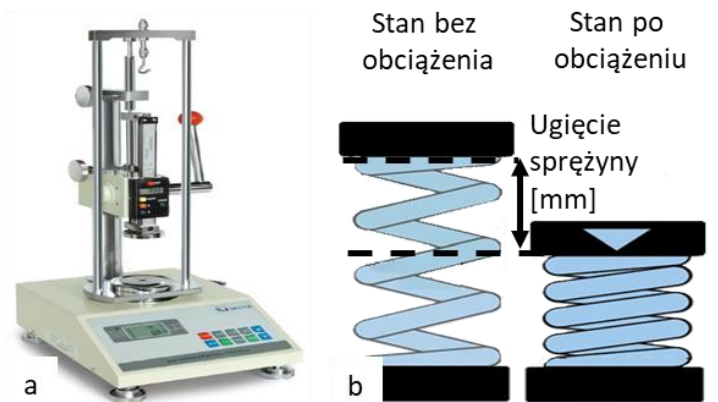
- Pomiar masy topnika - za pomocą wagi precyzyjnej z dokładnością do 0,01 [g], przedstawionej na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Waga precyzyjna [129]

Komponenty są ważone dwukrotnie, najpierw po procesie nanoszenia topnika, a następnie po myciu w myjce ultradźwiękowej. Różnica pomiarów odpowiada masie samego topnika [g] na wybranym komponencie. Po uwzględnieniu powierzchni komponentów obliczana jest gramatura topnika [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]. W przypadku prób technologicznych możliwy jest alternatywny pomiar nieniszczący, gdzie komponenty ważone są przed i po procesie nanoszenia topnika<sup>69</sup>.

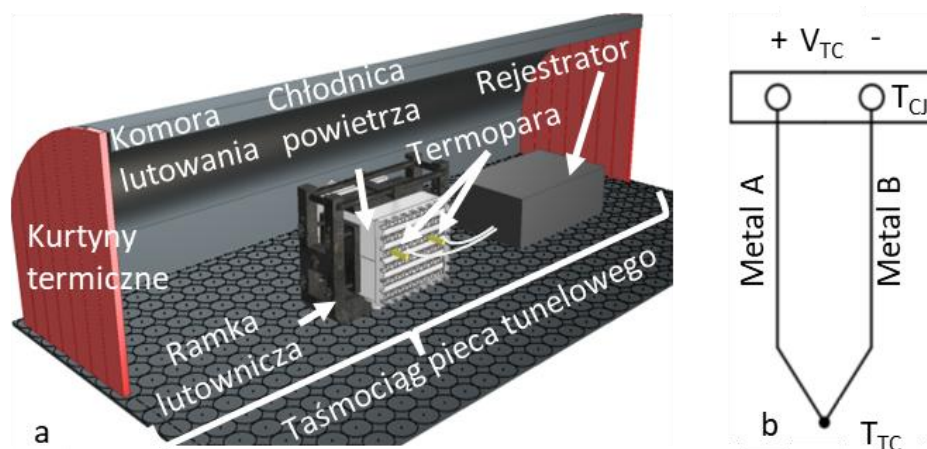
- Pomiar siły kompresji sprężyn w ramach lutowniczych - za pomocą siłomierza o dokładności 0,02 [N] zintegrowanego ze stanowiskiem pomiarowym, które zostało przedstawione na rysunku 4.2 a). Polega na pomiarze siły sprężyn [N] przy ich ugięciu do określonej wysokości [mm], co zostało przedstawione na rysunku 4.2 b).



Rysunek 4.2. Pomiar siły kompresji sprężyn: a) stanowisko do pomiaru sprężyn [130], b) schemat ugięcia sprężyny podczas pomiaru (opracowanie własne na podstawie [131])

<sup>69</sup> Nieniszczący charakter metody w procesie seryjnym wymaga śledzenia poszczególnych komponentów w pętli logistycznej.

- Pomiar temperatury w czasie – zmiana temperatury w czasie jest rejestrowana poprzez termopary umieszczone we wnętrzu chłodnicy powietrza, co zostało przedstawione na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3. Metoda pomiaru temperatury w czasie w piecu tunelowym<sup>70</sup>: a) schemat pomiaru temperatury w czasie (opracowanie własne), b) budowa termopary [132]

Wykorzystywana termopara składa się z dwóch przewodów wykonanych z różnych metali. Ich połączenie tworzy punkt pomiarowy  $T_{TC}$  (ang. Thermocouple Temperature Contact). Drugi koniec przewodów pełni funkcję ścieżki sygnałowej prowadzącej do układu kondycjonowania sygnału. Dzięki wykorzystaniu napięcia Seebecka<sup>71</sup> ( $V_{TC}$ ) oraz jego porównaniu z napięciem odniesienia w obszarze o znanej temperaturze ( $T_{CJ}$  – ang. Thermocouple Cold Junction) możliwe jest określenie temperatury badanego obiektu z dokładnością  $\pm 0,3$  [°C] [132, 133]. Ze względu na konieczność umieszczenia aparatury pomiarowej na taśmociągu pieca tunelowego, do aparatury pomiarowej stosuje się barierę ochronną w postaci obudowy termicznej [134].

- Pomiar szczelności - odbywa się za pomocą testera szczelności o dokładności  $\pm 1,5\%$  mierzonej wartości + 7,5 [mbar] [135], przedstawionego na rysunku 4.4. Pomiar odbywa się po zaciskowym podłączeniu chłodnicy powietrza do testera.

<sup>70</sup> Piec tunelowy został opisany w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>71</sup> Napięcie Seebecka to siła elektromotoryczna powstająca w obwodzie złożonym z dwóch różnych metali lub półprzewodników, których złącza znajdują się w różnych temperaturach.

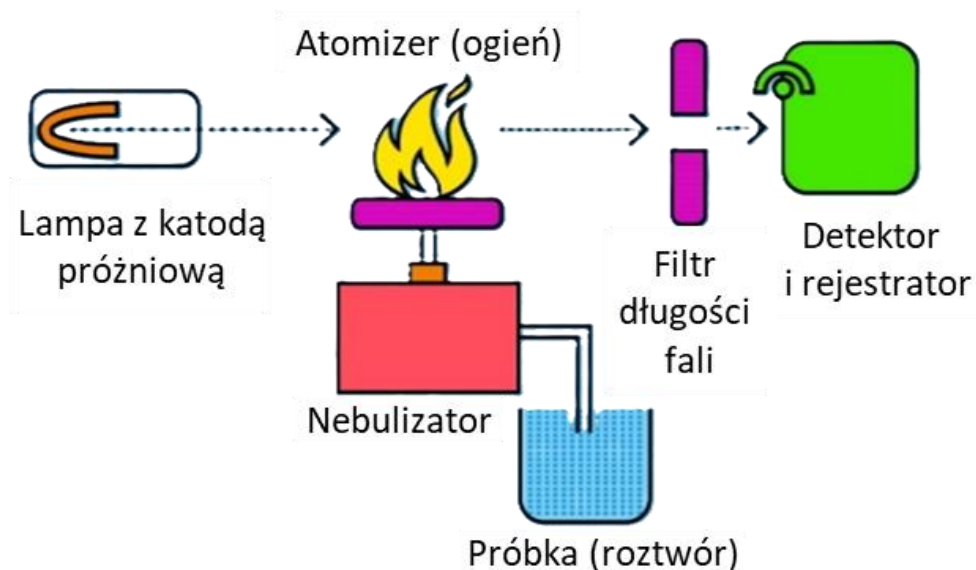


Rysunek 4.4. Przyrząd do pomiaru szczelności [135]

- Pomiar ilości pozostałości topnika - stosowany jest w ramach cyklicznej kontroli czystości wewnętrznej zgodnie z wymaganiami dla danej chłodnicy powietrza. Pomiar odbywa się zgodnie z normą DIN ISO 9964-3:1993 „Jakość wody -Oznaczenie sodu i potasu” [136] za pomocą metody atomowej spektrometrii absorpcyjnej AAS<sup>72</sup> (ang. Atomic Absorption Spectrometry). W tym celu wykorzystywana jest specjalistyczna aparatura badawcza, w skład której wchodzi zewnętrzne źródło światła (lampa katodowa), płomieniowy atomizator czy systemy korekcji zakłóceń [137], co zostało przedstawione na rysunku 4.5. W niniejszej pracy metoda AAS została zastosowana wyłącznie w celach porównawczych jako wartość referencyjna dla oceny skuteczności alternatywnych metod badawczych.

---

<sup>72</sup> Norma DIN ISO 9964-3:1993 zakłada wykorzystanie metody Emisyjnej Spektrometrii Płomieniowej FES (ang. Flame Emission Spectrometry). Ze względu na wady pomiaru światła emitowanego, takie jest podatność na zakłócenia ze strony płomieni i tła, dla pomiaru ilości pozostałości topnika w badanych chłodnicach powietrza stosowana jest alternatywna metoda absorpcyjna [138].



Rysunek 4.5. Schemat pomiaru ilości pozostałości topnika metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej [119]

Pomiar ilości pozostałości topnika metodą AAS odbywa się poprzez określenie stężenia potasu [mg/l] na podstawie pomiaru światła pochłanianego (absorpcja) przez wzbudzone atomy potasu. Wiąże się to z dużą czułością oraz dokładnością pomiaru [138]. Roztwór pozostałości topnika do badań (zawierający potas) uzyskuje się metodami płukania, które są zależne od specyfikacji chłodnicy powietrza [63, 118]. Intensywność emisji promieniowania o charakterystycznej dla potasu długości fali 766,5 [nm] jest proporcjonalna do jego stężenia w próbce [mg/l].

Ad. b) Metody opracowane na potrzeby realizowanych badań:

- Pomiar grubości warstwy topnika - umożliwia ocenę równomierności warstwy topnika. Poziomą równomierność warstwy topnika został określony jako zmienność jego grubości na powierzchni. W celu oceny tej zmienności pokrywa została podzielona na 9 obszarów, co zostało przedstawione na rysunku 4.6 a). Na tych obszarach wykonany został pomiar grubości warstwy topnika poprzez przyłożenie sondy pomiarowej warstwowierza TB 1000-0,1FN, który został przedstawiony na rysunku 4.6 b).



Rysunek 4.6. a) obszary pomiaru grubości warstwy topnika na pokrywie (opracowanie własne),  
b) warstwowierz TB 1000-0.1 FN [139]

Pomiar nieprzewodzących powłok (takich jak fluoroglinian potasu<sup>73</sup>) na metalicznych podłożach przewodzących (takich jak aluminium) wymaga zastosowania sondy pomiarowej typu N. Działa ona na zasadzie indukcji prądów wirowych<sup>74</sup> (ang. Eddy Current) [140]. Aby zniwelować wpływ nierównej wielkości cząsteczek topnika oraz zapobiec uszkodzeniu powłoki, pomiar został dokonany przez folię wzorcową o grubości 50 [ $\mu\text{m}$ ]. W ten sposób uzyskano gładką powierzchnię pomiarową, a wynik pomiaru, z dokładnością do 0,1 [ $\mu\text{m}$ ]  $\pm 3\%$  wartości mierzonej, został pomniejszony o grubość folii.

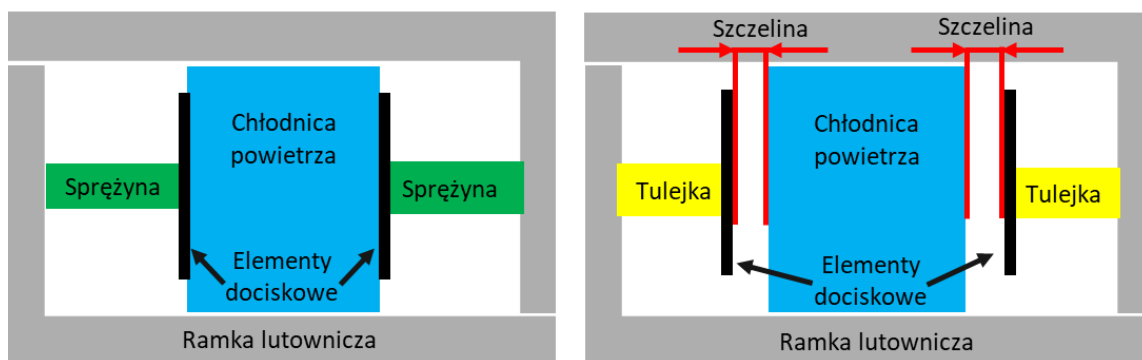
- Pomiar szerokości szczeliny montażowej - zastąpił pomiar siły sprężystości sprężyn w ramkach lutowniczych, stosowanych do utrzymania siły kompresji<sup>75</sup>. Ze względu na ograniczenia techniczne regulacji siły nacisku sprężyn<sup>76</sup>, wynikające z ich geometrycznych właściwości (np. średnica drutu, liczba zwojów oraz skok), sprężyny w ramkach zostały zastąpione przez tulejki dystansowe o stałej wysokości. Wysokość tulejek została dobrana tak, aby utrzymać stałą szczelinę montażową pomiędzy elementami dociskowymi ramki lutowniczej, a chłodnicą powietrza, co zostało przedstawione na rysunku 4.7.

<sup>73</sup> Omawiany topnik jest eutektyką związków  $\text{KAlF}_4\text{-K}_3\text{AlF}_6$ .

<sup>74</sup> Indukcja prądów wirowych następuje za pomocą zmiennego pola magnetycznego. Zmiany w przepływie prądów wirowych są analizowane, aby uzyskać informacje o właściwościach materiału, takich jak grubość.

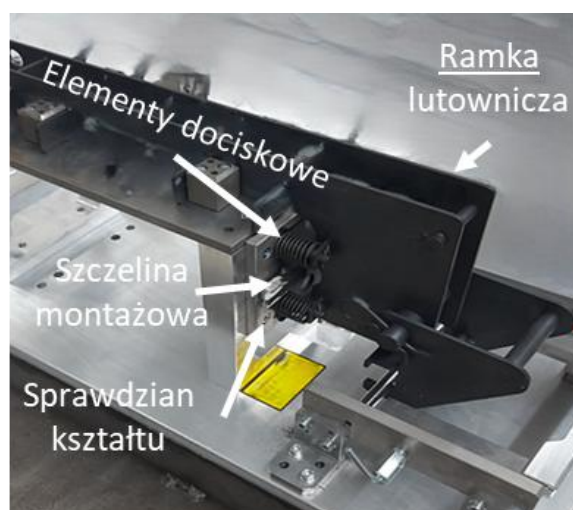
<sup>75</sup> Znaczenie siły kompresji w ramkach lutowniczych zostało opisane w 2.6 Proces montażu, s. 19.

<sup>76</sup> Po osiągnięciu określonego stopnia ściśnięcia, sprężyna osiąga tzw. stan zablokowania (ang. Solid Height), w którym zwoje stykają się ze sobą, uniemożliwiając dalsze skrócenie [167].



Rysunek 4.7. Modyfikacja ramek lutowniczych w celu uzyskania szczeliny montażowej: a) przed modyfikacją, b) po modyfikacji (opracowanie własne)

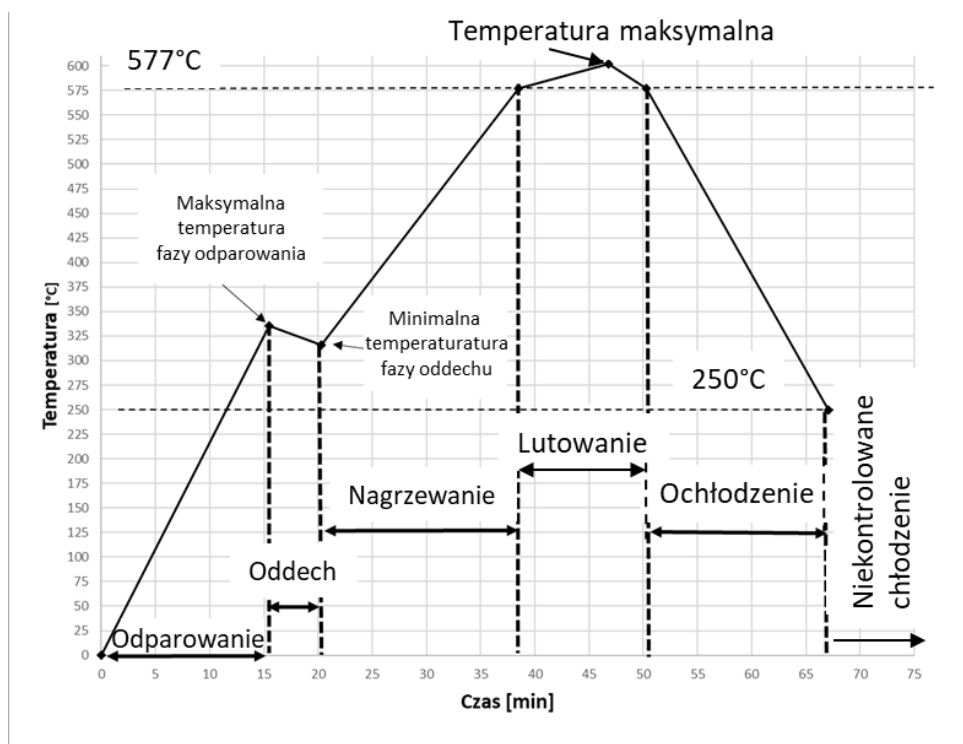
Aby umożliwić pomiar szerokości szczeliny montażowej, ramki lutownicze zostały zamontowane na sprawdzianie kształtu, co zostało przedstawione na rysunku 4.8. Pomiar został dokonany za pomocą szczelinomierza w narożnikach elementów dociskowych ramki lutowniczej z dokładnością do 0,05 [mm].



Rysunek 4.8. Ramka lutownicza zamontowana w sprawdzianie kształtu (opracowanie własne),

- Fazowa analiza profilu lutowania - odbywała się na podstawie pomiaru zmian temperatur w czasie. Metoda została opracowana w celu umożliwienia bezpośredniego porównywania profili lutowania dla różnych chłodnic powietrza. Polega na podzieleniu profilu lutowania na fazy zależne od temperatur<sup>77</sup>, co zostało przedstawione na rysunku 4.9.

<sup>77</sup> Fazy przyjęte w autorskiej metodzie zostały określone na podstawie faz lutowania opisanych w 2.7 Proces lutowania, s. 21.



Rysunek. 4.9 Fazowa analiza profilu lutowania ze względu na temperatury procesu lutowania (opracowanie własne)

Przyjętą w analizie miarą jest  $TTC_{PA}$  (ang. Time-Temperature Cycle Phase Area), która oznacza pole powierzchni pod profilem lutowania z podziałem na fazy:

- Faza odparowania – została wyznaczona w czasie [min] pomiędzy temperaturą otoczenia (początkiem taśmociągu) aż do czasu [min] pierwszego spadku temperatury. W tej fazie dochodzi do odparowania środków smarnych<sup>78</sup>.
- Faza oddechu – została wyznaczona w czasie [min] pomiędzy spadkiem temperatury (wyjście z komory odparowania) do ponownego jej wzrostu (wejście do komory nagrzewania). W efekcie spadku temperatury dochodzi do spadku ciśnienia, powodując zasysanie powietrza z otoczenia [141].
- Faza nagrzewania – została wyznaczona pomiędzy czasem [min] ponownego wzrostu temperatury aż do osiągnięcia temperatury 577 [°C]. W tej fazie odbywają się zjawiska dyfuzji magnezu i manganu [9, 92, 93].
- Faza lutowania – została wyznaczona pomiędzy czasem [min] osiągnięcia temperatury 577 [°C] aż do ponownego spadku poniżej niej. W tej fazie dochodzi

<sup>78</sup> Środki smarne stosowane są procesach formowania blach, co zostało opisane w 2.3 Proces formowania blach, s. 10.

do roztopienia topnika oraz spoina, zapewniając leżność umożliwiającą powstanie spoin.

- o Faza ochłodzenia – została wyznaczona w czasie [min] od początku spadku temperatury poniżej 577 [°C] aż do temperatury 250 [°C]. W tej fazie odbywa się krzepnięcie spoin i ich krystalizacja. Temperatury poniżej 250 [°C] (niekontrolowane ochłodzenie) nie są uwzględnione w analizie.

Ad c) Innowacyjne metody pomiaru pozostałości topnika:

Obecnie stosowana metoda pomiaru pozostałości topnika (metoda AAS) wymaga precyzyjnego sterowania warunkami pomiarowymi, takimi jak temperatura, czas atomizacji oraz synchronizacja źródła światła z detektorem [138]. Przygotowanie próbek jest czasochłonne, ponieważ obejmuje wieloetapowy proces płukania [63]. Ponadto konieczność stosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej wiąże się z wysokimi kosztami. Do ograniczeń metody AAS zaliczają się wymóg szczelności chłodziń powietrza oraz brak uwzględnienia obecności fluoru, który stanowi około 50% masy topnika<sup>79</sup>. W rezultacie metoda ta nie pozwala na ocenę wpływu warunków granicznych procesu lutowania<sup>80</sup> na formę ani na obszary agregacji cząsteczek pozostałości topnika. Z tych powodów analiza wpływu czynników procesowych na ilość i formę pozostałości topnika wymagała opracowania alternatywnej metody pomiarowej, pozbawionej wymienionych ograniczeń. Opracowanie takiej metody było związane z przeprowadzeniem obszernych prac badawczych, które są przedmiotem rozdziału 5.

## 4.5 Plan badań

W celu realizacji założeń pracy opracowano plan badań dotyczących wpływu wybranych czynników procesowych na ilość i formę pozostałości topnika. W tabeli 4.1 przedstawiono szczegółowy plan badań, obejmujący stosowane metody badawcze oraz metody pomiarowe opisane w rozdziałach 4.2 i 4.3. Badania były planowane sukcesywnie, w oparciu o wyniki uzyskane w poprzednich etapach, co pozwoliło na systematyczne poszerzanie wiedzy o procesie technologicznym chłodzińcy powietrza.

---

<sup>79</sup> Topnik jest eutektyką związków  $KAlF_4$ - $K_3AlF_6$ , co zostało opisane w 2.5 *Proces nanoszenia topnika*, s. 14.

<sup>80</sup> Graniczne warunki procesu lutowania to zakres maksymalnej temperatury od 590 do 610 [°C], co zostało opisane w 2.7 *Proces lutowania*, s. 21.

Tabela 4.1 Plan badań (opracowanie własne)

Etap pracy	Rodzaj badania	Metody badań i metody pomiarowe
Analiza problemu	Studium problemowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Badania literaturowe</li> <li>- Analiza przyczynowo-skutkowa problemu</li> </ul>
Opracowanie metod pomiaru	Badanie ilości i formy pozostałości topnika	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Spektrofotometria</li> <li>- Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM-EDS)</li> <li>- Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC)</li> </ul>
Planowanie i przeprowadzenie badań	Badanie charakterystyki warstwy topnika	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pomiar gramatury topnika na pokrywach</li> <li>- Pomiar grubości warstwy topnika</li> </ul>
	Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania	Metoda ilościowa: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pomiar wielkości szczeliny montażowej</li> </ul>
	Badanie wpływu konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na warunki termiczne procesu lutowania	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pomiar temperatury w wyznaczonych obszarach</li> <li>- Pomiar zmiany temperatury w czasie</li> </ul>
	Badanie wpływu konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na warunki termiczne procesu lutowania	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analiza fazowa profilu lutowania</li> <li>- Pomiar maksymalnej temperatury lutowania</li> </ul>
Zastosowanie zaleceń w praktyce przemysłowej	Badanie wpływu gramatury topnika i temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Test szczelności i rozrywania</li> <li>- Ocena stopnia zlutowania</li> <li>- Ocena ilości pozostałości topnika</li> </ul>
	Badanie wpływu czynników procesu nanoszenia topnika na udział jego gramatury pomiędzy partiami produkcyjnymi	Metoda symulacyjna: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Symulacja procesu nanoszenia topnika</li> <li>- Analiza ANOVA</li> </ul>
	Badanie wpływu czynników procesu nanoszenia topnika na równomierność pokrycia jego warstwy	Metody ilościowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pomiar gramatury topnika na pokrywach</li> <li>- Pomiar grubości warstwy topnika</li> </ul>

## 5. Opracowanie metody pomiaru ilości pozostałości topnika

### 5.1 Założenia

Ponieważ stosowana w przedsiębiorstwie metoda pomiaru ilości pozostałości topnika jest zbyt czasochłonna oraz nie pozwala wyznaczyć wszystkich wielkości potrzebnych do analizy wyników badań, zaproponowano i przebadano trzy nowe, niezależne metody, oparte na:

- spektrofotometrii - sygnałem pomiarowym jest refleksyjność powierzchni, wyrażona w postaci jasności i współrzędnych barw,
- skaningowej mikroskopii elektronowej - sygnałami pomiarowymi jest topografia powierzchni (obraz z elektronów wtórnych) oraz intensywność promieniowania rentgenowskiego charakterystycznego dla poszczególnych pierwiastków,
- mikroskopia światła odbitego - sygnałem pomiarowym jest kontrast optyczny obrazu, wynikający ze zmian intensywności światła odbitego od powierzchni.

Wartości pomiarowe w badanych metodach nie stanowią bezpośredniego pomiaru ilości pozostałości topnika. Ich interpretacja opierała się na istnieniu powtarzalnej zależności względem wartości referencyjnej, uzyskanej metodą AAS<sup>81</sup>. Wartości pomiarowe traktowane są jako miary pośrednie, umożliwiając ocenę względnych różnic w ilości pozostałości topnika w porównaniu do wartości referencyjnej. Przyjęto założenie, że w warunkach stałego przebiegu procesu technologicznego<sup>82</sup>, ilość pozostałości topnika jest proporcjonalna do ilości topnika wprowadzonego na wejściu, co umożliwia porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami.

W celu weryfikacji zgodności wartości pomiarowych badanych metod z wartościami referencyjnymi uzyskanymi metodą AAS, przygotowano chłodnice powietrza, w których kontrolowano gramaturę topnika<sup>83</sup> na pokrywach. Pokrywy te charakteryzują się ukształtowaną budową z wyoblonym kanałem przepływu cieczy chłodniczej, co zostało przedstawione na rysunku 5.1 a). Pokrywa chłodnicy powietrza, po zakończeniu procesu montażu<sup>84</sup>, znajduje się w bezpośrednim kontakcie z rurkami pakietu wymiany ciepła<sup>85</sup>, co umożliwia powstanie na

---

<sup>81</sup> Metoda AAS została opisana w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.

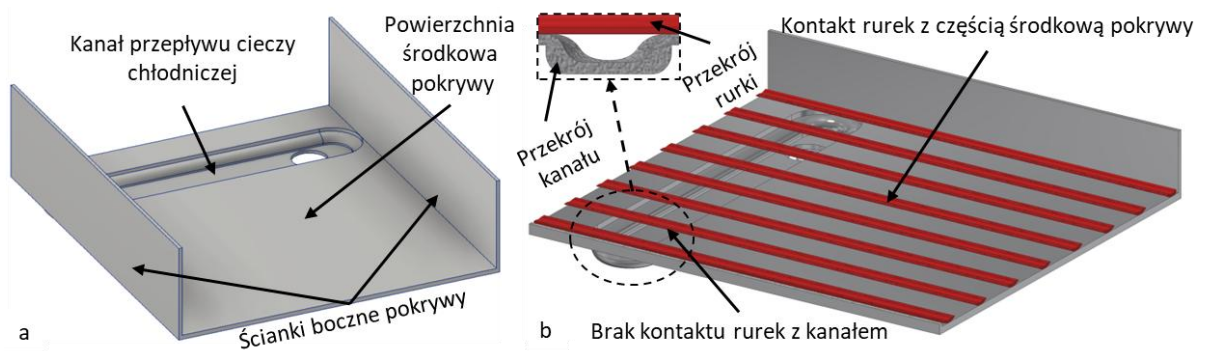
<sup>82</sup> Warunki procesu technologicznego zostały opisane w 2 Proces technologiczny aluminiowej chłodnicy powietrza, s. 8.

<sup>83</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>84</sup> Proces montażu został opisany w 2.6 Proces montażu, s. 19.

