

prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 27 stycznia 2024 r.

## **OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Kamil Krystek**

„Oddziaływanie warunków procesu lutowania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączeń elementów konstrukcji silników lotniczych”

### **Uwagi ogólne**

Opiniowana praca powstała pod opieką dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz, na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W zespole Profesora Macieja Motyki od wielu lat prowadzone są badania podstawowe i aplikacyjne nad rozwiązaniami materiałowymi we współpracy z przemysłem.

Recenzowana praca zrealizowana została w ramach II edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy” i jest odpowiedzią na zapotrzebowanie rynkowe przemysłu lotniczego, a w szczególności przedsiębiorstwa Pratt & Whitney Rzeszów. Dotyczy on łączenia poprzez wysokotemperaturowe lutowanie piecowe elementów konstrukcyjnych nowoczesnych silników lotniczych. Proces ten stanowi nieodzowny aspekt budowy maszyn i urządzeń, często kluczowy w przypadku produkcji zaawansowanych technologicznie produktów, szczególnie we współczesnym przemyśle lotniczym.

O skali problemu świadczy fakt, że w ramach działalności przedsiębiorstwa Pratt & Whitney Rzeszów codziennie wykonuje się kilkanaście procesów lutowania elementów z nadstopów niklu. Ta skala produkcji wiąże się ryzykiem wystąpienia zdarzeń losowych mogących zakłócić prawidłowy przebieg procesu lutowania.

Motywacją Autora rozprawy do pojęcia badań było przeprowadzenie analizy umożliwiającej ocenę stopnia oddziaływania zmiany wybranych parametrów przemysłowego procesu lutowania elementów konstrukcji silników lotniczych z nadstopów niklu na jakość wytworzonych złączy.

Uzyskane przez Autora rozprawy wyniki badań umożliwiły ocenę stopnia oddziaływania zmiany wybranych parametrów przemysłowego procesu lutowania (przerwanie procesu lutowania na różnych etapach nagrzewania, zmiany czasu wygrzewania w temperaturze lutowania oraz zmiany szerokości szczeliny lutowniczej) elementów konstrukcji silników lotniczych z nadstopów niklu na jakość wytworzonych złączy.

Otrzymane rezultaty pracy mają doskonałą perspektywę wdrożenia w formie procedur jakościowo-technologicznych w celu określenia postępowania w przypadku wystąpienia zdarzeń zakłócających przebieg procesu spajania.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo aktualny wątek badawczy w Inżynierii Materiałowej – doskonalenie dotychczas stosowanych materiałów oraz procesów technologicznych.

### **Uwagi redakcyjne**

Recenzowana praca jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Należy podkreślić, że Autor rozprawy wykazał wyjątkową staranność edycyjną podczas redagowania jej tekstu. Dysertacja ma klasyczny układ. Doktorant wyodrębnił w niej kilka części. Na wstępie przedstawił we *Wprowadzeniu* genezę pracy oraz w *Studium Literatury* aktualny stan wiedzy w obszarze podjętej tematyki badań. Następnie Doktorant sformułował *Cel Pracy*, po czym przedstawiał *Badania Własne* poddając je wnikliwej *Dyskusji*. Rozprawę kończy *Podsumowanie i Wnioski* wypływające z otrzymanych wyników badań i analiz.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana bardzo dobrym językiem i nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują liczne, trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe.

## **Cel i zakres pracy**

Ze względu na swoje duże znaczenie w bezpieczeństwie eksploatacji elementów konstrukcji, w szczególności w przemyśle lotniczym, lutowanie nadstopów niklu jest przedmiotem badań w wielu ośrodków uniwersyteckich i przemysłowych. Pomimo ugruntowanego, wieloletniego stosowania tej metody spajania materiałów, złożoność zagadnień związanych z procesem lutowania determinuje konieczność ciągłej jego analizy i optymalizacji.

