

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego nt.:

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

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Hamrol

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Rogalewicz

Podstawa opracowania: zlecenie nr DIM.075.40.2026 dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej, dr. hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, z dnia 19.02.2026.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 104 strony, a w tym: spis treści – 2 str.; nomenklatura (wykaz oznaczeń) – 1 str.; streszczenie w j. polskim - 1 str.); streszczenie w j. angielskim - 1 str.; wprowadzenie – 2 str.; literatura - 7 str. (167 pozycji), spis rysunków i tabel - 3 str. Zasadnicza część rozprawy składa się z 8 rozdziałów - 94 str.).

We wprowadzeniu doktorant zwraca uwagę na główne wymagania dotyczące jakości chłodnic, do których należą: niezawodność, trwałość i szczelność. O spełnieniu tych wymagań w głównej mierze decyduje stan spoin lutowaniczych (stopień zlutowania) pomiędzy poszczególnymi komponentami chłodnicy. Istotnym problemem jest zapewnienie wymaganej jakości technologicznej spoin lutowaniczych. Jest to wymagające zadanie, a w aktualnym stanie stosowanej technologii lutowania stwarzające poważne trudności. Przyczyną są pozostałości stosowanego topnika, które mogą wchodzić w reakcję z cieczą chłodniczą, prowadząc do jej żelowania oraz utraty właściwości przepływowych i funkcjonalnych chłodnicy. Tego typu wady (głównie nieszczelności) wykrywane już początkowym okresie eksploatacji przyczyniają się do zakłóceń i ponoszenia kosztów reklamacji.

Podjęcie badań w celu minimalizacji ilości występujących wad, które pogarszają jakość technologiczną spoin lutowaniczych jest ważnym i w pełni zasadnym zagadnieniem. Badania jakości połączeń wewnątrz chłodnicy oraz ilości pozostałości topnika są badaniami niszczącymi i czasochłonnymi, co jest istotnym ograniczeniem ich zastosowania w warunkach produkcji seryjnej. W związku z tym na potrzeby badań przemysłowych niezbędne było opracowanie szybkiej i taniej metody oceny ilości pozostałości topnika.

Zatem poszukiwanie nowych rozwiązań, które umożliwią poprawę efektywności produkcji chłodnic oraz ich niezawodność, trwałość i szczelność jest główną myślą przewodnią i pierwszoplanowym zadaniem opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego.

W rozdziale 1 – wymienniki ciepła (s.1-s.7) doktorant przedstawił pogłębioną analizę dotyczącą:

- znaczenia wymienników ciepła;
- konstrukcji i technologii kompaktowych chłodnic, mających zastosowanie między innymi w samochodowych wymiennikach ciepła;
- typu samochodowych chłodnic kompaktowych, zintegrowanych z układami doładowania w silnikach spalinowych. Dodatkowy obieg chłodzenia umożliwia zwiększenie wydajności cieplnej przy równoczesnym zredukowaniu masy chłodnicy.

W wyniku analizy konstrukcji i walorów eksploatacyjnych różnych typów chłodziń doktorant wytypował do dalszych analiz chłodziń powietrza doładowanego, dla której przyjął określenie „chłodziń powietrza”.

Rozdział 2 - proces technologiczny aluminiowej chłodziń powietrza zawiera zwięzłą, ale w pełni klarowną charakterystykę przebiegu procesu wytwarzania. Szczegółowa analiza została przeprowadzona w odniesieniu do procesu technologicznego chłodziń powietrza produkowanej w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski.

Uproszczony schemat procesu technologicznego tej chłodziń, zawierający kolejne etapy wytwarzania został przedstawiony na rys.2.1 (zwraca uwagę kompletność i klarowność tego uproszczonego schematu).

