

Dr hab. inż. Joanna Radziejewska, prof. PW
Wydział Inżynierii Produkcji
Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 85, Warszawa
Mail: jora@meil.pw.edu.pl

Warszawa, dn. 28 12 2017

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Banaka pt. „ Analiza pola temperatur i kształtu strefy przetopionej w procesie spawanie laserowego”

Rozprawa doktorska dotyczy istotnego w budowie maszyn zagadnienia jakim jest zapewnienie wysokiej jakości, trwałości i niezawodności połączeń spawanych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach.

Jednym z głównych nurtów tematów prac dotyczących obróbek laserowych są zagadnienia związane z matematycznym opisem zagadnień związanych z transportem ciepła i masy w strefie obróbki. Rozkład temperatury na powierzchni metalu oraz głębokość strefy przetopienia ma istotne znaczenie na efekty obróbki laserowej. Są to czynniki, które determinują jakość i wytrzymałość złączy spawanych.

Zagadnieniu oddziaływania promieniowania laserowego na materiały poświęcono wiele prac teoretycznych i doświadczalnych. Ich celem jest wyjaśnienie mechanizmów transportu ciepła i masy podczas topienia materiałów wiązką laserową. Poznanie tych zjawisk ma szczególnie istotne znaczenie w przypadku spawania, stopowania czy wtapiania. Występowanie jednocześnie wielu procesów, tj. nagrzewania, topnienia, ruchu cieczy, procesów dyfuzyjnych, parowania materiału, krystalizacji i szybkiego stygnięcia powoduje, że przez długi okres brak było kompleksowego opisu matematycznego tych zjawisk. Pierwsze modele matematyczne uwzględniały część zjawisk fizycznych występujących podczas procesu przetapiania laserowego. Do opisu wykorzystywane są często modele opracowane dla płytkiego spawania materiałów innymi, konwencjonalnymi metodami. Badania eksperymentalne w tym przypadku często są zawodne, ze względu na występowanie bardzo dużych prędkości procesu i wysokich temperatur. W przypadku badań doświadczalnych najczęściej obserwuje się skutki procesów zachodzących w trakcie obróbki i na tej podstawie

wyciągane są wnioski o zjawiskach, które odgrywają dominującą rolę podczas topienia materiału wiązką laserową.

Na początku lat 80-tych przedstawione zostały pierwsze analityczne opisy procesów zachodzących w ciekłym metalu pod wpływem działania skoncentrowanego źródła energii. Pozwoliły one na poznanie procesów występujących podczas topienia materiału. Modele te zostały opracowane przy licznych założeniach upraszczających. Na podstawie tych prac stwierdzono, że głównym czynnikiem decydującym o transporcie materiału w ciekłym metalu są siły napięcia powierzchniowego.

Obecnie proces przetapiania laserowego modelowany jest głównie numerycznie, najczęściej są to modele 3D, w którym uwzględnia się przepływ Marangoni'ego oraz konwekcję termokapilarną, a ruch cieczy opisywany jest, jako przepływ turbulentny k- ϵ lub laminarny. Pozwalają one na uwzględnienie z dość dużą dokładnością większości zjawisk występujących przy przetapianiu materiału wiązką laserową i uzyskanie informacji dotyczących rozkładu temperatury, kształtu i wymiarów przetopu, rozkładu elementów domieszek i procesów zachodzących w trakcie topnienia i krzepnięcia. W wielu przypadkach przetapiania laserowego oraz konwencjonalnego spawania kształt strefy przetopionej odbiega jednak od obliczeń teoretycznych. Do tej pory brak jest teorii jednoznacznie wyjaśniającej to zjawisko. Najczęściej rozbieżność wyników teoretycznych i doświadczalnych tłumaczona jest wpływem pierwiastków powierzchniowo czynnych na ruch ciekłego metalu oraz inną bardziej złożoną strukturą przepływu cieczy w trakcie procesu niż założona teoretycznie. Rozbieżność wyników może wynikać także z obecności tlenków na powierzchni materiału oraz braku dokładnych danych zmian właściwości fizycznych materiałów wraz z temperaturą np. rzeczywistego współczynnika absorpcji w wysokich temperaturach.

Wciąż publikowane są prace, których celem jest wyjaśnienie rozbieżności wyników dotyczących głównie kształtu strefy przetopienia. Zagadnienie to jest istotne gdyż zmiany kształtu i głębokości przetopienia mogą prowadzić do powstawania wad elementów spawanych.

Recenzowana rozprawa doktorska miała na celu opracowanie modeli numerycznych procesu spawania laserowego materiałów różniącymi się właściwościami fizycznymi a w szczególności temperaturą topienia. Problematykę pracy uważam za aktualną i uzasadnioną szczególnie w aspekcie użytkowym.