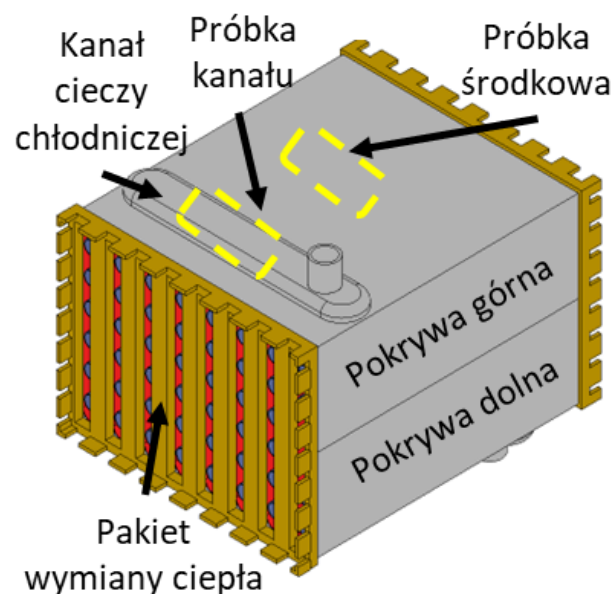
<sup>85</sup> Pakiet wymiany ciepła został opisany w 1.3 Chłodnica powietrza w układzie doładowania, s. 4.

powierzchniach ich styku spoin lutowniczych. Natomiast ze względu na wyoblony kształt kanału przepływu cieczy chłodniczej, nie dochodzi do kontaktu pomiędzy powierzchnią kanału a rurkami, co zostało przedstawione na rysunku 5.1 b). W związku z brakiem powierzchni styku, na tym obszarze spoina lutownicza nie powstaje.



Rysunek 5.1. Model ukształtowanej pokrywy chłodnicy powietrza: a) konstrukcja, b) widok przekrojowy kontaktu rurek z pokrywą (opracowanie własne)

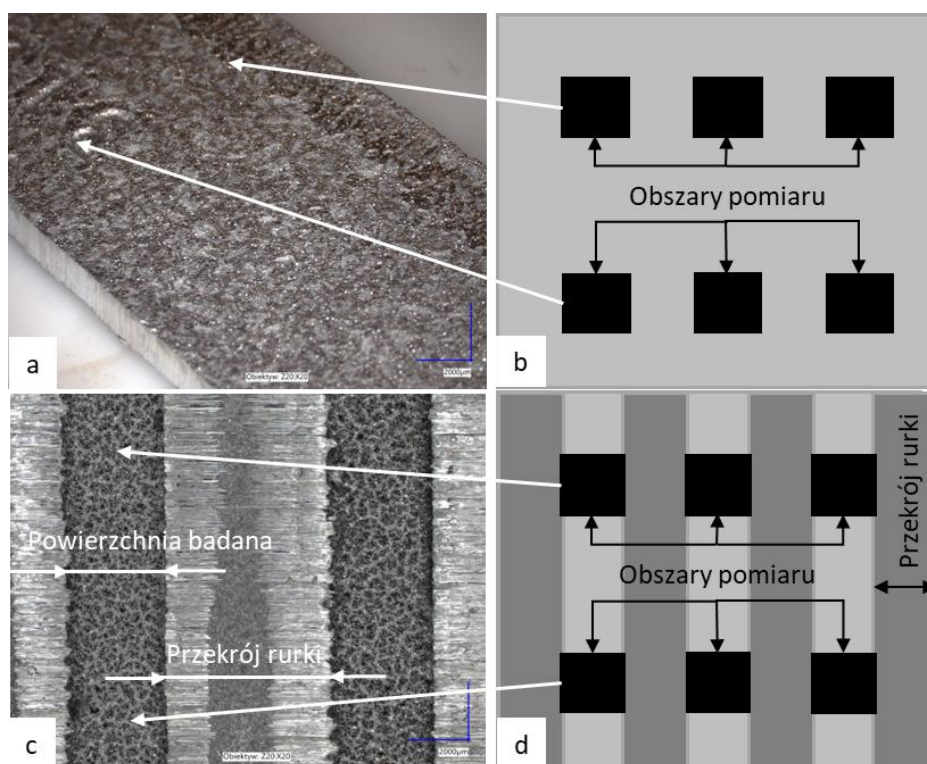
Aby zbadać wpływ zjawiska powstawania spoin na ilość pozostałości topnika, z każdej chłodnicy pobrano cztery próbki: z kanału pokrywy górnej, kanału pokrywy dolnej, części środkowej pokrywy górnej oraz części środkowej pokrywy dolnej, co zostało przedstawione na rysunku 5.2.



Rysunek 5.2. Obszary pobrania próbek z chłodnicy powietrza (opracowanie własne)

Zgodnie ze standardem ASTM E3-11 (2017) [142], przygotowanie próbek metalograficznych<sup>86</sup> odbywa się poprzez wycięcie fragmentu materiału (pobranie próbki), a następnie przeprowadzenie jego obróbki uzyskując zgląd metalograficzny<sup>87</sup>.

Ze względu na występowanie pozostałości topnika bezpośrednio na powierzchni, pobrane próbki nie mogły zostać poddane po wycięciu dalszej obróbce. W efekcie ich powierzchnia charakteryzowała się wysoką chropowatością, co zostało uwzględnione przy interpretacji wyników. Z wyznaczonych obszarów chłodnicy powietrza wycięto 4 próbki w postaci prostokątów o wymiarach ~30 x 15 [mm]. Zostały one przedstawione na rysunku 5.3 wraz z wyznaczonymi obszarami pomiarowymi.



Rysunek 5.3. Przygotowanie próbek pomiarowych: a) próbka kanału, b) schemat pomiaru próbki kanału, c) próbka środkowa, d) schemat pomiaru próbki środkowej (opracowanie własne)

Ze względu na występowanie pozostałości topnika w postaci nierównomiernych cząsteczek na powierzchni<sup>88</sup>, dla każdej z 4 próbek zostało wybrane 6 równomiernie rozłożonych obszarów pomiarowych, które dla próbek środkowych są ograniczone obecnością przekrojów

<sup>86</sup> Próbką metalograficzną to fragment materiału metalowego, który został przygotowany do obserwacji mikrostruktury pod mikroskopem optycznym lub elektronowym.

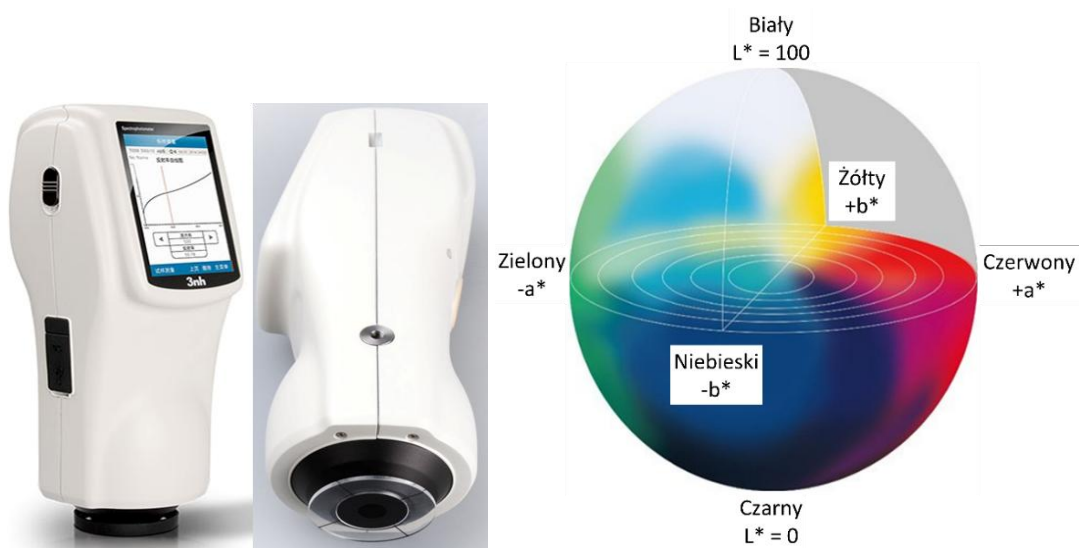
<sup>87</sup> Operacje obróbki próbek metalograficznych to: inkludowanie (umieszczenie w żywicy), szlifowanie, polerowanie oraz trawienie (uwidocznienie struktury powierzchni przez zastosowanie odczynników chemicznych).

<sup>88</sup> Pozostałość topnika występuje w postaci płytek o kwadratowym kształcie i wymiarach 10–20 [µm] oraz w postaci igieł, co zostało opisane w 3.1 Opis problemu i przegląd literatury, s. 30.

rurek. W ten sposób uzyskano i obserwowano próbki w celu badań metodami spektrofotometrii, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz mikroskopii światła odbitego.

## 5.2 Spektrofotometria

Spektrofotometria<sup>89</sup> polega na badaniu interakcji światła z materią poprzez analizę właściwości odbicia lub przepuszczania wybranych długości fal przez substancję w postaci refleksyjności<sup>90</sup> [143]. Przyjęto założenie, że pozostałość topnika na powierzchni próbki wpływa na wartość refleksyjności, w tym na jasność oraz współrzędne barw. Obserwacja metodą spektrofotometrii została dokonana na wybranych obszarach próbek pokryw<sup>91</sup> za pomocą spektrofotometru NS800, w przestrzeni barw CIE LAB<sup>92</sup>, które zostały przedstawione na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4. a) spektrofotometr NS800 [144], b) współrzędne barw przestrzeni barw CIE LAB [145]

W pomiarach został wykorzystany iluminant CIE D65<sup>93</sup>, przy kącie obserwacji 10°, uzyskując wartości jasności i współrzędnych barw:

- $L^*$  - oznacza jasność (luminancję), mierzoną w skali czarny (0) - biały (100),

<sup>89</sup> Podstawy spektrofotometrii zostały odkryte przez Newtona w 1666 r, natomiast regularne zastosowanie w laboratoriach i przemyśle datowane jest na lata 40. XX wieku [139].

<sup>90</sup> Reflektancja (odbicie) w postaci krzywej odbicia spektrofotometrycznego jest funkcją długości fali, oznaczającą stosunek natężenia światła odbitego do natężenia światła padającego na tę powierzchnię.

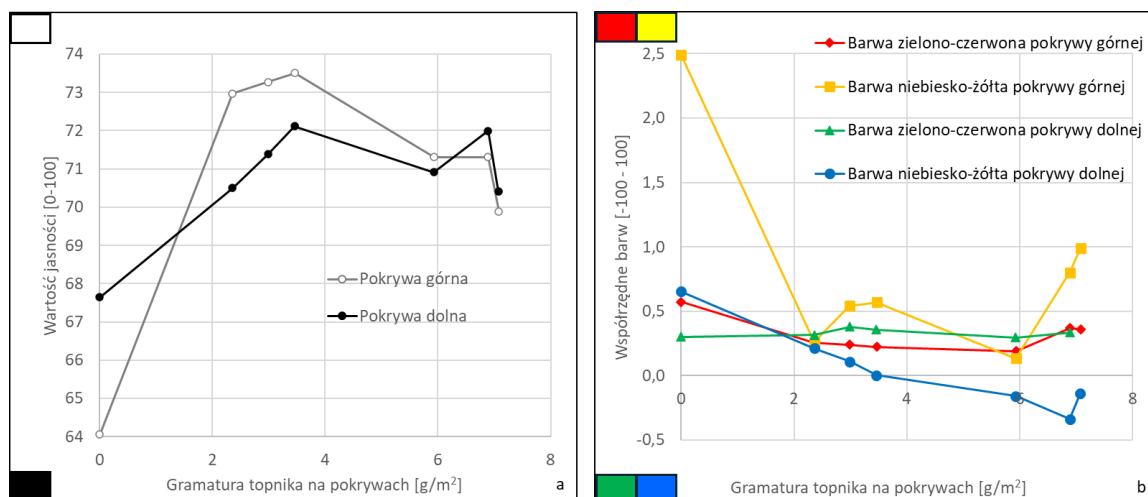
<sup>91</sup> Obszary pomiarowe zostały przedstawione na rysunku 5.2, s. 50.

<sup>92</sup> Formuła koloru CIE LAB jako przestrzeń barw w spektrofotometrii została opracowana przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE) w 1976 r. [145].

<sup>93</sup> Iluminant CIE D65 to standardowe źródło światła, zdefiniowane przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE), które ma symulować uśrednione światło dzienne [160].

- $a^*$  - świadczy o barwie zielonej (-100) lub czerwonej (+100),
- $b^*$  - świadczy o barwie niebieskiej (-100) lub żółtej (+100).

Ze względu na ograniczenia techniczne spektrometru NS800 dot. wielkości powierzchni badanej, pomiar był możliwy jedynie dla próbek kanału, które nie są ograniczone przekrojami rurek. Wyniki pomiaru dla 7 chłodnic powietrza w postaci jasności oraz współrzędnych barw zostały przedstawione na rysunku 5.5.



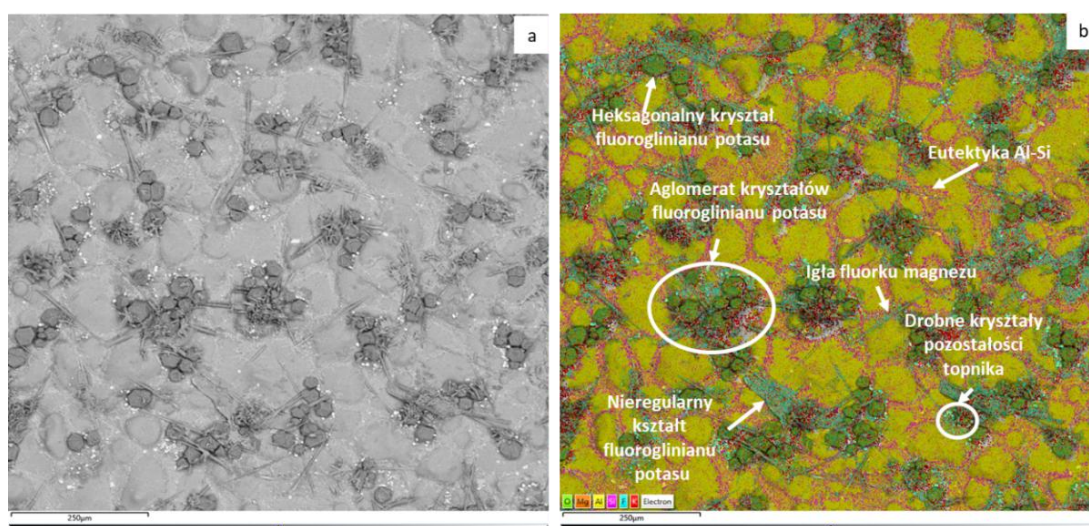
Rysunek 5.5. Wyniki pomiaru refleksyjności w zależności od gramatury topnika na pokrywach i miejscu pobrania próbki: a) porównanie jasności, b) porównanie barw (opracowanie własne)

Na wykresach można zaobserwować wyraźnie niższą jasność pokryw bez pokrycia topnikiem (wartość gramatury 0 [g/m<sup>2</sup>]). Wartość jasności jednak nie jest proporcjonalna do wzrostu gramatury topnika na pokrywach (rysunek 5.5 a). Może być ona wynikiem wysokiej chropowatości próbek. Współrzędne barw zaobserwowane dla pokryw bez pokrycia topnikiem (rysunek 5.5 b) znajdują się w zakresie refleksyjności barw czerwonej (dodatnia wartość parametru  $a^*$ ) oraz żółtej (dodatnia wartość parametru  $b^*$ ). Dla barwy zielono-czerwonej nie zaobserwowano proporcjonalnej zależności względem gramatury topnika na pokrywach ani rozróżnienia pomiędzy pokrywami górną i dolną. Dla barw niebiesko-żółtych widoczny jest trend zmniejszenia żółtej barwy wraz ze wzrostem gramatury topnika na pokrywach do poziomu 6 [g/m<sup>2</sup>], która na pokrywie dolnej przechodzi w barwę niebieską (ujemna wartość parametru  $b^*$ ). Ze względu na zbyt niskie różnice wartości zmiany barw niebiesko-żółtych oraz brak zależności jasności i barw czerwono-zielonej od gramatury topnika na pokrywach, zostało uznane, że metoda spektrofotometrii nie może być stosowana do oceny ilości pozostałości topnika i nie będzie rozpatrywana w dalszych badaniach.

### 5.3 Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM-EDS)

Obserwacja za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej SEM (ang. Scanning Electron Microscopy) została wybrana ze względu na drobnocząsteczkową strukturę pozostałości<sup>94</sup> topnika oraz trudność w jej jednoznacznej identyfikacji na badanych powierzchniach. Przyjęto założenie, że pozostałość topnika na powierzchni próbki wpływa na jej mikrostrukturę, a w szczególności na obecność pierwiastków fluoru oraz potasu. Metoda SEM wykorzystuje wiązkę elektronów do uzyskania szczegółowych informacji o topologii próbek. Są one rejestrowane w postaci obrazów, na podstawie sygnałów wtórnych (takich jak elektrony wtórne i wstecznie rozproszone), które powstają w wyniku oddziaływania elektronów z powierzchnią próbki [146]. Aby umożliwić identyfikację pozostałości topnika na powierzchni materiału, zastosowano moduł dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego EDS (ang. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). Działa on na zasadzie wykrywania charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez atomy, co pozwala na określenie składu chemicznego badanej powierzchni [146]. W połączeniu z techniką mapowania fałszywych kolorów przypisanych do wybranych pierwiastków, umożliwia identyfikację cząsteczek na powierzchni próbek [147].

Obserwacja SEM-EDS została dokonana na wybranych obszarach próbek pokryw<sup>95</sup> za pomocą mikroskopu Tescan Mira trzeciej generacji, przy użyciu napięcia przyspieszającego 12 [kV]. Przykłady uzyskanych obrazów zostały przedstawione na rysunku 5.6.

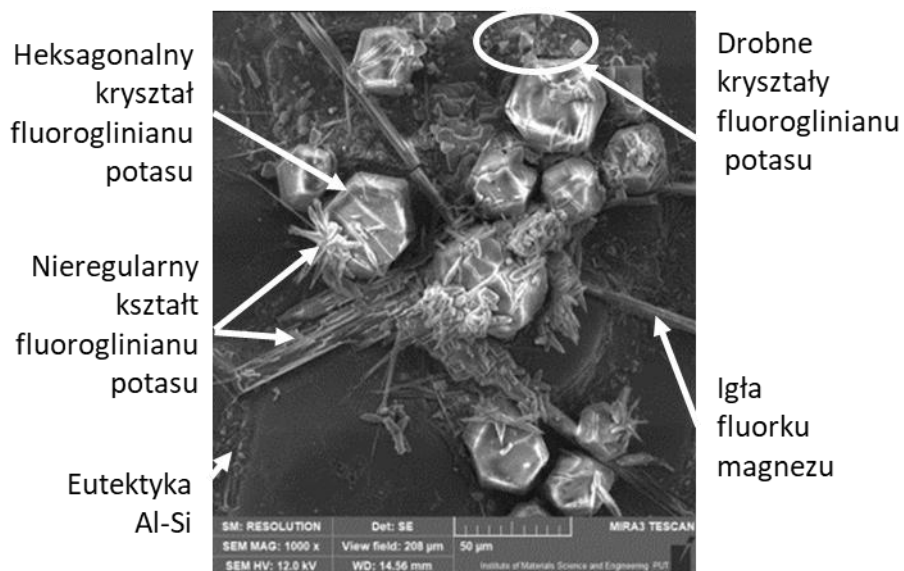


Rysunek 5.6. Obserwacja SEM-EDS pozostałości topnika: a) elektrony wstecznie rozproszone, b) mapowanie powierzchni techniką fałszywych kolorów (opracowanie własne)

<sup>94</sup> Pozostałość topnika występuje w postaci płytek o kwadratowym kształcie i wymiarach 10–20 [µm] oraz w postaci igieł, co zostało opisane w 3.1 Opis problemu i przegląd literatury, s. 30.

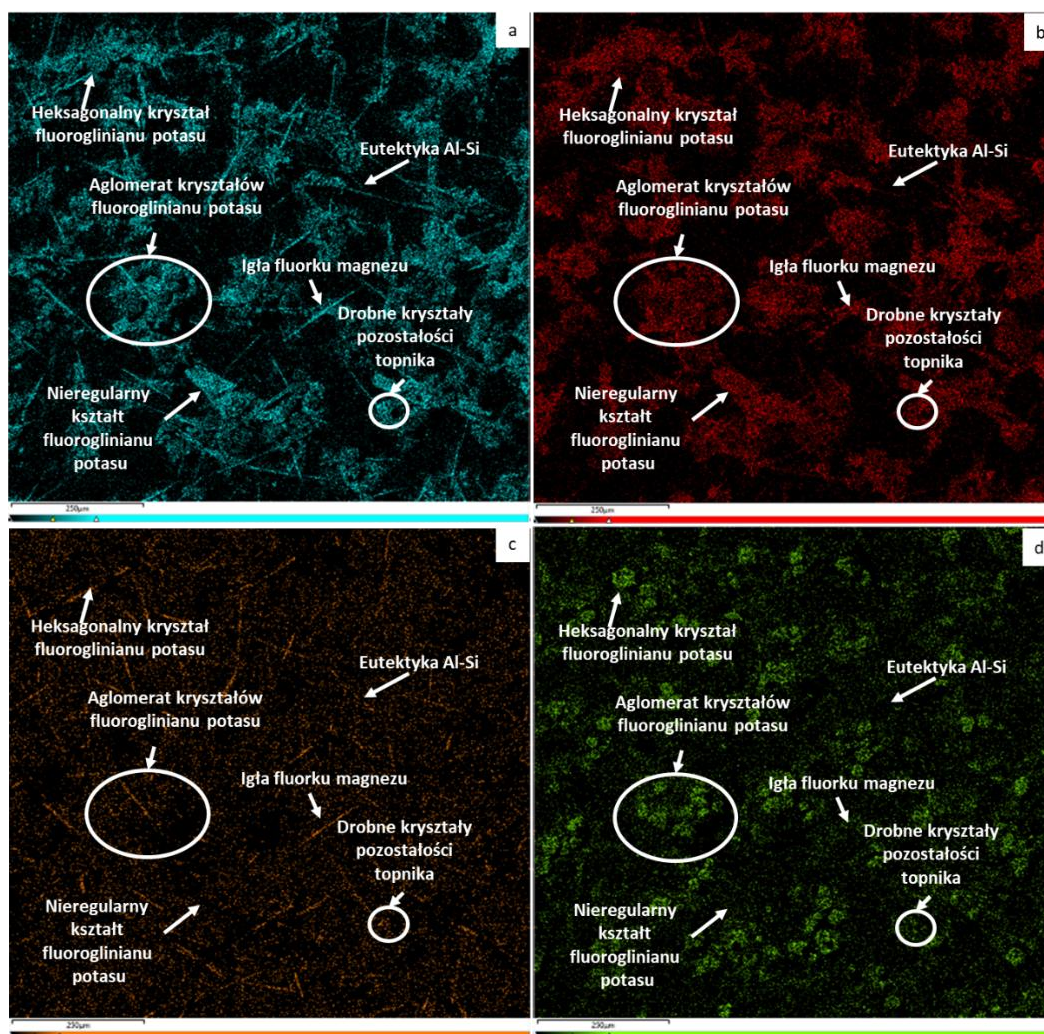
<sup>95</sup> Obszary pomiarowe zostały przedstawione na rysunku 5.2, s. 50.

Obszary zidentyfikowane dzięki technice mapowania fałszywych kolorów pozwalają na określenie formy występowania pozostałości topnika na powierzchni w postaci heksagonalnych aglomeratów kryształów oraz w postaci nieregularnej. Dla zaznaczonego obszaru aglomeratu kryształów fluoroglinianu potasu (pozostałości topnika) zostało wykonane przybliżone zdjęcie, widoczne na rysunku 5.7, gdzie zaobserwowane heksagonalne kryształy mają średnią wielkość  $\sim 30$  [ $\mu\text{m}^2$ ].



Rysunek 5.7. Obraz SEM aglomeratu fluoroglinianu potasu (opracowanie własne)

W celu dokładniejszej analizy wykonane zostały zdjęcia z wyodrębnionymi pierwiastkami. Ich przykład został przedstawiony na rysunku 5.8, gdzie widoczne są wyszczególnione pierwiastki fluoru, potasu, magnezu i tlenu (wraz z oznaczeniem związków chemicznych zidentyfikowanych na rysunku 5.6 b).

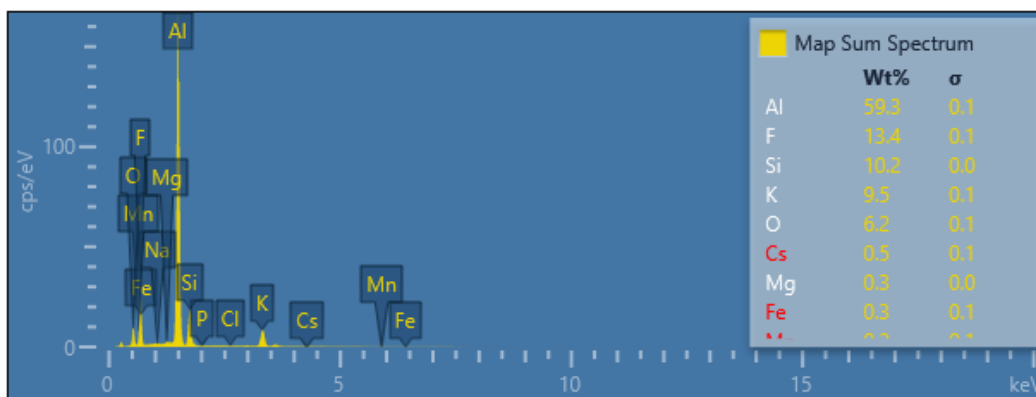


Rysunek 5.8. Mapowanie wybranych pierwiastków metodą SEM-EDS wraz z oznaczeniem związków chemicznych w danych obszarach: a) fluor, b) potas, c) magnez, d) tlen (opracowanie własne)

Zidentyfikowane pierwiastki tlenu pokrywają się z miejscami aglomeracji potasu, tworząc rozpoznawalne heksagonalne kształty. Może to oznaczać reakcję pozostałości topnika z tlenem po rozpuszczeniu warstwy tlenku glinu. Widoczne kształty w postaci igieł składają się głównie z fluorku i magnezu, wskazując na zjawisko magnezowego igłowania tworzącego związek  $MgF_2$ <sup>96</sup>.

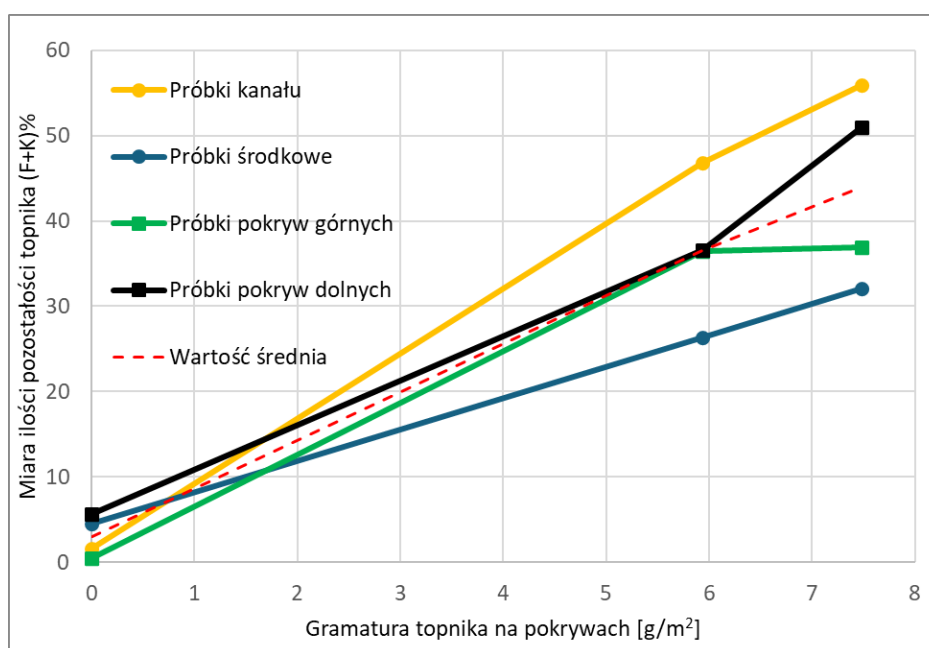
Zastosowanie modułu EDS pozwala na pomiar procentowego stężenia pierwiastków na powierzchni, którego przykład został przedstawiony na rysunku 5.9.