Następnie doktorant analizuje szczegółowo kolejne fazy procesu technologicznego podkreślając wpływ różnych czynników na występujące problemy i zakłócenia jego realizacji. Kolejne fazy analizy procesu technologicznego dotyczą (przedstawiam w skrócie):

- materiału wyjściowego, którym w przemyśle motoryzacyjnym są głównie stopy aluminium ze względu na niewielką masę właściwą i wysoką przewodność cieplną, dobre właściwości wytrzymałościowe (formowalność, odporność na korozję), relatywnie niską cenę. W procesie lutowania na spoiny lutownicze są również stosowane stopy aluminium o niższej temperaturze topnienia niż materiał bazowy komponentów, oraz dodatki siluminów (Al.-Si) dla poprawy lejności w trakcie tworzenia spoiny;
- procesu formowania blach w operacjach tłoczenia i walcowania. Wytłoczki są kształtowane za pomocą obróbki plastycznej i tłoczone w tłocznikach progresywnych w jednym cyklu roboczym. W walcarkach tandemowych jest formowana geometria zwijanej taśmy poprzez walcowanie kształtowe na zimno;
- wytworzenia komponentów chłodziń powietrza (płyta sitowa i pokrywa oraz rurka i zaburzacz), które są przygotowywane do zabiegów topnikowania oraz pakietowania;
- montażu, który następnie w procesach głównych lutowania i kontroli ostatecznej.

Ważną operacją jest proces pakietowania, w trakcie którego tworzy się zespół wymiany ciepła z dwoma obiegami (rys.2.5), tj.: obiegiem sprężonego powietrza (rurka z zaburzaczem) oraz obiegiem cieczy chłodzińczej (warstwa zaburzacza). Proces pakietowania musi być wykonany precyzyjnie z uwagi na baryłkowaty kształt rurek stosowanych w pakiecie wymiany ciepła (rys.2.6).

Doktorant szczegółowo omówił operację nanoszenia topnika. Scharakteryzował warunki i procesy zachodzące na powierzchni aluminium (rys.2.7 – rys.9). Zasadniczym kryterium skuteczności tej operacji jest, aby powierzchnie komponentów po procesie nanoszenia topnika posiadały równomierną warstwę topnika (rys.2.10). Miarą jest gramatura oznaczająca masę topnika przypadającą na jednostkę powierzchni. Na gramaturę nanoszonego topnika istotny wpływ wywierają nieoptymalne warunki procesu takie jak: niekorzystne warunki atmosferyczne, zbyt niska lub zbyt wysoka temperatura lutowania, skomplikowana geometria połączeń, niedopasowanie szczelin kapilarnych, obecność zanieczyszczeń powierzchni.

W analizowanym procesie technologicznym doktorant przedstawił dwie metody nanoszenia topnika, tj.:

- selektywne topnikowanie z zastosowaniem wodnej zawiesiny topnika o stężeniu 20-45% ze środkami adhezyjnymi o stężeniu 5 – 15 %. Proces jest realizowany w trzech zabiegach (rys.2.11): odparowanie środków smarnych – nanoszenie topnika – suszenie. Nanoszenie topnika następuje w dokładnie określonej gramaturze [g/m^2] bezpośrednio po procesie tłoczenia. Następnie jest wymagane usunięcie środków smarnych w temperaturze ok. 130 [°C];
- nanoszenie pasty z zastosowaniem topnika o stężeniu w zakresie od 5 do 60% w postaci pasty o lepkości w zakresie od 500 do 50 000 [$mPa \cdot s$]. Dozowanie pasty następuje przy użyciu urządzeń pneumatycznych lub pompy wyporowej (rys.2.12).

W produkcji seryjnej montaż odbywa się na zautomatyzowanych stanowiskach zapewniających odpowiednią kolejność i kontrolowane warunki procesu. Z uwagi na barytkowaty kształt rurek, zamknięcie pakietu wymiany ciepła w obudowie wymaga zastosowania odpowiedniej siły kompresji, która przeciwdziała sile elastyczności tych rurek (rys.2.13). W ramce lutowniczej (rys.2.14) siła sprężyn musi być dobrana tak, aby umożliwić utrzymanie szczeliny kapilarnej podczas topnienia spoiwa lutowniczego, nie powodując jednocześnie uszkodzeń mechanicznych w postaci wgnieceń. Dwa rodzaje połączeń (połączenia doczołowe i zakładkowe) komponentów w chłodnicach powietrza zostały przedstawione na rys. 2.15.

