

WPLYW PARAMETRÓW SPAWANIA LASEROWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZA NI-PT W ŚWIECACH ZAPŁONOWYCH DLA SILNIKÓW NA BIOPALIWO

Rafał BANAK¹, Tomasz MOŚCICKI², Bogdan ANTOSZEWSKI³

STRESZCZENIE

W pracy został przedstawiony model teoretyczny oddziaływania wiązki laserowej z materiałami różnoimiennymi w procesie spawania. W celu wyznaczenia rozkładu pola temperatur, wymiarów spoiny oraz strefy mieszania się materiałów zbudowano trójwymiarowy, niestacjonarny model numeryczny uwzględniający proces wymiany ciepła i masy. Model został wykorzystany do zbadania przebiegu i optymalizacji parametrów procesu spawania niklowo-platynowych nakładek na świece zapłonowe dla silników na biopaliwo. Zbadano wpływ czasu trwania impulsu, średnicy plamki oraz kąta nachylenia wiązki na rozkład pola temperatury. Kształt strefy przetopionej otrzymanej z modelu teoretycznego jest w dobrej zgodności z wynikami eksperymentalnymi.

WPROWADZENIE

W odpowiedzi na gwałtowny rozwój zastosowań silników na biogaz istotne stało się opracowanie długo żywotnych świec zapłonowych. W celu osiągnięcia odpowiednio długiego czasu eksploatacji świec, końcówki elektrod pokrywane są nakładkami ze specjalnych stopów platyny lub irydu – materiałów posiadających podwyższoną odporność na erozję w wysokich temperaturach [1].

¹ mgr inż. Rafał Banak - Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, PL- 25314 Kielce

² dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki, ul.Pawinskiego 5B, PL – 02-106 Warszawa

³ Profesor Bogdan Antoszewski - Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, PL- 25314 Kielce

W ostatnich czasach aktywnie rozwijane są metody laserowej modyfikacji powierzchni, mającej na celu zmianę jej struktury [2] lub podwyższenie odporności na działanie środowisk agresywnych [3]. Ze względu na specyficzne właściwości fizyczno-chemiczne biogazu, zwłaszcza jego silne właściwości korozyjne, próby wykorzystania tego paliwa w silnikach spalinowych przystosowanych do benzyny lub LPG jest praktycznie niemożliwe. Jednym z głównych powodów jest szybkie zużywanie materiałów konstrukcyjnych silnika. Świeca zapłonowa jest jednym z kluczowych elementów silnika narażonych na korozję wywołaną agresywnymi składnikami chemicznymi biogazu. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na podwyższone zużycie tej części silnika jest wysoka temperatura panująca w komorze spalania przekraczająca tysiąc stopni Celsjusza oraz erozja następująca na skutek okresowego działania iskry elektrycznej. Działanie w środowisku agresywnym powoduje szybkie zużycie elektrod. W celu zminimalizowania tego zjawiska końcówki elektrod są pokrywane specjalnie dopasowanymi nakładkami. Głównymi materiałami używanymi do produkcji nakładek są spieki irydowe oraz platynowo irydowe [1]. Platyna oraz iryd są metalami szlachetnymi odpornymi na większość chemikaliów i wpływ wysokich temperatur. Doświadczenia laboratoryjne pokazały, że iryd i platyna są najbardziej odporne na niszczące działanie spalanego biogazu.

Okres działania świecy zapłonowej zależy głównie od jakości połączenia nakładki z elektrodą. Obecnie rozwijane są dwie metody połączeń tych elementów: mikro spawanie oporowe [4] oraz zyskujące coraz większe znaczenie spawanie laserowe [5]. Efektywność spawania oporowego w dużym stopniu zależy od zastosowanego ciśnienia, temperatury oraz czasu trwania procesu. Często w wyniku tego procesu powstaje jedynie zgrzanie bez uzyskania przetopu powierzchni kontaktu. Spawanie laserowe polega na przetopieniu strefy połączenia elektrody z nakładką w wyniku oddziaływania skupionej wiązki lasera o precyzyjnie kontrolowanych parametrach. Nagrzewania wiązką laserową powoduje wzrost temperatury głównie w miejscu oddziaływania wiązki dlatego też, w celu uzyskania pełnego przetopu powierzchni połączenia, wiązka laserowa musi dotrzeć do wszystkich punktów styku nakładki z elektrodą. Wiązka laserowa o dużej gęstości mocy zostaje skupiona na miejscu styku elektrody z nakładką wykonaną z materiału szlachetnego, np. platyny (rysunek 1). W wyniku tego, nikiel, będący głównym składnikiem elektrody, oraz platyna zostają stopione i tworzą warstwę posiadającą uśredniony współczynnik rozszerzalności cieplnej, dzięki czemu zmniejszone są naprężenia cieplne. W trakcie procesu wiązka laserowa topi oba metale dzięki czemu następuje proces intensywnego mieszania w wyniku czego powstaje pośredni stop binarny. Jeśli energia wiązki jest zbyt mała przetopieniu ulega jedynie nikiel – w tym przypadku naprężenia cieplne są wyższe niż ma to miejsce w przypadku wymieszanych materiałów. Jeżeli energia wiązki laserowej jest zbyt duża, temperatura w spoinie wzrasta do wartości, w której nikiel zaczyna intensywnie parować co

