

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.:

„Analiza efektu uplastycznienia cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem do zastosowania w konstrukcjach lotniczych i samochodowych

Autor: mgr inż. **Piotr Myśliwiec**

Uwagi ogólne

Praca przedstawiona do opinii zawiera interesujące i udane podejście do analizy zjawisk w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW - *Friction Stir Welding*), elementów ze stopu aluminium i magnezu. Zawiera elementy opisu matematycznego zjawisk w odniesieniu do parametrów sterujących procesem i własności materiału oraz badania doświadczalne. Autor przedstawił wyniki badań doświadczalnych, które wykazały skuteczność i wiarygodność doboru parametrów procesu, umożliwiającego wykonanie złączy o wysokich właściwościach eksploatacyjnych, możliwych do zastosowania w przemyśle lotniczym i samochodowym, co w pełni uzasadnia temat pracy „*Analiza efektu uplastycznienia cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem do zastosowania w konstrukcjach lotniczych i samochodowych*”

W przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym poszukuje się ciągle nowych rozwiązań technologicznych, gwarantujących lekkość konstrukcji, wytrzymałość, szczelność, oraz bezpieczeństwo funkcjonowania w trudnych warunkach eksploatacji. Poprawa jakości, konkurencyjności i jednocześnie obniżenie kosztów zarówno produkcyjnych, jak i eksploatacyjnych, to kluczowe zagadnienia prowadzonych badań naukowo-badawczych nad innowacyjnością rozwiązań konstrukcyjnych. Badania prowadzi się zarówno w zakresie doboru materiałów, jak również ich sposobu łączenia.

W konstrukcji samolotów duży udział mają stopy metali lekkich, jak aluminium czy magnezu. Podczas konwencjonalnych metod łączenia tych stopów często pojawiają się

niepożądane zjawiska, jak np. pękanie na gorąco, dlatego też poszukuje się innych rozwiązań gwarantujących osiągnięcie pożądaných cech konstrukcji. Rozwiązaniem tego oraz wielu innych problemów technologicznych jest zastosowanie techniki łączenia materiałów w stanie stałym, w tym procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW). Technologia ta cieszy się dużym zainteresowaniem i z dużym powodzeniem stosuje się do łączenia elementów o różnej grubości, w tym cienkościennych, stosowanych zwłaszcza w lotnictwie, które stanowią wyzwanie, bo to inna, znacznie wyższa klasa trudności w realizacji procesu. Wobec stale wzrastających wymagań dotyczących materiałów i ich połączeń bardzo wiele problemów wymaga dalszych badań. Badania te zarówno na gruncie eksperymentu, jak również symulacji numerycznych dotyczą analizy złożonych zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi, w zakresie zmiany struktury wewnętrznej, łączonych materiałów, doboru warunków, parametrów procesu i innych. Autor w swojej rozprawie doktorskiej podjął badania nad istotą i zastosowaniem zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) do łączenia metalowych lekkich elementów różnorodnej konstrukcji w sektorze lotniczym, zwłaszcza cienkościennych.

Temat rozprawy jest interesujący i aktualny, a znaczenie praktyczne zaprezentowanej przez Autora problematyki rozprawy jest ważne nie tylko dla przemysłu lotniczego ale też w motoryzacji i innych branżach. Analizie poddano przydatność tej metody łączenia w produkcji elementów statków powietrznych.

Zakres pracy

Praca zawiera dziewięć rozdziałów, spis literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Dodatkowo praca uzupełniona jest czterema załącznikami. Pracę podzielono na dwie części: pierwsza zawiera teoretyczne podstawy zagadnienia, ujęta w sześciu pierwszych rozdziałach i druga zawiera badania własne, ujęte w trzech pozostałych rozdziałach.

W krótkim wprowadzeniu zamieszczono charakterystykę technologii łączenia FSW stosowanych w lotnictwie i genezę podjęcia tematu pracy.

Rozdział pierwszy na bazie danych literaturowych, zawiera przegląd klasycznych metod spawania, z podkreśleniem ich zalet i ograniczeń.

W rozdziale drugim przedstawiono charakterystykę procesu spawania tarcowego z przemieszaniem (FSW), w aspekcie wykorzystania tej metody do uzyskania różnorodnych konfiguracji połączeń.