Opis pracy

Rozprawa doktorska złożona jest z ośmiu rozdziałów. Część pierwsza to wprowadzenie w którym przedstawiono motywację podjęcia pracy i jej cele. Zakończona jest tezą. W części drugiej przedstawiono genezę i stan wiedzy. Rozdziały 3 - 7 dotyczą modelowania numerycznego procesu spawania laserowego. W części 3 zaprezentowano podstawowe równania zachowania masy, pędu, energii. Przedstawiono model topnienia, przepływu turbulentnego oraz napięcia powierzchniowego zastosowane w obliczeniach a także warunki brzegowe. W części czwartej zaprezentowano opis właściwości fizycznych materiałów wykorzystanych do obliczeń. Część piąta to analiza numeryczna procesu spawania laserowego materiałów różnoimiennych o zbliżonych temperaturach topienia, stali węglowej oraz stali kwasoodpornej 304. Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem otrzymanych wyników.

Rozdział 6 zawiera model numeryczny procesu spawania laserowego materiałów różnoimiennych o znacząco różnych temperaturach topienia. W części siódmej zaprezentowano model spawania laserowego materiałów różnoimiennych świec zapłonowych z nakładkami z metali szlachetnych Pt-Ni. Układ pracy jest analogiczny jak w przypadku rozdziału 6. Część ósma (strony 93-95) to podsumowanie i wnioski. Część dziewiąta zawiera spis literatury - 90 pozycji. Praca zawiera spis ilustracji i tabel oraz wykaz ważniejszych symboli.

Ocena części merytorycznej pracy

Część merytoryczna pracy dotyczy numerycznego modelu spawania laserowego przewodnościowego. W pracy analizowano trzy przypadki spawania różnoimiennych materiałów: dwóch gatunków stali o zbliżonych temperaturach topienia oraz znacząco różnych temperaturach topienia: Ir-Ni, Ni-Pt. Do obliczeń wykorzystano solver Fluent. Do opisu zjawisk fizycznych występujących w trakcie procesu spawania wykorzystano prawo zachowania masy i energii, równanie transportu masy oraz model przepływu turbulentnego. W modelu uwzględniono zjawiska związane ze zmianami napięcia powierzchniowego wraz z temperaturą oraz straty energii związane z konwekcją i radiacją. W obliczeniach uwzględniono również zmiany właściwości materiałów wraz ze wzrostem temperatury. Model obróbki posiada kilka ograniczeń, przede wszystkim nie uwzględnia deformacji powierzchni cieczy w trakcie obróbki. Wynika to z narzuconych przez oprogramowanie FLUENT ograniczeń oraz problemu zbieżności rozwiązania. Obliczenia zostały wykonane w geometrii 3D na siatce o rozmiarach zgodnych z wymiarami oryginalnych próbek

Model numeryczny dla pierwszego przypadku spawania przewodnościowego dwóch stali został opracowany przy założeniu prostokątnego rozkładu energii promieniowania i jednego zestawu parametrów procesu tj. gęstości mocy i prędkości posuwu. Autor nie uzasadnił w pracy wyboru parametrów procesu i ich zakresów do obliczeń i weryfikacji doświadczalnej. Przeprowadzone badania wskazują na dobrą zgodność uzyskanych wyników numerycznych i doświadczalnych. Brakuje jednak poszerzonej analizy wyników badań i próby wyjaśnienia, dlaczego kształt otrzymanej spoiny odbiega od modelowej. Może być to spowodowane przyjętym do obliczeń uproszczonym rozkładem oraz wpływem pierwiastków powierzchniowo czynnych. Brak jest komentarza na ten temat. Nie jest jasne sformułowanie, że „doszło do całkowitego wymieszania się materiałów” str. 62. W podsumowaniu rozdział 5.7 stwierdzono, że nastąpiło wymieszanie składników w stopniu zadowalającym. Brakuje sformułowania kryterium dostatecznego wymieszania materiałów przetapianych.

Drugim analizowanym zagadnieniem było spawanie materiałów o znacząco różnych temperaturach topienia. Model dwuwymiarowy zastosowano do analizy procesu spawania nakładki irydowej z podłożem niklowym przy zastosowaniu impulsowego lasera Nd:YAG. Analizowano wpływ energii impulsu, położenia ogniska promieniowania laserowego oraz temperatury początkowej materiałów na rozkład temperatury w trakcie procesu spawania i kształt strefy przetopionej. Analizę numeryczną przeprowadzono dla trzech energii impulsów promieniowania laserowego impulsów pojedynczych i serii 10 impulsów. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na dobór najkorzystniejszych parametrów procesu spawania, w którym nie zachodzi parowanie niklu oraz wyznaczenie wielkości strefy przetopienia. Weryfikacja doświadczalna polegała na wykonaniu procesu spawania przy różnych energiach impulsów. Przedstawione wyniki badań metalograficznych nie pozwalają na wyznaczenie wielkości strefy przetopienia gdyż wykonano je przy zbyt małych powiększeniach. Nie przeprowadzono również analizy składu chemicznego spoiny, która mogłaby ujawnić wielkość strefy przetopienia. Podobnie jak w przypadku pierwszego modelu brak jest pogłębionej analizy uzyskanych rezultatów badań. Ponadto Autor nie wyjaśnia, dlaczego w tym przypadku zastosował model dwuwymiarowy.