<sup>96</sup> Zjawisko rozpuszczenia tlenku glinu i reakcja magnezu z topnikiem została opisana w 2.5 *Proces nanoszenia topnika*, s.14.



Rysunek 5.9. Linie widmowe próbki zmierzone za pomocą metody SEM-EDS wraz ze stężeniem procentowym pierwiastków (opracowanie własne)

Ocena ilości pozostałości topnika dla 3 chłodnic powietrza została dokonana za pomocą sumy stężenia pierwiastków fluoru (F) i potasu (K) na powierzchni próbki, oznaczonej jako autorska miara (F+K)% [wt%]. Wyniki uzyskane z obserwacji próbek z trzech chłodnic powietrza metodą SEM-EDS zostały porównane pod kątem miejsca pobrania próbki i rodzaju pokrywy (górna i dolna), co zostało przedstawione na rysunku 5.10.



Rysunek 5.10. Porównanie miernika (F+K)% uzyskanego metodą SEM-EDS pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne)

Na wykresie zauważalny jest proporcjonalny wzrost miary (F+K)% wraz ze wzrostem gramatury topnika na pokrywach. Widoczna jest znacząca dysproporcja pomiędzy próbkami kanału oraz środkowymi, sięgająca 70%. Zjawisko to może wynikać z konstrukcji chłodnicy powietrza, w której kanał pokrywy nie pozostaje w bezpośrednim kontakcie z innymi

powierzchniami, co uniemożliwia powstanie spoiny. Przepuszczalnie prowadzi to do niewykorzystania topnika i zwiększenia ilości jego pozostałości. Powyżej gramatury 6 [g/m<sup>2</sup>] topnik migruje z pokrywy górnej na dolną w wyniku działania siły grawitacji. Na podstawie różnic wyników pomiędzy pokrywami górnymi i dolnymi wykazano, że metoda SEM-EDS umożliwia pośrednią ocenę lejnkości spoiwa<sup>97</sup>, w tym stwierdzenie nadmiaru gramatury topnika<sup>98</sup>. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość oceny ilości i formy pozostałości topnika za pomocą metody tej metody.

#### 5.4 Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC)

Mikroskopia światła odbitego RLM (ang. Reflected Light Microscopy) stosowana jest powszechnie w mikrografii nieprzeźroczystych próbek poprzez rejestrowanie światła odbitego od ich powierzchni. Pozwala na ocenę topografii, mikrostruktury oraz defektów powierzchniowych [148]. Przyjęto założenie, że pozostałość topnika na powierzchni próbki powoduje lokalne różnice we właściwościach optycznych, a w szczególności w zdolności odbijania światła. Umożliwia to rozróżnienie cząsteczek pozostałości topnika na tle materiału bazowego. Aby umożliwić obserwację przeźroczystych kryształów pozostałości topnika zastosowano technikę kontrastu różnicowo-interferencyjnego DIC (ang. Differential Interference Contrast). Technika DIC wykorzystuje spolaryzowane światło oraz pryzmat Nomarskiego<sup>99</sup> do uzyskania obrazu o trójwymiarowym charakterze. Poprzez zastosowanie pseudokolorów pozwala na uwidocznienie bardzo subtelnych różnic w wysokości i nachyleniu powierzchni próbki, które są trudne do wykrycia przy użyciu klasycznego jasnego pola [149].

Obserwacja RLM-DIC została dokonana na wybranych obszarach próbek pokryw<sup>100</sup> za pomocą mikroskopu metalograficznego Nikon Eclipse LV150A. Ze względu na wysoką chropowatość próbek<sup>101</sup>, zdjęcia zostały wyostrzone przez nałożenie wielu zdjęć<sup>102</sup> ze skokiem ~0,5 [μm] za pomocą kontrolera ostrości Prior ES10ZE. W celu analizy obrazu uzyskanego metodą RLM-DIC wykorzystane zostało porównanie z obrazem tej samej próbki uzyskanym metodą SEM-EDS, który został przedstawiony na rysunku 5.11 a). Zaobserwowana pozostałość topnika widoczna jest jako żółte odbarwienie, co zostało ukazane na rysunku 5.11 b).

---

<sup>97</sup> Znaczenie lejnkości spoiwa zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

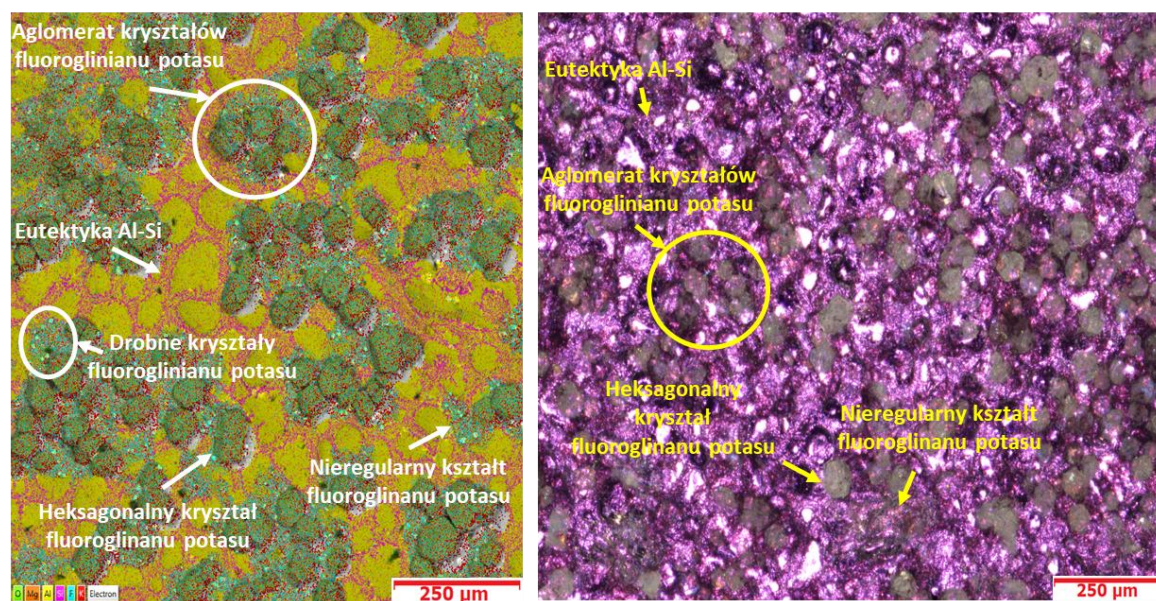
<sup>98</sup> Stwierdzenie nadmiaru stosowanego topnika może zostać określone na podstawie wielkości różnicy wyników dla pokryw górnej i dolnej.

<sup>99</sup> Pryzmat Nomarskiego to element optyczny służący do rozdzielania wiązki światła na dwie części o przesuniętej fazie.

<sup>100</sup> Obszary pomiarowe zostały przedstawione na rysunku 5.2, s. 50.

<sup>101</sup> Wysoka chropowatość próbek wynika z braku ich obróbki do postaci zglądów metalograficznych.

<sup>102</sup> Liczba zdjęć dla danej próbki zależała od lokalnej wysokości struktur.



Rysunek 5.11. Porównanie obrazów metalograficznych uzyskanych metodami: a) SEM-EDS, b) RLM-DIC (opracowanie własne)

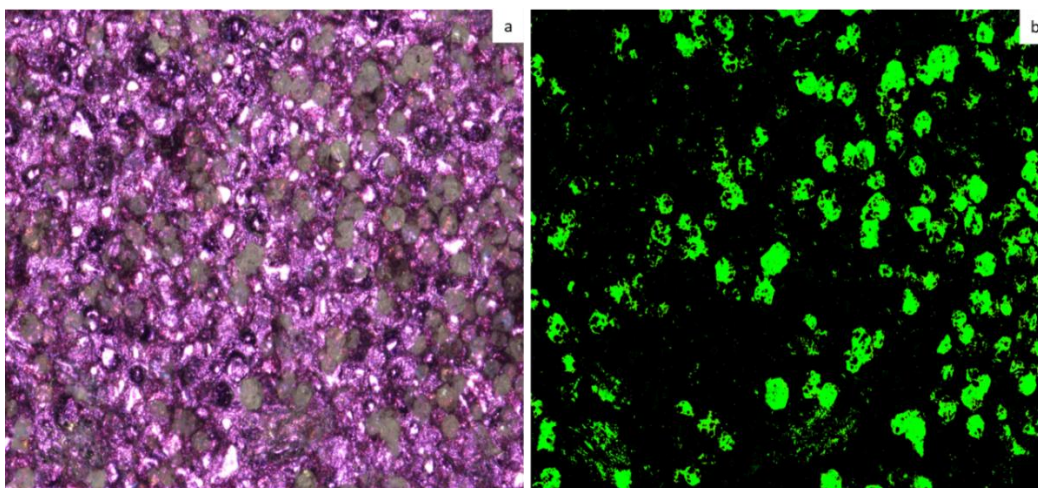
Na obrazie SEM-EDS obszaru o powierzchni 1 [mm<sup>2</sup>] można zaobserwować 96 heksagonalnych kształtów o średniej powierzchni 46 [µm<sup>2</sup>]<sup>103</sup>. Natomiast na obrazie RLM-DIC obszaru 1,5 [mm<sup>2</sup>] widoczne jest 151 heksagonalnych kształtów o średniej powierzchni 50 [µm<sup>2</sup>]<sup>104</sup>. Drobne kryształy fluoroglinianu potasu (< 1 µm<sup>2</sup>) są trudne do zidentyfikowania na obrazie RLM-DIC. Porównanie obu zdjęć potwierdza możliwość rozpoznania pozostałości topnika na obrazach wykonanych metodą RLM-DIC w postaci żółtych odbarwień.

Analiza obrazów uzyskanych za pomocą metod mikroskopowych zwykle bazuje na subiektywnej ocenie obserwatora [148]. Aby tego uniknąć, opracowany został algorytm obróbki graficznej zdjęć uzyskanych metodą RLM-DIC z wykorzystaniem programu Gimp-2.10.32. Algorytm polega na wyizolowaniu żółtych odbarwień na zdjęciach, a następnie obliczeniu ich procentowego udziału na podstawie histogramu koloru, poprzez zliczenie odpowiadających im pikseli. Wynik został zdefiniowany jako autorska miara [Px%]. Ze względu na stosowaną w histogramie skalę kolorów RGB<sup>105</sup>, kolor pozostałości topnika został zmieniony na zielony, co jest widoczne na rysunku 5.12.

<sup>103</sup> Zakres wielkości powierzchni heksagonalnych kryształów fluoroglinianu potasu wynosił 7-84 [µm<sup>2</sup>].

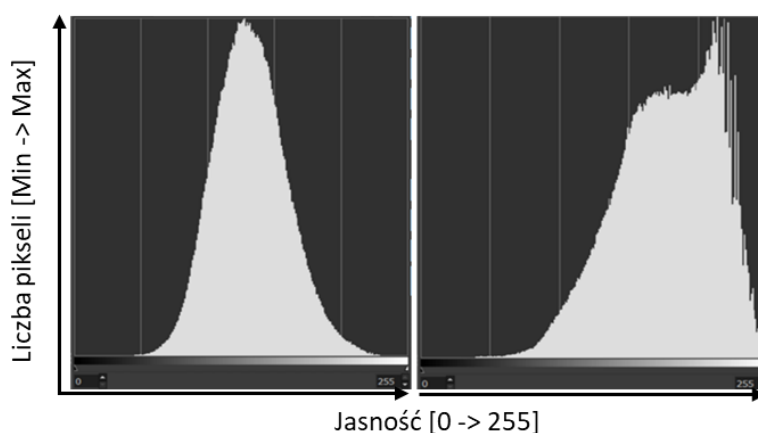
<sup>104</sup> Zakres wielkości powierzchni heksagonalnych kształtów wynosił 19-90 [µm<sup>2</sup>].

<sup>105</sup> Skala kolorów RGB to model barw oparty na kombinacji kolorów czerwonego, zielonego i niebieskiego.



Rysunek 5.12. Obróbka graficzna zdjęć uzyskanych metodą RLM-DIC: a) przed obróbką; b) po obróbce (opracowanie własne)

Przedstawiony algorytm jest wrażliwy na zmiany w jasności zdjęć<sup>106</sup>, która wynika z wysokiej chropowatości próbek<sup>107</sup>. Z tego powodu opracowany został parametr korekty jasności  $\alpha$ . Jego wyznaczenie zostało przedstawione na przykładzie histogramów rozkładu jasności dwóch zdjęć, wykonanych dla tej samej próbki. Na histogramach widoczna jest ilość pikseli (oś y) o zadanej jasności (oś x), co zostało przedstawione na rysunku 5.13.



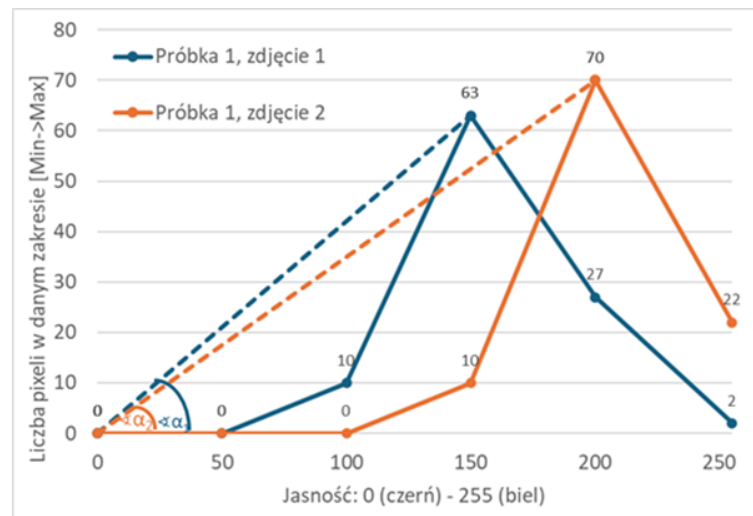
Rysunek 5.13. Histogram jasności zdjęć wykonanych metodą RLM-DIC (opracowanie własne)

Aby wyznaczyć parametr  $\alpha$ , każdy histogram został podzielony na 5 zakresów jasności  $\langle 0,50 \rangle$ ;  $\langle 50,100 \rangle$ ;  $\langle 100,150 \rangle$ ;  $\langle 150,200 \rangle$  oraz  $\langle 200,255 \rangle$ . Dla każdego z tych zakresów została zsumowana liczba pikseli i przedstawiona w postaci procentowego udziału. Dla zakresu odpowiadającego największej liczbie pikseli wyznaczony został wierzchołek  $(x, y)$ . Prosta

<sup>106</sup> Autorski algorytm opiera się na pomiarze różnic kontrastu żółtych odbarwień względem materiału bazowego. Zmiany jasności zdjęć wpływają na wartość tych różnic, dlatego w celu uzyskania miarodajnych wyników konieczna jest kalibracja algorytmu.

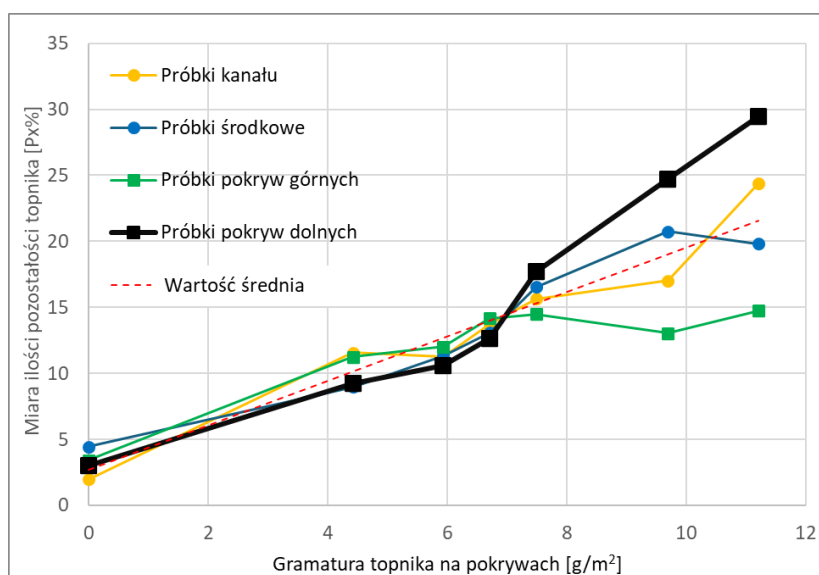
<sup>107</sup> Wysoka chropowatość próbek jest efektem braku możliwości przygotowania próbek metalograficznych zgodnie ze standardem ASTM E3-11 (2017) opisanym w 5.1 Założenia, s. 49.

poprowadzona od punktu (0,0) do wierzchołka tworzy kąt, który został przyjęty jako współczynnik  $\alpha$ , gdzie  $\alpha = \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$ , co zostało przedstawione na rysunku 5.14.



Rysunek 5.14. Wyznaczenie kąta jasności histogramów dla zdjęć wykonanych metodą RLM-DIC (opracowanie własne)

Wartości przyjętej w metodzie RLM-DIC miary ilości pozostałości topnika [Px%] zostały pomnożone przez współczynnik  $\alpha$ , co pozwoliło na uzyskanie oceny ilości pozostałości topnika. W ten sposób przeanalizowane zostało 140 zdjęć wykonanych na 28 próbkach pobranych z 7 chłodnic. Wyniki zostały porównane pod kątem miejsca pobrania próbki i rodzaju pokrywy (górna / dolna), co zostało przedstawione na rysunku 5.15.

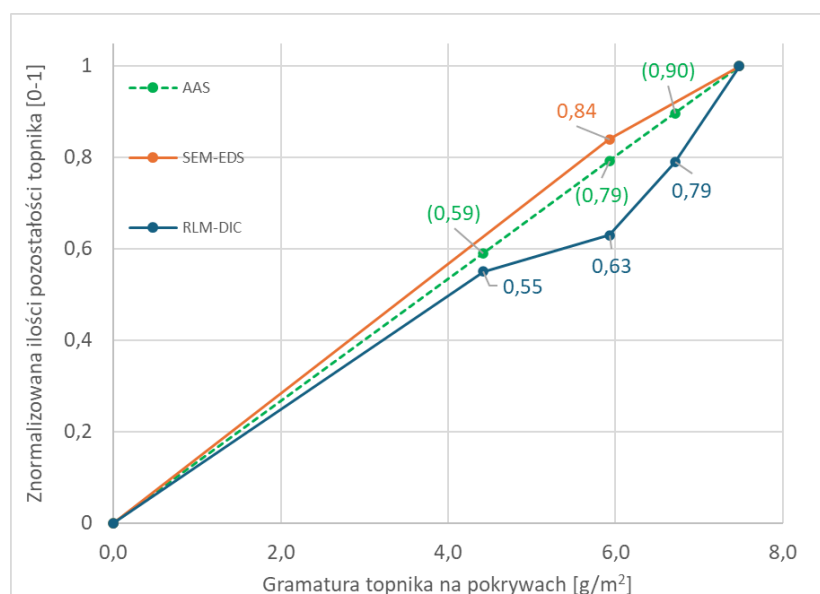


Rysunek 5.15. Porównanie miary [Px%] uzyskanej metodą SEM-EDS pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne)

Na wykresie zauważalny jest proporcjonalny wzrost miary [Px%] wraz ze wzrostem gramatury topnika na pokrywach. Wartość ta jest zbliżona niezależnie od miejsca pobrania próbki aż do progu gramatury  $\sim 7$  [g/m<sup>2</sup>]. Powyżej tej gramatury topnik przypuszczalnie migruje z pokrywy górnej na dolną w wyniku działania siły grawitacji. Na podstawie różnic wyników pomiędzy pokrywami górnymi i dolnymi zostało stwierdzone, że metoda RLM-DIC pozwala na pośrednią ocenę lejności spoiwa<sup>108</sup>, w tym stwierdzenie nadmiaru gramatury stosowanego topnika<sup>109</sup>. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić możliwość oceny ilości i formy pozostałości topnika za pomocą metody RLM-DIC.

### 5.5 Podsumowanie opracowanych metod oceny ilości pozostałości topnika

Wyniki oceny ilości pozostałości topnika metodami SEM-EDS oraz RLM-DIC zostały porównane do wartości referencyjnych uzyskanych wzorcową metodą AAS. Ze względu na różne jednostki miary tych metod, wyniki zostały znormalizowane, co zostało przedstawione na rysunku 5.16.



Rysunek 5.16. Porównanie znormalizowanych wartości ilości pozostałości topnika uzyskanych metodami SEM-EDS oraz RLM-DIC do wartości referencyjnej uzyskanej metodą AAS (opracowanie własne)

Wartość błędu względnego dla opracowanych metod SEM-EDS oraz RLM-DIC, w odniesieniu do wartości wzorcowej uzyskanej metodą AAS, została obliczona dla gramatury

<sup>108</sup> Znaczenie lejności spoiwa zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>109</sup> Stwierdzenie nadmiaru gramatury stosowanego topnika może zostać określone na podstawie wielkości różnicy wyników dla pokryw górnej i dolnej.

topnika na pokrywach 6 [g/m<sup>2</sup>], dla której dostępne są wyniki ze wszystkich trzech metod. Obliczenia zostały dokonane na podstawie poniższego wzoru:

$$\text{Błąd względny} = \frac{|\text{Wartość zmierzona} - \text{wartość referencyjna}|}{\text{wartość referencyjna}} * 100\%$$

Dla metody SEM-EDS:

$$\text{Błąd względny} = \frac{|0,84 - 0,79|}{0,79} * 100\% = 6,33 \%$$

Dla metody RLM-DIC:

$$\text{Błąd względny} = \frac{|0,63 - 0,79|}{0,79} * 100\% = 20,25 \%$$

Podsumowanie zalet i wad opracowanych metod oceny ilości pozostałości topnika zostało przedstawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Porównanie metod oceny ilości pozostałości topnika (opracowanie własne)

Metoda	Zalety	Wady	Wymagana specjalistyczna aparatura	Zgodność z wartością wzorcową
AAS	- Zgodność z normą DIN - Jednoznaczny wynik	- Wymagana szczelność - Kosztowność - Czasochłonność	Tak	100%
SEM-EDS	- Stężenie pierwiastków - Rozróżnienie pokryw - Analiza kształtu pozostałości	- Kosztowność	Tak	94%
RLM-DIC	- Szybkość pomiaru - Rozróżnienie pokryw - Analiza kształtu pozostałości	- Wymagana kalibracja jasności	Nie	80%

Pomimo wysokiej zgodności wyników metody SEM-EDS z wartością wzorcową<sup>110</sup> (94%) metoda ta wymaga stosowania specjalistycznej aparatury i wiąże się ze znaczącymi kosztami pomiaru. Z tego powodu może być zastosowana jedynie dla jednostkowej oceny formy cząsteczek pozostałości topnika na próbkach. Zgodność metody RLM-DIC z wartością wzorcową została obliczona na 80%, co zostało uznane jako dostateczna dokładność pomiaru. Ze względu na niski koszt pomiaru i brak konieczności stosowania specjalistycznej aparatury, metoda RLM-DIC może zostać wykorzystana w badaniach wpływu czynników na ilość pozostałości topnika<sup>111</sup>.

<sup>110</sup> Zgodność z wartością wzorcową została określona jako różnica między wartością referencyjną (100%) a błędem względnym dla gramatury topnika 6 [g/m<sup>2</sup>].

<sup>111</sup> Opracowanie metod oceny ilości pozostałości topnika zostało opublikowane w 2023 r. w artykule pod tytułem „Metody pomiaru i analizy pozostałości topnika w aluminiowych chłodnicach po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze” (ang. „Measurement Methods for Flux Residue Quantity after Controlled Atmosphere Brazing of Aluminum Coolers”). [163]

## 6. Optymalizacja procesu technologicznego

### 6.1 Etapy badania

W celu opracowania zaleceń dotyczących optymalizacji parametrów procesu technologicznego chłodnic powietrza przeprowadzono następujące badania wstępne:

- Badanie charakterystyki warstwy topnika - analiza obecnego procesu nanoszenia topnika, ze szczególnym uwzględnieniem jego gramatury<sup>112</sup> oraz równomierności rozkładu na powierzchni.
- Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania - określenie możliwego zakresu regulacji dla elementów dociskowych ramki lutowniczej.
- Badanie wpływu konfiguracji wsadu na warunki termiczne procesu lutowania - określenie możliwego zakresu regulacji profilu lutowania bez konieczności czasochłonnej zmiany ustawień pieca tunelowego<sup>113</sup>.

Uzyskane w badaniach wstępnych wyniki stanowiły podstawę eksperymentu, którego celem było wyznaczenie wartości parametrów procesów nanoszenia topnika, montażu oraz lutowania zapewniających uzyskanie pożądanego stopnia zlutowania przy jednoczesnej minimalizacji ilości pozostałości topnika.

### 6.2 Badanie charakterystyki warstwy topnika

Przedmiotem badania był proces nanoszenia topnika metodą selektywnego topnikowania, ze szczególnym uwzględnieniem jego gramatury<sup>114</sup> oraz równomierności rozkładu na powierzchni. Założeniem badania było, że zmienność grubości warstwy topnika w różnych obszarach pokrywy odzwierciedla poziom równomierności jego rozkładu. Badanie zostało przeprowadzone na 24 pokrywach chłodnicy powietrza<sup>115</sup> o nominalnej gramaturze topnika w zakresie 3-5 [g/m<sup>2</sup>]. Uśrednione wyniki pomiaru grubości warstwy topnika dla poszczególnych obszarów pokrywy zostały przedstawione na rysunku 6.1.

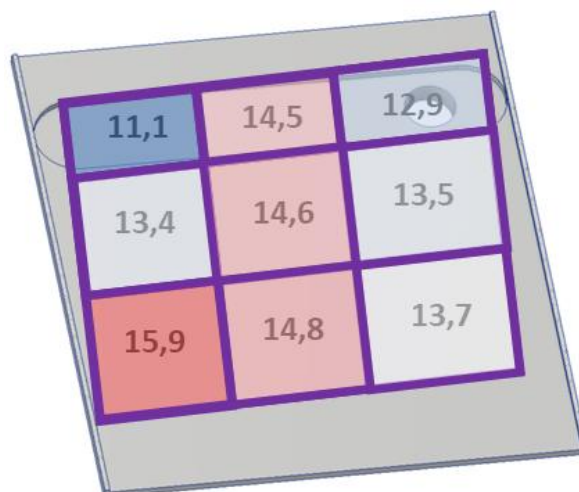
---

<sup>112</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>113</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) oraz czasochłonnej zmiany ustawień pieca tunelowego zostały opisane w 2.7 Proces lutowania, s. s. 21.

<sup>114</sup> Metoda selektywnego topnikowania i znaczenie gramatury topnika zostały opisane w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s. 14.

<sup>115</sup> Pokrywa chłodnicy powietrza została opisana na rysunku 5.1, s. 50.



