

dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
70-310 Szczecin  
Al. Piastów 19

Szczecin 26.03.2026



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego  
pt. „*Optymalizacja parametrów procesu technologicznego chłodnicy powietrza  
w celu minimalizacji pozostałości topnika po procesie lutowania w  
kontrolowanej atmosferze*”

*Podstawa opracowania recenzji: Uchwała z dnia 13 lutego 2026 roku Rady  
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o powołaniu na  
recenzenta pracy doktorskiej. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż.  
Adam HAMROL, a promotorem pomocniczym dr inż. Michał ROGALEWICZ.*

*Recenzja została sporządzona zgodnie z art. 191 ust. 7 ustawy z dnia 20  
lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz.  
1668 z późn. zm.) w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie  
nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.*

### 1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest przeprowadzenie optymalizacji procesu technologicznego aluminiowych chłodnic powietrza stosowanych w układach doładowania silników spalinowych, wytwarzanych w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski. Autor koncentruje się na problemie minimalizacji pozostałości topnika lutowniczego po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze (CAB, Controlled Atmosphere Brazing), przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego stopnia zlutowania, determinującego szczelność i wytrzymałość chłodnic.

Rozprawa ma wyraźnie określony, aktualny i istotny kontekst przemysłowy – wynikający zarówno z wymagań norm jakościowych (m.in. IATF 16949, normy dot. badań lutów twardych, norm dla wymienników ciepła), jak i z regulacji unijnych dotyczących efektywności energetycznej, redukcji emisji i trwałości wyrobów.

Praca została zrealizowana w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy, co dodatkowo podkreśla jej wdrożeniowy charakter.

Autor zdefiniował cel użyteczny pracy w postaci „redukcja pozostałości topnika w chłodnicach powietrza wytwarzanych w przedsiębiorstwie MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski o 10%, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego stopnia ich zlutowania”. Cel naukowy polega na wykazaniu, że redukcję pozostałości topnika można osiągnąć poprzez odpowiedni dobór i kontrolę kluczowych parametrów procesu technologicznego, w szczególności: gramatury warstwy topnika na pokrywach chłodnicy, charakterystyki kompresji w ramach lutowniczych oraz profilu lutowania w piecu tunelowym. Teza pracy w uproszczeniu brzmi: „Redukcja pozostałości topnika w chłodnicach powietrza jest możliwa poprzez optymalizację parametrów procesu technologicznego lutowania, bez pogorszenia jakości zlutowania.”

Zakres pracy obejmuje analizę konstrukcji i funkcji chłodnic powietrza, szczegółowy opis procesu technologicznego produkcji chłodnic, omówienie problemu pozostałości topnika, sformułowanie celów i tezy pracy badawczej, a także opracowanie nowych metod pomiaru pozostałości topnika, optymalizację parametrów procesu technologicznego, sformułowanie zaleceń, weryfikację efektów oraz podsumowanie i wnioski naukowe i wdrożeniowe.

Zakres pracy jest spójny, kompletny i odpowiada skali wymagań przewidzianych dla rozprawy doktorskiej. Oceniając wybór tematu rozprawy doktorskiej oraz jej zakres należy stwierdzić, że jest on trafny i uzasadniony zarówno pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym.

## **2. Ocena przeglądu literatury i stanu wiedzy**

W rozdziałach 1–3 Autor przedstawia szeroki i dobrze udokumentowany przegląd literatury dotyczącej konstrukcji kompaktowych wymienników ciepła i chłodnic powietrza, materiałów stosowanych w produkcji chłodnic, procesów technologicznych oraz mechanizmów powstawania i działania topnika (NOCOŁOK). Omówiono też dotychczasowe badania dotyczące pozostałości topnika oraz wpływ pozostałości topnika na wydajność cieplną, przepływ cieczy chłodniczej, degradację cieczy chłodniczych i powstawanie osadów.