W praktyce przemysłowej największym zagrożeniem w procesie twardego lutowania są czynniki mogące zakłócić jego prawidłowy przebieg. Należą do nich zazwyczaj zjawiska losowe, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest trudne do przewidzenia w analizie ryzyka związane na ogół z awariami urządzeń czy błędami ludzkimi. Wystąpienie jakichkolwiek odstępstw od założonych parametrów procesu (np. przerwanie operacji technologicznej lub jej nieodpowiedni czas czy niewłaściwe dopasowanie elementów łączonych) wpływa bezpośrednio na jakość połączenia. Co prawda takie wadliwe złącze może spełniać wymogi kontroli wizualnej, jednak nie posiada ono odpowiedniej mikrostruktury, a co za tym idzie właściwości wytrzymałościowych i eksploatacyjnych.

Proces lutowania twardego prowadzony w przedsiębiorstwie Pratt & Whitney Rzeszów obejmuje szeroką grupę materiałów żaroodpornych i żarowytrzymałych, jednakże zdecydowaną większość zespołów lutowniczych produkowanych w tej firmie stanowią konstrukcje wykonane z nadstopów niklu, szczególnie Inconelu 718 oraz Hastelloy X. Zapewnienie wysokiej jakości oraz powtarzalności lutowania elementów konstrukcji lotniczych jest priorytetem dla osiągnięcia ich niezawodności eksploatacyjnej.

Dokonana przez mgr inż. Kamila Krystka analiza aktualnego stanu wiedzy wykazała, że dostępne dane literaturowe w tym obszarze są niewystarczające i niekompletne. Było to bezpośrednią motywacją Autora dysertacji do podjęcia badań w celu „kompleksowej charakterystyki zjawisk zachodzących w złączach lutowanych w warunkach odbiegających od nominalnych, umożliwiającą zbudowanie bazy wiedzy, stanowiącej punkt wyjścia do analizy technologiczno-jakościowej analogicznych przypadków w trakcie produkcji przemysłowej. Jako główny problem naukowy, wymagający rozwiązania, przyjęto określenie stopnia oddziaływania zmian parametrów procesu lutowania próżniowego nadstopów niklu na kształtowanie mikrostruktury wytworzonych złączy, a pośrednio ich wytrzymałości”.

Badaniom poddano dwa nadstopy niklu – Hastelloy X oraz Inconel 718 – lutowane odpowiednio stopami lutowniczymi na osnowie niklu – Vitta-Braze 1996 (Ni-13Cr-4,5Fe-4,5Si-2,7B) oraz Palnico 36M (Ni-36Pd-10,5Cr-3B-0,5Si). Jako zmienne parametry procesu lutowania (w warunkach odbiegających od nominalnych) przyjęto newralgiczne czynniki determinujące jakość złączy wytwarzanych w warunkach przemysłowych: przerwanie procesu lutowania, czas wygrzewania w temperaturze, w której lut jest w stanie ciekłym i szerokość szczeliny lutowniczej.

Autor pracy zrealizował bardzo ambitny program badań dobierając adekwatne do zaplanowanych eksperymentów techniki badawcze obejmujące:

1. Analizę cieplną (DSC) lutu i złączy.
2. Badania makrostruktury i mikrostruktury (mikroskopia świetlna i elektronowa).
3. Analizę składu fazowego (XRD).
4. Określenie wytrzymałości na ścinanie złączy oraz odporności na odrywanie (maszyna wytrzymałościowa).
5. Analizę mikrotwardości (twardościomierz).
6. Badania rozpląwności lutu.

Przeprowadzone badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na realizację celu pracy. Chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Na podkreślenie zasługuje bardzo dobrze przedstawiona przez Autora rozprawy analiza aktualnego stanu wiedzy w kontekście realizacji postawionego celu badań. Na podstawie dokonanego przeglądu danych literaturowych wytypował On do analizy newralgiczne parametry procesu lutowania: przerwanie procesu lutowania na różnych etapach nagrzewania, zmiany czasu wygrzewania w temperaturze lutowania oraz zmiany szerokości szczeliny lutowniczej.