Rysunek 6.1. Grubość warstwy topnika [ $\mu\text{m}$ ] na pokrywach w zależności od obszaru pomiarowego (opracowanie własne)

Odchylenie standardowe ( $\sigma$ ) grubości pokrycia topnikiem oraz współczynnik zmienności ( $V$ ) zostały obliczone za pomocą wzorów:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\%$$

gdzie:

$n$  - liczba obserwacji,

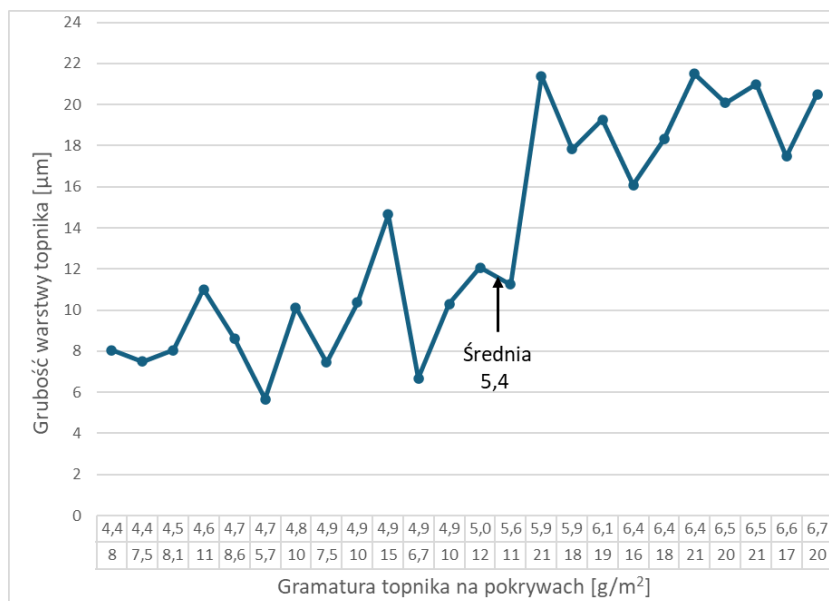
$x$  - wartość pomiaru,

$\bar{x}$  - średnia arytmetyczna z próby.

Uzyskane odchylenie standardowe 1,29 [ $\mu\text{m}$ ] oraz współczynnik zmienności 9,3% wskazują na niewielką zmienność grubości warstwy topnika [150].

Grubość warstwy topnika w stosunku do gramatury topnika na poszczególnych pokrywach<sup>116</sup> zostały przedstawione na rysunku 6.2.

<sup>116</sup> Metody pomiaru grubości warstwy topnika oraz gramatury topnika zostały opisane w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.



Rysunek 6.2. Zależność grubości warstwy topnika na pokrywie względem jego gramatury (opracowanie własne)

Gramatura topnika na pokrywach mieści się w zakresie od 4,4 do 6,7 [g/m<sup>2</sup>] a grubość w zakresie od 8 do 20 [µm]. Dla zmierzonych danych obliczono równanie regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów oraz średni błąd, na podstawie wzorów:

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 93,25$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = 15,74$$

$$m = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{93,25}{15,74} = 5,93$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} = 13,55 - 5,93 * 5,44 = -18,71$$

$$\hat{y} = 5,93x - 18,71$$

$$\text{Błąd bezwzględny} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| = 1,78$$

$$\text{Błąd względny} = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} * 100\% = 15,42\%$$

gdzie:

$\bar{x}$  - wartość średnia gramatury topnika na podstawie uzyskanych wyników [5,44 g/m<sup>2</sup>],

$\bar{y}$  - wartość średnia grubości warstwy topnika na podstawie uzyskanych wyników [13,55 µm],

$y$  - wartość rzeczywista gramatury topnika,

$\hat{y}$  - przewidywana wartość gramatury topnika.

$S_{xy}$  – suma iloczynów odchyłeń,

$S_{xx}$  – suma kwadratów odchyłeń,

m – współczynnik kierunkowy,

b – wyraz wolny,

n - liczba obserwacji.

Na podstawie obliczeń zostało stwierdzone, że średnia wartość gramatury topnika na pokrywach wynosi  $5,4 \pm 1,2$  [g/m<sup>2</sup>] co oznacza przekroczenie górnej granicy tolerancji<sup>117</sup>. w obecnym procesie jego nanoszenia. Wartość błędu względnego 15,42% oznacza umiarkowaną dokładność zastosowania metody pomiaru grubości warstwy topnika w celu oceny gramatury topnika na pokrywach, świadcząc o nierównomiernym pokryciu.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że obecny proces nanoszenia topnika przekracza dopuszczalną górną granicę tolerancji gramatury, co wskazuje na konieczność jego optymalizacji. W związku z tym została przeprowadzona dalsza analiza, uwzględniająca nie tylko ilościowe parametry warstwy topnika, lecz również jego funkcjonalne rozmieszczenie na powierzchni pokrywy.

W kontekście roli topnika w procesie lutowania<sup>118</sup>, szczególne znaczenie ma jego obecność w obszarach kontaktu pomiędzy komponentami<sup>119</sup>. Z tego względu dalsze badania skoncentrowano na identyfikacji obszarów pokrywy wymagających obecności topnika (styk rurek pakietu wymiany ciepła<sup>120</sup> z pokrywą), co zostało przedstawione na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3. Wizualizacja obszarów kontaktu pokrywy z rurkami (opracowanie własne)

<sup>117</sup> Górna granica tolerancji topnika na pokrywach wynosi 5,0 [g/m<sup>2</sup>].

<sup>118</sup> Rolą topnika jest rozproszenie warstwy tlenku glinu, co zostało opisane w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s. 14.

<sup>119</sup> Obszary kontaktu pomiędzy komponentami zostały opisane na rysunku 5.1, s. 50.

<sup>120</sup> Pakiet wymiany ciepła został opisany w 1.3 Chłodnica powietrza w układzie doładowania, s. 4.

Konieczność obecności topnika wyłącznie w obszarach kontaktu pomiędzy komponentami oznacza, że topnik poza nimi jest zbędny (nie powstają tam spoiny lutownicze). Ze względu na wysoką zwilżalność topnika w stanie likwidus przyjęto założenie, że możliwe jest jego samoczynne rozprowadzenie do obszarów styku komponentów w wyniku jego lejności oraz działania sił kapilarnych<sup>121</sup>. Pozwala to na ograniczenie masy topnika poprzez uwzględnienie jedynie obszarów kontaktu pomiędzy komponentami. Obszary te stanowią około 50% całkowitej powierzchni pokrywy. Na tej podstawie oszacowano, że gramatura topnika niezbędna do zapewnienia wymaganego stopnia zlutowania mieści się w przedziale od 1,5 do 2,5 [g/m<sup>2</sup>], co odpowiada wartościom 50% nominalnego zakresu (od 3 do 5 [g/m<sup>2</sup>]). W celu uproszczenia dalszych analiz, dolna granica została zaokrąglona w dół, a górna w górę, uzyskując zakres od 1 do 3 [g/m<sup>2</sup>], co zostanie wykorzystane dalszych badaniach.

### 6.3 Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania

Celem badania była weryfikacja wpływu siły docisku elementów dociskowych ramki lutowniczej na stopień zlutowania chłodnicy powietrza. Założeniem badania było, że zastosowanie tulejek dystansowych ogranicza przemieszczenie się elementów dociskowych ramki lutowniczej, umożliwiając pośrednią kontrolę siły kompresji<sup>122</sup>. Zostanie ona wygenerowana w wyniku działania rozszerzalności cieplnej chłodnicy powietrza, dla której oczekiwane wydłużenie w temperaturze lutowania zostało obliczone na podstawie wzoru:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 140 [mm] * 28 * 10^{-6} \left[ \frac{1}{^{\circ}C} \right] * 580 [^{\circ}C] = 2 [mm]$$

gdzie:

$\Delta L$  - wydłużenie [mm],

$L_0$  - długość początkowa chłodnicy powietrza<sup>123</sup> [140 mm],

$\alpha$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej<sup>124</sup> [ $28,0 * 10^{-6} 1/^{\circ}C$ ] [151],

$\Delta T$  - różnica temperatur<sup>125</sup> [580<sup>°</sup>C].

Szacowana wartość wydłużenia chłodnicy powietrza w wyniku rozszerzalności wynosząca 2 [mm] została przyjęta jako graniczna suma szerokości obu szczelin montażowych<sup>126</sup>.

<sup>121</sup> Zwilżalność topnika oraz działanie sił kapilarnych zostały opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>122</sup> Siła kompresji ramek lutowniczych została opisana w 2.6 Proces montażu, s. 19.

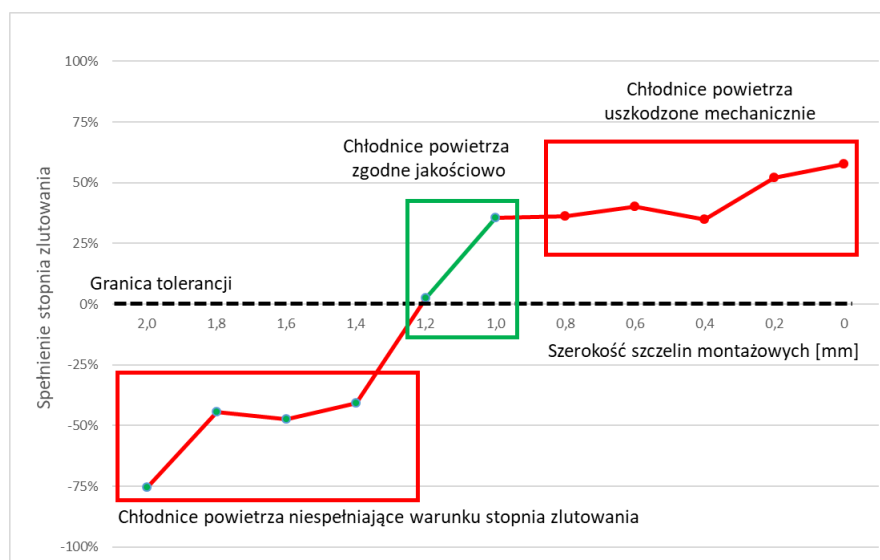
<sup>123</sup> Chłodnica powietrza przyjęta jako jednorodna bryła.

<sup>124</sup> Współczynnik rozszerzalności cieplnej dla aluminium w temperaturze 600 [°C].

<sup>125</sup> Różnica temperatur liczona w zakresie od 20 do 600 [°C].

<sup>126</sup> Szczeliny montażowe zostały rozmieszczone symetrycznie po obu stronach chłodnicy powietrza.

W badaniu wykorzystano 11 chłodnic powietrza zamontowanych w zmodyfikowanych ramkach lutowniczych. Szerokość szczelin dopasowano za pomocą podkładek umieszczonych między tulejkami a elementami dociskowymi i zmierzono za pomocą metody pomiaru szczeliny montażowej<sup>127</sup>. Na rysunku 6.4. zostały przedstawione wartości stopnia zlutowania (oś Y) zależnie od szerokości szczeliny (oś X) w zakresie od 0,0 do 2,0 [mm] ze skokiem 0,2 [mm], gdzie wartość Y 0% oznacza dolną granicę tolerancji stopnia zlutowania dla chłodnicy powietrza.



Rysunek 6.4. Wyniki oceny stopnia zlutowania oraz uszkodzeń mechanicznych chłodnic powietrza w zależności od wielkości szczelin montażowych (opracowanie własne)

Z uzyskanych danych wynika, że szerokość szczelin powyżej 1,2 mm nie zapewnia wymaganego stopnia zlutowania, a poniżej 1,0 [mm] powoduje uszkodzenia mechaniczne, wynikające z nadmiernego ścisku chłodnicy powietrza po jej rozszerzeniu cieplnym. Tym samym akceptowalna tolerancja szerokości szczelin pomiędzy elementami dociskowymi a chłodnicą powietrza wynosi zaledwie 0,2 [mm]. Na tej podstawie uznano, że siła kompresji elementów dociskowych ramek lutowniczych nie jest możliwa do regulacji, dlatego nie została uwzględniona w dalszych badaniach<sup>128</sup>.

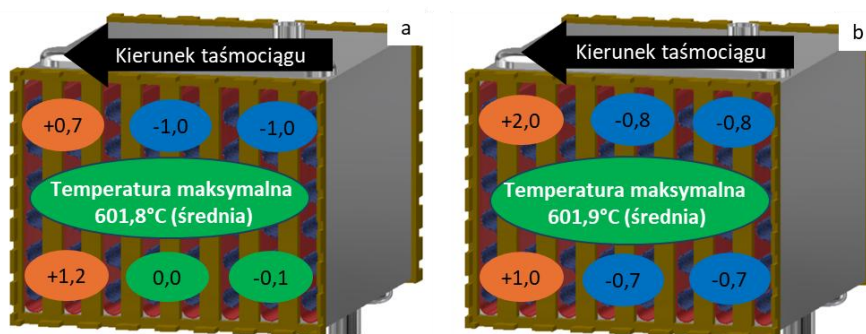
<sup>127</sup> Modyfikacja ramek lutowniczych i metoda pomiaru szczeliny montażowej zostały opisane w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.

<sup>128</sup> Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania zostało opublikowane w 2024 roku w artykule pod tytułem „Przekształcenie ramek do lutowania aluminiowych wymienników ciepła w kontrolowanej atmosferze z mechanizmem sprężynowego na ramki o stałym wymiarze” (ang. “Transition of Controlled Atmosphere Brazing Jig for Aluminum Heat Exchangers from Spring-Loaded to Fixed-Dimension”) [162].

## 6.4 Badanie wpływu konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na warunki termiczne procesu lutowania

Celem badania było określenie możliwego zakresu regulacji profilu lutowania bez konieczności czasochłonnej zmiany ustawień pieca tunelowego<sup>129</sup>. Założeniem badania było, że rodzaj wsadu w piecu tunelowym (właściwości materiałów i ich masa) oraz ich rozmieszczenie na taśmociągu wpływają znacząco na profil lutowania.

Poprawny przebieg procesu lutowania wymaga równomierności nagrzewania, gdzie rozbieżność lokalnych różnic temperatur wewnątrz chłodnicy powietrza nie powinna przekraczać zakresu  $\pm 3$  [°C]<sup>130</sup> [29]. Aby ocenić zgodność aktualnie uzyskiwanego profilu lutowania z tymi zaleceniami zostało przeprowadzone badanie z wykorzystaniem 6 termopar<sup>131</sup>. Pomiar został dokonany osobno dla 6 chłodnic powietrza, pierwszej oraz ostatniej z 3 różnych partii produkcyjnych. Uśrednione wyniki temperatury maksymalnej oraz rozrzutu w zależności od obszaru pomiarowego zostały przedstawione na rysunku 6.5



Rysunek 6.5. Rozkład temperatur wewnątrz chłodnicy powietrza: a) pierwsza sztuka, b) ostatnia sztuka (opracowanie własne)

Najwyższa temperatura została osiągnięta w obszarach, które jako pierwsze przekraczają kurtyny termiczne w piecu, „wjeżdżając” na taśmociągu do komory lutowania<sup>132</sup>. Rozrzut temperatury w zakresie od -1,0 do 2,0 [°C] oznacza spełnienie warunku równomierności rozkładu  $\pm 3$  [°C]. Z tego powodu rozkład temperatur wewnątrz chłodnic powietrza nie będzie uwzględniany w dalszych badaniach.

<sup>129</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) oraz czasochłonnej zmiany ustawień pieca tunelowego zostały opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>130</sup> Zalecenie równomierności rozkładu, gdzie lokalna różnica temperatur nie przekracza  $\pm 3$  [°C] została opisana w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>131</sup> Metoda pomiaru zmian temperatury za pomocą termopar została opisana w 4.4 Metody pomiaru i analizy Metody pomiar, s. 39.

<sup>132</sup> Budowa komory pieca tunelowego została opisana w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

Znaczenie rodzaju wsadu w piecu tunelowym można rozpatrywać pod kątem rodzaju materiału oraz gęstości jego rozłożenia na taśmociąg. Do wsadu pieca zaliczają się chłodnice powietrza (stop aluminium EN AW-3003 [11, 35]) oraz ramki lutownicze<sup>133</sup> (stal nierdzewna 316L [152]). Różnice właściwości tych materiałów, w tym wpływ stosowanych dodatków stopowych, zostały porównane w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Właściwości termiczne wybranych materiałów i pierwiastków w temp. 20°C [153, 154, 155, 156]

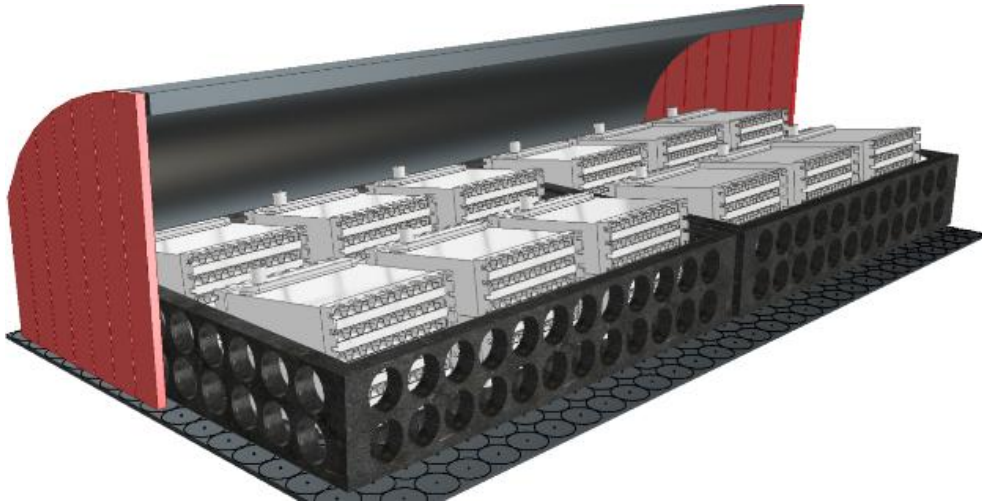
Stop / Pierwiastek	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Pojemność cieplna [J/g*K]	Przewodność cieplna [W/m*K]
Aluminium EN AW-3003	2730	890	~150
Stal nierdzewna 316L	800	500	15

Stal nierdzewna 316L w porównaniu do aluminium AW3003 charakteryzuje się znacznie niższą gęstością (o 70%), niższą pojemnością cieplną (o 44%) oraz 10-krotnie niższą przewodnością cieplną. Aby ocenić wpływ różnicy właściwości materiałów oraz rozłożenia wsadu na taśmociąg na profil lutowania, zostało przeprowadzone badanie na 6 chłodnicach powietrza podzielonych na 3 grupy:

- Grupa bezramkowa - chłodnice powietrza ułożone w stalowym koszu (brak ramek lutowniczych), co zostało przedstawione na rysunku 6.6. Geometria połączeń została utrzymana poprzez obwiązanie sztuk stalowym drutem, skręconym za pomocą szczypiec obrotowych. Dla tej grupy chłodnic oczekuje się braku spełnienia stopnia zlutowania ze względu na niską tolerancję szczeliny montażowej<sup>134</sup> pomiar został dokonany na 2 środkowych sztukach w 2 różnych koszach.

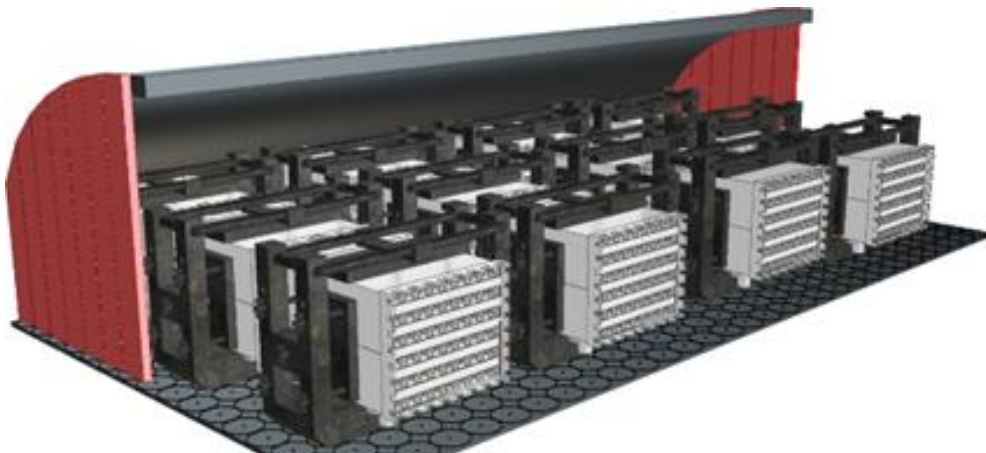
<sup>133</sup> Znaczenie ramek lutowniczych zostało opisane w 2.6 *Proces montażu*, s. 19.

<sup>134</sup> Tolerancja szczelin montażowych wynosi 0,2 [mm], co zostało opisane w 6.3 *Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania*, s. 68.



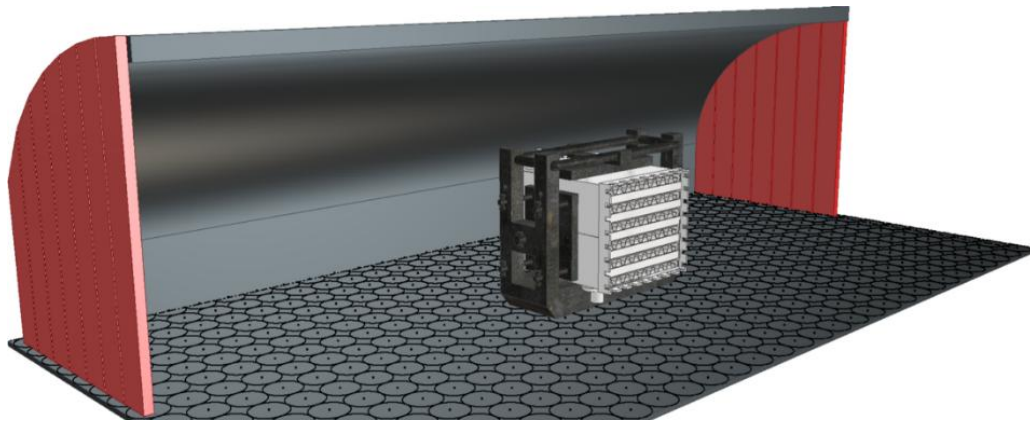
Rysunek 6.6. Schemat chłodnic powietrza umieszczonych w stalowych koszach na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne)

- Grupa referencyjna - chłodnice powietrza montowane w ramach lutowniczych rozłożone równomiernie na taśmociągu, co zostało przedstawione na rysunku 6.7. Pomiar dokonany na 2 sztukach: pierwszej środkowej oraz ostatniej środkowej



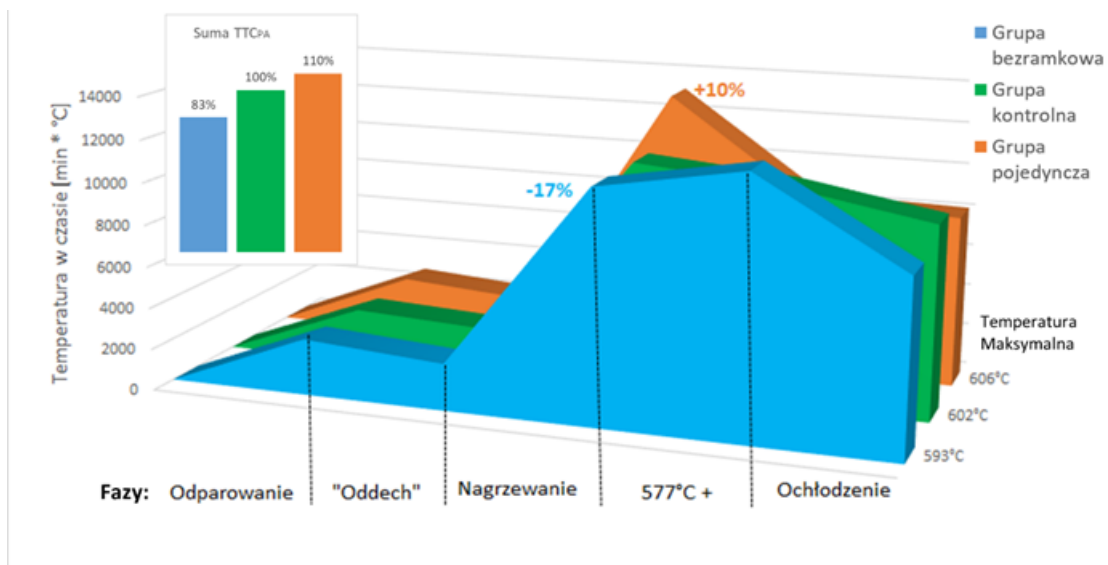
Rysunek 6.7. Schemat chłodnic powietrza zamontowanych w ramach lutowniczych na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne)

- Grupa pojedyncza – Chłodnice powietrza ułożone w odstępach odpowiadających długości komory lutowania pieca tunelowego, co zostało przedstawione na rysunku 6.8. W ten sposób naraz znajdował się w niej tylko jeden wymiennik. Pomiar został dokonany na 2 następujących po sobie chłodnic powietrza.



Rysunek 6.8. Schemat pojedynczej chłodnicy powietrza zamontowanej w ramce lutowniczej na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne)

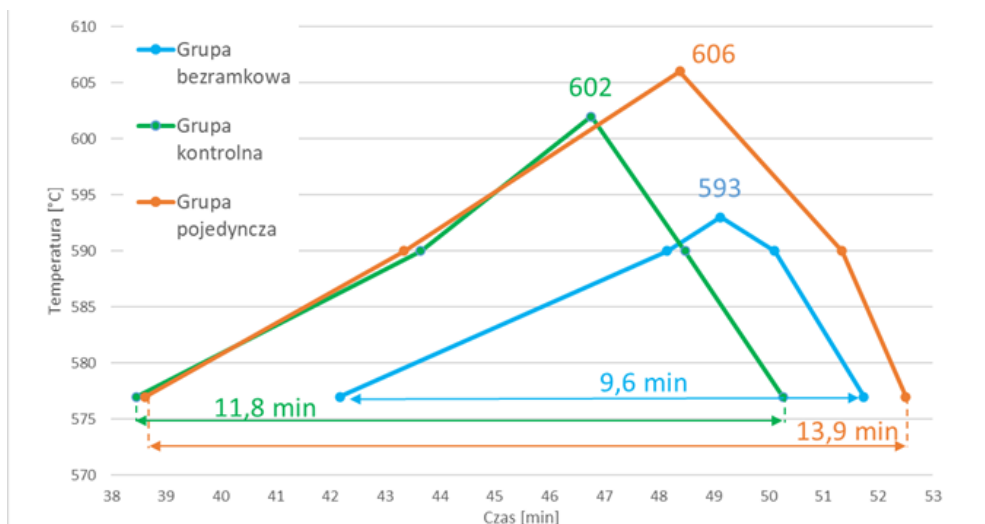
Na rysunku 6.9 zostały przedstawione profile lutowania<sup>135</sup> uzyskane dla wszystkich grup wraz z porównaniem ich miar  $TTC_{PA}$ <sup>136</sup> do grupy referencyjnej. Na rysunku 6.10 zostały przedstawione ich czasy w temperaturze powyżej 577 [°C] wraz z osiągniętą maksymalną temperaturą.



Rysunek 6.9. Porównanie powierzchni profilu lutowania z podziałem na fazy, w zależności od materiału i ułożenia wsadu w piecu tunelowym (opracowanie własne)

<sup>135</sup> Wartości temperatury i czasu są średnią obu pomiarów.

<sup>136</sup> Miara  $TTC_{PA}$  stosowana w autorskiej metodzie fazowej analizy profilu lutowania została opisana w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.



Rysunek 6.10. Czas przebywania chłodnic powietrza w temperaturze powyżej 577 [°C] w zależności od materiału i rozłożenia wsadu w piecu tunelowym (opracowanie własne)

Brak ramek lutowniczych skutkowało uzyskaniem obniżonej maksymalnej temperatury wewnątrz chłodnicy powietrza do 593 [°C] oraz skróceniem czasu przebywania chłodnic w temperaturze powyżej 577 [°C] do 9,6 [min]. Natomiast zwiększenie rozstawu wsadu doprowadziło do zwiększenia maksymalnej temperatury do wartości 606 [°C], w tym wydłużenia czasu przebywania chłodnic w temperaturze powyżej 577 [°C] do 13,9 [min]. Suma miary  $TTC_{PA}$ , w porównaniu do grupy kontrolnej, wynosiła -17% dla grupy bezramkowej oraz +10% dla grupy pojedynczej. Uzyskane wyniki pozwoliły opracować metodę osiągnięcia zarówno niższej, jak i wyższej temperatury wewnątrz chłodnicy w procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze w zakresie temperatury maksymalnej od 593 do 606 [°C] bez konieczności czasochłonnej zmiany parametrów pieca tunelowego<sup>137</sup>.