Finalnym procesem wytwarzania chłodnic powietrza jest proces lutowania z zastosowaniem spoiwa lutowniczego, którego zadaniem jest utworzenie wiązania na poziomie atomowym pomiędzy dwoma metalowymi komponentami. Dominującą technologią lutowania twardego aluminiowych chłodnic powietrza w przemyśle motoryzacyjnym jest lutowanie w kontrolowanej atmosferze. Profil lutowania (rys.2.17) składa się z kilku faz, a procesy i struktura tworzonych spoin w odniesieniu do poszczególnych faz zostały przez doktoranta objaśnione. Do tych faz są zaliczane:

- faza odparowania wilgoci oraz obecnych na powierzchni komponentów środków smarnych, będących pozostałością po procesach formowania blach;
- faza nagrzewania chłodnicy powietrza do temperatury początku nadtopień stosowanego topnika;
- faza lutowania w trakcie radiacyjnego rozgrzania całej chłodnicy w celu umożliwienia intensywnej dyfuzji krzemu podczas płynięcia spoiwa pomiędzy łączonymi komponentami;
- faza wstępnego chłodzenia do zapoczątkowania procesu krystalizacji spoiny lutowniczej;
- faza chłodzenia w powietrzu atmosferycznym w celu powstania warstwy tlenku glinu na powierzchni komponentów dla ochrony chłodnicy przed korozją.

Proces lutowania odbywa się w specjalizowanych piecach tunelowych (rys.2.19), dostosowanych do produkcji wielkoseryjnej. Poprawny przebieg procesu lutowania wymaga, aby spoiwo przemieściło się do szczelin pomiędzy równolegle ułożonymi komponentami pod wpływem napięcia powierzchniowego. Decyduje o tym lejność spoiwa (rys.2.20), która silnie zależy od temperatury, a rozpoczyna się wówczas, gdy ponad 60% jego objętości przejdzie do stanu likwidus. Na to zjawisko wpływają także: zwilżalność spoiwa, jego lepkość i reaktywność metalurgiczna stosowanych materiałów wejściowych.

Końcowym etapem produkcji chłodnic powietrza jest kontrola jakości na zgodność z wymaganiami ujętymi w normach PN-ISO. W ramach procesu kontroli możliwe jest zastosowanie jedynie badań nieniszczących, tj. oceny wizualnej (rys.2.21), testu szczelności (rys.2.22) oraz weryfikacji zgodności wymiarowej (rys.2.23).

Potwierdzenie zgodności chłodnic powietrza z normami wymaga również cyklicznych badań niszczących: makrografii spoin (rys.2.24 oraz testu ciśnienia rozrywającego (rys.2.25). Zostały one krótko naświetlone w rozprawie.

W rozdziale 3 - pozostałość topnika w chłodnicy powietrza mgr inż. S.A. Nadolny przedstawił gruntowną analizę wpływu warunków procesu technologicznego na stopień zlutowania komponentów chłodnicy oraz na pozostałość topnika, zanieczyszczając jej wewnętrzne przestrzenie eksploatacyjne.

Pozostałości topnika (rys.3.2) wpływają bowiem na:

- wydajność, gdyż cząsteczki pozostałości topnika stanowią dodatkową barierę izolacyjną;
- przepływ, ponieważ sprzyjają tworzeniu się osadów i blokowaniu kanałów przepływu cieczy chłodniczej (rys.3.1);
- korozję, ponieważ akumulacja cząsteczek zawierających osady pozostałości topnika sprzyja powstawaniu ognisk korozyjnych;
- właściwości chemiczne, gdyż poprzez wchodzenie w reakcje z cieczami chłodniczymi powodują żelowanie, zwiększenie lepkości cieczy chłodniczej oraz obniżenie jej lejności



W procesie technologicznym szereg czynników wywiera wpływ na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania chłodnicy powietrza. Mgr inż. S.A. Nadolny przeprowadził gruntowną analizę tego problemu podkreślając, że: ... „*pozostałość topnika jest problemem uniwersalnym w przemyśle motoryzacyjnym, a jej znaczenie rośnie wraz z obecnym rozwojem nanocieczny*”. Syntetycznie wpływ czynników procesu technologicznego chłodnicy powietrza na pozostałość topnika oraz stopień zlutowania ujął na wykresie Ishikawy (rys.3.3). Do analizy przyczyn i skutków wad dla problemu minimalizacji pozostałości topnika przy maksymalizacji stopnia zlutowania chłodnicy zastosował metodę FMEA-P (tab.3.1).