Trzeci opracowany model w rozprawie dotyczy spawania materiałów różnoimiennych o dużej różnicy temperatur topienia. Model ten został zastosowany do analizy procesu spawania nakładek platynowych na niklowe świece zapłonowe wykorzystywanych w silnikach na biopaliwo. Stworzono trójwymiarowy model oddziaływania promieniowania impulsowego na łączone materiały. Podobnie jak w poprzednim przypadku analizowano wpływ energii impulsu, położenia ogniska promieniowania laserowego oraz kąta padania promieniowania laserowego na rozkład temperatury w trakcie procesu spawania i kształt strefy przetopionej. Badania numeryczne pozwoliły na ustalenie optymalnych parametrów

procesu pozwalających na uzyskanie połączenia bez wad spawalniczych. Wyniki symulacji zostały zweryfikowane doświadczalnie dla jednego z analizowanych przypadków. Ustalono najkorzystniejsze parametry procesu spawania. Nie przedstawiono analizy zjawisk fizycznych.

Ocena części literaturowej pracy

W rozdziale drugim pracy Autor przedstawił genezę pracy i stan wiedzy. Rozdział 2.1 zawiera podstawowe wiadomości dotyczące różnych metod spawania oraz laserów technologicznych najczęściej stosowane w tym procesie. Przedstawiono różnice pomiędzy spawaniem kondukcyjnym a głębokim. Zaprezentowane informacje zostały oparte na pozycjach literaturowych 9-18.

Przedstawiona analiza jest dość powierzchowna. Brak jest porównania efektów spawania różnymi metodami. Również opis laserów technologicznych jest bardzo ogólny. Opisano jedynie lasery gazowe CO₂ i Nd:YAG pozostałe rodzaje laserów zostały pominięte. Brak opisu zasady działania laserów, charakterystyki promieniowania laserowego, stosowanych układów optycznych. Pominięto również ważne informacje dotyczące np. wpływu długości promieniowania, rozkładu energii, atmosfery ochronnej na przebieg procesu spawania.

W rozdziale 2.2. przeanalizowano stan wiedzy dotyczący modelowania procesu spawania laserowego. Omówiono 35 pozycji literatury w tym, 10 w którym Autor rozprawy jest współautorem publikacji. Zawarto ważniejsze pozycje literatury krajowej i światowej dotyczące problematyki modelowania numerycznego procesu spawania laserowego.

W tej części pracy brakuje analizy literatury dotyczącej opisu zjawisk fizycznych występujących w procesie spawania. Pominięto też ważne pozycje z polskiej literatury dotyczących tego zagadnienia np. Szymański Z., Hoffman J. *Fizyka spawania laserowego*,

Teza i cel pracy zostały przedstawione we wcześniejszym rozdziale 1, nie nawiązują bezpośrednio do wniosków z analizy literatury.

Dobór pozycji literaturowych wskazuje na wystarczającą podstawę do realizacji tematu rozprawy doktorskiej.

Uwagi edytorskie

W pracy występują drobne błędy językowe i edytorskie. Na przykład: temperatura „topnienia”. Brak numeracji stron 30-31, 90-92. Strona 20: „ *Szersze informacje związane z*

tym tematem można znaleźć w rozdziale 0 i 0". Strona 21: Opis teoretyczny modelu CFD-brak rozwinięcia skrótu itp. Błędy te jednak nie umniejszają wartości merytorycznej pracy.

Podsumowanie

Przedstawione modele numeryczne spawania różnych materiałów w zadawalającym stopniu pozwalają na analizę procesów zachodzących w trakcie procesu spawania przewodnościowego. Autor wykazał się znajomością modelowania numerycznego złożonych procesów fizycznych. Uzyskane wyniki pozwalają na przyspieszenie i zmniejszenie kosztów badań oraz skrócenie czasu wdrożenia procesu spawania w zastosowaniach przemysłowych. Treść rozprawy rozwija trudną problematykę spawania materiałów różnoimiennych.

Postawiona w rozprawie teza: "Zaproponowany model numeryczny w wystarczającym stopniu obrazuje proces przetapiania i spawania laserowego wybranych materiałów może służyć do przyspieszenia badań eksperymentalnych oraz może być użytecznym narzędziem w ocenie przyczyn defektów powstałych podczas przewodnościowego spawania laserowego." została potwierdzona w zakresie spawania laserowego trzech par stopów: stal węglowa-stal 304, iryd-nikiel oraz nikiel-platyna.

Opiniowana rozprawa dotyczy istotnego w budowie maszyn zagadnienia, uzyskane w trakcie jej realizacji wyniki mają istotne znaczenie poznawcze i użytkarne, do ich uzyskania zastosowano nowoczesne metody badawcze i spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Wniosek końcowy

Na podstawie analizy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Banaka pt. „Analiza pola temperatur i kształtu strefy przetopionej w procesie spawanie laserowego” stwierdzam, że zawiera ona wartościowe wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych przyczyniające się do rozwoju dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn.

Praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym z dn. 14 03 2003 (Dz.U. poz.595) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.