

**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 30.09.2025

## 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.