Ta pogłębiona, gruntowna analiza była podstawą do stwierdzenia, że najwyższy priorytet dla uzyskania wysokiego stopnia zlutowania oraz małej ilości pozostałości topnika mają:

- gramatura topnika, tj. masa topnika przypadająca na jednostkę powierzchni komponentu i jej rozrzut;
- siła kompresji i obszar docisku ramek lutowniczych;
- profil lutowania, wpływający na zmiany temperatury w czasie procesu.

Wymienione czynniki były przedmiotem kolejnych badań doktoranta.

Rozdział 4 - cel, zadania i metody pomiarowe zawiera zwięźle ujęte w siedmiu punktach wnioski z analizy literatury, konsultacji przeprowadzonych w środowisku przemysłowym oraz obserwacji i doświadczeń w firmie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski. Ich syntezą jest stwierdzenie, że: ... „*w procesie technologicznym na pozostałość topnika wpływ mają przede wszystkim procesy nanoszenia topnika, montażu oraz lutowania*”.

Doktorant sformułował dwa **cele pracy**:

- **cel naukowy**, w świetle którego możliwa jest redukcja ilości pozostałości topnika poprzez kontrolę i odpowiedni dobór gramatury warstwy topnika, siły kompresji ramek lutowniczych oraz kontrolę profilu lutowania;
- **cel użytkowy**, którym jest redukcja ilości pozostałości topnika w chłodnicach powietrza wytwarzanych w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski o 10%, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego stopnia ich zlutowania.

Osiągnięcie planowanych celów pracy zostało ujęte w 4 etapach włącznie z zastosowaniem zaleceń dla praktyki przemysłowej.

Oryginalną, innowacyjną częścią rozprawy doktorskiej jest metodyka i metody badawcze, zastosowane przez mgra inż. S.A. Nadolnego. W badaniach były zastosowane metody jakościowe do identyfikacji i analizy głównych czynników procesu mających wpływ na ilość pozostałości topnika oraz stopień zlutowania chłodnicy powietrza (diagram Ishikawy oraz analiza FMEA-P).

Metody ilościowe (eksperymenty oraz badania symulacyjne) były wykorzystane do zbadania wpływu gramatury topnika i maksymalnej temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość pozostałości topnika oraz weryfikacji wpływu czynników geometrii pokrywy i ciśnienia roboczego procesu nanoszenia topnika na jego gramaturę i rozrzut grubości jego warstwy.

Badania symulacyjne procesu nanoszenia postużyły do analizy czynników istotnych dla rozrzutu gramatury pomiędzy pokrywami w partiach produkcyjnych.

Złożoność konstrukcji chłodnicy powietrza i jej procesu technologicznego uzasadniały zastosowanie różnorodnych metod pomiaru i analizy, które doktorant ujął w trzech grupach:

- metody stosowane w przedsiębiorstwie;
- metody opracowane na potrzeby realizowanych badań;
- innowacyjne metody pomiaru pozostałości topnika.

Następnie przedstawił i omówił metody pomiarów oraz urządzenia stosowane w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski dotyczące:

- masy topnika za pomocą precyzyjnej wagi (rys.4.1);

- siły kompresji sprężyn w ramach lutowniczych za pomocą siłomierza o dokładności 0,02 [N] (rys.4.2);
- zmiany temperatury w czasie w czasie poprzez termopary umieszczone we wnętrzu chłodnicy powietrza z dokładnością $\pm 0,3$ [°C] (4.3);
- szczelności za pomocą testera szczelności o dokładności $\pm 1,5\%$ mierzonej wartości + 7,5 [mbar] (rys.4.4);
- ilości pozostałości topnika w ramach cyklicznej kontroli czystości wewnętrznej zgodnie z wymaganiami dla danej chłodnicy powietrza (rys.4.5).