Na uwagę zasługują poprawne osadzenie problemu w kontekście norm technicznych i unijnych regulacji dotyczących efektywności energetycznej i emisji oraz pokazanie ewolucji poglądów - od traktowania pozostałości topnika jako warstwy obojętnej, a nawet ochronnej, do aktualnego rozumienia jej jako czynnika negatywnie wpływającego na niezawodność układów chłodzenia i stabilność cieczy chłodniczych.

Analiza literatury jest aktualna, szeroka i kompletna. Jednocześnie można wskazać, że ze względu na bardzo dynamiczny rozwój badań nad nanocieczami i nowymi topnikami, w

przyszłości warto szerzej uwzględnić najnowsze prace dotyczące długookresowej stabilności cieczy chłodniczych z nanododatkami. Uwaga ta nie wpływa negatywnie na poziom rozprawy.

Generalnie stan wiedzy został przedstawiony w sposób kompetentny, pozwalający jednoznacznie zidentyfikować lukę badawczą w postaci braku badań systemowych analizujących wpływ parametrów procesu technologicznego (gramatura topnika, profil lutowania, docisk w ramkach) na ilość i formę pozostałości topnika w produkcji seryjnej chłodziw. Jednocześnie autor prawidłowo wskazał, iż pozostawienie topnika w chłodziw po procesie lutowania prowadzi do obniżenia sprawności chłodziw, ryzyka blokowania kanałów przepływowych oraz przyspieszonej degradacji cieczy prowadzącej do przyspieszonej korozji.

### **3. Metodyka badań i zastosowane narzędzia**

Autor korzysta z szerokiego zestawu metod inżynierskich i badawczych, charakterystycznych dla inżynierii produkcji i inżynierii mechanicznej. W ramach metod jakościowych zastosowano analizę przyczynowo-skutkową przeprowadzoną z wykorzystaniem diagramu Ishikawy w celu identyfikacji zależności między parametrami procesu a jakością wyrobu, natomiast analizę FMEA-P wykorzystano do oceny ryzyka związanego z niespełnieniem wymagań dotyczących stopnia zlutowania oraz ilości pozostałości topnika. W zakresie metod ilościowych zastosowano klasyczne metody planowania eksperymentów (DOE), obejmujące pełne eksperymenty czynnikowe  $2^2$  i  $3^2$  z nierówną liczbą replikacji, metody analizy statystycznej — regresję oraz analizę wariancji (ANOVA) — służące identyfikacji istotnych czynników oraz ich interakcji, a także ilościowe badania symulacyjne procesu nanoszenia topnika.

W celu pozyskania niezbędnych danych zastosowano typowe metody pomiarowe stosowane w przedsiębiorstwie, takie jak pomiar gramatury topnika, pomiar siły kompresji sprężyn, rejestracja profilu lutowania za pomocą termopar, testy szczelności i rozrywania oraz metoda AAS do oceny pozostałości topnika. Dodatkowo wykorzystano znaną metodę SEM-EDS — skaningową mikroskopię elektronową z analizą dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego — do oceny składu pierwiastkowego pozostałości topnika, w ramach której opracowano autorską miarę (F+K)% służącą ilościowej analizie pozostałości topnika. Ponadto opracowano metodę pomiarową RLM-DIC — mikroskopię światła odbitego z kontrastem różnicowo-interferencyjnym, wykorzystującą miarę Px% opartą na autorskim algorytmie analizy obrazu i korekcji jasności.

Dobór metod badawczych jest logiczny i w pełni adekwatny do celów pracy. Zastosowane metody inżynierii jakości — analiza przyczynowo-skutkowa z wykorzystaniem diagramu Ishikawy oraz analiza FMEA-P zgodna z wytycznymi AIAG & VDA (2019) — zostały właściwie użyte do zawężenia listy istotnych czynników procesowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiej metody pomiarowej RLM-DIC, obejmującej własny algorytm analizy obrazu, korekcję jasności oraz zdefiniowaną przez autora miarę Px%, a także konsekwentna walidacja wszystkich zastosowanych metod pomiarowych względem metody referencyjnej AAS (znormalizowane porównania oraz analiza błędów względnych). Ponadto umiejętne połączenie badań eksperymentalnych z symulacjami procesu nanoszenia topnika stanowi dodatkowy walor metodologiczny pracy.