proceeds to the formation of welding defects. The desired „safe” range of welding parameters can therefore be defined as a range in which the melting and mixing of the two metals occurs and the temperature is lower than the nickel evaporation temperature.

Hydrodynamic models describing the interaction of a laser beam with the material surface have been developed since the 1960s. However, only a few papers describe the laser welding process of two or more materials at different temperatures. The main focus was on thin coatings on metal substrates [6]. In such cases, an important parameter is the thermal contact resistance, which determines the amount of energy transferred to the base material. Numerical modeling of Cu-Ni joints was presented in [7]. It was assumed that the elements are welded together and the absorption of the laser beam is independent of temperature. On the basis of calculations, the shape of the fusion zone was determined. Despite certain simplifications, theoretical models of welding are a useful tool for reducing costs and ensuring the selection of appropriate process parameters. Experimental studies are expensive in terms of materials and time, especially when it comes to the use of expensive metals and the need to perform a series of welds in order to obtain the desired joint. The presented model was used for the verification and optimization of laser welding of spark plug electrodes on biogas engines.

1. BADANIA DOŚWIADCZALNE I EKSPERYMENTALNE

In the first step, the problem of positioning the joined elements relative to each other and the laser beam was solved. For this purpose, a special fixture was used and the elements were prepared. A flat plate of copper on a platinum base was preheated on the substrate. The welding parameters were determined experimentally on the basis of observations of the welding process. The laser power was controlled by changing the lamp current, the pulse frequency, the pulse duration and the welding speed. The process was carried out under an inert atmosphere of nitrogen.

In the presented model, it was assumed that the heat source is stationary. Two variants of calculations were performed – the first for the verification of the model and the second for the optimization of the process parameters. In the first case, the laser beam was parallel to the axis of symmetry of the spark plug electrode and illuminated both materials at the same time (Figure 1a). It was assumed that the laser beam Nd:YAG with a wavelength of 1064 nm and a spot diameter of 0.7 mm was used.

został impuls o prostokątnym rozkładzie czasowym o długości 1.5 ms przenoszący energię 4.6 J. W przypadku obliczeń optymalizacji parametrów wyznaczono średnicę plamki równą 0.25 mm, czasie trwania impulsu 20 ms oraz 8 J energii w impulsie. Przyjęto również, że kąt padania wiązki laserowej wynosi 45° (rysunek 3a).

Zestaw trójwymiarowych, zależnych od czasu równań opisujących problem topnienia i krzepnięcia został rozwiązany z wykorzystaniem programu Ansys – Fluent. W celu dostosowania aplikacji do opisywanego problemu stworzono i wykorzystano zewnętrzne funkcje użytkownika napisane w języku C. Model teoretyczny przedstawiony w poniższej pracy został uprzednio opisany w [8], gdzie był wykorzystany do symulacji topnienia i krzepnięcia pojedynczego materiału gdzie uzyskano dobrą zgodność z wynikami eksperymentu. Z dwóch dostępnych modeli mikrosegregacji składników oferowanych przez pakiet Ansys-Fluent została wybrana reguła dźwigni (ang. *lever rule*).

Siatka elementów skończonych została wykonana w programie Gambit. Siatka została zagęszczona w obszarach, gdzie spodziewano się występowania największych gradientów tzn. w miejscu oddziaływania wiązki laserowej. Dzięki takiemu podejściu zaoszczędzono znaczącą ilość czasu potrzebnego do obliczeń. Wpływ rozmiaru siatki obliczeniowej został przetestowany poprzez sukcesywne zmniejszanie oczek siatki. Jako kompromis pomiędzy długością czasu obliczeniowego a dokładnością obliczeń założono minimalną długość krawędzi elementu skończonego równą 1 mikrometr zaś krok czasowy równy $1 \cdot 10^{-5}$ s.

Wszystkie parametry materiałowe niklu i platyny są zależne od temperatury. Właściwości fizyczne niklu przyjęto na podstawie [9] zaś współczynnik absorpcji promieniowania laserowego na podstawie [10].