Na potrzeby prowadzonych badań własnych doktorant opracował metody:

- pomiaru grubości warstwy topnika umożliwiającego ocenę równomierności tej warstwy z zastosowaniem (rys.4.6) z zastosowaniem folii wzorcowej o grubości 50 [μm];
- pomiaru szerokości szczeliny montażowej w miejsce dotychczas stosowanego pomiaru siły sprężystości sprężyn w ramach lutowniczych i zastosowaniu tulejek dystansowych o stałej wysokości. Dzięki temu rozwiązaniu mógł uzyskać stałą szczelinę montażową (rys.4.7-rys.4.8);
- fazowej analizy profilu lutowania na podstawie pomiaru zmian temperatur w czasie. Dzięki temu uzyskał możliwość bezpośredniego porównywania profili lutowania dla różnych chłodnic powietrza. Fazowa analiza profilu lutowania ze względu na temperatury procesu polegała na określeniu pola powierzchni pod profilem lutowania z podziałem na poszczególne fazy (rys.4.9).

Podejmując realizację części badawczej rozprawy, doktorant zaproponował kompleksowy, innowacyjny plan badań (tab.4.1). W dotychczasowych metodach pomiaru pozostałości topnika konieczne było przygotowywanie licznych próbek do uzyskania wyników. Doktorant zaproponował progresywny program badań, w którym na podstawie uzyskanych wyników były podejmowane kolejne pomiary.

Rozdział 5 - opracowanie metody pomiaru ilości pozostałości topnika obejmuje trzy nowe, niezależne metody, oparte na:

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

Z badanej chłodnicy o konstrukcji przedstawionej na rys.5.1 zostały pobrane cztery próbki z oznaczonych obszarów (rys.5.2 i rys. 5.3).

Uwaga: doktorant podaje (str.51), że próbki były ... „w postaci prostokątów...” . Jest to niezbyt precyzyjne sformułowanie, ponieważ próbki miały 3 wymiary i lepiej byłoby stwierdzić, że np. w przekroju badana powierzchnia była w kształcie prostokąta.

Autor rozprawy przedstawił jednoznacznie zastosowane metody badawcze i uzyskane wyniki pomiarów. W efekcie stwierdził, że:

- ze względu na zbyt niskie różnice wartości zmiany barw niebiesko-żółtych oraz brak zależności jasności i barw czerwono-zielonej od gramatury topnika na pokrywach,.. metoda spektrofotometrii nie może być stosowana do oceny ilości pozostałości topnika;
- metoda **SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)** umożliwia pośrednią ocenę leżności spoiwa, w tym stwierdzenie nadmiaru gramatury topnika. Uzyskane wyniki (rys.5.5.6 – rys.5.9) potwierdzają możliwość oceny ilości i formy pozostałości topnika za pomocą metody tej metody **Na uwagę zasługuje autorska koncepcja oceny ilości pozostałości topnika dla 3 chłodnic powietrza za pomocą sumy stężenia pierwiastków fluoru (F) i potasu (K) na powierzchni próbki, oznaczonej jako miara (F+K)% [wt%]** (rys.5.10);



- zastosowanie mikroskopii światła odbitego **RLM-DIC** (*Reflected Light Microscopy - Differential Interference Contrast*) umożliwia to rozróżnienie cząsteczek pozostałości topnika na tle materiału bazowego. **Doktorant opracował 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 jest autorską miarą [Px%]. Kolor pozostałości topnika został zmieniony na zielony i uwidoczniiony na rys. 5.12. Aby ograniczyć wrażliwość algorytmu na zmiany w jasności zdjęć wskutek wysokiej chropowatości próbek, doktorant wprowadził parametr korekty jasności α (rys.5.13 i rys.5.14).

