

**Recenzja pracy doktorskiej p. Tomasza Mościckiego pt.
„Badanie właściwości fizycznych obłoku plazmowego powstającego przy spawaniu
laserowym stali”.**

Praca doktorska mgr inż. Tomasza Mościckiego o objętości 98 stron składa się z 8 rozdziałów i poświęcona jest badaniom właściwości fizycznych obłoku plazmowego powstającego przy głębokim spawaniu laserowym stali.

Spawanie takie ma miejsce, gdy natężenie wiązki laserowej na powierzchni próbki przekracza 1 MW/cm^2 . Wówczas tworzy się głęboki kanał parowy, z którego wypływają zjonizowane pary metalu, których ciśnienie podtrzymuje kanał w stanie otwarcia. Strumień tych par zderza się ze strumieniem gazu osłonowego, którym jest zazwyczaj argon lub hel napływający z przeciwnej strony. W ten sposób ograniczany jest obłok plazmowy, który się tworzy ponad powierzchnią próbki pochłania energię wiązki laserowej. Tak więc obłok plazmowy ma istotny wpływ na proces spawania. Plazma z jednej strony pomaga w transporcie energii z wiązki laserowej do obrabianego materiału dzięki wysokiej temperaturze i dużej przewodności cieplnej, z drugiej zaś strony, ponieważ silnie pochłania promieniowanie laserowe, to ta część energii, która jest absorbowana przez plazmę poza kanałem, a więc przez obłok jest tracona. Plazma obłoku także rozogniskowuje wiązkę w skutek refrakcji, co zmniejsza gęstość energii w wiązce.

Oddziaływanie wiązki laserowej z obłokiem plazmowym nie daje się łatwo opisać. Dodatkową trudność stanowi fakt, że obserwowany proces jest wysoce niestacjonarny. Eksperymenty są trudne, czego dowodem jest rozbieżność wyników doświadczalnych. Nie wyjaśniony w dalszym ciągu pozostaje problem głębokości przetopienia przy użyciu różnych gazów osłonowych. Ponadto brak jest informacji dotyczących składu i stopnia wymieszania par metalu z gazem osłonowym. Taka informacja jest niezbędna ze względu na dobór parametrów procesu spawania, a także przy wykorzystaniu promieniowania plazmy do kontroli tego procesu.

Informacji takich może dostarczyć model teoretyczny, którego wyniki pozwoliłyby na analizę własności obłoku, to znaczy na wyznaczenie jego składu, rozkładów przestrzennych temperatury i gęstości elektronów w zależności od użytego gazu osłonowego.

Dotychczasowe nieliczne próby modelowania obłoku plazmowego zawierały szereg uproszczeń, co w rezultacie prowadziło do dużych błędów. Przede wszystkim uzyskane wyniki nie pokazywały istnienia plazmy argonu, co jest niezgodne z obserwacjami eksperymentalnymi.

Recenzowana praca przedstawia wyniki modelowania plazmy powstającej podczas spawania żelaza laserem CO_2 w warunkach, gdy gazem osłonowym jest argon lub hel. Autor formułuje tezę, że poprawnie sformułowany model powinien pokazywać istnienie plazmy argonu w sytuacji, gdy gazem osłonowym jest argon. Główną część pracy stanowią wyniki dotyczące modelu stacjonarnego, który dostarcza uśrednionych informacji o obłoku i jego własnościach. Zdaniem doktoranta uwzględnienie niestabilności plazmy jest trudnym zadaniem, przede wszystkim dlatego, że przyczyna oscylacji nie jest dobrze znana. W tej sytuacji wyniki modelu stacjonarnego mają dużą wartość, ponieważ parametry obłoku i tak oscylują wokół pewnych wartości średnich.

Po krótkim wstępie zwracającym uwagę na motywy zajęcia się opisanym powyżej problemem autor w rozdziale 2-m. przedstawia model teoretyczny obłoku plazmowego.

Obliczenia dotyczące obłoku plazmowego zostały przeprowadzone za pomocą komercyjnego programu FLUENT. Aby użyć programu konieczne było wygenerowanie odpowiedniej siatki, która pozwoliłaby właściwie odwzorować geometrię i własności problemu, wybór równań teoretycznie opisujących zjawisko, a także dobór warunków brzegowych. Ważnym elementem było modelowanie i wprowadzenie do procesu obliczeniowego wiązki laserowej jako źródła energii. Program zadający źródło energii pozwala na zmianę parametrów wiązki a także uwzględnia pochłanianie wiązki na jej drodze przez plazmę.

