

Kraków 09.09.2015

Prof. dr hab. inż. Edmund Tasak

30-149 Kraków ul. Balicka 14B/40

Tel. kom. 692-770-907

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Jędrusik pt. „*Technologia cięcia, oczyszczania i spawania laserowego cienkich blach ze stopu Inconel 718*”, opracowana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej (pismo RM-530-13-02-2015 z dnia 16.06.2015)

Wstęp

Temat pracy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Jędrusik dotyczy poszukiwania konkurencyjnych technologii wytwarzania metodami spawalniczymi elementów konstrukcyjnych ze stopów niklu eksploatowanych w wysokich temperaturach. Jednym z takich stopów jest stop Inconel 718. Podstawową technologią wytwarzania elementów z tego stopu jest cięcie i czyszczenie mechaniczne oraz spawanie łukiem elektrycznym metodą GTAW. Doktorantka w swojej pracy podjęła się zbadania możliwości zastosowania konkurencyjnej metody przygotowania elementów do spawania oraz spawania wiązką laserową. Praca była realizowana w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Dowodzi to o aktualności tematyki recenzowanej pracy doktorskiej.

Charakterystyka pracy

Recenzowana praca ma typowy układ prac doktorskich. Część literaturowa obejmuje 37 str. maszynopisu, co stanowi około 28% całości pracy i jest w granicach przyjętych dla tego typu prac (30÷40%). W części literaturowej (rozdział 1) doktorantka scharakteryzowała stopy niklu stosowane w przemyśle lotniczym ze szczególnym uwzględnieniem stopów przerabianych plastycznie. Opisała fazy występujące w tych stopach oraz zakresy zastosowań stopów typu Inconel. Mimo, że rozdział ten obejmuje 11 stron jest treść jest wystarczająca do scharakteryzowania materiału, na którym były prowadzone badania. Źródła ciepła stosowane do w procesie spawania zostały opisane w rozdziale 2. Scharakteryzowano w nim zjawiska zachodzące w jeziorce ciekłego metalu

przy spawaniu metodą GTAW, działanie łuku elektrycznego oraz przewodność elektryczną i cieplną gazów osłonowych. Szczegółowo został scharakteryzowany strumień światła laserowego oraz sposoby spawania z wykorzystaniem wiązki laserowej. Podsumowanie stanu zagadnienia oraz teza i cel pracy zostały przedstawione w rozdziale 3. W rozdziale tym doktorantka stwierdza, że istnieje możliwość zastąpienia tradycyjnej metody przygotowania elementów do spawania i spawania metodą GTAW zintegrowaną technologią przygotowania krawędzi i spawania wiązką laserową. Na temat tej technologii brak jest w literaturze danych czemu nie należy się dziwić, bowiem wszelkie nowości technologiczne są ściśle chronione i nie publikowane. Doktorantka stwierdza również, że wprowadzenie zintegrowanej technologii cięcia, czyszczenia i spawania laserem skróciłoby czas realizacji procesu produkcyjnego.

W oparciu o zebrany materiał i wstępne badania postawiono tezę **„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, czyszczenie, spawanie) pod warunkiem odpowiedniego dobrania parametrów wiązki laserowej w poszczególnych etapach wytwarzania konstrukcji z blach tego stopu. Nowo opracowana technologia powinna zapewnić znaczący wzrost jakości złączy spawanych cienkich blach z tego stopu przy zachowaniu porównywalnych lub lepszych właściwości mechanicznych”**.

Teza jest sformułowana poprawnie.

Dla potwierdzenia postawionej tezy doktorantka postawiła następujące cele:

- zbadać i określić budowę strukturalną i właściwości mechaniczne złączy przed i po obróbce cieplnej,
- wykazać w formie modelu matematycznego współzależność pomiędzy parametrami spawania a wytrzymałością doraźną,
- opracować parametry dla technologii zintegrowanej cięcia, czyszczenia i spawania laserowego.

Plan i zakres badań został przedstawiony w bardzo czytelny sposób na rysunku 2.14.

W rozdziale 4 (badania własne) doktorantka przedstawiła szczegółowy program badań oraz cele naukowe i cel praktyczny, opisała materiał i metodykę badań, sposób oceny struktury geometrycznej powierzchni po cięciu laserowym i mechanicznym, przygotowanie próbek i przeprowadzenie badań kalorymetrycznych, obróbkę cieplną stopu Inconel 718. Szczegółowo (w rozdziale 4.3) został opisany plan realizacji parametry doświadczeń oraz model liniowy procesu spawania blach cienkich. W podsumowaniu tego rozdziału doktorantka stwierdza, że największe różnice między wytrzymałością obliczoną z modelu a wytrzymałością uzyskaną w próbach występuje dla blachy 0,7 mm, co może świadczyć o nieadekwatności tego modelu przy małych wartościach

czynników x_1 , x_2 , x_3 . Dla blach grubszych wyniki z prób są porównywalne z wynikami obliczeń, co wskazuje na adekwatność modelu w przypadku blach grubszych.