Metodyka badań w pełni spełnia wymogi art. 187 ust. 1 pkt 2 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, ponieważ doktorant wykazał umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych, a także stosowania zaawansowanych technik pomiarowych, analitycznych i eksperymentalnych.

#### **4. Główne wyniki i ich znaczenie**

W ramach pracy doktorskiej Autor opracował i szczegółowo zweryfikował dwie autorskie metody oceny ilości i formy pozostałości topnika. Pierwsza z nich opiera się na wykorzystaniu znanej metody SEM-EDS — skaningowej mikroskopii elektronowej połączonej z analizą dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego — w której Autor wprowadził autorską miarę (F+K)%, definiowaną jako sumaryczne stężenie fluoru i potasu na powierzchni. Weryfikacja tej miary poprzez porównanie wyników z metodą referencyjną AAS potwierdziła zgodność na poziomie ok. 94%. Wykorzystanie SEM-EDS umożliwiło również analizę formy pozostałości topnika, w tym identyfikację heksagonalnych aglomeratów  $KAlF_4$  oraz igieł  $MgF_2$ , a także obserwację zjawiska migracji topnika z pokrywy górnej na dolną. Drugą autorską metodą jest opracowana przez Autora metoda RLM-DIC — mikroskopia światła odbitego z kontrastem różnicowo-interferencyjnym — oparta na autorskim algorytmie analizy obrazu, korekcji jasności oraz zdefiniowanej miarze Px%, służącej ilościowej i jakościowej ocenie pozostałości topnika.

Zgodność wyników uzyskanych metodą RLM-DIC z wartościami referencyjnymi określonymi za pomocą atomowej spektrometrii absorpcyjnej (AAS) została oceniona na około 80%, co — przy znacząco niższych kosztach i wielokrotnie większej szybkości akwizycji

danych — stanowi istotną zaletę tej metody w kontekście zastosowań operacyjnych. W pracy słusznie wskazano, że metoda SEM-EDS, jako metoda znana i charakteryzująca się wysoką dokładnością (zgodność z AAS na poziomie ok. 94%), może pełnić funkcję metody referencyjnej dzięki możliwości jednoznacznej identyfikacji chemicznej pozostałości topnika. Natomiast opracowana przez Autora metoda RLM-DIC stanowi praktyczne narzędzie badawcze, które może być wykorzystywane zarówno w analizach procesowych, jak i potencjalnie w rutynowej kontroli technologicznej. Oceniam to jako istotny, oryginalny i w pełni uzasadniony wkład naukowy w obszarze metrologii i inżynierii produkcji wymienników ciepła.

W zakresie charakterystyki warstwy topnika Autor wykazał, że aktualny proces jego nanoszenia prowadzi do przekroczenia górnej granicy tolerancji gramatury — średnia wartość wynosi  $5,4 \pm 1,2 \text{ g/m}^2$  przy wymaganiu  $\leq 5,0 \text{ g/m}^2$ . Ponadto udowodniono, że obszary faktycznie wymagające obecności topnika, tj. strefy kontaktu komponentów, obejmują około 50% powierzchni pokryw, co uzasadnia możliwość teoretycznego obniżenia gramatury do poziomu  $1\text{--}3 \text{ g/m}^2$  bez negatywnego wpływu na proces tworzenia spoin. Autor słusznie wskazał również, że zwiększanie gramatury powyżej ok.  $3 \text{ g/m}^2$  nie przynosi dalszej poprawy stopnia zlutowania, natomiast znacząco zwiększa ilość pozostałości topnika. Wyniki te mają istotne znaczenie aplikacyjne, ponieważ wyznaczają racjonalne granice minimalnej gramatury topnika przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej jakości połączeń lutowanych.