## 6.5 Badanie wpływu gramatury topnika i temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika

Uwzględniając wyniki poprzedzających badań opisanych w rozdziałach 6.2-6.4, zaplanowany został eksperyment, zgodnie z metodologią DOE (ang. Design of Experiments) [126]. Jego celem było wyznaczenie wpływu czynników procesowych na spełnienie stopnia zlutowania oraz ilość pozostałości topnika<sup>138</sup>. Na podstawie analizy literatury oraz przeprowadzonych badań zostały przyjęte następujące założenia:

<sup>137</sup> Badanie wpływu konfiguracji wsadu na warunki termiczne procesu lutowania zostało opublikowane w 2025 r. w artykule pod tytułem „Wpływ organizacji wsadu stosowanego w piecu tunelowym na rozkład temperatury podczas procesu lutowania w kontrolowanej atmosferze” (ang. „The effect of continuous furnace load organization on temperature distribution during controlled atmosphere brazing”) [161].

<sup>138</sup> Odpowiedzi układu zostały opisane w 4.2 Cel, teza i etapy pracy, s. 38

- Obecny proces technologiczny pozwala na zapewnienie wymaganego poziomu stopnia zlutowania przy jednoczesnym obniżeniu ilości pozostałości topnika<sup>139</sup>.
- Ilość pozostałości topnika jest bezpośrednio zależna od gramatury topnika<sup>140</sup>.
- Topnik jest niezbędny jedynie w obszarach kontaktu pomiędzy komponentami. Jego pominięcie w pozostałych obszarach nie wpływa na spełnienie stopnia zlutowania oraz ilość pozostałości topnika<sup>141</sup>.
- Na płycie sitowej<sup>142</sup> znajduje się znacząco mniej topnika niż na pokrywach. Ze względu na skomplikowaną geometrię oraz jej bezpośredni wpływ na spoiny zewnętrzne<sup>143</sup>, obecność topnika na płycie sitowej przyjmuje się jako parametr stały.
- Komponenty oraz stosowane oprzyrządowanie są zgodne z wymaganiami dla poprawnego przebiegu procesu<sup>144</sup>.

Zaprojektowano pełen eksperyment czynnikiowy  $3^2$  z nierówną liczbą replikacji dla 64 jednostek eksperymentalnych. Badano dwie zmienne zależne:

- stopień zlutowania - mierzony metodą makroskopii spoin lutowniczych<sup>145</sup>,
- ilość pozostałości topnika - mierzona autorską metodą RLM-DIC<sup>146</sup>. W celach porównawczych dokonane zostały również pojedyncze pomiary autorską metodą SEM-EDS<sup>147</sup>.

Ze względu na ograniczenia produkcyjne (produkcyjne obciążenie pieca lutowniczego) oraz przyjętą liczbę 64 szt. badanych chłodziń powietrza, w celu przeprowadzenia dogłębszej analizy wzajemnego wpływu zmniejszenia gramatury oraz zmian temperatury lutowania, liczebność grup referencyjnych (gramatura topnika 5 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalna temperatura lutowania 602 [°C]) została zmniejszona w stosunku do pozostałych grup (gramatura topnika 1 i 3 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalna temperatura lutowania 593 i 606 [°C]), co zostało przedstawione w tabeli 6.2.

---

<sup>139</sup> Jest to teza pracy opisana w 4.2 Cel, teza i etapy pracy, s. 38

<sup>140</sup> Zależność pozostałości topnika od gramatury została opisana w 4.2 Cel, teza i etapy pracy, s. 38.

<sup>141</sup> Znaczenie obszarów nanoszenia topnika na stopień zlutowania zostało opisane w 6.2 Badanie charakterystyki warstwy topnika, s. 64.

<sup>142</sup> Budowa chłodziń powietrza została opisana w 1.3 Chłodzińca powietrza w układzie doładowania, s. 4.

<sup>143</sup> Znaczenie połączeń zewnętrznych zostało opisane w 2.8 Proces kontroli, s. 26.

<sup>144</sup> Metody potwierdzenia zgodności komponentów zostały opisane w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.

<sup>145</sup> Metoda makroskopii spoin lutowniczych została opisana w 2.8 Proces kontroli, s. 26.

<sup>146</sup> Autorska metoda RLM-DIC została opisana w 5.4 Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC), s. 58.

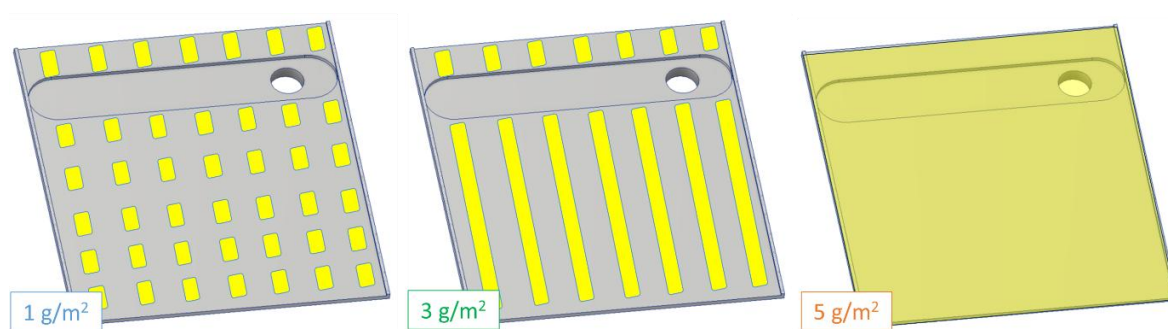
<sup>147</sup> Autorska metoda SEM-EDS została opisana w 5.3 Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM-EDS), s. 54.

Tabela 6.2. Plan eksperymentu 3<sup>2</sup> z nierównolicznymi grupami (opracowanie własne)

Maksymalna temperatura [°C]	Gramatura topnika [g/m <sup>2</sup> ]		
	1	3	5
593	10 szt.	10 szt.	3 szt.
602	8 szt.	8 szt.	2 szt.
606	10 szt.	10 szt.	3 szt.

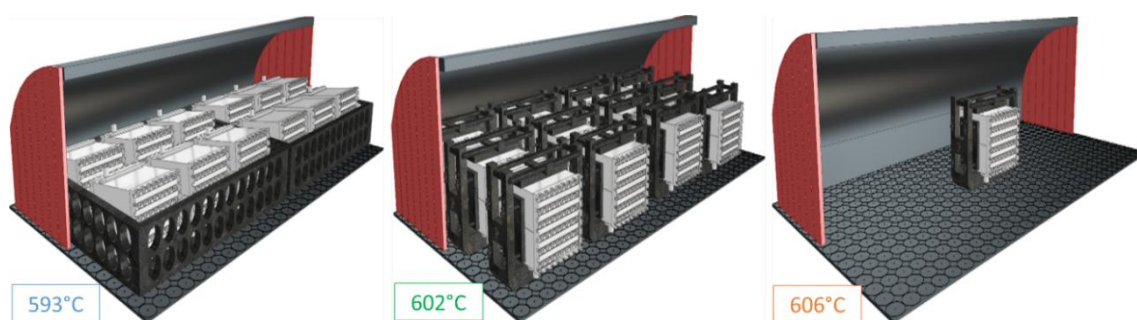
W eksperymencie zmieniane były następujące czynniki:

- Gramatura topnika<sup>148</sup> - poziomy 1; 3 oraz 5 [g/m<sup>2</sup>], gdzie wartość 5 [g/m<sup>2</sup>] jest wartością referencyjną. Schemat rozkładu topnika na pokrywach zależnie od gramatury został przedstawiony na rysunku 6.11.



Rysunek 6.11. Schemat rozkładu warstwy topnika w zależności od jego gramatury (opracowanie własne)

- Maksymalna temperatura<sup>149</sup> - poziomy 593; 602 oraz 606 [°C], gdzie wartość 602 [°C] jest wartością referencyjną. Schemat konfiguracji chłodnic powietrza na taśmociągu pieca tunelowego został przedstawiony na rysunku 6.12.



Rysunek 6.12. Schemat konfiguracji chłodnic powietrza w piecu tunelowym w zależności od maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne)

<sup>148</sup> Gramatura topnika to masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu.

<sup>149</sup> Określenie zakresu maksymalnej temperatury w piecu tunelowym zostało opisane w 6.4 Badanie wpływu konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na warunki termiczne procesu lutowania, s. 70.

Wyniki wybranych pomiarów wraz z założeniami i wnioskami zostały przedstawione poniżej:

- Wyniki testów szczelności i rozrywania - zostały przedstawione w tabeli 6.3. Test szczelności<sup>150</sup> został wykonany dla wszystkich 64 szt. Test rozrywania<sup>151</sup>, ze względu na wpływ na stopień zlutowania oraz potencjalny wpływ na formę pozostałości topnika, został wykonany jedynie dla pojedynczych sztuk z każdej grupy w celach porównawczych (łącznie 9 chłodnic powietrza).

Tabela 6.3. Stopień spełnienia wymagań testu szczelności oraz testu rozrywania w zależności od gramatury topnika na pokrywach oraz maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne)

Rodzaj testu	Maksymalna temperatura [°C]	Gramatura topnika [g/m <sup>2</sup> ]		
		1	3	5
Test szczelności	593	0%	0%	33%
	602	38%	100%	100%
	606	80%	100%	100%
Test rozrywania	593	0%	0%	0%
	602	460%	425%	413%
	606	465%	383%	358%

Najwyższa gramatura topnika umożliwiła spełnienie stopnia zlutowania nawet w przypadku braku stosowania ramek lutowniczych<sup>152</sup>. Potwierdza to dane z literatury, że zwiększona gramatura topnika może kompensować mniej korzystne warunki procesu lutowania, w tym zbyt niską temperaturę lutowania<sup>153</sup>. Jednak chłodnica z grupy gramatury topnika 5 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalnej temperatury 593 [°C], pomimo spełnienia warunku szczelności, nie spełniła wymagań testu rozrywania. Oznacza to, że uzyskane w tej grupie spoiny były niskiej jakości (skrótowa długość, nieregularny kształt, niezgodna mikrostruktura). Przy najniższej gramaturze 1 [g/m<sup>2</sup>] odnotowano chłodnice powietrza niespełniające warunku szczelności we wszystkich grupach, jednak podwyższona temperatura lutowania do 606 [°C] wpłynęła na blisko dwukrotną poprawę spełnienia warunku szczelności w tej grupie. Oznacza to, że w przypadku obniżonej gramatury topnika, kluczowe znaczenie ma dokładność jego naniesienia, aby dostarczyć topnik do obszarów gdzie muszą powstać spoiny.

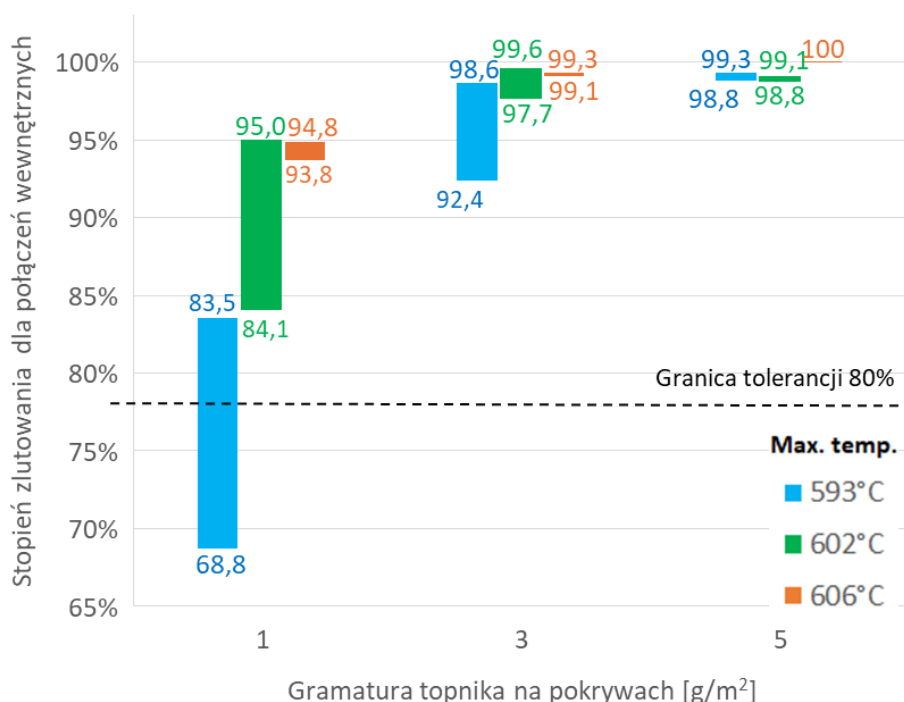
<sup>150</sup> Test szczelności wykonany na podstawie metody opisanej w 4.4 Metody pomiaru i analizy, s. 39.

<sup>151</sup> Test rozrywania wykonany zgodnie z metodą opisaną w 2.8 *Proces kontroli*, s. 26.

<sup>152</sup> Znaczenie ramek lutowniczych na stopień zlutowania zostało opisane w 6.3 Badanie wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania, s. 68.

<sup>153</sup> Pozytywny wpływ zwiększonej gramatury topnika na stopień zlutowania został opisany w 2.5 *Proces nanoszenia topnika*, s. 14.

- Ocena spełnienia stopnia zlutowania - została dokonana dla połączeń wewnętrznych, które nie wpływają na szczelność, gdyż nie są one bezpośrednio zależne od zastosowania ramek lutowniczych<sup>154</sup>. Uzyskane wyniki<sup>155</sup> dla 58 szt. zostały przedstawione na rysunku 6.13.



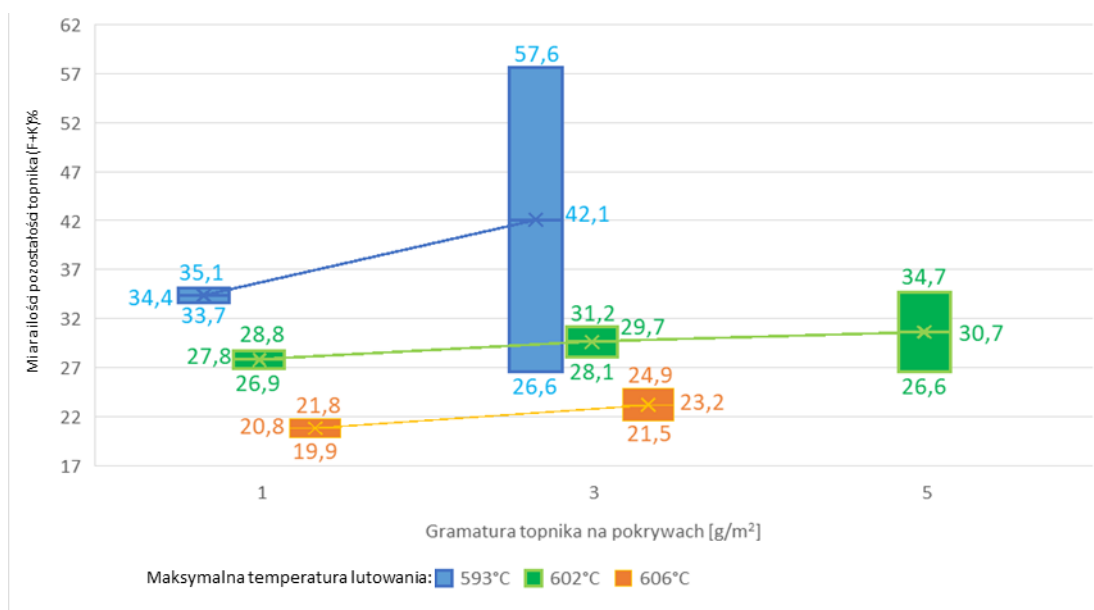
Rysunek 6.13. Stopień zlutowania chłodnic powietrza w zależności od gramatury topnika oraz temperatury lutowania z podziałem na pokrywy górne i dolne (opracowanie własne)

Niższe wartości dla każdej z grup zostały odnotowane dla pokryw górnych, a wyższe dla dolnych. Grupy 602 [°C] oraz 606 [°C] pozwalają na uzyskanie wymaganych spoin lutowniczych we wszystkich zakresach gramatury topnika na pokrywach. Podwyższona temperatura skutkowała wyższym stopniem zlutowania o około 2%. Dla grupy 593 [°C], pomimo nieszczelności chłodnic powietrza, odnotowano niespełnienie wymagań spoin lutowniczych jedynie dla gramatury 1 [g/m<sup>2</sup>] na pokrywach górnych. Wyniki podkreślają znacznie dokładności i równomierności pokrycia komponentów warstwą topnika.

<sup>154</sup> Ocena dokonana dla 55 szt. (pozostałe 9 sztuk zostało wykorzystanych w testach rozrywania), zgodnie z metodą makrografii spoin opisaną w 2.8 *Proces* kontroli, s.26.

<sup>155</sup> Wartości stopnia zlutowania są uśrednione dla danych grup chłodnic powietrza z podziałem na pokrywy górne i dolne.

- Ocena ilości pozostałości topnika mierzonej metodą SEM-EDS - została dokonana w celach porównawczych<sup>156</sup> dla 7 szt. chłodziń powietrza. Uzyskane wyniki<sup>157</sup> zostały przedstawione na rysunku 6.14.



Rysunek 6.14. Porównanie miary (F+K)% uzyskanego metodą SEM-EDS pomiędzy chłodzićmi powietrza w zależności od gramatury topnika oraz temperatury maksymalnej (opracowanie własne)

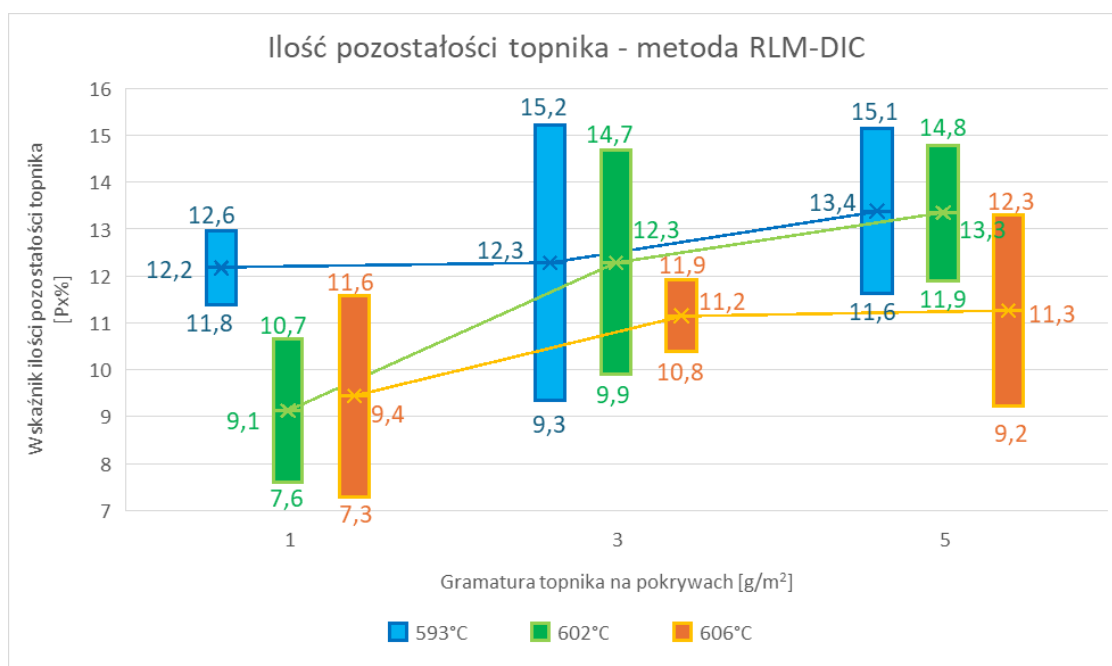
Metoda SEM-EDS nie wymaga szczelności chłodziń, co pozwoliło na dokonanie oceny ilości pozostałości topnika również dla grupy 593 [°C], w której zaobserwowano jej nieproporcjonalną ilość w stosunku do wejściowej gramatury. Przepuszczalnie wynika to z przecieku wewnętrznego, który skutkował migracją topnika z obiegu sprężonego powietrza<sup>158</sup>. Znaczny rozrzut pomiędzy pokrywami górną i dolną świadczy o braku reakcji topnika ze spoiwem lutowniczym, a w efekcie jego grawitacyjnym spłynięciu. W grupie 606 [°C] odnotowano mniej pozostałości topnika o około 30% niż w grupie temperatury referencyjnej 602 [°C]. Może to świadczyć o wpływie zwiększonej temperatury lutowania na lejność topnika, który rozplywa się na większej powierzchni.

<sup>156</sup> Pomiar został przeprowadzony jedynie dla 7 szt. chłodziń powietrza ze względu na znaczące koszty metody SEM-EDS, opisanej w 5.3 *Skaningowa mikroskopia elektronowa*, s. 54.

<sup>157</sup> Wyniki stanowią średnią z 6 zdjęć wykonanych dla każdej próbki środkowej, uwzględniając rozróżnienie pomiędzy pokrywą dolną (wyższa wartość) oraz górną (niższa wartość).

<sup>158</sup> Podział na obieg sprężonego powietrza oraz obieg cieczy chłodzińczej został opisany w 1.3 Chłodzińca powietrza w układzie doładowania, s. 4.

- Ocena ilości pozostałości topnika mierzonej metodą RLM-DIC - została dokonana dla 50 szt. chłodnic powietrza<sup>159</sup>. Uzyskane wyniki<sup>160</sup> zostały przedstawione na rysunku 6.15.



Rysunek 6.15. Porównanie miary [Px%] uzyskanej metodą RLM-DIC pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne)

Metoda RLM-DIC również umożliwia przeprowadzenie oceny dla grupy 593 [°C]. Dla tej grupy przy gramaturze 1 [g/m<sup>2</sup>] zaobserwowano pozostałość topnika nieproporcjonalną do gramatury, co potwierdza przeciek wewnętrzny. W grupie 606 [°C] nie zaobserwowano znaczącej różnicy miary [Px%]<sup>161</sup> pomiędzy gramaturami 3 oraz 5 [g/m<sup>2</sup>]. Może to oznaczać wpływ podwyższonej temperatury lutowania na wzrost grubości aglomeratów pozostałości topnika, co nie jest rozróżnialne za pomocą metody RLM-DIC. Rozrzut pomiędzy pokrywami górnymi i dolnymi jest zmienny w zakresie od 14 do 63%. Wzrost gramatury topnika w grupie 606 [°C], pomimo braku znaczącego wpływu na ilość pozostałości topnika, skutkował znaczącym zwiększeniem rozrzutu pomiędzy pokrywami górną i dolną. Może to oznaczać migrację topnika z górnej pokrywy na dolną w wyniku jego zbyt dużej lejukości, jak i jego nadmiernej gramatury. Miara [Px%] jest najwyższa dla grupy 593 [°C], a najniższa dla grupy 606

<sup>159</sup> Ocena dokonana dla 50 szt. (pozostałe 9 sztuk zostały wykorzystane w testach rozrywania), zgodnie z metodą RLM-DIC opisaną w 5.4 *Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC)*, s. 58.

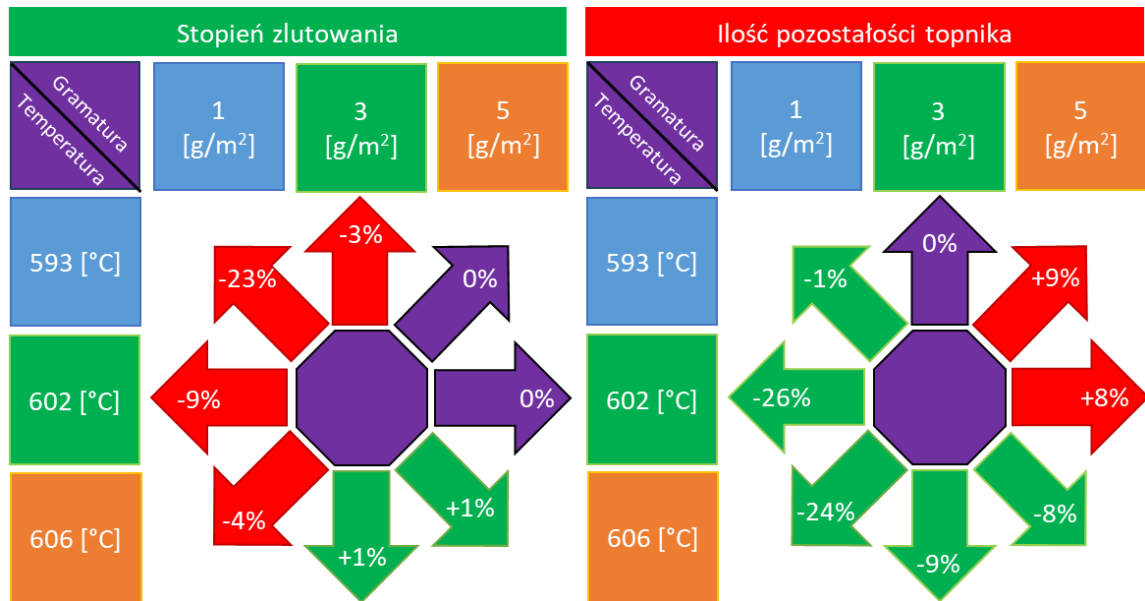
<sup>160</sup> Wyniki stanowią średnią z 6 zdjęć wykonanych dla każdej próbki środkowej, uwzględniając rozróżnienie pomiędzy pokrywą dolną (wyższa wartość) i górną (niższa wartość).

<sup>161</sup> Miara [Px%] stosowana w autorskiej metodzie RLM-DIC została opisana w 5.4 *Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC)*, s. 58.

[°C]. Oznacza to pozytywny wpływ zwiększonej temperatury lutowania na obniżenie ilości pozostałości topnika, co potwierdza wyniki uzyskane metodą SEM-EDS.

## 6.6 Podsumowanie badań optymalizacyjnych

Na rysunku 6.16 zostało przedstawione podsumowanie wyników przeprowadzonych badań z podziałem na wyniki stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika<sup>162</sup>.



Rysunek 6.16. Porównanie stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika w zależności od gramatury topnika na pokrywach oraz maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne)

Wpływ czynników został porównany do wartości środkowych: gramatury topnika na pokrywach 3 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalnej temperatury lutowania 602 [°C]. Na podstawie uzyskanych wyników stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika stwierdzono, że najważniejszym parametrem procesu jest wejściowa gramatura topnika na pokrywach. Poziom gramatury powyżej 3 [g/m<sup>2</sup>] nie wpływa znacząco na poprawę stopnia zlutowania (poprawa w zakresie od 0 do 3 [p.p]), przy jednoczesnym wyraźnym wzroście ilości pozostałości topnika w zakresie od 1 do 9 [p.p]. Zwiększona maksymalna temperatura lutowania (powyżej 602 [°C]) wpływa na zwiększenie lejności topnika oraz spoiwa lutowniczego, poprawiając stopień zlutowania w zakresie od 1 do 5 [p.p]. W efekcie możliwe jest powstanie spoin również przy zmniejszonej gramaturze topnika. Jednocześnie zwiększona temperatura wpływa na zmniejszenie ilości pozostałości topnika w zakresie od 2 do 16 [p.p]. Przepuszczalnie wynika

<sup>162</sup> w podsumowaniu wyników dla ilości pozostałości topnika wykorzystane zostały jedynie wyniki pomiaru metodą RLM-DIC.

to z reakcji topnika z magnezem<sup>163</sup>, wpływając na proporcje potasu do fluoru, a w efekcie na formę pozostałości topnika. Porównując skrajne wartości stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika został wyznaczony potencjał zwiększenia stopnia zlutowania o 24% oraz potencjał obniżenia ilości pozostałości topnika o 35% w zależności od parametrów procesu technologicznego.