Rozdziały trzeci i czwarty zawierają kolejno cechy połączeń metodą FSW blach z aluminium i magnezu i aplikacje przemysłowe samego procesu FSW. Doktorant skupił się na krótkiej charakterystyce stosowanych stopów aluminium i magnezu w przemyśle w aspekcie ich właściwości, w tym właściwości mechanicznych i sposobów łączenia. Za literaturą przedstawia problematykę różnych metod łączenia i ich klasyfikację. Aplikacje przemysłowe technologii FSW, głównie w branży motoryzacyjnej i lotnictwie, a także w przemyśle elektronicznym i maszynowym podano w rozdziale czwartym.

Przedstawiona w punkcie piątym analiza obecnego stanu wiedzy pod kątem poszukiwania teoretycznych i praktycznych rozwiązań dotyczących technologii FSW w odniesieniu do łączenia elementów z cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w różnych branżach przemysłowych, w tym dotyczących konstrukcji lotniczych i samochodowych stanowiła podstawę sformułowania tezy i celów pracy.

Rozdział szósty zawiera tezę pracy oraz cel i zakres pracy.

Część druga pracy obejmuje program badań własnych (rozdział 7), wyniki badań (rozdział 8) i wnioski końcowe (rozdział 9). Sformułowano metodykę badań, przedstawiono stanowisko badawcze i narzędzia do realizacji procesu FSW według przyjętego projektu badań. Prowadzone badania wyczerpująco zostały udokumentowane wynikami badań doświadczalnych. Ocenę jakości uzyskanych zgrzein FSW przeprowadzono w oparciu o podstawowe badania własności mechanicznych i badania mikrostruktury. Przeprowadzono analizę badań własnych zgrzewania liniowego FSW cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu. Przeprowadzono analizę wpływu poszczególnych parametrów procesu w aspekcie uzyskania dobrej jakości zgrzein oraz wykonano demonstrator technologii FSW w warunkach przemysłowych. Rozdział dziewiąty zawiera wnioski i podsumowanie przeprowadzonych badań.

Pracę o objętości 195 stron zakończono spisem literatury zawierającym 174 pozycje, dołączono 4 załączniki zawierające wyniki badań doświadczalnych oraz streszczenia pracy w języku polskim i angielskim.

Zakres pracy obejmuje teoretyczne podstawy zagadnienia zgrzewania FSW i badania własne obejmujące badania doświadczalne. W zakresie rozważań teoretycznych, na podstawie literatury przedstawiono najważniejsze zjawiska zgrzewania FSW i ich opisy analityczne. Przedstawione przez Autora teoretyczne podstawy FSW poparte są bogatym spisem literatury. Przegląd literatury dobrze przygotowuje do analizy zjawisk towarzyszących zgrzewaniu FSW, jak również analizy wyników badań własnych.

Na uwagę zasługuje przejrzyste prowadzony plan badań własnych oraz duża liczba wykonanych prób i pomiarów. Świadczy to o dużym zaangażowaniu Doktoranta w badaniach i dobrym rozeznaniu problematyki badawczej. Dużym wyzwaniem jest wdrożenie technologii w warunkach przemysłowych.

Ocena merytoryczna pracy

Problematyka przedstawiona w pracy jest istotna z naukowego i użytkowego punktu widzenia. Doktorant udowodnił w pracy, że obór parametrów procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) oparty o zidentyfikowane szczególne cechy, efekty mechaniczne i mikrostrukturalne zjawiska uplastycznienia oraz wymieszania w strefie połączenia cienkich blach z metali lekkich gwarantuje uzyskanie wysokiej jakości złączy.

Celem potwierdzenia postawionej tezy pracy Doktorant przeprowadził w oparciu o dane literaturowe analizę zjawisk towarzyszących procesowi FSW, wykonał bardzo różnorodne badania doświadczalne, dobrze je udokumentował i podsumował ich analizą.

Doktorant udowodnił w pracy, zamieszczając bogaty materiał badawczy, że zastosowanie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem może być zastosowane do łączenia cienkościennych elementów ze stopu aluminium i magnezu. Projekt badań był ukierunkowany na uzyskanie właściwych parametrów zgrzewania, przy których uzyskuje się najlepszej jakości złącze wymagane w warunkach przemysłowych. Przedstawione badania dotyczą łączenia elementów cienkościennych ze stopów lekkich aluminium i magnezu, bez dodatkowego materiału łączącego w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW).

