

Dr hab. inż. Janusz Adamiec, prof. w Pol.Śl.
Instytut Nauki o Materiałach
Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Politechniki Śląskiej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Agnieszki Jędrusik** zatytułowanej:
**„Technologia cięcia, oczyszczania i spawania laserowego cienkich blach
ze stopu Inconel 718”**

1. UWAGI O WYBORZE TEMATYKI I TEZIE ROZPRAWY

Rozwój transportu lotniczego powoduje konieczność budowy coraz większej liczby samolotów. Samoloty powinny się charakteryzować jak najmniejszą masą, czego przykładem jest ultranowoczesny Boeing Dreamliner, jak również silnikami o coraz większej sprawności. Osiągnięcie wyższych sprawności silników jest możliwe dzięki zastosowaniu wyższych temperatur spalania, co wymusza stosowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i nowych materiałów. Jednym z takich rozwiązań jest zastosowanie stopów na osnowie niklu np. Inconel 718 oraz nowych technologii, związanych z wykorzystaniem skoncentrowanej energii wiązki laserowej.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Agnieszki Jędrusik pt: „**Technologia cięcia, oczyszczania i spawania laserowego cienkich blach ze stopu inconel 718**” całkowicie wpisuje się w ten kierunek badań i stanowi istotne uzupełnienie wiedzy z zakresu wpływu warunków technologicznych procesu cięcia i spawania laserowego na strukturę i właściwości cienkich blach ze stopu Inconel 718 oraz złączy spawanych z tego stopu.

Na podstawie studiów literaturowych oraz doświadczeń zdobytych w swojej karierze zawodowej doktorantka założyła, że „wymagana jakość i właściwości użytkowe złączy spawanych ze stopu Inconel 718, uzyskiwane w dotychczasowej technologii można będzie również uzyskać przy zastosowaniu zintegrowanej technologii spawania laserowego (cięcie, oczyszczanie, spawanie) pod warunkiem odpowiedniego dobrania parametrów wiązki laserowej w poszczególnych etapach wytwarzania konstrukcji z blach z tego stopu. Nowo opracowana technologia powinna zapewnić znaczący wzrost jakości złączy spawanych cienkich blach z tego stopu przy zachowaniu porównywalnych lub lepszych właściwości mechanicznych”. Przedstawiona teza jest zbyt ogólna i nie w pełni wynika z przeglądu aktualnego stanu wiedzy, głównie w obszarze rozwiązań technologicznych i materiałowych stosowanych w konstrukcjach dla lotnictwa. Jednak doktorantka konsekwentnie dążyła w pracy do udowodnienia tej tezy.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa doktorska została podzielona na 7 numerowanych rozdziałów, obejmujących: analizę literatury, badania własne dotyczące głównie procesu cięcia i spawania metodą GTAW oraz spawania laserowego cienkich blach ze stopu Inconel 718, wyniki badań materiałowych ze szczególnym uwzględnieniem właściwości mechanicznych złączy bez obróbki cieplnej i złączy po obróbce cieplnej. Całość została zakończona analizą wyników badań i wnioskami końcowymi. Praca obejmuje zajmuje 137 stron tekstu. Zamieszczono w niej 61 rysunków w postaci zdjęć, schematów, wykresów i mikrostruktur oraz 21 tabel.

Przedstawiony przez doktorantkę przegląd literatury i ocena aktualnego stanu wiedzy zostały wykonane ogólnie, bez podania konkretnych danych materiałowych, dotyczących stopów niklu oraz danych technologicznych, opisujących metody spawania - głównie spawania GTAW i spawania laserowego.

Cel pracy, zakładający określenie struktury i właściwości złączy cienkich blach ze stopu niklu Inconel 718, opracowanie modelu liniowego współzależności pomiędzy parametrami spawania a właściwościami złącza i w konsekwencji wyznaczenie parametrów technologii zintegrowanej cięcia, oczyszczania i spawania laserowego jest ogólnikowy i zgodny z przedstawionym planem i zakresem badań (rys. 2.14).