Wyniki zostały ocenione w skali 0–1, gdzie 0 oznacza najmniej korzystne, a 1 optymalne ustawienie, co zostało przedstawione na Rysunek 6.17

Ocena [0-1]					
Gramatura Temperatura	1 [g/m <sup>2</sup> ]	3 [g/m <sup>2</sup> ]	5 [g/m <sup>2</sup> ]	Kryterium	Waga
593 [°C]	0,00	0,29	0,72	Stopień zlutowania	0,5
602 [°C]	0,34	0,61	0,77	Rozrzut stopnia zlutowania	0,1
606 [°C]	0,94	1,00	0,89	Ilość pozostałości topnika	0,3
				Rozrzut ilości pozostałości topnika	0,1

Rysunek 6.17. Macierz oceny wpływu czynników na spełnienie kryteriów jakościowych (opracowanie własne)

W celu oceny została przyjęta waga kryteriów, które uwzględniają również rozrzut stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika pomiędzy pokrywami górną i dolną. Najwyższa ocena, a tym samym optymalne parametry procesu technologicznego chłodnicy powietrza, została uzyskana dla ustawienia czynników: gramatura topnika 3 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalna temperatura lutowania 606 [°C].

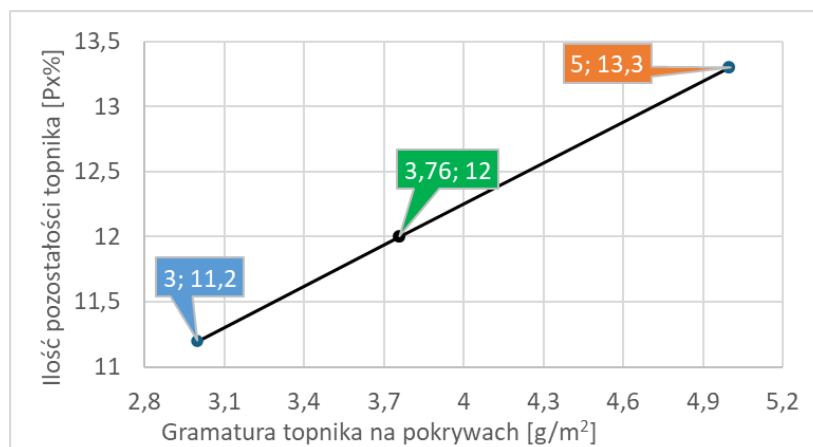
Aby określić graniczną gramaturę topnika [g/m<sup>2</sup>], która umożliwi osiągnięcie celu pracy<sup>164</sup> porównane zostały wartości miary ilości pozostałości topnika [Px%] pomiędzy parametrami referencyjnymi<sup>165</sup> oraz optymalnymi<sup>166</sup>, co zostało przedstawione na rysunku 6.18.

<sup>163</sup> Zjawisko reakcji topnika z magnezem zostało opisane w 2.5 *Proces nanoszenia topnika*, s.14.

<sup>164</sup> Celem pracy jest ograniczenie ilości pozostałości topnika o 10%, co zostało opisane w 4.2 *Cel, teza i etapy pracy*, s. 38.

<sup>165</sup> Parametry referencyjne: gramatura topnika 5 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalna temperatura lutowania 602 [°C].

<sup>166</sup> Parametry optymalne: gramatura topnika 3 [g/m<sup>2</sup>] oraz maksymalna temperatura lutowania 606 [°C].



Rysunek 6.18. Obliczenie zakresu tolerancji gramatury topnika na pokrywach umożliwiającej osiągnięcie obniżenia ilości pozostałości topnika o 10% (opracowanie własne)

Na wykresie przyjęto, że oś x reprezentuje gramaturę topnika [g/m<sup>2</sup>], natomiast oś y miarę ilość pozostałości topnika [Px%]. Na podstawie macierzy oceny, parametry referencyjne odpowiadają punktowi (5; 13,3), natomiast parametry optymalne odpowiadają punktowi (3; 11,2). Zakładając liniową zależność pomiędzy zmiennymi, wyrażoną w postaci  $y=mx+b$ , obliczono graniczną gramaturę topnika ( $G_{doc}$ ), odpowiadającą obniżeniu ilości pozostałości topnika o 10% ( $P_{doc}$ ) za pomocą wzorów:

$$P_{doc} = m * G_{doc} + b$$

$$G_{doc} = \frac{P_{doc} - b}{m}$$

$$P_{doc} = 0,9 * P_{ref} = 0,9 * 13,3 = 12,0$$

$$m = \frac{P_{ref} - P_{opt}}{G_{ref} - G_{opt}} = \frac{(13,3 - 11,2) [Px\%]}{(5 - 3) \left[\frac{g}{m^2}\right]} = \frac{2,1 [Px\%]}{2 \left[\frac{g}{m^2}\right]} = 1,05 \left[\frac{Px\% * m^2}{g}\right]$$

$$b = P_{ref} - m * G_{ref} = 13,3 [Px\%] - 1,05 \left[\frac{Px\% * m^2}{g}\right] * 5 \left[\frac{g}{m^2}\right] = 8,05 [Px\%]$$

$$G_{doc} = \frac{(12,0 - 8,05)[Px\%]}{1,05 \left[\frac{Px\% * m^2}{g}\right]} = 3,8 \left[\frac{g}{m^2}\right]$$

gdzie:

$G_{doc}$  – graniczna gramatura topnika,

$G_{opt}$  – gramatura topnika odpowiadająca wartości optymalnej [3 g/m<sup>2</sup>],

$G_{ref}$  – gramatura topnika odpowiadająca wartości referencyjnej [5 g/m<sup>2</sup>],

$P_{doc}$  – miara [Px%] odpowiadająca wartości granicznej gramatury topnika,

$P_{ref}$  – miara [Px%] odpowiadająca wartości referencyjnej [13,3 Px%],

$P_{opt}$  – miara [Px%] odpowiadająca wartości optymalnej [11,2 Px%],

$m$  – współczynnik kierunkowy,

$b$  – wyraz wolny.

Obliczona graniczna gramatura topnika  $3,8 \text{ [g/m}^2\text{]}$  została przyjęta jako górna granica tolerancji dla gramatury topnika, wyznaczając symetryczną tolerancję  $\pm 0,8 \text{ [g/m}^2\text{]}$ .

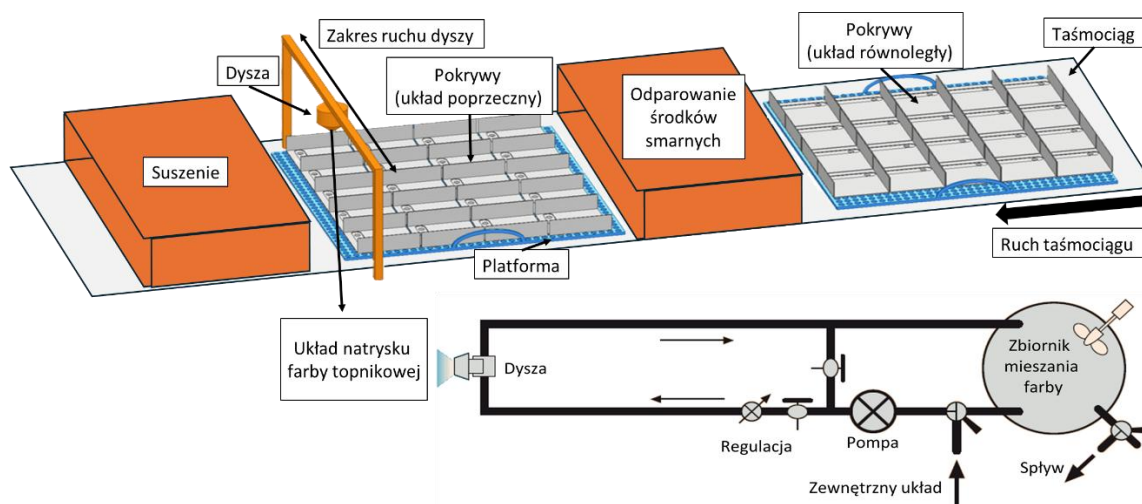
Na podstawie wyników badań zostało potwierdzone, że istnieje technologiczna możliwość zmniejszenia ilości pozostałości topnika w chłodnicy powietrza po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze, przy jednoczesnym zachowaniu jej wymaganego stopnia zlutowania. W celu osiągnięcia ich poprawy w procesie technologicznym zostały zdefiniowane poniższe zalecenia wdrożeniowe:

- wymiana sprężyn w ramach lutowniczych w przypadku odnotowania spadku stopnia zlutowania,
- zwiększenie maksymalnej temperatury lutowania z  $602 \text{ [}^\circ\text{C]}$  do  $606 \text{ [}^\circ\text{C]}$  lub zmiana ułożenia wsadu w piecu tunelowym (wprowadzenie odstępów pomiędzy partiami produkcyjnymi),
- zmniejszenie obecnej gramatury topnika na pokrywach z  $5,4 \pm 1,2$  do zalecanej gramatury  $3 \pm 0,8 \text{ [g/m}^2\text{]}$ .

## 7. Zastosowanie zaleceń w praktyce przemysłowej

### 7.1 Nowa maszyna do nanoszenia topnika

Zgodnie z zaleceniami wdrożeniowymi<sup>167</sup>, kluczowym czynnikiem wpływającym zarówno na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika jest wejściowa gramatura topnika na pokrywach. Zastosowana metoda selektywnego topnikowania<sup>168</sup> charakteryzuje się pewnym rozrzutem gramatury topnika nanoszonego na pokrywy<sup>169</sup>. Aby umożliwić osiągnięcie zalecanej gramatury topnika  $3\pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>], w firmie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski została wprowadzona do produkcji nowa maszyna do nanoszenia topnika, której schemat został przedstawiony na rysunku 7.1.



Rysunek 7.1. Schemat nowej maszyny do nanoszenia topnika (opracowanie własne)

Farba topnikowa<sup>170</sup> jest natryskiwana za pomocą dyszy, pomiędzy komorami odparowania środków smarnych oraz suszenia<sup>171</sup>. Dysza porusza się ruchem wahadłowym względem taśmociągu, który przemieszcza się ruchem jednostajnym. Pokrywy ułożone są na platformach, tworząc partie produkcyjne. Pokrywy, ze względu na ukształtą geometrię<sup>172</sup>, mogą być

<sup>167</sup> Zalecenia wdrożeniowe zostały opisane w 6.6 Podsumowanie badań optymalizacyjnych, s.81.

<sup>168</sup> Metoda selektywnego topnikowania została opisana w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s.14.

<sup>169</sup> Obecny rozrzut gramatury topnika na pokrywach  $5,4\pm 1,2$  [g/m<sup>2</sup>] został opisany w 6.2 Badanie charakterystyki warstwy topnika, s. 64.

<sup>170</sup> Farba topnikowa to wodna zawiesina topnika, opisana w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s. 14.

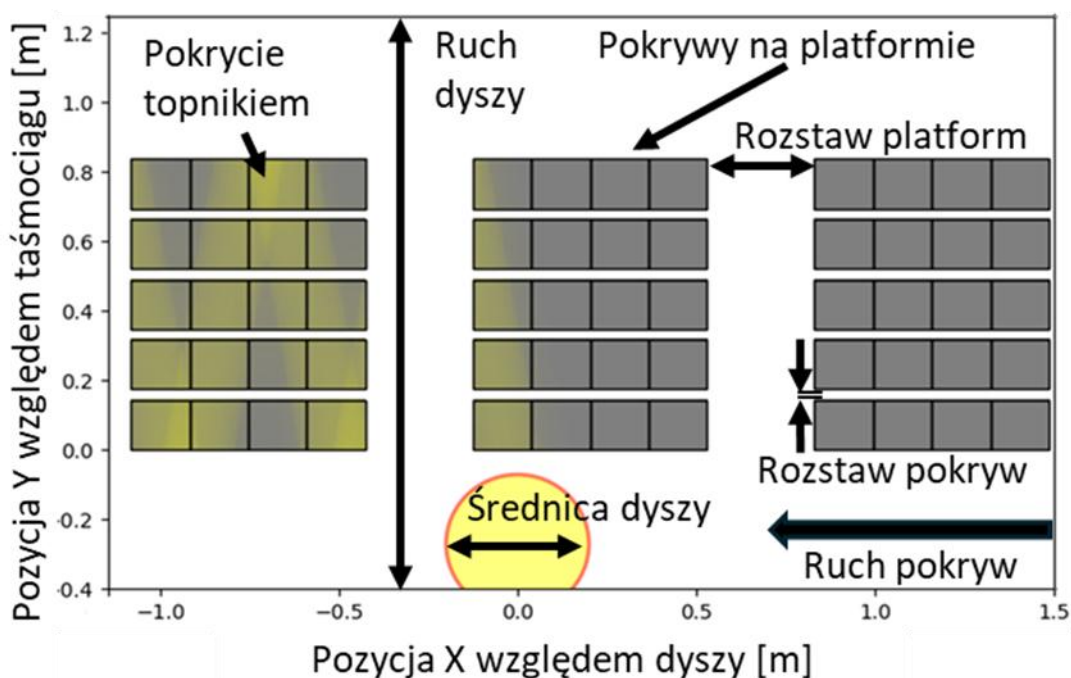
<sup>171</sup> Znaczenie odparowania oleju oraz suszenia w metodzie selektywnego topnikowania zostały opisane w 2.5 Proces nanoszenia topnika, s. 14.

<sup>172</sup> Geometria pokryw została opisana na rysunku 5.1.

ułożone poprzecznie lub równoległe względem ruchu dyszy. Gramatura nanoszonego topnika jest zależna od przepustowości<sup>173</sup> układu natrysku farby topnikowej.

## 7.2 Symulacja procesu nanoszenia topnika

Efektywne wdrożenie nowej maszyny do procesu nanoszenia topnika wymagało wskazania czynników procesowych istotnych dla uzyskania zalecanej gramatury<sup>174</sup> na pokrywach. W tym celu został opracowany model komputerowy maszyny do selektywnego topnikowania, umożliwiający przeprowadzenie symulacji odwzorowującej mechanikę działania i wzajemne relacje między poszczególnymi czynnikami procesowymi [157]. Schemat modelu został przedstawiony na rysunku 7.2.



Rysunek 7.2. Komputerowy model maszyny do nanoszenia topnika (opracowanie własne)

W modelu wyróżnione zostały następujące czynniki:

- Stopień pokrycia topnikiem - przedstawiony w postaci gradientu kolorów szary-żółty. Intensywniejsza żółta barwa odpowiada większemu udziałowi gramatury topnika [%]<sup>175</sup>. W ramach symulacji przyjęto, że wartość ta jest proporcjonalna do gramatury

<sup>173</sup> Na przepustowość układu natrysku wpływają gęstość stosowanej farby topnikowej, ciśnienie robocze oraz rodzaj dyszy.

<sup>174</sup> Zalecana gramatura topnika  $3 \pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>] została opisana w 6.2 Badanie charakterystyki warstwy topnika, s. 64.

<sup>175</sup> Udział gramatury topnika to miara stosowana w autorskiej symulacji procesu nanoszenia topnika.

topnika, która jest zależna od przepustowości układu natrysku (nie został on uwzględniony w symulacji).

- Obszar natrysku topnika - został w symulacji uproszczony do postaci kolistego pola średnicy dyszy [m]. Obszar ten definiuje powierzchnię, na którą nanoszony jest topnik w danym momencie czasowym, z krokiem symulacyjnym co 0,1 [s]. Założono, że 75% całkowitej ilości topnika trafia na centralny obszar stanowiący 25% średnicy dyszy, natomiast pozostałe 25% rozkłada się degresywnie na pozostałej części obszaru (czyli na 75% średnicy). Taki rozkład odwzorowuje typowy profil natrysku dla dysz przemysłowych, w których największe stężenie występuje w centrum strumienia [158].
- Geometria pokryw - kształt pokryw został uproszczony do postaci płaskich płyt, uniemożliwiając rozróżnienie układów poprzecznego i równoległego względem ruchu dyszy.
- Rozstaw pokryw ( $Y$  [m]) - wymiary platformy umożliwiają swobodę rozsunęcia pokryw w zakresie wielkości platformy między rzędami w osi  $Y$ .
- Rozstaw platform ( $P$  [m]) - platformy mogą być układane na taśmociągu w dowolnej odległości od siebie w osi  $X$ . Większa odległość pomiędzy platformami wiąże się z ograniczeniem zdolności produkcyjnej maszyny. Z tego powodu w produkcji seryjnej preferowana jest minimalizacja tego czynnika.
- Prędkość taśmociągu ( $V_t$  [m/s]) - taśmociąg w trakcie procesu nanoszenia topnika porusza się ruchem jednostajnym wzdłuż osi  $X$ . Większa prędkość taśmociągu jest pożądana z powodu jej wpływu na zwiększenie wydajności produkcyjnej.
- Prędkość dyszy ( $V_d$  [m/s]) - w trakcie symulacji dysza porusza się ruchem jednostajnym wahadłowym w osi  $Y$ . W efekcie stałego posuwu taśmociągu w osi  $X$  uzyskiwany jest piłokształtny przebieg pokrycia topnikiem.

Format wyniku symulacji został przedstawiony na rysunku 7.3.

	Platforma 1			
	Kol. 1	Kol. 2	Kol. 3	Kol. 4
Rząd 1	0.78%	1.44%	2.85%	0.60%
Rząd 2	1.17%	1.70%	2.21%	1.01%
Rząd 3	1.61%	1.93%	1.54%	1.54%
Rząd 4	2.15%	1.97%	0.95%	2.17%
Rząd 5	2.64%	1.86%	0.52%	2.78%

Rysunek 7.3. Format wyników symulacji procesu nanoszenia topnika uwzględniający udział gramatury topnika pomiędzy pokrywami z podziałem pokryw na rząd, kolumnę oraz platformę (opracowanie własne)

Wyniki symulacji przedstawiają udział gramatury topnika [%] na pokrywach, przy czym całkowita wartość dla 3 platform wynosi 100%. Uwzględnione zostało rozróżnienie pozycji pokryw (rząd i kolumna) jak i platformy, na której są umieszczone. Przyjęto założenie, że każda platforma stanowi osobną replikację. Zmienność wyników pomiędzy tymi platformami potraktowano jako błąd losowy eksperymentu. Miernikiem sukcesu symulacji jest osiągnięcie minimalnej wartości rozrzutu udziału gramatury topnika pomiędzy pokrywami. Wartość idealna tego rozrzutu wynosi 0%.

### 7.3 Analiza wyników eksperymentu

Komputerowy model procesu nanoszenia topnika pozwolił na przeprowadzenie symulacji według schematu odpowiadającego planowi eksperymentu czynnikowego  $2^4$  z 3 replikacjami zgodnie z metodologią DOE [159]. Celem było zbadanie, które czynniki mają wpływ na rozrzut udziału gramatury topnika pomiędzy pokrywami. Uwzględnione czynniki to:

- rozstaw pokryw (Y),
- rozstaw platform (P),
- prędkość taśmociągu (Vt),
- prędkość dyszy (Vd).

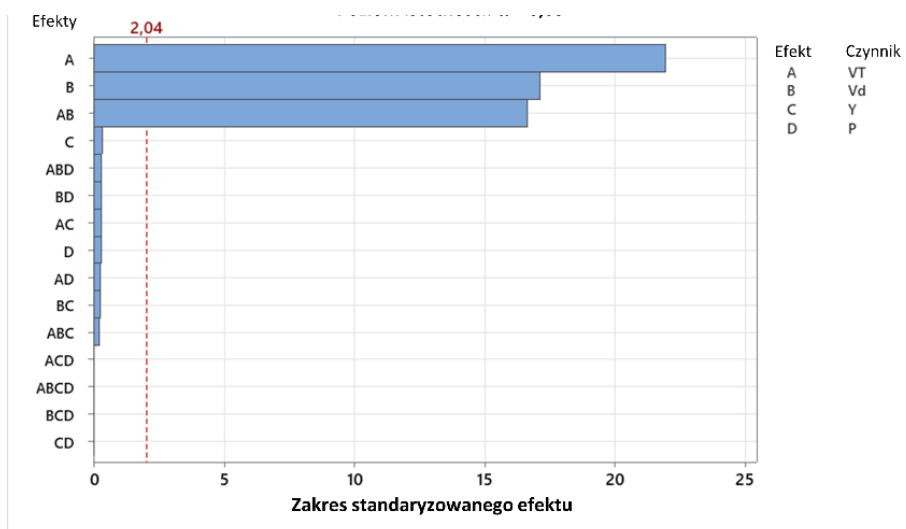
W wyniku przeprowadzonego w ten sposób eksperymentu uzyskana została ocena efektów głównych dla każdego z 4 czynników sterowalnych<sup>176</sup> oraz interakcji pomiędzy nimi. Wyniki analizy wariancji z uzyskanych danych zostały przedstawione w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Wyniki analizy ANOVA dla przeprowadzonego eksperymentu (opracowanie własne)

Podsumowanie modelu					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0,0024190	97,05%	95,66%	93,36%		
Analiza wariancji					
Źródło	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,006155	0,000410	70,13	0,000
Liniowa	4	0,004532	0,001133	193,63	0,000
VT	1	0,002814	0,002814	480,85	0,000
Vd	1	0,001717	0,001717	293,47	0,000
Y	1	0,000001	0,000001	0,11	0,745
P	1	0,000001	0,000001	0,09	0,772
2-giego stopnia	6	0,001622	0,000270	46,21	0,000
Interakcje					
VT*Vd	1	0,001621	0,001621	276,94	0,000
VT*Y	1	0,000001	0,000001	0,09	0,772
VT*P	1	0,000000	0,000000	0,08	0,781
Vd*Y	1	0,000000	0,000000	0,07	0,790
Vd*P	1	0,000001	0,000001	0,09	0,763
Y*P	1	0,000000	0,000000	0,00	0,995
3-ciego stopnia	4	0,000001	0,000000	0,04	0,997
Interakcje					
VT*Vd*Y	1	0,000000	0,000000	0,04	0,836
VT*Vd*P	1	0,000001	0,000001	0,10	0,754
VT*Y*P	1	0,000000	0,000000	0,00	0,976
Vd*Y*P	1	0,000000	0,000000	0,00	0,995
4-tego stopnia	1	0,000000	0,000000	0,00	0,986
Interakcje					
VT*Vd*Y*P	1	0,000000	0,000000	0,00	0,986
Błąd	32	0,000187	0,000006		
Suma	47	0,006343			

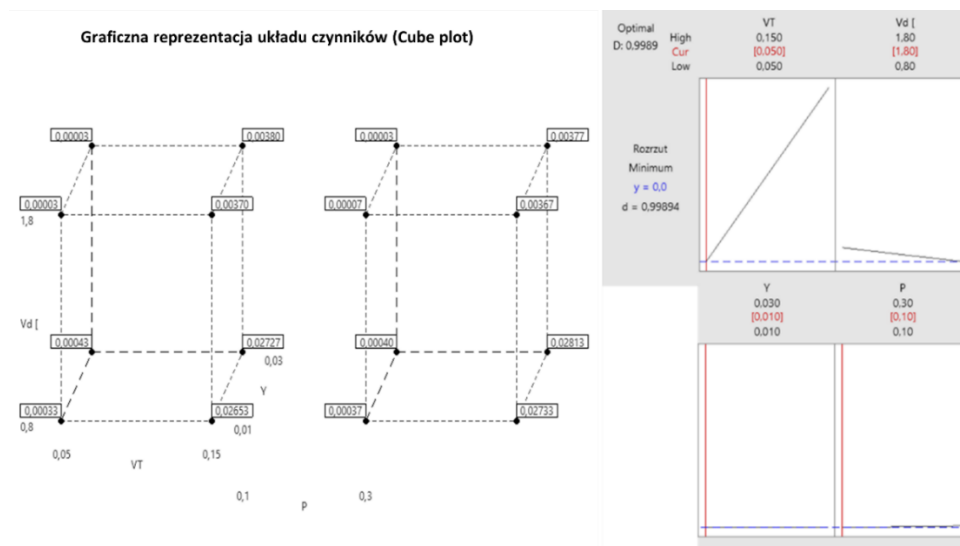
Uzyskany współczynnik determinacji 97,05% oznacza, że model cechuje się bardzo dobrym dopasowaniem i zdolnością predykcyjną. Istotnymi statystycznie efektami liniowymi są prędkość taśmociągu (Vt) oraz prędkość dyszy (Vd). Czynniki rozstaw pokryw (Y) oraz rozstaw platform (X) nie są statystycznie istotne. Na rysunku 7.4 został przedstawiony wykres Pareto standaryzowanych efektów.

<sup>176</sup> Czynniki sterowalne w symulacji: rozstaw pokryw (P); rozstaw platform (Y); prędkość taśmociągu (Vt); prędkość dyszy (Vd)



Rysunek 7.4. Wykres Pareto standaryzowanych efektów dla przeprowadzonego eksperymentu dla odpowiedzi rozrzutu przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  (opracowanie własne)

Wykres potwierdza znaczący wpływ na rozrzut gęstości warstwy topnika pomiędzy pokrywami czynników Vt, Vd oraz ich interakcji 2-giego stopnia (ich efekty przekraczają granicę obszaru krytycznego dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$ ). Pozostałe czynniki i interakcje nie są statystycznie istotne. Na rysunku 7.5 został przedstawiony wykres kubiczny wraz z wykresem optymalizacji.



Rysunek 7.5. Wykres kubiczny oraz wykres optymalizacji dla eksperymentu przeprowadzonego na podstawie wyników symulacji (opracowanie własne)

Wykresy pozwalają na określenie najlepszego ustawienia czynników Vt oraz Vd. Wynika z nich, że najmniejsza wartość rozrzutu gęstości warstwy topnika pomiędzy pokrywami występuje przy najniższej wartości prędkości taśmociągu oraz najwyższej prędkości dyszy, przy minimalnych wartościach rozstawu pokryw oraz rozstawu platform.

Na podstawie symulacji komputerowej oraz analizy wyników eksperymentu zostało stwierdzone, że optymalne parametry procesu nanoszenia topnika wymagają dopasowania prędkości dyszy do prędkości taśmociągu. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie rozrzutu gramatury warstwy topnika pomiędzy pokrywami do 3,5%. Wyniki te nie są zależne od rozstawu pokryw (Y) oraz platform (P). Oznacza to, że nie ma konieczności kontrolowania tych czynników w produkcji seryjnej.