Biorąc pod uwagę współzależność efektów mechanicznych i strukturalnych w procesie FSW Doktorant przeprowadził identyfikację charakterystycznych stref w wyniku transformacji mikrostruktury wynikłej z uplastycznienia materiałów łączonych i wygenerowanego ciepła. Dużym osiągnięciem był dobór odpowiednich parametrów technologicznych procesu FSW dla cienkich blach, ponieważ w literaturze przedmiotu dotychczas nie opracowano jednoznacznej, w pełni skutecznej metody doboru parametrów procesu dla danego gatunku i grubości łączonych elementów a także narzędzi, co świadczy o osiągnięciach i oryginalności badań w tym zakresie.

W strukturach lotniczych, z powodu koniecznego zabezpieczenia przed korozją występują elementy platerowane, co również Doktorant uwzględnił w swoim planie badań. Na podstawie połączeń cienkich blach w układzie płaskim, o grubości 0,5 mm ze stopu magnezu AZ31B i platerowanych blach ze stopu aluminium 2024-T3 oraz połączenia

zakładkowego blach ze stopu AA2024-T3 o różnej grubości, wykazał że po zastosowaniu odpowiednich parametrów procesu uzyskuje się złącza o wysokich właściwościach eksploatacyjnych, spełniających warunki stawiane konstrukcjom lotniczym.

Realizacja zadań pracy wymagała wielu badań doświadczalnych. Doktorant wykonał dużą liczbę badań, opracował je, a wyniki zamieścił w pracy w postaci wykresów i tabel. Część wyników zamieścił w załącznikach. Wyniki są przedstawione w sposób przejrzysty i jakościowo perfekcyjnie dopracowane.

Rozważania teoretyczne dotyczące technologii FSW przedstawione w pierwszej części pracy znacznie poszerzają stan wiedzy w tym zakresie i świadczą o szerokim zainteresowaniu Doktoranta problemami tej technologii. Autor podał modele matematyczne opisujące istotne zjawiska towarzyszące zgrzewaniu tarciovemu z przemieszaniem. Dobre rozeznanie Doktoranta w podstawach teoretycznych procesu zgrzewania stanowi solidne podstawy do kontynuowania przez Niego w przyszłości problematyki tej technologii w zakresie modelowania matematycznego i numerycznego, chociaż ten zakres wiedzy teoretycznej nie jest konieczny do umieszczenia w tej pracy.

Realizacja poszczególnych zadań pracy była głównie podporządkowana ogólnemu celowi o charakterze użytkowym, a mianowicie wykonanie połączenia o właściwościach, które spełnia oczekiwania konstruktorów pojazdów lotniczych. Starannie zostały zaplanowane i przeprowadzone badania, w trakcie których został przebadany wpływ różnych parametrów procesu na własności mechaniczne i zachowanie materiału. Przeprowadzone badania pozwoliły określić stopień wpływu poszczególnych parametrów na efekt końcowy. Każda część badań podsumowana została wnioskami.

Zdobyte doświadczenia i wiedza przy realizacji procesu FSW były podstawą wykonania demonstratora technologii FSW w postaci dwóch części strukturalnych samolotu M28: belki przedniego podwozia i wręgi. Elementy o różnej grubości były zgrzewane w konfiguracji zakładkowej i występowały elementy platerowane. Dużym wyzwaniem przy planowaniu procesu, co należy podkreślić, było zaprojektowanie i wykonanie odpowiedniego oprzyrządowania mocującego zgrzewane blachy i kształtowniki, co dostarczyło dodatkowych informacji dla przebiegu technologii zgrzewania w warunkach przemysłowych.

Wykonane elementy demonstratora potwierdzają prawidłowość przyjętych przez Doktoranta zarówno parametrów procesu, jak i podejścia badawczego. Pokazuje, że możliwe jest wykonanie wielkogabarytowych elementów struktury lotniczej elementów cienkościennych za pomocą technologii FSW. Dużym sukcesem podczas wdrożenia

technologii FSW do zastosowań przemysłowych jest odpowiedni dobór parametrów technologicznych procesu i oprzyrządowania.

Wykonany demonstrator technologii FSW oznacza, że docelowy poziom technologii został osiągnięty i technologia może być zastosowana w przewidywanych dla niej warunkach przemysłowych. Zostały osiągnięte założenia projektowe i został osiągnięty prawie najwyższy poziom gotowości technologicznej.

Przedstawiona praca wychodzi naprzeciw oczekiwaniom przemysłu lotniczego. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano cenne informacje oraz wytyczne do poprawnego prowadzenia procesu zgrzewania. To inżynierskie podejście nie jest pozbawione również aspektów naukowych, które przejawiają się podczas badań i analizy wyników. Dotyczą zarówno procesu, jak i zachowania materiału. Wyniki swoich badań Doktorant publikował w liczących się czasopismach. Osobiście poznałam Doktoranta na konferencjach, gdzie przedstawiał swoje wyniki badań. Zawsze widoczna była duża wiedza i Jego osobiste zaangażowanie w prowadzonych badaniach.