Interesujące jest również porównanie metod oceny ilościowej pozostałości topnika. Wyniki oceny ilości pozostałości topnika metodami SEM-EDS oraz RLM-DIC zostały porównane do wartości referencyjnych uzyskanych stosowaną, zalecaną wzorcową metodą (rys.5.16 i tab.5.1). Pomimo bardzo dobrej zgodności (94%) wyników metody SEM-EDS z wartością wzorcową jej zasadniczym ograniczeniem jest wysoki koszt. Natomiast niski koszt pomiaru oraz brak konieczności stosowania specjalistycznej aparatury i dobra zgodność (80%) wyników z wartością wzorcową metody RLM-DIC zaproponowanej przez doktoranta, otwiera możliwość zastosowania jej w badaniach wpływu istotnych czynników procesu na ilość pozostałości topnika.

Rozdział 6 - optymalizacja procesu technologicznego obejmuje badania:

- charakterystyki warstwy topnika z analizą obecnego procesu nanoszenia topnika, ze szczególnym uwzględnieniem jego gramatury oraz równomierności rozkładu na powierzchni;
- wpływu charakterystyki docisku ramki lutowniczej na stopień zlutowania z określeniem możliwego zakresu regulacji dla elementów dociskowych ramki lutowniczej;
- wpływu konfiguracji wsadu na warunki termiczne procesu lutowania z określeniem możliwego zakresu regulacji profilu lutowania bez konieczności czasochłonnej zmiany ustawień pieca tunelowego.

Zaplanowane eksperymenty oraz oceny uzyskanych wyników zostały wykonane zgodnie z wymogami analizy statystycznej. Graficzne ilustracje porównaj i analiz zostały przedstawione na rys.6.13 – rys.6.18

Na podstawie uzyskanych wyników mgr inż. S. A. Nadolny potwierdził, że „*istnieje technologiczna możliwość zmniejszenia ilości pozostałości topnika w chłodnicy powietrza po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze, przy jednoczesnym zachowaniu jej wymaganego stopnia zlutowania*”.

Aby osiągnąć poprawę w tym zakresie zaproponował w procesie technologicznym zalecenia dotyczące.:

- wymiany sprężyn w ramkach lutowniczych w przypadku odnotowania spadku stopnia zlutowania;
- zwiększenia maksymalnej temperatury lutowania z 602 [°C] do 606 [°C] lub zmiany ułożenia wsadu w piecu tunelowym poprzez wprowadzenie odstępów pomiędzy partiami produkcyjnymi;
- zmniejszenia obecnej gramatury topnika na pokrywach z $5,4 \pm 1,2$ do zalecanej gramatury $3 \pm 0,8$ [g/m²].

W rozdziale 7 - zastosowanie zaleceń w praktyce przemysłowej zostały uwzględnione zalecenia wdrożeniowe opracowane przez doktoranta w badaniach optymalizacyjnych. Zaproponował schemat nowej maszyny do nanoszenia topnika (rys.7.1). Opracował model komputerowy maszyny do selektywnego topnikowania, umożliwiający przeprowadzenie symulacji odwzorowującej mechanikę działania i wzajemne relacje między poszczególnymi czynnikami procesu (rys.7.2). Format wyników symulacji procesu nanoszenia topnika uwzględnia udział gramatury topnika pomiędzy pokrywami z podziałem pokryw na rząd, kolumnę oraz platformę (rys.7.3).

„Wyniki symulacji przedstawiają udział gramatury topnika [%] na pokrywach, przy czym całkowita wartość dla 3 platform wynosi 100%. Uwzględnione zostało rozróżnienie pozycji pokryw (rzęd 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%.”

Analiza wyników eksperymentu symulacyjnego (tab.7.1 i rys.7.4 -rys.7.5) była podstawą do ważnego stwierdzenia, iż: ...„*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*”.