#### 7.4 Próby technologiczne nowej maszyny do nanoszenia topnika

W celu weryfikacji wpływu czynników nieuwzględnionych w symulacji (u-kształtnej geometrii pokrywy<sup>177</sup> oraz ciśnienia roboczego<sup>178</sup>) przeprowadzone zostały próby produkcyjne w postaci pełnego eksperymentu czynnikowego na dwóch poziomach 2<sup>2</sup>, którego plan został przedstawiony w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Plan prób technologicznych nowego procesu nanoszenia topnika

Ciśnienie robocze	Układ pokryw	Liczba replikacji
1,3 [bar]	Poprzeczny	20
1,3 [bar]	Równoległy	20
0,8 [bar]	Poprzeczny	20
0,8 [bar]	Równoległy	20

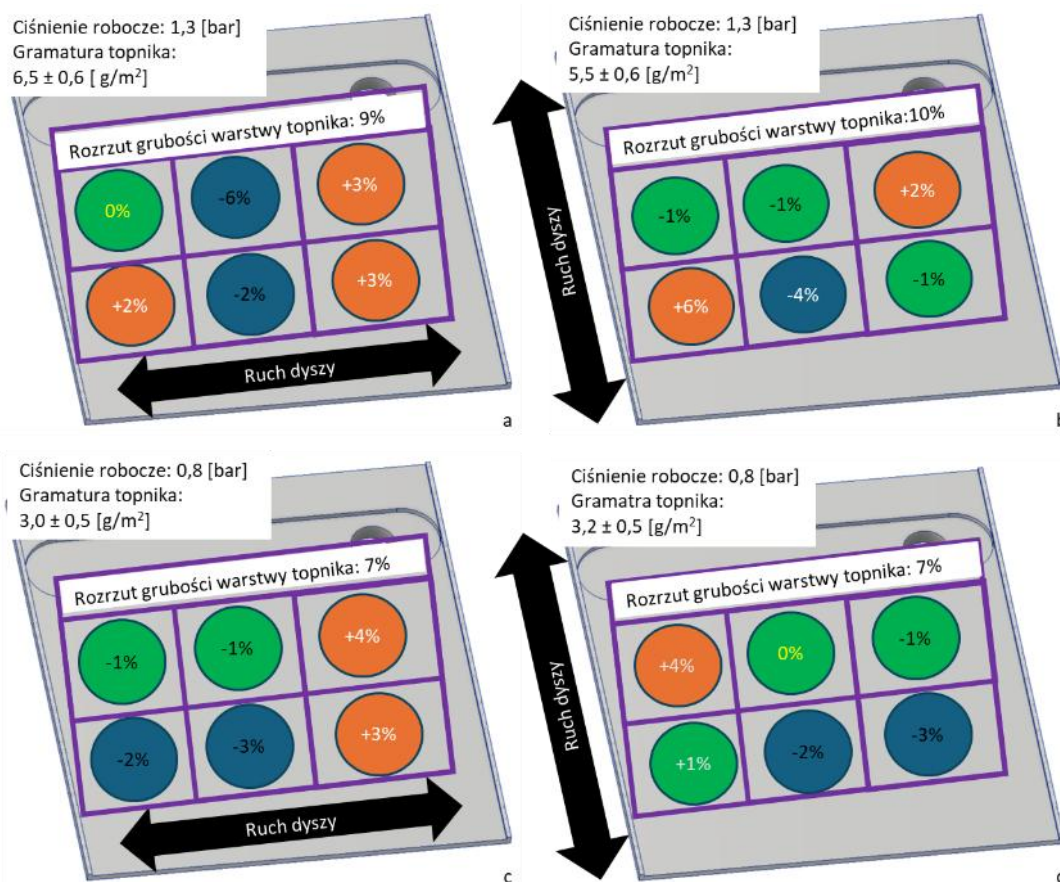
Badanymi czynnikami były ciśnienie robocze układu natrysku farby topnikowej oraz ułożenia pokryw względem taśmociągu<sup>179</sup>. Parametry prędkości dyszy oraz taśmociągu były stałe. Zmienne zależne obejmowały: gramaturę topnika na pokrywach, rozrzut gramatury topnika oraz rozrzut grubości warstwy topnika<sup>180</sup>. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 7.6.

<sup>177</sup> Geometria pokryw została opisana w 5.1 Założenia, s. 49.

<sup>178</sup> Ciśnienie robocze układu natrysku dyszy jest jednym z czynników sterowalnych w nowej maszynie do nanoszenia topnika. Czynniki ten, ze względu na złożoność, został pominięty w symulacji.

<sup>179</sup> Czynniki te nie były badane w ramach symulacji komputerowej.

<sup>180</sup> Obszary pomiaru grubości warstwy topnika na kanale pokrywy zostały pominięte, ze względu na różnicę geometrii w porównaniu do płaskich obszarów środka pokrywy.



Rysunek 7.6. Gramatura nanoszonego topnika i jej rozrzut oraz grubość warstwy topnika, w zależności od czynników ciśnienia roboczego oraz ułożenia pokryw na taśmociągu: a) układ poprzeczny dla wyższego ciśnienia, b) układ równoległy dla wyższego ciśnienia, c) układ poprzeczny dla niższego ciśnienia, d) układ równoległy dla niższego ciśnienia (opracowanie własne)

Osiągnięte gramatury topnika mieszczą się w zakresie od  $3,0$  do  $6,5$  [g/m<sup>2</sup>] przy podobnym rozrzucie  $\pm 0,5$  [g/m<sup>2</sup>]. Rozrzut grubości warstwy topnika mieści się w zakresie od 7 do 10% i jest nieznacznie wyższy dla wyższego ciśnienia roboczego. Ułożenie pokryw ma znaczenie jedynie przy wyższym ciśnieniu, gdzie różnica gramatury pomiędzy grupami wynosiła aż  $1$  [g/m<sup>2</sup>].

Przeprowadzone próby potwierdzają możliwość sterowania gramaturą topnika przy zachowaniu wymaganego rozrzutu topnika poniżej  $\pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>]<sup>181</sup>. Osiągnięcie wartości gramatury  $3,0 \pm 0,5$  [g/m<sup>2</sup>] pozwala stwierdzić spełnienie zalecenia wdrożeniowego dla nowej maszyny do nanoszenia topnika.

<sup>181</sup> Tolerancja gramatury topnika  $\pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>] została wyznaczona jako zalecenie wdrożeniowe w 6.6 Podsumowanie badań optymalizacyjnych, s. 81.

## 8. Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań oraz wdrożonych na ich podstawie rozwiązań, w chłodnicach powietrza wytwarzanych w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski ograniczono ilość pozostałości topnika o 35% oraz uzyskano wzrost stopnia zlutowania o 24%<sup>182</sup>. Oznacza to spełnienie celu użytecznego pracy<sup>183</sup>.

Zweryfikowana została także pozytywnie teza naukowa pracy, że redukcję ilości pozostałości topnika można uzyskać poprzez odpowiedni dobór i kontrolę:

- gramatury i rozłożenia warstwy topnika<sup>184</sup>,
- siły kompresji ramek lutowniczych<sup>185</sup>,
- profilu lutowania<sup>186</sup>.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy można sformułować wnioski poznawcze, wnioski praktyczne i wdrożeniowe oraz wnioski co do przyszłych prac badawczych.

### **Wnioski poznawcze:**

1. Stosowana metoda pomiaru ilości pozostałości topnika (AAS<sup>187</sup>), pomimo wysokiej dokładności i jednoznaczności wyniku, nie umożliwia analizy formy ani obszarów agregacji cząsteczek pozostałości topnika.
2. Ilość pozostałości topnika oraz jej forma i obszary agregacji cząsteczek można wyznaczać w sposób pośredni z zastosowaniem:
  - skaningowej mikroskopii elektronowej z wykorzystaniem dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (SEM-EDS)<sup>188</sup>,
  - mikroskopii światła odbitego z wykorzystaniem kontrastu różnicowo-interferencyjnego (RLM-DIC)<sup>189</sup>.
3. Największy wpływ na ilość pozostałości topnika mają gramatura i rozłożenie warstwy topnika oraz profil lutowania<sup>190</sup>
4. Siła kompresji elementów dociskowych ramki lutowniczej powinna być dostosowana do wymiarów chłodnicy powietrza oraz utrzymana w wąskim zakresie tolerancji, aby

---

<sup>182</sup> Potencjał wdrożeniowy ograniczenia ilości pozostałości topnika o 35% oraz wzrostu stopnia zlutowania o 24% został określony na podstawie rysunku 6.16, s. 81.

<sup>183</sup> Użyteczny cel pracy to redukcja ilości pozostałości topnika w chłodnicach powietrza o 10%, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego stopnia ich zlutowania.

<sup>184</sup> Gramatura topnika została opisana w 2.5 *Proces nanoszenia topnika*, s. 14.

<sup>185</sup> Kompresja ramek lutowniczych została opisana w 2.6 *Proces montażu*, s. 19.

<sup>186</sup> Znaczenie profilu lutowania (zmian temperatury w czasie) zostało opisane w 2.7 *Proces lutowania*, s. 21.

<sup>187</sup> Metoda AAS została opisana w 4.4 *Metody pomiaru i analizy*, s. 39.

<sup>188</sup> Autorska metoda SEM-EDS została opisana w 5.3 *Skaningowa mikroskopia elektronowa*, s. 54.

<sup>189</sup> Autorska metoda RLM-DIC została opisana w 5.4 *Mikroskopia światła odbitego (RLM-DIC)*, s. 58.

<sup>190</sup> Wpływ gramatury i rozłożenia warstwy topnika oraz profilu lutowania na ilość pozostałości topnika zostały opisane w 6.6 *Podsumowanie badań optymalizacyjnych*, s. 81.

zapewnić powstanie spoin lutowniczych bez ryzyka wystąpienia uszkodzeń mechanicznych.

### **Wnioski praktyczne i wdrożeniowe:**

1. W stosowanym w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski procesie technologicznym chłodnic powietrza, czynnikami ograniczającymi możliwości redukcji pozostałości topnika są:
  - wysoki rozrzut gramatury i grubości warstwy topnika<sup>191</sup>,
  - ograniczone możliwości regulacji profilu lutowania<sup>192</sup>,
  - ograniczone możliwości analizy formy pozostałości topnika.
2. Eliminacja wskazanych problemów została dokonana poprzez:
  - optymalizację parametrów procesu nanoszenia topnika dzięki wdrożeniu nowej maszyny do selektywnego topnikowania, umożliwiającej uzyskanie gramatury w wyznaczonym zakresie  $3\pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>]<sup>193</sup>,
  - kontrolowane zwiększanie maksymalnej temperatury profilu lutowania do 606 [°C] poprzez konfigurację wsadu w piecu tunelowym,
  - stosowanie innowacyjnych - opracowanych w ramach pracy - metod obserwacji pozostałości topnika umożliwiających ocenę jej ilości oraz formy, w tym obszarów agregacji.

### **Wnioski co do przyszłych prac:**

Przeprowadzone badania nie wyczerpują potencjału doskonalenia procesu. W najbliższym czasie wskazane jest kontynuowanie prac w zakresie:

- określenia standardów pomiarowych w zależności od rodzaju wymiennika ciepła dla metod SEM-EDS oraz RLM-DIC,
- kalibracji współczynnika jasności dla metody RLM-DIC z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego,
- analizy wpływu różnych konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na rozkład temperatur,
- optymalizacji konstrukcji ramek lutowniczych w celu precyzyjnej kontroli siły kompresji.

---

<sup>191</sup> Rozrzut gramatury i grubości warstwy topnika  $5,4\pm 1,2$  [g/m<sup>2</sup>] został opisany w 6.2 Badanie charakterystyki warstwy topnika, s. 64.

<sup>192</sup> Regulacja profilu lutowania wiąże się z czasochłonną zmianą ustawień pieca tunelowego, co zostało opisane w 2.7 Proces lutowania, s. 21.

<sup>193</sup> Zakres optymalnej gramatury topnika  $3\pm 0,8$  [g/m<sup>2</sup>] został opisany w 6.6 Podsumowanie badań optymalizacyjnych, s. 81

## Podziękowanie

Badania zostały przeprowadzone w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Edukacji i Nauki realizowanego w latach 2021-2025 (Umowa nr (PP)RU00019673). Partnerem prowadzonych badań jest MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski Sp. z o.o.

## Literatura

- [1] G. Huminic i A. Huminic, „Application of nanofluids in heat exchangers: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 16, nr 8, pp. 5625-5638, 2012.
- [2] Solvay Special Chemicals, „NOCOLOK® Flux Brazed Aluminum Heat Exchangers For the Refrigeration and Air Conditioning Industry,” [https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/tridion/documents/NOCOLOK\\_Flux-Brazed-Aluminum-Heat-Exchangers.pdf](https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/tridion/documents/NOCOLOK_Flux-Brazed-Aluminum-Heat-Exchangers.pdf), Accessed 13.06.2025.
- [3] EUR-Lex, „Document 32024R1781,” 2024.
- [4] K. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook*, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [5] Setrab, „LT Cooler”.
- [6] Z. A. Syed i J. R. Wagner, „Modeling and Control of a Multiple-Heat-Exchanger Thermal Management System for Conventional and Hybrid Electric Vehicles,” *Designs*, tom 7, nr 1, 2023.
- [7] V. Vasu, K. Rama Krishna i A. C. Kumar, „Thermal design analysis of compact heat exchanger,” *International Journal of Nanomanufacturing*, tom 2, nr 3, pp. 271-288, 2008.
- [8] K. K. Kahlol, M. Aldhaidhawi i S. A. Nawi, „Simulation between Soldering and Brazing of Copper at 450 Temperature by Zn-Sn Fillet Alloy,” w *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Diyala, 2021.
- [9] P. J. Mirski Z., „Modern trends in production of brazed heat exchangers for automotive industry,” *Welding Technology Review*, tom 89, nr 8, 2017.
- [10] E. Keklik i M. Hoşöz, „Comparison of the experimental performance of round and flat tube automobile radiators for various coolants,” *Journal of Polytechnic*, tom 23, nr 4, 2019.
- [11] European Automotive Manual, „Applications – Power train – Heat exchangers,” w *The Aluminium Automotive Manual*, 2011, pp. 1-44.
- [12] B. Leszczyńska-Madej, M. Richert, A. Waśik i A. Szafron, „Analysis of the Microstructure and Selected Properties of the Aluminium Alloys Used in Automotive Air-Conditioning Systems,” *Metals*, tom 8, nr 1, 2018.
- [13] International Automotive Task Force, „IATF 16949:2016 – Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations,” 2016.
- [14] S. Kakaç, H. Liu i A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, 3 red., Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [15] E. M. Smith, *Advances in Thermal Design of Heat Exchangers*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [16] W. M. Kays i A. L. London, *Compact Heat Exchanger*, Malabar: Krieger Pub Co, 1998.
- [17] L. S. Syam i M. K. Singh, „Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 20, pp. 23-35, 2013.
- [18] S. Koundal, S. L. Sharma i A. Debbarma, „Battery thermal management systems for electric vehicles: an overview of cooling techniques and performance optimization,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 5855-5882, 2025.
- [19] F. A. Kulacki i A. Fakheri, „Heat Exchanger Fundamentals: Analysis,” w *Handbook of Thermal Science and Engineering*, Cham, Springer International Publishing, 2018, pp. 1315-1352.

- [20] European Union, „Regulation (EU) 2019/851 of the European Parliament and of the Council,” 25 04 2023. [Online]. Dostęp: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R0851>. [Data uzyskania dostępu: 01 08 2025].
- [21] H. Nguyen-Schäfer, „Turbocharging Concepts,” w *Rotordynamics of Automotive Turbochargers*, Heidelberg, Springer Berlin, 2012, pp. 1-16.
- [22] H. Jiang, H. Wang, F. Jiang, J. Hu i L. Hu, „Research on the Optimization of a Diesel Engine Intercooler Structure Based on Numerical Simulation,” *Processes*, tom 12, nr 276, 2024.
- [23] X. Zhao i T. Gronstedt, „Conceptual design of a two-pass cross-flow aeroengine intercooler,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, tom 229, nr 11, 2014.
- [24] C. J. King, „Turbocharger Aftercooling - Why and How,” *SAE Technical Paper 700536*, 1970.
- [25] S. Burgold, J.-P. Galland, L. Odillard i B. Ferlay, „Modular Water Charge Air Cooling for Combustion Engines,” *MTZ worldwide*, tom 73, nr 11, 2012.
- [26] J. F. Gardner, „Case Study: Comparing Intercoolers,” w *Thermodynamic Analysis for Industrial Refrigeration Systems*, Springer Cham, 2021, pp. 61-65.
- [27] S. Liu i Y. Zhang, „Research on the integrated intercooler intake system of turbocharged diesel engine,” *International Journal of Automotive Technology*, tom 21, nr 2, pp. 339-349, 2020.
- [28] C. Guhr i H. Zellbeck, „Turbocharging with low temperature charge air cooling and egr,” *MTZ worldwide*, tom 73, nr 10, pp. 44-52, 2012.
- [29] H. Zhao i R. Woods, „Controlled atmosphere brazing of aluminum,” w *Advances in Brazing Science, Technology and Applications*, Pleasanton, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2013, pp. 280-322.
- [30] H. Hiereth i P. Prenninger, „Charge air coolers and charge air cooling systems,” w *Charging the Internal Combustion Engine*, Vienna, Springer Vienna, 2007, pp. 208-214.
- [31] J. L. García-Castillo, F. Vizcaino-García i M. Picón-Núñez, „Thermohydraulic Engineering of Plate-Fin Surfaces for Heat Exchangers Subject to Required Dimensions,” w *Process Integration and Optimization for Sustainability*, Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 135-147.
- [32] Yinlun TDI, „Indirect Charge Air Cooler,” 2024.
- [33] M. Muqem, „Turbocharging With Air Conditioner Assisted Intercooler,” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, tom 2, nr 3, pp. 38-44, 2012.
- [34] J. Klett, B. Bongartz, V. F. Viebranz, D. Kramer, C. Hao, H. J. Maier i T. Hassel, „Investigations into Flux-Free Plasma Brazing of Aluminum in a Local XHV-Atmosphere,” *Materials*, tom 15(23), nr 8292, 2022.
- [35] Z. Mirski, J. Pabian, T. Wodjar i J. Hejna, „Significance of the brazing gap in the brazing of aluminium heat exchangers for automotive industry,” *Welding Technology Review*, tom 92, nr 4, pp. 7-14, 2020.
- [36] European Aluminium Association, „Materials - Designation system,” w *The Aluminium Automotive Manual*, 2011, pp. 1-12.
- [37] T. Carlberg, M. Jaradeh i H. Kamgou Kamaga, „Solidification studies of automotive heat exchanger materials,” *JOM*, tom 58, pp. 56-61, 2006.
- [38] Q. Lu, Q. Zhao, Q. Wang i D. Li, „Investigation on the Corrosion Resistance of 3003 Aluminum Alloy in Acidic Salt Spray under Different Processing States,” *Metals*, tom 14, nr 2, 2024.
- [39] Z. Li, Z. Zhang i X.-G. Chen, „Effect of magnesium on dispersoid strengthening of Al—Mn—Mg—Si (3xxx) alloys,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, tom 26, nr 11, pp. 2793-2799, 2016.
- [40] T. Radomski i A. Ciszewski, Lutowanie, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-techniczne, 1985.
- [41] Y. Sugiyarna, „Brazing of aluminium alloys,” *Welding Technique*, tom 36 (6), nr W/88/6/6, 1988.
- [42] Solvay Fluor GmbH, „Flame and Furnace Brazing with NOCOLOK®,” Aluminium Brazing Webinar, 2020.
- [43] International Organization for Standardization, „ISO 17672:2024 – Brazing — Filler metals,” ISO, Geneva, 2024.
- [44] Z. Huda, Metal Forming Processes, Springer Nature Switzerland, 2024.
- [45] P. Hu, L. Ying i B. He, Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body, 1 red., Springer Singapore, 2017.

- [46] M. Unterberg, M. Becker, P. Niemiętz i T. Bergs, „Data-driven indirect punch wear monitoring in sheet-metal stamping,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, tom 35, pp. 1721-1735, 2024.
- [47] S. Kumar i R. Singh, „An automated design system for progressive die,” *Expert Systems with Applications*, tom 38, pp. 4482-4489, 2011.
- [48] S. Chandrasekhara, H. Palaniswamy, N. Jain, G. Ngaile i T. Altan, „Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, tom 45, pp. 379-388, 2005.
- [49] A. Chandra, „Real-Time Identification and Control of Springback in Sheet Metal Forming,” *Journal of Engineering for Industry*, tom 109, pp. 265-273, 1987.
- [50] J. Świtacz i J. Bartnicki, „Forming of fixing plate in a progressive die,” *Mechanik*, tom 90, nr 11, pp. 985-987, 2017.
- [51] A. E. Barten, „Aluminium Rolling Mill Technology: Future Concepts in Thin-Strip and Foil Rolling,” *Die Bibliothek der Technik*, tom 233, 2002.
- [52] P. Mallesham i V. V. Ram Babu, „Cold rolling mill for Aluminum Sheet,” *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, tom 3, nr 2, pp. 16-20, 2016.
- [53] SCHULER GmbH, *Metal Forming Handbook*, 1 red., Heidelberg: Springer Berlin, 1998.
- [54] A. Losch, „Sheet Metal Forming Lubricants,” w *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*, Heidelberg, Springer, 2014, pp. 1747-1769.
- [55] J. Hatch, „Aluminum: Properties and Physical Metallurgy,” *Metals Park*, 1984.
- [56] H.-Y. Li, Y.-F. Liu, Y.-Q. Yang i Y.-N. Lu, „Method for Aluminum Oxide Thin Films Prepared through Low Temperature Atomic Layer Deposition for Encapsulating Organic Electroluminescent Devices,” *Materials*, tom 8, nr 2, pp. 600-610, 2015.
- [57] S. K. Lee, S. B. Lee, S. Y. Park, Y. S. Yi i C. W. Ahn, „Structure of Amorphous Aluminum Oxide,” *Physical review letters*, tom 103, nr 095501, 2009.
- [58] European Aluminium Association, „EAA Aluminium Automotive Manual – Joining,” w *The Aluminium Automotive Manual*, 2015.
- [59] J. Zähr, H.-J. Ullrich, S. Oswald, M. Türpe i U. Füssel, „Analyses about the influence of the natural oxide layer of aluminium on the brazeability in a shielding gas furnace,” *Weld World*, tom 57, pp. 449-455, 2013.
- [60] D. J. Field i N. I. Steward, „Mechanistic Aspects of the NOCOLOK Flux Brazing Process,” *SAE Technical Paper*, tom 96, nr 870186, pp. 656-664, 1987.
- [61] K. Allen, „Solving The Problems Inherent to Torch Brazing Aluminium,” *Welding Journal*, 2009.
- [62] W. E. Cooke, T. E. Wright i J. A. Hirschfield, „Furnace Brazing of Aluminium with a Non-Corrosive Flux,” w *SAE Transactions*, tom 87, Kingston, Ontario: SAE International, 1979, pp. 1357-1363.
- [63] H. Bourgeois i C. Demarcq, „Cleaning Methods for Flux Pollution Measurement in Automotive Coolant Loop Components,” w *CONAT 2016 International Congress of Automotive*, Brasov, 2016.
- [64] H.-W. Swidersky, „Aluminium Brazing with Non-corrosive Fluxes State of the Art and Trends in NOCOLOK® Flux Technology,” w *6th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding*, Aachen, 2001.
- [65] Societe Des Soudures Castolin SA, „Flux for Brazing Aluminum”. United Kingdom Patent UK Patent No. 1,055,914, 18 01 1967.
- [66] Alcan Research and Development Limited, „Flux for Brazing Aluminum”. United States Patent US Patent No. 3,951,328, 04 20 1976.
- [67] Solvay Special Chemicals, „NOCOLOK® Cs Flux”.
- [68] Solvay GmbH, „Aluminium-brazing.com,” 2025. [Online]. Dostęp: <https://www.aluminium-brazing.com/sponsor/nocolok/Files/PDFs/31327.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 11 08 2025].
- [69] I. Goto, Y. Kuramasu, S. Yamawaki, Y. Kobayashi, H. Ishida i A. Sugihara, „Flux for brazing aluminum and method of employing the same”. Canada Patent CA1206076A, 28 03 1983.
- [70] K. Suzuki, F. Miura i F. Shimizu, „Brazing flux”. United States Patent US4670067A, 24 03 1986.
- [71] S. Shoich, O. Yasuhiro i T. Seiji, „Process for Producing Flux for Brazing”. European Patent Office Patent EP0295541A3, 06 06 1988.
- [72] R. S. Timsit, „Method of Brazing Metal Surfaces”. WIPO Patent WO1992012821A1, 06 08 1992.

- [73] A. Gray, H. W. Swidersky i D. C. Lauzon, „The Morphology and Structure of Post-Braze Flux Residues,” 2011. [Online]. Dostęp: [http://www.aluminium-brazing.com/sponsor/nocolok/Files/PDFs/Morphology\\_Paper.pdf](http://www.aluminium-brazing.com/sponsor/nocolok/Files/PDFs/Morphology_Paper.pdf). [Data uzyskania dostępu: 17 09 2025].
- [74] H. K. Chen, Y. Y. Jie i L. Chang, „Oxidation characteristics of MgF<sub>2</sub> in air at high,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, tom 170, 2017.
- [75] J. Garcia, C. Massoulier i P. Faille, „Brazeability of Aluminum Alloys Containing Magnesium by CAB Process Using Cesium Flux,” *SAE Technical Papers*, 2001.
- [76] Yangwoo Corporation, „<http://yangwoocorp.com/>,” [Online]. Dostęp: <http://yangwoocorp.com/>. [Data uzyskania dostępu: 09 16 2025].
- [77] D. G. Claydon i A. Sugihara, „Brazing Aluminum Automotive Heat Exchanger Assemblies Using a Non-Corrosive Flux Process,” *SAE Technical Paper 830021*, 1983.
- [78] Solvay Special Chemicals, „Application Areas for NOCOLOK® Flux and Brazing Pastes”.
- [79] D. S. Sekulic, *Advances in brazing - Science, technology and applications*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 280-318.
- [80] J. Liu, „NOCOLOK Flux and Aluminum Brazing,” *SAE Technical Paper series*, tom 2, 1996.
- [81] A. Markku, *Brazing Handbook – CuproBraze*, tom 8, Västerås: CuproBraze Alliance, 2006.
- [82] H. Ma, J. Wang, H. Chen, J. Bai, W. Cai, S. Wang i R. Ding, „Numerical Investigation on Thermal Fatigue Damage Mechanism of Head Structures in Aluminum Plate-Fin Heat Exchangers,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, tom 33, pp. 13670-13684, 2024.
- [83] K. B. Anand, w *Manufacturing processes*, Jersey City, Alexis press, 2022, pp. 162-168.
- [84] S. Lathbai, „Joining of aluminium and its alloys,” w *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Woodhead Publishing, 2011, pp. 607-654.
- [85] M. Schwarz, *Brazing*, 2 red., Materials Park: ASM International, 2003.
- [86] A. Winiowski, „Brazeability – the definitions and examples,” *Welding Technology Review*, tom 82, nr 9, pp. 58-62, 2010.
- [87] F. Gao i inni, „Solid state Si diffusion and joint formation involving aluminum brazing sheet,” *Materials Science and Engineering*, pp. 228-235, 337 2002.
- [88] T. Wojdat, M. Winnicki, Z. Mirski i A. Żuk, „An innovative method of applying fluxes using the low-pressure cold gas spraying method,” *Welding Technology Review*, tom 91, nr 10, pp. 17-24, 2019.
- [89] D. K. Hawksworth, „Fluxless brazing of aluminium,” w *Advances in Brazing Science, Technology and Applications*, Sapa Group, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2013, pp. 566-585.
- [90] C.-N. Yu, D. K. Hawksworth i D. P. Sekluic, „An analysis of an impact of the background atmosphere on the aluminum brazing joint formation,” w *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Diego, 2013.
- [91] K. Peta, *Evaluation of brazed joints in automotive heat exchangers using artificial neural networks*, AGH University of Science and Technology, 2018.
- [92] L. Orman, H.-W. Swidersky i D. Lauzon, „Brazing of Aluminium Alloys with Higher Magnesium Content using Non-Corrosive Fluxes,” 2014. [Online]. Dostęp: [https://www.academia.edu/11599444/Brazing\\_of\\_Aluminium\\_Alloys\\_with\\_Higher\\_Magnesium\\_Content\\_using\\_Non\\_Corrosive\\_Fluxes](https://www.academia.edu/11599444/Brazing_of_Aluminium_Alloys_with_Higher_Magnesium_Content_using_Non_Corrosive_Fluxes). [Data uzyskania dostępu: 04 08 2025].
- [93] J. Lacaze, S. Tierce, M. C. Lafant, Y. Thebault, N. Pébère, G. Mankowski, C. Blanc, H. Robidou, D. Vaumousse i D. Daloz, „Study of the Microstructure Resulting from Brazed Aluminium Materials Used in Heat Exchangers,” *Materials Science and Engineering: A*, Tomy %1 z %2413-414, pp. 317-321, 2005.
- [94] S. F. Corbin, S. Winkler, D. R. Turriff i M. Kozdras, „Analysis of Fluxless, Reactive Brazing of Al Alloys Using,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, tom 45, pp. 3907-3915, 2014.
- [95] Z. Gao, Z. Qin i Q. Lu, „Controlled Atmosphere Brazing of 3003 Aluminum Alloy Using Low-Melting-Point Filler Metal Fabricated by Melt-Spinning Technology,” *Materials*, tom 15(17), nr 6080, 2022.
- [96] H. Jin, „Development of an Aluminum Brazing Sheet Product with Barrier Layer for High-Performance Automotive Heat Exchangers,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, tom 52, pp. 1409-1426, 2021.