Przedstawione w pracy wyniki badań, uzyskane na drodze drogiej i czasochłonnej pracy mogą posłużyć nie tylko jako wytyczne dla technologów i konstruktorów, ale mogą stanowić cenny materiał i bazę danych dla symulacji komputerowych.

Uwagi

Praca napisana jest czytelnie i starannie. Jednakże przy wnikliwej analizie pojawiają się pewne uwagi. Autor w rozdziale drugim na podstawie literatury przedstawia różne modele analityczne do opisu niektórych zjawisk procesu FSW. Do opisu zjawisk termomechanicznych proponuje za literaturą szereg opisów analitycznych. Jednakże interpretację podanych wzorów utrudnia brak podanych jednostek. Niektóre z cytowanych wzorów mają niejasności, które często wyjaśniają rysunki, lecz czasem niejasności zostają. Przykładowo: wzór (18) czym jest λ , a czym k . Warunek III rodzaju równania przewodzenia ciepła, wzór (19) i rysunek 2.15 jak rozumieć współczynniki h_1 i h_2 , wzór (22) i poniższa interpretacja wzoru: co to jest c , c_f , praca tarcia i połączone z tym wzory (23) i (24) itp. FSW jest procesem autogenicznym i szczególnej interpretacji wymagają w równaniu przewodnictwa ciepła przyjmowane objętościowe źródła ciepła. Niektóre wzory podane są w zapisie tensorowym, inne w zapisie inżynierskim. Dobrze byłoby utrzymać zapis matematyczny w jednej konwencji. Wielkość R , wzór (62), wzór Zennera – Holmona, str.53, wzór (71) i rys. 8.11, 8.62, rysunek 2.35 czy to jest ta sama wielkość?, czy tylko zbieżność przyjętych oznaczeń, jaki jest jej wymiar i znaczenie. Gdzie występuje stała materiałowa A

i jaki jest jej sens fizyczny (str. 47). Autor po każdej części badań podaje wnioski z przeprowadzonych badań, co bardzo ułatwia analizę danego zagadnienia. Jednakże bardzo przydatne byłoby zamieszczenie odniesień we wnioskach, dla interpretacji wyników potwierdzających formułowane wnioski pomimo, że analiza taka znajduje się w tekście.

Szczegółowa analiza rozprawy przyniosła trochę uwag szczegółowych, nie wpływających jednak na bardzo dobrą ocenę ogólną rozprawy. Biorąc pod uwagę indywidualny wkład Autora w realizację oryginalnych badań, ich opracowanie i dotychczasowy dorobek publikacyjny w tym zakresie, można uznać, że zasługuje na wyróżnienie.

Praca zawiera bogaty materiał dotyczący technologii FSW. Doktorant wykazał się dużą umiejętnością prowadzenia badań, a starannie i czytelnie przedstawione wyniki badań świadczą o Jego dużym zaangażowaniu w prowadzeniu badań oraz staranności badawczej i edytorskiej.

Wniosek końcowy

Praca doktorska mgra inż. Piotra Myśliwca stanowi wartościowy wkład zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i utylitarnego do rozwoju technologii FSW łączenia metali i stopów metali. Doktorant sformułował tezę pracy, przeprowadził bardzo dużą liczbę prób, zgromadził bardzo bogaty materiał badawczy i wyjątkowo starannie go przedstawił. Wykazał szeroką wiedzę w zakresie technologii FSW, prowadzonych badań i podał ciekawe wnioski.

Podjęta przez Doktoranta tematyka jest ciekawa i aktualna i stanowi, co trzeba podkreślić, podstawy do zastosowania praktycznego wyników badań w przemyśle. Wykonane elementy demonstratora potwierdzają, że możliwe jest wykonanie wielkogabarytowych elementów struktury lotniczej elementów cienkościennych za pomocą technologii FSW. Dużym sukcesem jest wdrożenie technologii FSW do zastosowań przemysłowych, co oceniam bardzo wysoko. Należy mieć nadzieję, że przedstawione w pracy wyniki badań zainteresują producentów konstrukcji i technologów w przemyśle lotniczym.

W mojej ocenie, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Myśliwca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w świetle obowiązującej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnioskuję jej dopuszczenie do publicznej obrony.