W kolejnym rozdziale 3 omawiane są obliczenia strat promienistych plazmy. Ponieważ straty promieniste plazmy odgrywają ważną rolę w bilansie energetycznym plazmy, rozdział ten stanowi poważną część pracy. Ze względu na brak dostępnych danych dotyczących współczynników emisji dla mieszanin żelazo-argon i żelazo-hel, konieczne było obliczenie współczynnika emisyjności netto mieszaniny żelazo-argon i żelazo-hel uwzględniającego samo-absorpcję linii spektralnych. Było to zadanie żmudne biorąc pod uwagę, że autor musiał uwzględnić promieniowanie ogółem prawie 43000 linii spektralnych żelaza a ponadto obliczyć wkład od promieniowania ciągłego. Promieniowanie rekombinacyjne, które jest jednym ze składników promieniowania ciągłego wymagało obliczenia tzw. czynników Bibermana. Te ostatnie ze względu na zależność od temperatury i długości fali mają duże znaczenie w diagnostyce plazmy.

W rozdziale 4-m opisane są funkcje materiałowe użyte w obliczeniach. Część funkcji materiałowych niezbędnych do obliczeń została wzięta z literatury. Wielkości takie jak gęstość, ciepło właściwe żelaza, współczynnik pochłaniania promieniowania laserowego i współczynnik dyfuzji wymagały wyznaczenia. Większość funkcji materiałowych poza współczynnikiem pochłaniania i dyfuzji została wprowadzona jako funkcje materiałowe poszczególnych składników mieszaniny zależne tylko od temperatury (przyjęto stałe ciśnienie 1 atm.). Ich zależność od składu mieszaniny (dokładnie dla ułamka masowego zawartości żelaza w mieszaninie) jest obliczana przez program. Wyznaczone przez FLUENT funkcje materiałowe dla mieszaniny argonu i żelaza zostały sprawdzone z wynikami bardziej rygorystycznych obliczeń. Było to niezbędne, ponieważ reguły mieszania używane przez FLUENT nie mają potwierdzonej wiarygodności dla plazmy. Porównanie wyników pokazało ich dość dobrą zgodność, dlatego też wszystkie użyte funkcje materiałowe można uznać za rzetelne.

W rozdziale 5-m analizowane są wyniki obliczeń. Pokazują one, że przedstawiony w pracy teoretyczny model poprawnie ukazuje obecność plazmy argonowej i plazmy żelaza w przypadku, gdy gazem osłonowym jest argon a także brak plazmy helowej w przypadku, gdy gazem osłonowym jest hel. Ten wynik - zgodny z wynikami eksperymentalnymi uznać za główny wynik pracy. W przypadku helu obłok plazmowy jest znacznie mniejszy niż w przypadku argonu ze względu na brak plazmy helowej i duże przewodnictwo cieplne helu, co również jest zgodne z eksperymentem.

Rozpatrzony w pracy przypadek niestacjonarny pokazuje, że w przypadku, kiedy jako gaz osłonowy użyty jest argon, plazma argonu zaczyna rozwijać się bardzo szybko. Wymieszanie zjonizowanych par żelaza z argonem następuje w ciągu kilku mikrosekund po pojawieniu się plazmy żelaza na zewnątrz kanału parowego. Dalej, w kolejnych krokach czasowych, obserwowane są już obydwie plazmy.

W przypadku stacjonarnym, zarówno przy użyciu argonu jak i helu jako gazu osłonowego, maksymalna temperatura jest podobna i wynosi 19 kK i jest o kilka tysięcy wyższa niż obserwowana w eksperymencie (15 kK dla plazmy argonowej i 7-14 kK dla plazmy żelaza). Ponieważ jednak obszar gdzie temperatura przekracza 15 kK jest bardzo mały to jest możliwe, że nie został zauważony eksperymentalnie. Innym wytłumaczeniem może być fakt, że w teoretycznych obliczeniach nie uwzględniono zjawiska refrakcji. Jak pokazały

obliczenia zwiększenie średnicy ogniska powoduje spadek temperatury maksymalnej z 18600 (przy 0.3 mm) do 17700 K (przy 0.6 mm). W przypadku, kiedy argon jest używany jako gaz osłonowy całkowita absorbowana energia promieniowania lasera sięga 451 W, co stanowi 26.5% mocy lasera (w tym argon 11.5 %), a 78% pochłoniętej mocy jest wypromieniowane do otoczenia. Obliczona absorpcja jest wyższa niż wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych (Fe-He 1%, Fe-Ar 10%, Ar 5%) - ale wyniki eksperymentalne są otrzymywane z uśrednionych przestrzennie gęstości elektronów i temperatury. Można to tłumaczyć tym, że uzyskany teoretycznie obłok plazmowy jest większy od zaobserwowanego w eksperymencie, ale przyczyną rozbieżności mogą być także niedokładności eksperymentu.