W wyniku badań z wykorzystaniem zmodyfikowanych ramek lutowniczych Autor wykazał, że akceptowalny zakres sumarycznej szerokości szczelin montażowych mieści się w przedziale ok.  $1,0\text{--}1,2 \text{ mm}$  — poniżej tego progu dochodzi do uszkodzeń mechanicznych w wyniku rozszerzalności cieplnej, natomiast powyżej niego nie jest osiągany wymagany stopień zlutowania. Oznacza to, że siła kompresji ramek w praktyce nie podlega regulacji i nie powinna być traktowana jako kluczowa zmienna w dalszych eksperymentach optymalizacyjnych. Wniosek ten świadczy o krytycznym i dojrzałym podejściu Autora do własnych założeń badawczych.

W ramach pełnego eksperymentu czynnikowego  $3^2$  Autor zbadał wpływ gramatury nanoszonego topnika oraz maksymalnej temperatury lutowania na stopień zlutowania i ilość pozostałości topnika, co stanowi kluczowy element weryfikacji tezy rozprawy. Wykazano, że zastosowanie gramatury  $3 \pm 0,8 \text{ g/m}^2$  oraz temperatury  $606^\circ\text{C}$  umożliwia jednoczesną poprawę jakości połączeń i ograniczenie pozostałości topnika — odpowiednio o około 24% i 35% względem stanu wyjściowego — znacznie przekraczając zakładany cel użyteczny. Wyniki te

mają istotne znaczenie aplikacyjne, zostały wdrożone w przedsiębiorstwie i potwierdzają dojrzałość metodologiczną autora.

## 5. Wkład oryginalny i znaczenie dla inżynierii produkcji

Do najważniejszych, oryginalnych osiągnięć naukowych i wdrożeniowych Autora zaliczam:

1. Opracowanie i pełna walidacja autorskiej metody pomiaru pozostałości topnika RLM-DIC, obejmującej autorski algorytm analizy obrazu, parametr korekcji jasności  $\alpha$  oraz nową miarę Px%, wraz z walidacją względem metody referencyjnej AAS i metodą SEM-EDS, co stanowi oryginalny wkład w metrologię procesu lutowania CAB.
2. Opracowanie autorskiej miary (F+K)% oraz jej zastosowanie w metodzie SEM-EDS do ilościowej oceny pozostałości topnika oraz analizy form cząstek (heksagonalne aglomeraty  $KAlF_4$ , igły  $MgF_2$ ), co pozwoliło na powiązanie chemiczno-morfologicznych cech pozostałości z parametrami procesu lutowania.
3. Identyfikację i ilościową ocenę wpływu gramatury nanoszonego topnika oraz maksymalnej temperatury lutowania na stopień zlutowania oraz ilość i formę pozostałości topnika, uzyskaną w ramach pełnego eksperymentu czynnikowego  $3^2$ , co stanowi nową wiedzę dla procesów CAB w chłodnicach powietrza.
4. Wyznaczenie racjonalnego zakresu minimalnej gramatury topnika (około  $3 \pm 0,8 \text{ g/m}^2$ ), umożliwiającego spełnienie wymagań jakościowych spoin przy jednoczesnej istotnej redukcji pozostałości topnika, co posiada zarówno znaczenie naukowe, jak i bezpośredni potencjał wdrożeniowy.
5. Oryginalne zastosowanie fazowej analizy profilu lutowania (TTC\_PA) jako narzędzia oceny wpływu konfiguracji wsadu na warunki termiczne procesu, stanowiące nowatorski wkład w analizę zjawisk cieplnych w piecach tunelowych CAB.

Osiągnięcia te spełniają kryterium art. 187 ust. 1 ustawy: stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o istotnym wymiarze praktycznym w obszarze inżynierii produkcji i technologii lutowania aluminium.

## 6. Ocena strony formalnej i językowej

Rozprawa jest napisana językiem poprawnym, precyzyjnym i komunikatywnym, z zastosowaniem poprawnej terminologii technicznej. Zdania są formułowane w sposób logicznie uporządkowany. Układ rozdziałów jest przejrzysty i prowadzi czytelnika od stanu wiedzy, przez analizę problemu, po badania i wnioski. Na plus należy odnotować:

- starannie przygotowaną ikonografię (rysunki procesów, schematy, wyniki pomiarów),
- konsekwentne odwoływanie się do norm, standardów i literatury fachowej,
- szczegółowe wyjaśnianie pojęć technicznych (w formie przypisów i objaśnień).