W celu uzasadnienia tezy mgr inż. Agnieszka Jędrusik zrealizowała szeroki program badań, który obejmował:

- określenie struktury geometrycznej powierzchni blach ciętych laserem i ciętych mechanicznie,
- próby technologiczne spawania metodą GTAW oraz spawania laserowego,
- opis jakościowy i ilościowy struktury złączy spawanych ze stopu Inconel 718,
- ocenę właściwości mechanicznych złączy przed i po obróbce cieplnej,
- badania sprawności cieplnej procesu spawania metodą GTAW i spawania laserowego,
- opracowanie modelu liniowego procesu spawania,
- opracowanie wytycznych technologicznych zintegrowanej technologii cięcia, czyszczenia i spawania laserowego elementów wykonanych z blach cienkich ze stopu Inconel 718 przeznaczonych dla lotnictwa.

Na podkreślenie zasługuje szeroka współpraca doktorantki z laboratoriami zarówno naukowo-badawczymi w Katedrze Przeróbki Plastycznej, Katedrze Odlewnictwa i Spawalnictwa PRZ jak również z laboratoriami przemysłowymi m.in. w WSK "PZL Rzeszów" S.A. i w Inkubatorze Technologicznym w Stalowej Woli).

Wyniki swoich badań doktorantka zebrała w podsumowaniu, co pozwoliło jej sformułować trzynaście wniosków, które zostały podzielone na wnioski poznawcze (3)

i wnioski o charakterze utylitarnym (10). Należy zatem stwierdzić, że cel i zakres rozprawy został zrealizowany i rozprawa spełnia wymagania stawiane badaniom realizowanym w ramach pracy doktorskiej.

3. UWAGI FORMALNE

Czytając tekst rozprawy można jednak odnieść wrażenie, że była finalizowana w dużym pośpiechu. Dowodzą tego liczne zdania i wyrażenia, których styl odbiega od norm obowiązujących w języku technicznym. Doktorantka często stosuje nieprecyzyjne opisy właściwości materiałów i zjawisk, np. "dużych właściwościach..." (str. 14 w. 19), "specyficznych warunkach dużego gradientu temperatury..." (str. 16, w. 7,8), "ograniczenia efektywnego udziału dyfuzji ..." (str. 16, w. 9), " prąd stały stabilny ..." (str. 19, w. 14), "stabilne szczeliny ..." (str. 23, w. 6), "Lasery stałe..." (str. 24, w.1), "stylu spawania ..." (str. 28, w. 13), itp. Uwagę zwraca również słaba jakość rysunków (np. rys. 2.1, 2.2, 2.3 2.5 2.7, 2.13, itd.), co utrudnia ich interpretację i zrozumienie treści przedstawionych przez doktorantkę. Najprawdopodobniej z tego samego powodu doktorantka nie do końca precyzyjnie powołuje źródła literaturowe, np. rys. 2.8 - jest powołanie na poz. lit. 31 a powinno być powołanie na Poradnik Inżyniera - Spawalnictwo, tom 2., wyd. WNT 2005, praca pod redakcją J. Pilarczyka, podobnie na rys 2.10 oraz np. rys. 2.9 - jest powołanie na poz. 20 a powinno być na materiały informacyjne firmy Trumpf GmbH oraz niewłaściwie zdefiniowane są źródła literaturowe np. poz. 86. jest Lechosław T., Żurek Z.: Mikrostruktura złączy spawanych odlewanych stopów magnezu wykonanych wiązką laserową, Przegląd Mechaniczny nr 4, 2013 a powinno być Tuz L. ..., oraz poz. 76 - jest Adamiec P.: Poradnik Inżyniera -Spawalnictwo, WNT, Warszawa 2005 a powinno być praca zbiorowa pod redakcją J. Pilarczyka ... W zestawieniu literatury znajdują się również powtórzenia np. poz. 48 i 54.

Wydaje się również, że bardziej korzystny byłby jednoznaczny, klasyczny układ pracy z opisaną metodyką wszystkich badań, zarówno prób technologicznych jak i badań materiałowych w jednym rozdziale, ponieważ doktorantka w swojej pracy zebrała częściowo metodykę badań w rozdziale "Materiał i metodyka badań" a następnie powtórzyła opisy metodyki w poszczególnych rozdziałach. Myślę, że uwagi formalne do pracy pomogą w dalszej karierze naukowo-badawczej doktorantki.

4. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W części teoretycznej doktorantka przedstawiła charakterystykę stopów na osnowie niklu, ze szczególnym uwzględnieniem stopów stosowanych do wytwarzania elementów dla przemysłu lotniczego. Mgr inż. Agnieszka Jędrusik w dość ogólnikowy sposób wykazała, że

jednym z najczęściej stosowanych stopów na elementy dla lotnictwa jest stop niklu Inconel 718. Celowym wydaje się uzupełnienie tego fragmentu rozprawy o schemat podziału stopów niklu oraz podanie liczbowo poziomu właściwości mechanicznych i fizykochemicznych dla poszczególnych grup tych stopów, co pozwoli na lepsze wykazanie konieczności stosowania stopu Inconel 718 w konstrukcjach lotniczych.

Następnie przedstawiono technologie cięcia i spawania cienkich blach metodą GTAW oraz laserowo. Autorka ogólnie opisała podstawowe technologie spawania GTAW oraz spawania laserowego z uwzględnieniem nowych technologii spawania z podziałem wiązki laserowej i spawania hybrydowego. Istotnym uzupełnieniem tej części rozprawy byłoby zestawienie podstawowych parametrów technologicznych spawania oraz zalet tych procesów, jak również uwzględnienie możliwości technologicznych laserów dyskowych i laserów włóknowych. Lasery te są obecnie coraz częściej stosowane w procesach cięcia i spawania ze względu na ich sprawność oraz możliwości robotyzacji i automatyzacji zintegrowanych procesów technologicznych.

Doktorantka w podsumowaniu stwierdziła, że elementy cienkościennie ze stopu Inconel 718 w WSK PZL -Rzeszów S.A. są obecnie cięte mechanicznie na gilotynach i łączone poprzez spawanie metodą GTAW. Wykazała, że zastosowanie technologii cięcia i spawania laserowego powinno zapewnić uzyskanie złączy spawanych na poziomie właściwości mechanicznych połączeń wykonanych metodą GTAW lub lepszych. Stwierdzenie to stało się podstawą do sformułowania tezy rozprawy.

W dalszej części rozprawy mgr inż. Agnieszka Jędrusik sformułowała cele pracy oraz przedstawiła plan badań. W tym miejscu konieczne jest wyjaśnienie przyczyn przedstawienia celów pracy w części podsumowania oraz w rozdziale dotyczącym programu badań. Analiza zakresu badań wskazuje na dojrzałość badawczą doktorantki. Zakres badań jest logiczny i ukierunkowany na potwierdzenie tezy. Na podkreślenie zasługuje szeroka gama wykorzystanych technik badawczych, zarówno do charakterystyki materiałów podstawowych, jak i opisu właściwości wykonanych złączy spawanych. Realizacja programu badań umożliwiła doktorantce potwierdzenie tezy oraz wyznaczenie wytycznych technologicznych zintegrowanego procesu cięcia, czyszczenia i spawania cienkich blach ze stopu Inconel 718 w warunkach przemysłowych.

Badania własne rozpoczyna rozdział, w którym doktorantka przedstawiła program badań obejmujący cele naukowe i cele praktyczne. Wydaje się, że informacje te można było umieścić w rozdziale "Podsumowanie stanu zagadnienia, cel i zakres pracy". Następnie w sposób ogólny scharakteryzowano materiał i metodykę badań. W rozdziale opisano urządzenia i stanowiska badawcze, które wykorzystano w badaniach. Opis jest szczegółowy

i pozwala na dobre zorientowanie się w metodyce badawczej. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że blachy wykorzystane w badaniach powinny być jednoznacznie opisane zarówno w zakresie składu chemicznego, jak również właściwości mechanicznych z uwzględnieniem grubości blach oraz poszczególnych wytopów. Nie jest dobrą praktyką uśrednianie składu chemicznego dla różnych wytopów i różnych wyrobów (tabl. 4.1). Należy również ujednolicić jednostki zastosowane do opisu technologii spawania, np. prędkość spawania metodą GTAW podano w mm/min a prędkość spawania laserowego w mm/s. Niejasne jest również określenie natężenia prądu spawania w metodzie GTAW - 39A/80ms lub 20A/80ms (str. 40).

Ważnym elementem pracy było opracowanie modelu liniowego procesu spawania cienkich blach ze stopu Inconel 718, który po pewnych udoskonaleniach może stanowić narzędzie do projektowania technologii łączenia tego typu elementów.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni po cięciu laserem i cięciu mechanicznym. Wyniki w tej części pracy powinny być odniesione do standardowych parametrów oceny jakości powierzchni po cięciu stosowanych w przemyśle. Umożliwiłoby to porównanie jakości powierzchni pomiędzy różnymi technologiami cięcia.