- [97] E. Cinkilic, C. D. Ridgeway, X. Yan i A. A. Luo, „A Formation Map of Iron-Containing Intermetallic Phases in Recycled Cast Aluminum Alloys,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, tom 50, p. 5945–5956, 2019.
- [98] L. Bitschnau i M. Kozek, „Modeling and Control of an Industrial Continuous Furnace,” *CSSIM '09: Proceedings of the 2009 International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*, pp. 231-236, 2009.
- [99] M. Tucker, E. Valdez, K. Tsakalis, M. Warren i K. Stoddard, „Improving Vertical Furnace Performance Using Model-Based,” w *AEC/APC Symposium X*, Colorado, 2014.
- [100] IEEE Electronics Packaging Society, „Chapter 20: Thermal,” w *Heterogeneous Integration Roadmap*, 2021.
- [101] D. P. Sekulic, „Compact Heat Exchangers,” w *Heat Exchanger Fundamentals: Analysis*, Cham, Springer International Publishing, 2018, pp. 1501-1520.
- [102] G. Beketov i O. V. Shynkarenko, „Surface wetting and contact angle: basics and characterisation,” *Himia Fizika ta Tehnologija Poverhni*, tom 13, nr 1, pp. 3-35, 2022.
- [103] W. D. Kaplan, D. Chatain, P. Wynblatt i W. C. Carter, „A review of wetting versus adsorption, complexions, and related,” *Journal of Materials Science*, tom 48, nr 17, pp. 5681-5717, 2013.
- [104] Polski Komitet Normalizacyjny, „PN-EN 12799 - Lutowanie twarde - Badania nieniszczące złączy lutowanych twardo,” PKN, Warszawa, 2003.
- [105] Polski Komitet Normalizacyjny, „PN-EN ISO 18279:2008 - Lutowanie twarde – Niezgodności w złączach lutowanych na twardo,” PKN, Warszawa, 2008.
- [106] Polski Komitet Normalizacyjny, „PN-EN 12797:2002 - Lutowanie twarde – Badania niszczące złączy lutowanych na twardo,” PKN, Warszawa, 2002.
- [107] Polski Komitet Normalizacyjny, „Wymienniki ciepła – Chłodnice cieczy chłodzone powietrzem – Procedury badawcze wyznaczania wydajności,” PKN, Warszawa, 2014.
- [108] B. Ładecki i Ł. Knysak, „Non-destructive testing of brazing joints of thin walled non-ferromagnetic steel pipes,” w *Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN)*, Kołobrzeg, 2018.
- [109] J. Zurek i K. Peta, „Badania jakości montażu nierozłącznego (lutowania) samochodowych wymienników ciepła,” *Technologia i Automatykacja Montażu*, tom 3, pp. 55-58, 2014.
- [110] Mikron, „Mikron-maszyny.pl,” [Online]. Dostęp: <https://www.mikron-maszyny.pl/pl/Sprawdziany-kszaltu/>. [Data uzyskania dostępu: 16 09 2025].
- [111] Test Industry Srl, „Radiator Burst Test Bench,” [Online]. Dostęp: <https://www.test-industry.com/test-benches-catalogue/radiator-burst-test-bench/>. [Data uzyskania dostępu: 14 08 2025].
- [112] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, „Dyrektywa 2014/68/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 maja 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich dotyczących urządzeń ciśnieniowych,” *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, Bruksela, 2014.
- [113] A. J. Wittebrood, „Process for Fluxless Brazing of Aluminium and Brazing Sheet for Use Therein”. Germany Patent EP2382087B1, 06 12 2017.
- [114] F. C. Alverson, M. Ranger i H. J. DeBaun, „The Effects of Residual Controlled Atmospheric Brazing Flux on Engine Coolants,” w *STP 1556: Engine Coolants and Related Technologies*, West Conshohocken, ASTM International, 2014, pp. 175-194.
- [115] S. U. Choi i J. A. Eastman, „Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” w *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, San Francisco, 1995.
- [116] A. V. Gershun i P. M. Woyciesjes, „Engine Coolants and Coolant System Corrosion,” w *Corrosion: Environments and Industries*, tom 13C, ASM International, 2006, pp. 531-537.
- [117] J. G. Zaldivar, H. Swidersky i G. D. Pelsemaeker, „Study of the Compatibility of the CAB Flux,” w *Proceedings of the 2007 Vehicle Thermal Management Conference*, Nottingham, 2007.
- [118] G. Cocian i C. Popa, „Measurement method for determining the residual flux deposits in a heat exchanger from a controlled atmosphere brazing line,” *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemia*, tom 60, nr 1, pp. 187-193, 2015.
- [119] A. Kanjirakat, S. Kabelac, T. Sundararajan i S. K. Das, „Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration,” *Journal of Applied Physics*, tom 106, nr 034909, pp. 1-7, 2009.

- [120] S. Zeinali Heris, M. Shokrgozar, S. Poorpharhang, M. Shanbedi i S. H. Noie, „Experimental Study of Heat Transfer of a Car Radiator with CuO/Ethylene Glycol-Water as a Coolant,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, tom 35, nr 5, pp. 677-684, 2014.
- [121] S. Pourfarhang, S. Z. Heris, S. Motahare i M. Kahani, „Pressure drop and thermal performance of CuO/ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, tom 32, nr 4, pp. 609-616, 2014.
- [122] X. Li, C. Zou, T. Wang i X. Lei, „Rheological behavior of ethylene glycol-based SiC nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, tom 84, pp. 925-930, 2015.
- [123] M. Akbari, M. Afrand, A. Arshi i A. Karimipour, „An Experimental Study on Rheological Behavior of Ethylene Glycol-Based Nanofluid: Proposing a New Correlation as a Function of Silica Concentration and Temperature,” *Journal of Molecular Liquids*, tom 233, pp. 1-33, 2017.
- [124] V. V. Huy, H. D. Quang, A. Katolik, N. T. Dan i S. M. Gaidar, „The Development of Corrosion Inhibitor Used in the Automotive Coolant,” *Russian Journal of Applied Chemistry*, tom 94, pp. 1577-1584, 2021.
- [125] K. A. Pundkar, S. S. Chaudhari, A. S. Daryapurkar i R. Himte, „verall impact on thermal and tribological performance of air conditioning system with nanoparticle application: a critical review,” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, tom 33, 2025.
- [126] A. Hamrol, Zarządzanie jakością z przykładami, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [127] J. Łuczak, „Metody i techniki zarządzania jakością,” w *Podstawy kompleksowego zarządzania jakością TQM*, Poznań, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, 2006, pp. 267-314.
- [128] AIAG & VDA, AIAG & VDA FMEA Handbook, Southfield: AIAG & VDA, 2019.
- [129] Moga, „<https://www.moga.pl/>,” OHAUS. [Online]. [Data uzyskania dostępu: 15 08 2025].
- [130] SuperWagi, „<https://superwagi.com/>,” Sauter, [Online]. Dostęp: <https://superwagi.com/stanowiska-do-testow-sily/sd-100n100.html>. [Data uzyskania dostępu: 14 08 2025].
- [131] Larson Systems Inc., „Length Deflection Compensation,” [Online]. Dostęp: <https://larsonsystems.com/support/>. [Data uzyskania dostępu: 22 09 2025].
- [132] J. Wu, „A Basic Guide to Thermocouple Measurements,” Texas Instruments, 2018.
- [133] Fluke, „Datapaq® Furnace Tracker for Controlled Atmosphere and Vacuum Brazing,” [Online]. Dostęp: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/products/thermal-profiling-systems/datapaq-furnace-tracker-systems/datapaq-furnace-tracker-cab>. [Data uzyskania dostępu: 18 09 2025].
- [134] Info Press, „RotoPaq Lite: nowy system profilowania temperatury firmy Datapaq,” [Polskiprzemysl.com.pl](http://Polskiprzemysl.com.pl), 2014.
- [135] Ateq, „[ateq.pl](https://ateq.pl/),” [Online]. Dostęp: <https://ateq.pl/produkt/ateq-g620/>. [Data uzyskania dostępu: 18 09 2025].
- [136] International Organization for Standardization, „ISO 9964-3:1993. Water quality — Determination of sodium and potassium — Part 3,” Geneva, 1993.
- [137] M. S. Akash i K. Rehman, „Comprehensive Insights into Atomic Absorption Spectroscopy,” w *Essentials of Pharmaceutical Analysis*, Singapore, Springer, 2025, pp. 241-282.
- [138] B. V. L'vov, „Fifty Years of Atomic Absorption Spectrometry,” *Journal of Analytical Chemistry*, tom 60, nr 4, pp. 382-392, 2005.
- [139] MATBOR, „Warstwomierz TB 1000-0.1FN miernik grubości powłok metodą F i metodą N SAUTER,” [Online]. Dostęp: <https://matbor.pl/pl/p/Warstwomierz-TB-1000-0.1FN-miernik-grubosci-powlok-metoda-F-i-metoda-N-SAUTER/650>. [Data uzyskania dostępu: 18 08 2025].
- [140] G. Betta, L. Ferrigno, M. Laracca, A. Rasile i A. Sardellitti, „Thickness Measurements with Eddy Current and Ultrasonic Techniques,” w *Sensors and Microsystems: Proceedings of the AISEM 2020 Regional Workshop*, Naples, 2020.
- [141] C. Ramírez-Dolores, J. Andaverde, L. Ordoñez-Castillo i J. Wong-Loya, „Experimental evaluation of a heat exchanger for different configurations between internal and external flow,” *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, tom 7, pp. 4117-4132, 2024.
- [142] ASTM International, „ASTM E3-11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens,” ASTM International, West Conshohocken, 2017.
- [143] R. Morris, „Spectrophotometry,” *Current Protocols Essential Laboratory Techniques*, tom 11, nr 2, pp. 1.1-2.1.30, 2015.
- [144] 3nh, „NS800 Spectrophotometer”.

- [145] Konica Minolta, *Podstawy Pomiaru Barwy: Kontrola Barwy Od Postrzegania do Pomiaru*, 2007.
- [146] H. E. Exner i S. Weinbruch, „Scanning Electron Microscopy,” w *Metallography And Microstructures*, ASM International, 2004, pp. 355-367.
- [147] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin, D. C. Joy, C. E. Lyman, E. Lifshin, L. Sawyer i J. R. Michael, „X-Ray Spectral Measurement: EDS and WDS,” w *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, Boston, Springer, 2003, pp. 297-353.
- [148] G. F. Vander Voort, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, Materials Park: ASM International, 2004.
- [149] X. Chen i Y. Li, „An application of differential interference contrast,” *China Foundry*, tom 2, nr 1, pp. 14-20, 2005.
- [150] M. Ręklewski, *Statystyka opisowa. Teoria i przykłady*, Włocławek: Państwowa Uczelnia Zawodowa we Włocławku, 2020.
- [151] J. R. Davis, „Engineering Data for Metals and Alloys,” w *Metals Handbook: Desk Desk Edition*, Materials Park, ASM International, 1998, pp. 64-84.
- [152] Klartxt GmbH, „Aluminium Brazing - News, Knowledge & Technology,” [Online]. Dostęp: <https://www.aluminium-brazing.com/2012/07/31/fixture-for-braze-assembly-during-brazing/>. [Data uzyskania dostępu: 09 09 2025].
- [153] Matmake, „Aluminum Alloy 3003 (UNS A93003),” [Online]. Dostęp: <https://matmake.com/materials-data/aluminum-3003-properties.html>. [Data uzyskania dostępu: 22 08 2025].
- [154] The Engineering ToolBox, „Energy stored as sensible heat in different types of materials,” [Online]. Dostęp: [https://www.engineeringtoolbox.com/sensible-heat-storage-d\\_1217.html](https://www.engineeringtoolbox.com/sensible-heat-storage-d_1217.html). [Data uzyskania dostępu: 22 08 2025].
- [155] Thyssenkrupp, „Stainless Steel 316L 1.4404,” [Online]. Dostęp: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>. [Data uzyskania dostępu: 22 08 2025].
- [156] The Engineering ToolBox, „Thermal Conductivity of Metals and Alloys: Data Table & Reference Guide,” [Online]. Dostęp: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html). [Data uzyskania dostępu: 22 08 2025].
- [157] M. Łatuszyńska, „Modelowanie i symulacja w zarządzaniu produkcją,” *Przegląd Organizacji*, pp. 51-57, 2015.
- [158] J. Gałąj i T. Drzymała, „Analiza wpływu natężenia przepływu wody na rozkład intensywności zraszania w strumieniu rozpylonym wytwarzanym przez prądownicę Turbo Master 52,” *Logistyka*, tom 4, pp. 3302-3312, 2015.
- [159] D. R. Cox i N. Reid, *The Theory of the Design of Experiments*, Boca Raton: CRC Pres, 2000.
- [160] CIE, *Colorimetry - CIEDE2000 colour-difference formula*, 2022.
- [161] S. Nadolny, M. Rogalewicz i A. Hamrol, „The effect of continuous furnace load organization on temperature distribution during controlled atmosphere brazing process,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, tom 73, nr 3, pp. 1-9, 2025.
- [162] S. Nadolny i M. Rogalewicz, „Transition of Controlled Atmosphere Brazing Jig for Aluminum Heat Exchangers from Spring-Loaded to Fixed-Dimension,” w *Advances in Manufacturing IV, MANUFACTURING 2024*, Poznan, 2024.
- [163] S. Nadolny, A. Hamrol, M. Rogalewicz i A. Piasecki, „Measurement Methods for Flux Residue Quantity after Controlled Atmosphere Brazing of Aluminum Coolers,” *Management and Production Engineering Review*, tom 14, nr 3, pp. 156-163, 2023.
- [164] R. Wu, W. Dai, J. Luo, M. Li, Y. Liu i H. Li, „Aluminum Alloy Hot Stamping and Forming Technology:,” *Materials*, tom 18, nr 1694, 2025.
- [165] R. Koleňák, R. Augustin, V. Ruža i M. Nerádová, „The influence of high-temperature brazing upon indicators of material brazeability,” *Materials Engineering*, tom 17, nr 1, pp. 17-22, 2010.
- [166] A. A. Bayraktar, G. Coşkunseda, E. Salman, A. Ö. Toy i N. K. Aygün, „Capacity Expansion Through Bottleneck Analysis for an OEM Company,” *Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era*, pp. 718-732, 2024.
- [167] H. Font, H. Orcière, M. Paredes i G. Cadet, „Enhanced Formulae for Determining Solid Height of Axially Guided Compression Springs with Closed & Unground Ends,” 2022. [Online]. Dostęp: <https://hal.science/hal-04194692v1/file/Wire%20Forming%20Techn%20pour%20HAL.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 22 09 2025].

## Spis rysunków

Rysunek 1.1. Przykłady konstrukcji wymienników ciepła: a) rurowe, b) płytkowe, c) niskotemperaturowe [4, 5]	1
Rysunek 1.2. Kompaktowe chłodnice wymiany ciepła: a) konstrukcja rurka-żebro, b) konstrukcja belka-zwijana taśma [4]	3
Rysunek 1.3. Zwijana taśma stosowana w kompaktowych chłodnicach: a) gładka, b) ząbkowana [4]	3
Rysunek 1.4. Podział kompaktowych wymienników ciepła ze względu na kierunek przepływu czynnika chłodniczego: a) krzyżowy, b) przeciwpłdowy, c) krzyżowy przeciwpłdowy, d) krzyżowy przeciwpłdowy z wewnętrznym zawrotem [4]	4
Rysunek 1.5. Chłodnica powietrza doładowanego w układzie powietrze-powietrze (opracowanie własne na podstawie [27])	5
Rysunek 1.6. Chłodnica powietrza doładowanego w układzie ciecz-powietrze (opracowanie własne na podstawie [27])	6
Rysunek 1.7. Pakiet wymiany ciepła stosowany w pośredniej chłodnicy powietrza (opracowanie własne na podstawie [30])	6
Rysunek 1.8. Budowa chłodnicy powietrza doładowanego w układzie ciecz-powietrze [32]	7
Rysunek 2.1. Uproszczony schemat procesu technologicznego chłodnicy powietrza (opracowanie własne)	8
Rysunek 2.2. Taśma lutownicza [2]	10
Rysunek 2.3. Wytłocznka kształtowana w tłoczniku progresywnym [50]	11
Rysunek 2.4. Walcowanie profili – widok boczny oraz przekrój formowanej taśmy [53]	12
Rysunek 2.5. Schemat procesu pakietowania (opracowanie własne)	13
Rysunek 2.6. Baryłkowany kształt rurek stosowanych w pakiecie wymiany ciepła (opracowanie własne)	13
Rysunek 2.7. Warstwa tlenku glinu na powierzchni aluminium [56]	14
Rysunek 2.8. Schemat struktury warstwy tlenków na powierzchni aluminium [59]	15
Rysunek 2.9. Schematy równowagi fazowej topników korozyjnych [62]	15
Rysunek 2.10. Pokrycie komponentów warstwą topnika [76]	17
Rysunek 2.11. Schemat procesu selektywnego topnikowania [2]	18
Rysunek 2.12. Nanoszenie topnika w formie pasty [78]	18
Rysunek 2.13. Siła elastyczności rurek oraz siła kompresji w pakiecie wymiany ciepła (opracowanie własne na podstawie [30])	19
Rysunek 2.14. Elementy dociskowe ramki lutowniczej (opracowanie własne)	20
Rysunek 2.15. Podstawowe rodzaje połączeń komponentów w chłodnicach powietrza [58]	21
Rysunek 2.16. Struktura spoiny lutowniczej [29]	22
Rysunek 2.17. Profil lutowania w procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze (opracowanie własne na podstawie [91])	22
Rysunek 2.18. Mikrostruktura spoiny lutowniczej po szybkim chłodzeniu [29]	24
Rysunek 2.19. Budowa pieca tunelowego [91]	24
Rysunek 2.20. Właściwości lejności spoiwa: a) zwilżalność, b) oddziaływanie kapilarne [103]	25
Rysunek 2.21. Korozja na komponentach aluminiowych po procesie lutowania (opracowanie własne)	27
Rysunek 2.22. Rozkład ciśnienia w funkcji czasu podczas testu szczelności [91]	27
Rysunek 2.23. Sprawdzenie kształtu wykorzystywany w ocenie zgodności wymiarowej [110]	28
Rysunek 2.24. Makrografia spoin zewnętrznych (A-A; B-B) i wewnętrznych (C-C) w chłodnicy powietrza (opracowanie własne na podstawie [91])	28
Rysunek 2.25. Test rozrywania aluminiowej chłodnicy w komorze rozrywającej [111]	29
Rysunek 3.1. Zapychanie kanałów chłodnicy powietrza przez pozostałość topnika [63]	31
Rysunek 3.2. Pozostałość topnika obserwowana metodą skaningowej mikroskopii elektronowej [63]	31
Rysunek 3.3. Analiza przyczynowo-skutkowa czynników procesowych wpływających na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika (opracowanie własne)	34
Rysunek 4.1. Waga precyzyjna [129]	40
Rysunek 4.2. Pomiar siły kompresji sprężyn: a) stanowisko do pomiaru sprężyn [130], b) schemat ugięcia sprężyny podczas pomiaru (opracowanie własne na podstawie [131])	40
Rysunek 4.3. Metoda pomiaru temperatury w czasie w piecu tunelowym: a) schemat pomiaru temperatury w czasie (opracowanie własne), b) budowa termopary [132]	41
Rysunek 4.4. Przyrząd do pomiaru szczelności [135]	42

Rysunek 4.5. Schemat pomiaru ilości pozostałości topnika metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej [119].....	43
Rysunek 4.6. a) obszary pomiaru grubości warstwy topnika na pokrywie (opracowanie własne), b) warstwomierz TB 1000-0.1 FN [139].....	44
Rysunek 4.7. Modyfikacja ramek lutowniczych w celu uzyskania szczeliny montażowej: a) przed modyfikacją, b) po modyfikacji (opracowanie własne).....	45
Rysunek 4.8. Ramka lutownicza zamontowana w sprawdzianie kształtu (opracowanie własne),.....	45
Rysunek 4.9. Fazowa analiza profilu lutowania ze względu na temperatury procesu lutowania (opracowanie własne).....	46
Rysunek 5.1. Model u-kształtnej pokrywy chłodnicy powietrza: a) konstrukcja, b) widok przekrojowy kontaktu rurek z pokrywą (opracowanie własne).....	51
Rysunek 5.2. Obszary pobrania próbek z chłodnicy powietrza (opracowanie własne).....	51
Rysunek 5.3. Przygotowanie próbek pomiarowych: a) próbka kanału, b) schemat pomiaru próbki kanału, c) próbka środkowa, d) schemat pomiaru próbki środkowej (opracowanie własne).....	52
Rysunek 5.4. a) spektrofotometr NS800 [144], b) współrzędne barw przestrzeni barw CIE LAB [145].....	53
Rysunek 5.5. Wyniki pomiaru refleksyjności w zależności od gramatury topnika na pokrywach i miejscu pobrania próbki: a) porównanie jasności, b) porównanie barw (opracowanie własne).....	54
Rysunek 5.6. Obserwacja SEM-EDS pozostałości topnika: a) elektrony wsteczne rozproszone, b) mapowanie powierzchni techniką fałszywych kolorów (opracowanie własne).....	55
Rysunek 5.7. Obraz SEM aglomeratu fluoroglinianu potasu (opracowanie własne).....	56
Rysunek 5.8. Mapowanie wybranych pierwiastków metodą SEM-EDS wraz z oznaczeniem związków chemicznych w danych obszarach: a) fluor, b) potas, c) magnez, d) tlen (opracowanie własne).....	57
Rysunek 5.9. Linie widmowe próbki zmierzone za pomocą metody SEM-EDS wraz ze stężeniem procentowym pierwiastków (opracowanie własne).....	58
Rysunek 5.10. Porównanie miernika (F+K)% uzyskanego metodą SEM-EDS pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne).....	58
Rysunek 5.11. Porównanie obrazów metalograficznych uzyskanych metodami: a) SEM-EDS, b) RLM-DIC (opracowanie własne).....	60
Rysunek 5.12. Obróbka graficzna zdjęć uzyskanych metodą RLM-DIC: a) przed obróbką; b) po obróbce (opracowanie własne).....	61
Rysunek 5.13. Histogram jasności zdjęć wykonanych metodą RLM-DIC (opracowanie własne).....	61
Rysunek 5.14. Wyznaczenie kąta jasności histogramów dla zdjęć wykonanych metodą RLM-DIC (opracowanie własne).....	62
Rysunek 5.15. Porównanie miary [Px%] uzyskanej metodą SEM-EDS pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne).....	62
Rysunek 5.16. Porównanie znormalizowanych wartości ilości pozostałości topnika uzyskanych metodami SEM-EDS oraz RLM-DIC do wartości referencyjnej uzyskanej metodą AAS (opracowanie własne).....	63
Rysunek 6.1. Grubość warstwy topnika [ $\mu\text{m}$ ] na pokrywach w zależności od obszaru pomiarowego (opracowanie własne).....	66
Rysunek 6.2. Zależność grubości warstwy topnika na pokrywie względem jego gramatury (opracowanie własne).....	67
Rysunek 6.3. Wizualizacja obszarów kontaktu pokrywy z rurkami (opracowanie własne).....	68
Rysunek 6.4. Wyniki oceny stopnia zlutowania oraz uszkodzeń mechanicznych chłodnic powietrza w zależności od wielkości szczelin montażowych (opracowanie własne).....	70
Rysunek 6.5. Rozkład temperatur wewnątrz chłodnicy powietrza: a) pierwsza sztuka, b) ostatnia sztuka (opracowanie własne).....	71
Rysunek 6.6. Schemat chłodnic powietrza umieszczonych w stalowych koszach na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne).....	73
Rysunek 6.7. Schemat chłodnic powietrza zamontowanych w ramach lutowniczych na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne).....	73
Rysunek 6.8. Schemat pojedynczej chłodnicy powietrza zamontowanej w ramce lutowniczej na taśmociągu pieca tunelowego (opracowanie własne).....	74
Rysunek 6.9. Porównanie powierzchni profilu lutowania z podziałem na fazy, w zależności od materiału i ułożenia wsadu w piecu tunelowym (opracowanie własne).....	74
Rysunek 6.10. Czas przebywania chłodnic powietrza w temperaturze powyżej 577 [ $^{\circ}\text{C}$ ] w zależności od materiału i rozłożenia wsadu w piecu tunelowym (opracowanie własne).....	75
Rysunek 6.11. Schemat rozkładu warstwy topnika w zależności od jego gramatury (opracowanie własne).....	77
Rysunek 6.12. Schemat konfiguracji chłodnic powietrza w piecu tunelowym w zależności od maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne).....	77

Rysunek 6.13. Stopień zlutowania chłodnic powietrza w zależności od gramatury topnika oraz temperatury lutowania z podziałem na pokrywy górne i dolne (opracowanie własne).....	79
Rysunek 6.14. Porównanie miary (F+K)% uzyskanego metodą SEM-EDS pomiędzy chłodnicami powietrza w zależności od gramatury topnika oraz temperatury maksymalnej (opracowanie własne).....	80
Rysunek 6.15. Porównanie miary [Px%] uzyskanej metodą RLM-DIC pomiędzy pokrywami i miejscem pobrania próbek w zależności od gramatury topnika (opracowanie własne).....	81
Rysunek 6.16. Porównanie stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika w zależności od gramatury topnika na pokrywach oraz maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne).....	82
Rysunek 6.17. Macierz oceny wpływu czynników na spełnienie kryteriów jakościowych (opracowanie własne).....	83
Rysunek 6.18. Obliczenie zakresu tolerancji gramatury topnika na pokrywach umożliwiającej osiągnięcie obniżenia ilości pozostałości topnika o 10% (opracowanie własne).....	84
Rysunek 7.1. Schemat nowej maszyny do nanoszenia topnika (opracowanie własne).....	86
Rysunek 7.2. Komputerowy model maszyny do nanoszenia topnika (opracowanie własne).....	87
Rysunek 7.3. Format wyników symulacji procesu nanoszenia topnika uwzględniający udział gramatury topnika pomiędzy pokrywami z podziałem pokryw na rząd, kolumnę oraz platformę (opracowanie własne).....	89
Rysunek 7.4. Wykres Pareto standaryzowanych efektów dla przeprowadzonego eksperymentu dla odpowiedzi rozrzutu przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (opracowanie własne).....	91
Rysunek 7.5. Wykres kubiczny oraz wykres optymalizacji dla eksperymentu przeprowadzonego na podstawie wyników symulacji (opracowanie własne).....	91
Rysunek 7.6. Gramatura nanoszonego topnika i jej rozrzut oraz grubość warstwy topnika, w zależności od czynników ciśnienia roboczego oraz ułożenia pokryw na taśmociągu: a) układ poprzeczny dla wyższego ciśnienia, b) układ równoległy dla wyższego ciśnienia, c) układ poprzeczny dla niższego ciśnienia, d) układ równoległy dla niższego ciśnienia (opracowanie własne).....	93

## Spis tabel

Tabela 3.1. Analiza FMEA-P dla problemu minimalizacji pozostałości topnika przy maksymalizacji stopnia zlutowania (opracowanie własne).....	35
Tabela 4.1 Plan badań (opracowanie własne).....	48
Tabela 5.1 Porównanie metod oceny ilości pozostałości topnika (opracowanie własne).....	63
Tabela 6.1. Właściwości termiczne wybranych materiałów i pierwiastków w temp. 20° C [153, 154, 155, 156].....	71
Tabela 6.2. Plan eksperymentu 3 <sup>2</sup> z nierównolicznymi grupami (opracowanie własne).....	76
Tabela 6.3. Stopień spełnienia wymagań testu szczelności oraz testu rozrywania w zależności od gramatury topnika na pokrywach oraz maksymalnej temperatury lutowania (opracowanie własne).....	77
Tabela 7.1. Wyniki analizy ANOVA dla przeprowadzonego eksperymentu (opracowanie własne).....	89
Tabela 7.2. Plan prób technologicznych nowego procesu nanoszenia topnika.....	91