Próby technologiczne wg zaproponowanego przez doktoranta planu (tab.7.2, i rys. 7.6) potwierdziły, że można sterować ... „*gramaturą topnika przy zachowaniu wymaganego rozrzutu topnika poniżej $\pm 0,8$ [g/m²]*181. Osiągnięcie wartości gramatury $3,0 \pm 0,5$ [g/m²] pozwala stwierdzić spełnienie zalecenia wdrożeniowego dla nowej maszyny do nanoszenia topnika”.

W rozdziale 8 - podsumowanie i wnioski doktorant syntetycznie zawarł efekty swoich badań, które przedstawiam w skrócie.

We wnioskach poznawczych stwierdza, że:

- stosowana dotychczas metoda pomiaru ilości pozostałości topnika nie daje możliwości analizy formy ani obszarów agregacji cząsteczek pozostałości topnika;
- ilość pozostałości topnika oraz jej forma i obszary agregacji cząsteczek można wyznaczać w sposób pośredni z zastosowaniem: skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS) oraz mikroskopii światła odbitego (RLM-DIC);
- największy wpływ na ilość pozostałości topnika mają gramatura i rozłożenie warstwy topnika oraz profil lutowania;
- siła kompresji elementów dociskowych ramki lutowniczej powinna być dostosowana do wymiarów chłodnicy powietrza oraz utrzymana w wąskim zakresie tolerancji, aby zapewnić powstanie spoin lutowniczych bez ryzyka wystąpienia uszkodzeń mechanicznych.

We wnioskach praktycznych i wdrożeniowych zaleca, aby:

- w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski w procesie technologicznym chłodnic powietrza wyeliminować wpływ czynników ograniczających możliwości redukcji pozostałości topnika, tj.: wysoki rozrzut gramatury i grubości warstwy topnika, gdyż wpływają one na regulację profilu lutowania i możliwości analizy formy pozostałości topnika;
- 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/m²];
- wprowadzić kontrolowane zwiększanie maksymalnej temperatury profilu lutowania do 606 [°C] poprzez konfigurację wsadu w piecu tunelowym;
- wprowadzić innowacyjne metody obserwacji pozostałości topnika, umożliwiające ocenę jego ilości oraz formy, w tym także obszarów agregacji.

We wnioskach do dalszych prac doktorant proponuje, aby: :

- określić standardy pomiarowe w zależności od rodzaju wymiennika ciepła dla metod SEM-EDS oraz RLM-DIC;
- dokonać kalibracji współczynnika jasności dla metody RLM-DIC z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego;
- przeprowadzić analizy wpływu różnych konfiguracji wsadu w piecu tunelowym na rozkład temperatur;
- zoptymalizować konstrukcję ramek lutowniczych w celu precyzyjnej kontroli siły kompresji.



2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Uwaga ogólna: rozprawa została napisana w pełni poprawnie i starannie pod względem językowym i edycyjnym. Pojedyncze, nieliczne pomyłki literowe nie wpływają na jej merytoryczną spójność.

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Sławomir Andrzej Nadolny opracował zwięzłą i spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu tematu rozprawy. Wykazał, że dysponuje bardzo dobrze opanowaną, szeroką wiedzą i praktycznym doświadczeniem do rozwiązywania złożonych problemów badawczych, dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń przemysłowych. Opanował również w bardzo dobrym stopniu umiejętność prowadzenia badań diagnostycznych oraz merytorycznej analizy uzyskanych wyników.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z konstrukcją i optymalizacją technologii chłodnic powietrza. **Rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także wykazane, znaczące walory użyteczne. Poszerzają one wiedzę i możliwości skutecznej poprawy jakości technologicznej i użytkowej produkowanych wyrobów w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski.**

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgra inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego, posiadająca wysokie walory poznawcze i użyteczne spełnia warunki do uzyskania wyróżnienia. Przedstawiam zatem wniosek o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego nt.: **„Optymalizacja parametrów procesu technologicznego chłodnicy powietrza w celu minimalizacji pozostałości topnika po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze”** spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (*ustawa z dnia 14 marca 2003 r. wraz z późniejszymi zmianami, a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.*) i **wnoszę o dopuszczenie jej autora do publicznej obrony.**

Kraków, dnia 24 marca 2026 r.


Józef Gawlik

