

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn
Katedra Transportu Drogowego
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Waldemara Łogina

nt.

**„ Analiza wpływu geometrii narzędzia do punktowego
zgrzewania tarcowego z przemieszaniem
i wypełnieniem krateru przy łączeniu blach ze
stopów aluminium stosowanych w przemyśle
lotniczym”**

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie prośby zawartej w piśmie od Pana Przewodniczącego Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” w Politechnice Rzeszowskiej, z dnia 31.05. 2023 br.

2. Uwagi wstępne

Zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem (FSW) należy do ważnych procesów łączenia elementów wyrobów i konstrukcji metalowych. Od jakości wykonanych złączy zgrzewanych zależy trwałość eksploatacyjna konstrukcji i bezpieczeństwo ich użytkowania. Dla uzyskania prawidłowego złącza zgrzewanego istotne jest poprawne zaprojektowanie konstrukcji, właściwy dobór materiałów, prawidłowo realizowany proces technologiczny, doświadczenie i kwalifikacje personelu wykonującego bezpośrednio zgrzewanie, dobór i prowadzenie odpowiednich metod kontroli jakości.

Każda próba prowadząca do podwyższania jakości zarówno procesów zgrzewania jak i nowych wyrobów jest bardzo zasadna. Jednym z kierunków prowadzonych w zakresie badań doktoranta jest możliwość dobierania odpowiedniego sposobu wykonywania zgrzein i kształtowania jej struktury, która stanowi o właściwościach eksploatacyjnych, trwałości i niezawodności konstrukcji. Zaproponowana przez Autora modyfikacja w procesie punktowego zgrzewania

tarciowego z przemieszaniem i wypełnieniem krateru (RFSSW – Refill Friction Stir Spot Welding) przy łączeniu blach z wysokowytrzymałych stopów aluminium jest pomysłem autorskim. Technologia RFSSW jest stosunkowo nowa i coraz częściej jest sprawdzana do zastosowań w nowoczesnych środkach transportu, zwłaszcza w przemyśle lotniczym i kosmicznym, samochodowym, np. do budowy pojazdów elektrycznych.

Każdy z badanych wysokowytrzymałych stopów aluminium (Al-Cu, Al-Zn) posiada inne właściwości mechaniczne i różną spawalność (zgrzewalność). Sprawdzenie procesu zgrzewania różnych materiałów pod kątem ich spawalności (zgrzewalności) i możliwości zastosowania na cienkościennie konstrukcje lotnicze jest dużym wyzwaniem naukowym.

Najważniejsze badania dotyczą wpływu modyfikacji powierzchni czołowej tulei narzędzia na właściwości aluminiowych zgrzein. Analizowano zjawisko uplastycznienia złącza oraz wzajemnego mieszania łączonych materiałów. Na podstawie użycia dwóch różnych materiałów metalicznych, których różne właściwości mechaniczne, ale też ich różne kolory dają możliwość identyfikacji sposobu uplastycznienia i ich wymieszania w strefie złącza.

Sprawdzano nośność złącza i trwałość zmęczeniową zgrzein przy łączeniu platerowanych blach ze stopu 2024 (aluminium z miedzią) oraz 7075 (aluminium z cynkiem) 2024, w porównaniu do zgrzein wykonanych narzędziem bez modyfikacji geometrii.

Udowodniono, że zgrzewanie RFSSW pozwala na uzyskanie złączy blach ze stopów aluminium z powłokami ochronnymi w postaci plateru i anody o bardzo dużej jakości dzięki odpowiednio dobranej modyfikacji geometrii narzędzia RFSSW. Sprawdzone zmodyfikowaną metodę zgrzewania RFSSW na obiekcie rzeczywistym poprzez wykonanie elementu konstrukcji obramowania szyby pilotów samolotu M28-05.

Z tego punktu widzenia podjęcie przez Autora ocenianej rozprawy badań nad efektami procesu zgrzewania cienkościennych konstrukcji lotniczych jest zrozumiałe i w pełni uzasadnione. Tematykę rozprawy i jej zakres należy ocenić jako aktualne, stanowiące ważny krok na drodze projektowania zgrzewanych konstrukcji cienkościennych z różnych stopów aluminium.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Waldemar Łogin podjął próbę zbadania efektów zastosowania procesu zgrzewania do wykonania elementów konstrukcji cienkościennych z wysokowytrzymałych stopów aluminium.

Rozprawa podzielona jest na 10 rozdziałów, całość liczy 140 stron, zawiera spis literatury obejmujący 91 pozycji. Układ rozprawy jest prawidłowy, typowy dla tego rodzaju

opracowań, tzn. składa się z przeglądu literatury, przeprowadzenia badań rozpoznawczych, sformułowania tezy, celu i wykonaniu badań zasadniczych prowadzących do udowodnienia tezy, dokładnego opisu przeprowadzonych badań, opracowania ich wyników, precyzyjnego podsumowania wraz z wnioskami. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu, prawidłowy dobór przedmiotu złączy zgrzewanych, jak również staranne i dokładne opracowanie uzyskanych wyników badań na obiekcie rzeczywistym.