W przypadku helu całkowita absorpcja promieniowania lasera wynosi 86 W to jest 5% mocy lasera, z czego 61% pochłoniętej mocy jest oddawane na zewnątrz. W tym przypadku wymiary obłoku są zgodne z obserwacjami eksperymentalnymi, lecz obliczona absorpcja jest większa niż wyznaczona z eksperymentów (ok.1 %). Nie mniej jednak różnice rozmiarów plazm argonu i helu są zgodne z obserwacjami.

Autor policzył także pole prędkości i pole strumienia masy. Obliczenia te pokazują, że choć prędkość wzrasta w gorących regionach, to tylko niewielka część strumienia masy dostaje się do centralnego obszaru plazmy. Obszar plazmy zmniejsza się, gdy prędkość par na wylocie z kanału parowego maleje, oraz zwiększa się, gdy maleje prędkość gazu osłonowego na wylocie z dyszy. Obliczenia pokazują też, że obszar plazmy zmniejsza się, gdy promień wiązki w ognisku zwiększa się, oraz gdy przesuwamy ognisko pod powierzchnie próbki.

Rozdział 6-y zawiera porównanie z eksperymentem. Porównanie to jest zrobione głównie na podstawie przeprowadzonej przez autor analizy kolorowych zdjęć plazmy.

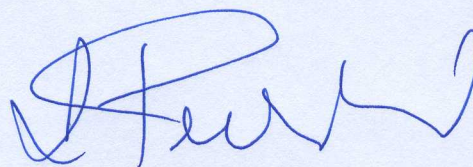
Połączenie obliczeń współczynników emisyjności plazmy wraz z analizą kolorów (model CIE) umożliwia wyznaczenie kolorów plazmy. Analiza pokazuje, że w przypadku argonu i żelaza, plazma argonu ma zabarwienie różowo-pomarańczowe natomiast plazma żelaza kolor niebieski. Ustalenie koloru składników umożliwia omówienie zachowania się plazmy, które zostały zarejestrowane na kolorowych zdjęciach przy wykorzystaniu szybkiej kamery. Analiza kolorowych zdjęć obłoku plazmowego pozwala także na jednoznaczne stwierdzenie, że w przypadku, gdy gazem osłonowym jest argon występują dwie plazmy – plazma żelaza i plazma argonu. Gdy gazem osłonowym jest hel występuje tylko plazma żelaza, prawdopodobnie wymieszana w pewnym stopniu z helem. Pozwala to na stwierdzenie, że zasadnicze wyniki modelu teoretycznego są poprawne. Podobne wnioski można wyciągnąć z pomiarów spektroskopowych.

Krótkie podsumowanie najważniejszych wyników zawarte jest w rozdziale 7.

Reasumując należy stwierdzić, że w wyniku użycia wiarygodnych funkcji materiałowych wyniki obliczeń są zgodne z rzeczywistością. Model użyty przez autora poprawnie opisuje zjawisko istnienia dwu rodzajów plazmy, w przypadku, gdy gazem osłonowym jest argon, tzn. plazmy argonowej i plazmy par metalu, oraz nie pojawianie się plazmy helowej w przypadku, gdy gazem osłonowym jest hel. Różnice w absorpcji wiązki laserowej przez obłok plazmowy (26 % w przypadku argonu i 5% w przypadku helu) tłumaczą obserwowane różnice w głębokości przetopienia w zależności od tego, który gaz jest używany. Różnice te dochodzą do 25%. Ponieważ promieniowanie obłoku plazmowego jest używane do kontroli procesu spawania, więc uzyskany wynik jest również ważny z punktu widzenia kontroli procesu spawania; w przypadku, kiedy gazem osłonowym jest argon należy monitorować zarówno świecenie żelaza jak i argonu.

Konkluzja: Autor opanował skomplikowaną wiedzę dotyczącą podstaw teorii plazmy, posiadał umiejętności związane z modelowaniem numerycznym. Uzyskane wyniki są istotne

dla opisanie procesu spawania i zostały opublikowane w 10 pracach, z czego cztery w czasopismach z listy filadelfijskiej a kilka innych w „proceedingach” prestiżowych konferencji (SPIE, AIP). W związku z powyższym uważam, że praca spełnia zarówno ustawowe jak i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'H' followed by a series of connected loops and a final flourish.