Doktorant w swojej rozprawie podjął się ambitnego zadania – kompleksowej charakterystyki zjawisk zachodzących w złączach lutowanych konstrukcji wykonane z nadstopów niklu (Inconel 718 oraz Hastelloy X) w warunkach odbiegających od nominalnych. Ocena zakłóceń prawidłowego przebiegu procesu lutowania jest bardzo często niemożliwa na podstawie dostępnych danych i wymaga dodatkowych i skomplikowanych badań, umożliwiających pełniejszą analizę potencjalnego wpływu na produkt rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi i założonymi parametrami tego procesu.

Innowacyjność rozwiązania zaproponowana Przez mgr inż. Kamila Krystka w rozprawie polega na umiejętnym opracowaniu programu badań uwzględniającym zjawiska fizyczne zachodzące w dwóch konfiguracjach materiałowych (nadstop niklu Hastelloy X lutowany stopem Vitta-Braze 1996 oraz nadstop niklu Inconel 718 lutowany stopem Palnicro 36M) podczas lutowania twardego odbiegającego od warunków nominalnych. Doktorant podzielił prace badawcze na trzy grupy. Każda z nich dedykowana została jednemu z newralgicznych parametrów, w których przeprowadzono badania mające na celu analizę wpływu zmian tego parametru na warunki płynięcia lutu oraz zmiany mikrostruktury i właściwości wytrzymałościowe złącza.

Moim zdaniem bardzo ważne z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego jest wykazanie przez Doktoranta, że w warunkach uniemożliwiających krystalizację izotermiczną lutu w całej objętości szczeliny lutowniczej w obu rodzajach złączy ma również miejsce krystalizacja atermiczna. W obszarze strefy krystalizacji atermicznej w złączach Hastelloy X/Vitta-Braze 1996 tworzą się twarde wydzielenia fazy Cr-Ni-B oraz mieszanina eutektyczna zawierająca nikiel, krzem, chrom i żelazo. Natomiast w szczelinie lutowniczej złączy Inconel 718/Palnicro 36M dochodzi do utworzenia strefy atermicznej składającej się z bardzo twardych wydzieleni fazy Ni-Pd-Cr oraz fazy Pd-Ni-Si-B.

Niezwykle istotnym z punktu widzenia praktycznego jest wykazanie przez Doktoranta, że złącza z przerwanych procesów lutowania, nawet jeżeli spełniają wymogi kontroli wizualnej, wymagają przeprowadzenia poprawy lutowania, ponieważ w mikrostrukturze lutu występuje strefa krystalizacji atermicznej, zawierająca bardzo twarde i kruche fazy. Temperatura przerwania lutowania determinuje proces kształtowania mikrostruktury złączy podczas jego poprawy. Doktorant dowiódł, że przerwanie nagrzewania w temperaturze wyższej od

poprawy. Doktorant dowiódł, że przerwanie nagrzewania w temperaturze wyższej od nominalnej zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania jednorodnej mikrostruktury strefy lutu po ponownym lutowaniu. Natomiast niezależnie od temperatury przerywania procesu lutowania, w trakcie jego poprawy dochodzi do ponownego płynięcia stopu lutowniczego. Z kolei nie wykazano wpływu przerywania procesu lutowania ani na stopień pokrycia powierzchni łączonych lutem w próbie odrywania, ani na wytrzymałość na ścinanie obu rodzajów złączy po poprawie lutowania.

Badania prowadzone przez Autora dysertacji odnośnie do innego newralgicznego parametru lutowania tj. zmiany czasu wygrzewania w temperaturze lutowania, dały podstawę do wytypowania optymalnego, z technologicznego i ekonomicznego punktu widzenia, czasu wygrzewania w procesie lutowania złączy badanych konfiguracji materiałów. Stwierdzono, że „rekomendowany czas wygrzewania w temperaturze lutowania wynosi: 3-20 min dla złączy HastelloyX/Vitta-Braze 1996 o szerokości szczeliny  $\leq 70 \mu\text{m}$  oraz 10 min dla złączy Inconel 718/Palnicro 36M ze szczeliną  $\leq 50 \mu\text{m}$ ”.