W rozdziale 1. pt. „Wybrane zagadnienia związane złączeniem struktur lotniczych” zawarto wprowadzenie dotyczące charakterystyki, projektowania, możliwości łączenia oraz własności aluminiowych konstrukcji cienkościennych z grupy 2xxx oraz 7xxx. Przedstawiono dotychczasowe sposoby łączenia elementów ze stopów aluminiowych i ich znaczenie i zastosowanie w przemyśle lotniczym. Opisano bardzo dokładnie metody punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszczeniem oraz punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszczeniem FSSW i wypełnieniem krateru (Friction Stir Spot Welding (RFSSW)), którymi zajmowano się w pracy.

W rozdziale 2. pt. „Charakterystyka procesu zgrzewania tarcowego z przemieszczaniem i wypełnieniem krateru” autor opisał sposób wykonywania złącza zgrzewanego RFSSW. Opisał zasady działania głowicy zgrzewarki i narzędzi RFSSW. Podano parametry procesu zgrzewania oraz różne warianty geometrii tulei narzędzia RFSSW. Przedstawiono wady i zalety procesu zgrzewania.

W rozdziale 3. pt. „Cechy szczególne łączenia w procesie RFSSW blach ze stopów aluminium” omówiono możliwości spajania stopów aluminium. Zwrócono uwagę na wady i zalety procesów spawania i zgrzewania dla stopów stopów aluminium, zwłaszcza umacnianych wydzieleniowo z serii 2xxx, 6xxx, 7xxx. Wskazano, że proces zgrzewania RFSSW tych stopów pozwala łączenia blach z warstwami ochronnymi np. po anodowaniu. Jest bardzo ważne w tworzeniu połączeń konstrukcji lotniczych, gdy elementy blach metalowych posiadają powłokę, której istnienie nie ułatwia wytwarzania połączenia.

W rozdziale 4. pt. „Aplikacje procesu RFSSW” przedstawiono możliwości zastosowań zgrzewania w budowie i naprawie statków powietrznych. Omówiono możliwość łączenia stopów aluminium z kompozytami włóknistymi.

W rozdziale 5 pt. „Krytyczna ocena stanu zagadnienia” jest zamieszczone podsumowanie literatury. Autor wskazuje na bardzo małą ilość publikacji na tematy związane z procesem zgrzewania RFSSW. Do najważniejszych luk badawczych Autor zaliczył brak informacji na temat kumulacji ciepła w trakcie realizacji procesu zgrzewania w narzędziu RFSSW i w zgrzeinie. Podkreślono również brak szczegółowych informacji na temat zgrzewania RFSSW aluminiowych blach z powłokami ochronnymi, co jest istotne

w łączeniu konstrukcji lotniczych, gdy wymagane właściwości mechaniczne połączeń oraz szczelności stanowi szczególny wymóg. Szczególne warunki eksploatacyjne elementów konstrukcji obiektów latających uwzględniających obciążenia zmienne znalazły swoje odbicie w pracy w prezentacji wyników badań zmęczeniowych, które zostały bardzo dobrze zaplanowane i zrealizowane.

W rozdziale 6. pt. „Teza i cele pracy” na podstawie badań rozpoznawczych i przeglądu literatury zaproponowano tezę pracy, która zakłada, że „Określona modyfikacja powierzchni czołowej tulei wewnętrznej narzędzia RFSSW znacząco wpływa na zjawisko uplastycznienia oraz efekt wymieszania łączonych materiałów w strefie złącza a zastosowanie odpowiednio dobranej do rodzaju połączeń geometrii gwarantuje uzyskanie wysokiej jakości zgrzein przy łączeniu blach platerowanych ze stopu aluminium z powłoką anodową”. Dodatkowo podano najważniejsze cele pracy, do których zaliczono:

1. Sprawdzenie zasadności zastosowania modyfikacji geometrii narzędzia RFSSW na przebieg i efekt procesu łączenia, a w szczególności skuteczność wymieszania materiałów w obszarze zgrzeiny.
2. Zaprojektowanie geometrii narzędzi, opracowanie programu badań oraz wykonanie narzędzi i badań.
3. Dokonanie analizy wpływu różnych wariantów geometrycznych modyfikacji na właściwości zgrzein, a w szczególności ich nośność i mikrostrukturę.
4. Zbadanie wpływu geometrii narzędzia na zjawiska towarzyszące, tj. generowaną temperaturę w trakcie procesu i powstające wady w zgrzeinach.
5. Przeprowadzenie wstępnych badań trwałości zmęczeniowej połączeń.
6. Zastosowanie wytypowanej geometrii narzędzia do wykonania elementu konstrukcji lotniczej z zastosowaniem technologii RFSSW.