Można wskazać kilka drobnych uwag redakcyjnych (sporadyczne potknięcia stylistyczne, miejscami bardzo duże zagęszczenie symboli i przypisów w jednym akapicie, co może utrudniać lekturę), jednak nie mają one wpływu na ogólną, wysoką ocenę strony formalnej.

## **7. Zastrzeżenia i uwagi krytyczne**

W odniesieniu do recenzowanej rozprawy zwracam uwagę na następujące kwestie:

Ograniczona dyskusja długookresowych efektów wdrożenia. Autor przekonująco pokazuje efekty wdrożeń w krótkim horyzoncie (redukcja pozostałości topnika, poprawa stopnia zlutowania). Brakuje jednak szerszej dyskusji dotyczącej długookresowej niezawodności chłodziń pracujących ze zredukowaną gramaturą topnika, opartej np. na danych eksploatacyjnych lub testach przyspieszonego starzenia.

Choć metoda RLM-DIC jest cennym narzędziem, to jej ograniczona zgodność z metodą AAS (ok. 80%) oraz wrażliwość na kalibrację jasności wskazują, że w zastosowaniach przemysłowych wymaga jeszcze dopracowania procedur pomiarowych i walidacji operacyjnej. Warto byłoby szerzej omówić plan dalszego rozwoju tej metody.

Prezentacja wyników DOE. Część rezultatów eksperymentów czynnikowych (szczególnie 3<sup>2</sup>) jest przedstawiona bardzo syntetycznie. Dla pełniejszego obrazu można byłoby dodać bardziej rozbudowaną dyskusję interakcji pomiędzy czynnikami (np. wykresy odpowiedzi powierzchniowych, interpretację fizyczną obserwowanych efektów).

Z rozprawy wynika, że kluczowe elementy pracy zostały opublikowane w recenzowanych artykułach naukowych (w tym w latach 2023–2025) i materiałach branżowych. Z punktu widzenia oceny w świetle ustawy i wytycznych Rady Doskonałości Naukowej zasadne jest jeszcze wyraźne powiązanie tych publikacji z poszczególnymi rozdziałami pracy (tablica korelacji osiągnięć i publikacji).

Metody oceny pozostałości topnika, zwłaszcza RLM-DIC, choć wartościowe, wymagają doprecyzowania procedur pomiarowych pod kątem powtarzalności i ograniczenia wpływu operatora. W szczególności konieczność ręcznej kalibracji jasności zdjęć wskazuje na potrzebę dalszej automatyzacji i walidacji metody w warunkach produkcyjnych.

Podkreślam jednak, że powyższe uwagi mają charakter uzupełniający i rozwojowy; nie podważają one merytorycznej wartości rozprawy ani jej zgodności z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim.

## **8. Konkluzja i wniosek końcowy**

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa jest dojrzałym, spójnym i wartościowym opracowaniem naukowym. Autor przedstawia w niej oryginalne rozwiązanie ważnego problemu z zakresu inżynierii produkcji, wykazuje wysoki poziom merytoryczny, posiada wyraźnie udokumentowany potencjał wdrożeniowy oraz spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Sławomira Andrzeja Nadolnego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. „Optymalizacja parametrów procesu technologicznego chłodnicy powietrza w celu minimalizacji pozostałości topnika po procesie lutowania w kontrolowanej atmosferze” oraz o nadanie mu stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Jednocześnie, ze względu na oryginalność zastosowanych metod i narzędzi badawczych, a także wyjątkowe walory poznawcze, użytkowe i wdrożeniowe rozprawy, których znaczenie wykracza poza standardowy zakres badań doktorskich w inżynierii produkcji, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT

Szczecin 26.03.2026