Uzyskane przez mgr inż. Kamila Krystka wyniki analizy wpływu krytycznego parametru procesu lutowania jakim jest szerokość szczeliny lutowniczej na przebieg procesu lutowania twardego nadstopów niklu (Inconel 718 oraz Hastelloy X) wskazują, że w obu rodzajach złączy „zwiększenie szerokości szczeliny lutowniczej skutkuje zwiększeniem objętości względnej strefy ASZ oraz zmniejszeniem stopnia pokrycia powierzchni łączonych lutem – wpływa zatem na pogorszenie ich właściwości wytrzymałościowych”.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Krystka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze aplikacyjnym bardzo dobrze osadzonego w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa – procesu spajania zaawansowanych technologicznie elementów konstrukcji w przemyśle lotniczym.

Moim zdaniem, wkładem Doktoranta do rozwoju wiedzy o procesie twardego lutowania nadstopów niklu, szczególnie Inconel 718 oraz Hastelloy X, jest uzyskanie wyników badań pozwalających na opracowanie „procedur jakościowo-technologicznych, wdrożonych do praktyki produkcyjnej w celu ustandaryzowania postępowania w przypadku wystąpienia zdarzeń zakłócających przebieg procesu spajania”.

## **Uwagi**

W podsumowaniu rozdziału 7 „Wnioski” Autor rozprawy stwierdza, że „otrzymane wyniki stanowią podstawę opracowania procedur jakościowo-technologicznych, wdrożonych do praktyki produkcyjnej w celu ustandaryzowania postępowania w przypadku wystąpienia zdarzeń zakłócających przebieg procesu spajania. Ponadto, zdobyta wiedza i doświadczenie w trakcie realizacji badań umożliwi przygotowanie materiałów szkoleniowych dla kadry inżyniersko-technicznej nadzorującej technologiczną obsługę procesów wysokotemperaturowego lutowania próżniowego w Pratt & Whitney Rzeszów S.A.”

Czy zatem Doktorant mógłby przedstawić propozycje takiej procedury?

Jakie wytyczne powinny znaleźć się we wspomnianych przez Doktoranta materiałach szkoleniowych dla kadry nadzorującej proces lutowania?

Czy zdaniem Doktoranta przeprowadzone badania lutowanych złączy można by uzupełnić (wzbogacić) o inne analizy w celu pełniejszego opisu zjawisk fizycznych zachodzących w obszarze złączy dwóch analizowanych konfiguracji materiałowych? Jeśli tak to o jakie?

Czy, i ewentualnie w jaki sposób, opracowane na podstawie otrzymanych przez Doktoranta wyników badań wytyczne postępowania w przypadku wystąpienia zdarzeń zakłócających przebieg wysokotemperaturowego lutowania próżniowego wpłyną na efektywność tego procesu w Pratt & Whitney Rzeszów S.A.?

## **Opinia końcowa**

Wysoko oceniam pracę doktorską mgr inż. Kamila Krystka. Autor pracy wybrał do badań wciąż aktualny i ważny problem o charakterze aplikacyjnym, umiejętnie sformułował cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktoranta badania umożliwiły zgromadzenie danych umożliwiających ocenę zmian mikrostruktury oraz właściwości użytkowych złączy lutowanych blach z nadstopów Hastelloy X i Inconel 718, w zmiennych warunkach procesu technologicznego.

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej pt. „Oddziaływanie warunków procesu lutowania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączeń elementów konstrukcji silników lotniczych” przedłożonej przez mgr inż. Kamila Krystka stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w obowiązujących przepisach. Wniosuję zatem o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład Autora rozprawy do rozwoju wiedzy w zakresie lutowania podzespołów silników lotniczych z nadstopów niklu. Uważam, że Doktorant wykazał nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i realizacji ambitnego celu badawczego. Otrzymane wyniki badań mają bardzo dużą wartość aplikacyjną.

W związku z powyższym wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Krystka pt. „Oddziaływanie warunków procesu lutowania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączeń elementów konstrukcji silników lotniczych”.

*Jawna Mizew*