Wyniki badań struktury geometrycznej zostały opisane w rozdziale 5.1. Stwierdzono, że cięcie laserem daje prawie jednakowe wysokości nierówności w zakresie $19,4 \div 28,2 \mu\text{m}$ przy niewielkim rozrzucie parametrów amplitudowych. Po cięciu mechanicznym wysokość nierówności dla blachy o grubości 1,2 mm jest czterokrotnie większa i wynosi $83,09 \mu\text{m}$. Lepsza jakość krawędzi ciętej laserem będzie miała istotny wpływ na dopasowanie elementów podczas spawania.

Badania sprawności cieplnej przy użyciu kalorymetru wykazały, że przy spawaniu metodą GTAW o wartości współczynnika η_c decydują natężenie prądu i prędkość spawania. Ze wzrostem prędkości spawania wartość współczynnika sprawności cieplnej η_c maleje i ma przeważnie charakter liniowy. Przy spawaniu laserowym tylko ok. 9-21% ciepła generowana przez laser jest przekazywana do przetopienia krawędzi i utworzenia złącza.

Badania metalograficzne i charakterystyka mikrostruktury zostały przedstawione w rozdziale 5.3. Dokumentacja poszczególnych obszarów złącza spawanego została pokazana poprawnie. Wątpliwości budzą jednak niejednakowe warunki trawienia materiału rodzimego. Np. na rys. 5.11a i 5.12a, 5.15a, 5.16a materiał rodzimy nie jest wytrawiony a na rys. 5.13a i 5.14a jest wytrawiony.

Niejasne są również wyniki pomiarów wielkości ziaren przedstawione w tabeli 5.8. Wielkość ziaren materiału rodzimego wynosi ok. $100 \mu\text{m}$ natomiast w SWC jest 4-6 krotnie mniejsza ($15 \div 25 \mu\text{m}$). Co się stało, że ziarna się rozdrobniły przecież w stopach niklu nie ma przemian fazowych.

Wątpliwości budzi również identyfikacja faz występujących w strukturze na str. 101 w oparciu o wyniki mikroanalizy przedstawione na rys. 5.21. Czy może to być faza σ skoro zawiera mniej niobu niż jest w składzie blachy. Skład tych faz jest porównywalny ze składem blachy.

W tabeli 5.9 podano wyniki pomiarów mikrotwardości. Nie skomentowano jednak dlaczego dla blachy 0,9mm twardość w spoinie i w SWC ($165 \text{HV}_{0,2}$) jest znacznie niższa niż w materiale rodzimym ($230 \text{HV}_{0,2}$). Dla pozostałych grubości twardości w SWC i w materiale rodzimym są takie same, co jest wynikiem prawidłowym. Na str. 47 podano, że twardość mierzono przy obciążeniu 20N. Czy jest to mikrotwardość?

W tabeli 5.11 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości złączy spawanych. Brak jednak komentarza do tych wyników. Dlaczego po obróbce cieplnej blacha o grubości 1 mm ma większą wytrzymałość i większe wydłużenie przy tej samej granicy plastyczności jak w stanie dostawy. Nie skomentowano również bardzo niskiego wydłużenia (ok. 4%) złączy spawanych metodą GTAW i obrabianych cieplnie. Brak komentarza do innego charakteru wykresu na rys. 5.25c.

W rozdziale 8 przedstawiono analizę wyników badań. Analiza struktury geometrycznej ciętej powierzchni została przeprowadzona poprawnie. Wykazano, że po cięciu mechanicznym parametry SGP ciętych mechanicznie blach są około czterokrotnie większe od parametrów SGP po cięciu laserem. Dopasowanie elementów do spawania jest zatem trudniejsze, co wpływa na większą wadliwość wykonanych złączy spawanych (duże wklęsnięcia lica, podtopienia lica, braki przetopów itp.). Po cięciu laserem dobre jakościowo złącza spawane uzyskiwano przy zastosowaniu stosunkowo niewielkich sił docisku (435-40N). Podobnie poprawnie przeanalizowano badanie sprawności cieplnej, dobór parametrów spawania oraz wyniki badań z próby wysokotemperaturowego pełzania. Badania wykazały, że złącza spawane wykonane laserem mają większą żarowytrzymałość niż materiał rodzimy, co dowodzi słuszności postawionej tezy.