Na podkreślenie zasługuje rozdział pracy, opisujący badania i wyniki oceny sprawności cieplnej procesu spawania. W rozdziale tym doktorantka wykazała, jaka część energii liniowej wiązki laserowej oraz łuku elektrycznego jest wykorzystywana do topienia łączonych blach. Wyniki te są istotnym elementem uzupełniającym wiedzę w zakresie procesów spawalniczych.

Pewne zastrzeżenia budzi opis struktury złączy spawanych. Wyniki badań strukturalnych, przedstawione w rozdziale "Badania metalograficzne i pomiary twardości złączy spawanych blach" nie są w pełni uzasadnione. Dotyczy to głównie badań ilościowych struktury, tj. wyznaczenia odległości między gałęziami drugiego rzędu "ziaren dendrytycznych" spoiny oraz maksymalnej średniej średnicy ziarna w SWC. W opisie metodyki należy precyzyjnie podać jaka była liczba pomiarów, która zapewnia powtarzalne i odtwarzalne wyniki badań. Wyjaśnienia wymagają również wyniki mikroanalizy składu chemicznego, wykonane metodą EDS (rys.5.20, 5.21). W jaki sposób był wyznaczany udział masowy węgla oraz na jakiej podstawie identyfikowano fazy w strukturze?

Następnie doktorantka przeprowadziła pomiary twardości w złączu spawanym oraz wykonała próby gięcia i statyczną próbę rozciągania. Wyniki tych badań pozwoliły na porównanie właściwości mechanicznych połączeń wykonanych metodą GTAW oraz

spawanych laserowo, zarówno przed obróbką cieplną jak również po obróbce cieplnej. W pracy autorka nie wyjaśniła zmiany charakteru krzywej rozciągania dla złącza spawanego metodą GTAW po obróbce cieplnej (rys. 5.25c). Uzupełnieniem badań były badania fraktograficzne próbek po zerwaniu. Stwierdzono, że przelom we wszystkich przypadkach był plastyczny. Należy wyjaśnić co autorka rozumie przez określenie przelomów jako "ciągliwe , gdzie dominują pęknięcia łupliwe i rozrywanie mostków międzywarstw" (str. 112, w.4-5).

Ważnym elementem badań była ocena odporności na pełzanie złączy spawanych laserowo w próbach skróconych. Autorka na podstawie analizy literatury oraz wymagań konstrukcyjnych dobrała parametry próby i zaprojektowała wymiary geometryczne próbek. Przeprowadzone badania wykazały, że złącza spawane laserowo charakteryzują się lepszą odpornością na pełzanie w warunkach próby od złączy wykonanych metodą GTAW.

Zrealizowany program badań oraz uzyskane wyniki, które zostały podsumowane w rozdziale 6, uzasadniają sformułowane wnioski dotyczące cięcia i spawania laserowego. Jedynie wnioski technologiczne, dotyczące czyszczenia nie znajdują uzasadnienia w przeprowadzonych badaniach. Należy jednak podkreślić, że uzyskane wyniki mogą stanowić wytyczne technologiczne dla inżynierów konstruktorów i inżynierów technologów do projektowania nowego zintegrowanego procesu cięcia i spawania elementów ze stopu Inconel 718.

5. UWAGI KOŃCOWE

Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Jędrusik jest oryginalnym rozwiązaniem problemu technologicznego jakim było opracowanie technologii cięcia i spawania laserowego cienkich blach ze stopu Inconel 718. Przedstawione w pracy wyniki badań materiałowych, zarówno charakterystyki materiałów podstawowych, jak i złączy spawanych oraz ocena ich właściwości mechanicznych, wskazują na ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w zakresie inżynierii materiałowej oraz w obszarze zaawansowanych technologii materiałowych. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością oraz umiejętnością praktycznego zastosowania różnorodnych narzędzi badawczych. Teza rozprawy została udowodniona, a cele zarówno o charakterze poznawczym, jak i użytkowym zostały osiągnięte.

Stwierdzam zatem, że praca spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 18.03.2011r., i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Agnieszki Jędrusik do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