W rozdziale 7. pt. „Cel i zakres badań własnych” przedstawiono program badań służących do udowodnienia tezy. Postanowiono wykonać badania prowadzące do analizy efektu uplastycznienia i wymieszania materiału w obszarze zgrzein RFSSW, które były wykonywane z różnych materiałów i po modyfikacji narzędzia RFSSW z użyciem 13 różnych wariantów geometrii czoła powierzchni tulei wewnętrznej.

W rozdziale 8. pt. „Wyniki badań” podano rezultaty badań wytrzymałości statycznej, badania metalograficzne, badania trwałości zmęczeniowej. Głównie badano zgrzewalność stopu 7075-T6 oraz 2024-T3 z wykorzystaniem narzędzi o różnej geometrii. Dodatkowo sprawdzono możliwość zgrzewania stopu 7075-T6 z miedzią w celu dokładnego sprawdzenia efektu wymieszania zgrzewanych blach. Przeprowadzono bardzo staranną i profesjonalną analizę wyników.

W rozdziale 9. pt. „Analiza wyników badań” bardzo dokładnie przebadano wpływ modyfikacji narzędzia RFSSW na eliminację wad strukturalnych w zgrzeinach. Dodatkowo precyzyjnie określono wpływ modyfikacji geometrii narzędzia na przebieg procesu mieszania zgrzewanych blach w różnym zestawieniu materiałowym. Ponadto określano zmiany temperatury blach w procesie zgrzewania w zależności od rodzaju geometrii narzędzia RFSSW. Ostatnim punktem pracy było sprawdzenie zmodyfikowanej metody zgrzewania na obiekcie rzeczywistym. Wykonano obramowanie szyby pilotów kabiny samolotu M28-05.

W rozdziale 10. pt. „Wnioski końcowe” podano 8 najważniejszych wniosków, z których wynika, że zostały zrealizowane cele pracy, a teza została doskonale udowodniona. Technologia RFSSW pozwala na uzyskanie zgrzein blach ze stopów aluminium z powłokami ochronnymi w postaci plateru i anody o bardzo dużej jakości dzięki odpowiednio dobranej modyfikacji geometrii narzędzia RFSSW.

4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie. Realizację badań oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to kompleksowego podejścia do autorskiej modyfikacji procesu zgrzewania RFSSW, mechanicznej i metaloznawczej analizy zagadnienia. Doceniam trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, profesjonalny sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dużej dojrzałości badawczej Doktoranta. Szata graficzna rozprawy jest bardzo profesjonalnie dopracowana i świadczy o dużej wiedzy informatycznej Doktoranta. W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się dwie uwagi o charakterze ogólnym i trzy uwagi szczegółowe nie mające wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Do uwag ogólnych zaliczam:

1. Jak wykonywano nacięcia w powierzchni czołowej tulei wewnętrznej narzędzia RFSSW? Czy napotkano na trudności w modyfikowaniu różnej geometrii narzędzia?
2. Czy Doktorant ma koncepcję badań przyszłościowych nad dalszym udoskonaleniem zgrzewania RFSSW?

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Jaka można mieć pewność, że złącze Al-Cu odzwierciedla zasady wymieszania się złącza aluminiowego?

2. Jakie korzyści są w budowie statków powietrznych można uzyskać przez zastosowanie zgrzewania RFSSW w stosunku do złącza nitowanego?
3. Drobne niedociągnięcia edycyjne (np. brak spacji w jednostkach).

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Waldemara Łogina nt. „Analiza wpływu geometrii narzędzia do punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszaniem i wypełnieniem krateru przy łączeniu blach ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym” jest bardzo interesującą rozprawą doktorską o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę Inżynieria mechaniczna”. Niepodważalnym walorem i oryginalnym osiągnięciem rozprawy jest opracowanie modyfikacji dotyczącego procesu zgrzewania RFSSW, pozwalający uzyskać złącza o lepszej jakości, dzięki czemu można z powodzeniem stosować nowo opracowany autorski proces w budowie elementów statków powietrznych.

Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi wkład rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria mechaniczna. Doktorant postawił tezę, dla udowodnienia której wykonał badania w warunkach laboratoryjnych, a ich wynik sprawdził z powodzeniem na obiekcie rzeczywistym. Postawiona teza została przejrzystie i poprawnie udowodniona. Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Autor osiągnął cele postawione w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale przede wszystkim użyteczne. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 13 ust.1 ustawy z dnia 14 III 2003 (Dz. U. 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Z uwagi na wskazane atuty w pracy i osiągnięcia w dyscyplinie naukowej wnioskuję o jej wyróżnienie.

Katowice, 29 VI 2023 r