W oparciu o przeprowadzone badania poprawnie opracowano proces technologiczny przygotowania półfabrykatu oraz proces technologiczny czyszczenia i spawania laserowego. Pracę kończą poprawnie opracowane wnioski poznawcze oraz wnioski o charakterze użytkowym (rozdział 7). Szczególnie ważny jest wniosek ostateczny o charakterze użytkowym, który w całości potwierdza słuszność postawionej tezy.

Pozostałe uwagi do pracy

Przedstawiona do recenzji praca oprócz uwag merytorycznych przedstawionych wcześniej zawiera jeszcze inne mniej istotne usterki.

Przy wyliczaniu pozycji literaturowych brak spacji.

Str. 19. w.2d. jest „zjawisko katodowego rozpuszczania tlenków... „ a winno być „zjawisko katodowego rozpraszania tlenków”

Str. 28. w.13g. W zdaniu „W trakcie procesu spawania następuje przesunięcie się wzdłuż styku spawanych elementów.” - czegoś brakuje.

Str. 40. w.13d. Co to za jednostka przy natężeniu prądu 29A/80ms ?.

Str. 49. w.9g. „Pierwszy przesycania realizowano przez nagrzewanie blach z szybkością ok. 300°C/godz.....” nie podano do jakiej temperatury.

Str. 65. Tabela 4.7. Co oznacza w 4 kolumnie „2/1”.

Str. 83. w.11d. Błędnie powołanie się na rys. 5.6.b. Winno być rys. 5.5b.

Str. 86. w.3g. „...i dwustopniowe starzenie w 720°C/8h/H₂O.” Nie podano drugiego stopnia starzenia.

Str. 111. Rys. 5.28. W podpisie rys. 5.28 podano „...z ciągłymi i płaskimi strefami pęknięcia łupliwego (b). Ten stop nie pęka mechanizmem łupliwym.

Str. 112. w.2d. Jak rozumieć zdanie. „Po obróbce cieplnej przełomy blach charakteryzują przełomy ciągłe, gdzie dominują pęknięcia łupliwe i rozrywanie mostków międzywarstw (rys. 5.28c).

- Str. 113. w.2g. Jak rozumieć zdanie. „Przełomy obejmujące obszary SWC mają przeważnie charakter międzykrystaliczny z niewielkim udziałem obszarów ciągliwych.”
- Str. 120. w.16g. Niewłaściwie przywołany rys. 5.20a, gdyż jest to materiał rodzimy. Winno być rys. 5.20c.
- Str. 122. W trzeciej kolumnie w tabelce zamiast „prędkość spawania” winno być „prędkość cięcia”.
- Str. 125. w.16.g. w zdaniu jest „...posiadają o około 50% wytrzymałość..” winno być posiadają o około 50% większą wytrzymałość.
- Str. 128. Poz. lit. 23. Brak numeru zeszytu.
- Str. 129. Poz. lit. 40 taka sama jak poz. 23.
- Str. 131. Poz. lit, jest Lechosław T., winno być lub L. Tuz.
- Str. 132. Poz. lit. 89. Jest Hernos A, winno być Hernas A.

Ocena końcowa

Praca mgr inż. Agnieszki Jędrusik stanowi samodzielne oryginalne opracowanie naukowe przedstawiające badania nad opracowaniem konkurencyjnej metody przygotowania elementów do spawania oraz spawania wiązką laserową.

Dokonany przegląd literatury, przeprowadzone badania, ich interpretacja i wyciągnięte wnioski dowodzą o wysokich umiejętnościach doktorantki, która zdobyłą wiedzę naukową potrafi zastosować i wykorzystać w praktyce.

Uzyskane wyniki badań zostały prawidłowo udokumentowane i zinterpretowane. Niektóre interpretacje są jednak dyskusyjne, co powinno być wyjaśnione w czasie rozprawy. Również pozostałe wymienione wyżej uwagi nie obniżają istotnie pozytywnej oceny całości pracy. Cennym osiągnięciem doktorantki jest możliwość wykorzystania wyników badań w praktyce i wdrożenia konkurencyjnej metody przygotowania i spawania wiązką laserową cienkich blach ze stopu Inconel 718. Praca stanowi istotny wkład w rozwój inżynierii wytwarzania elementów eksploatowanych w wysokich temperaturach.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Jędrusik spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.