W przypadku właściwości stopu niklu oraz platyny, parametry takie jak ciepło właściwe, przewodność cieplna czy lepkość są obliczane zgodnie ze wzorem:

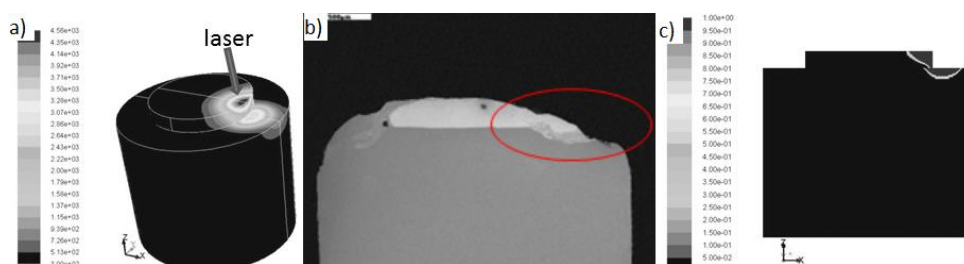
$$\Phi = \Phi_{Pt} Y_i + \Phi_{Ni} (1 - Y_i)$$

gdzie: Φ oznacza dany parametr zaś indeksy dolne Pt oraz Ni oznaczają odpowiednio platynę oraz nikiel. Ze względu na brak danych dotyczących współczynnika absorpcji promieniowania laserowego dla platyny przyjęto wartość 0.25.

2. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Na podstawie rozkładu pola temperatury oraz kształtu strefy przetopionej (rysunek 1) można wyciągnąć wniosek, że energia impulsu w przeprowadzonym doświadczeniu była za duża. Doszło do znaczącego stopienia platyny i przesunięcia materiału w kierunku krawędzi elektrody. W wyniku tego pojawiły się deformacje powierzchni nakładki oraz pustki wypełnione powietrzem (rysunek 1b), które mogą prowadzić do zmniejszonej odporności na zużycie. Obszar przetopienia, w któ-

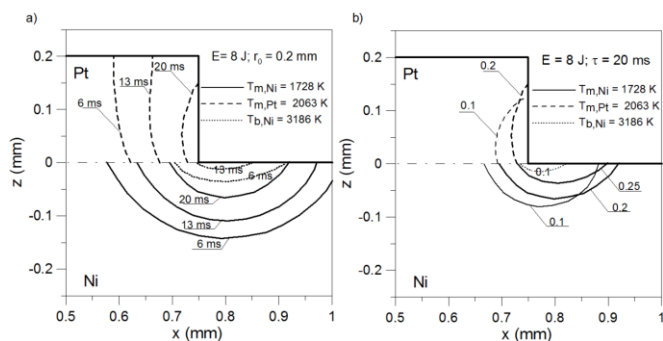
rym dochodzi do mieszania się materiału nakładki i podłoża jest niewielki (rysunek 1c). Kształt jeziorzka spawalniczego otrzymany z analizy numerycznej wskazuje, że lepsze rezultaty mogą zostać osiągnięte poprzez zmianę położenia wiązki lasera względem przedmiotu tj. poprzez pochylenie wiązki do kąta 45° i zmniejszenie promienia plamki. Zmiana kąta nachylenia wiązki powinna spowodować rozszerzenie się strefy przetopu na obszar styku nakładki z elektrodą zamiast na samą nakładkę jak miało to miejsce w pierwszym przypadku.



Rys. 1. Weryfikacja modelu: a) temperatura powierzchni, b) przekrój poprzeczny elektrody z nakładką, c) strefa ciekła po zakończeniu oddziaływania impulsu.

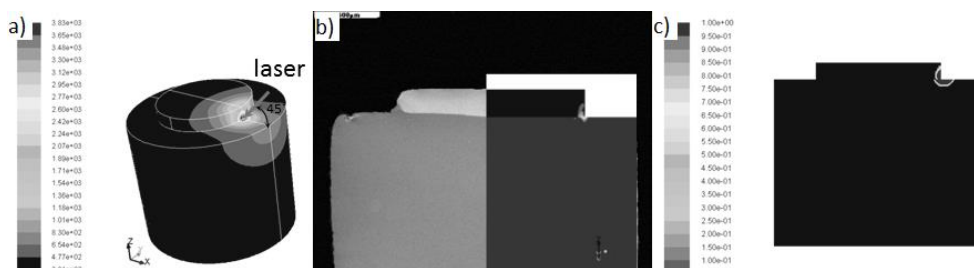
Analiza rozkładu pola temperatur wskazuje, że należy zmienić energię impulsu oraz czas jego trwania. Na rysunku 2a przedstawiono rozkład temperatur w przekroju poprzecznym dla impulsów o czasie trwania $\tau = 6, 12, 20$ ms, energii 8 J oraz średnicy plamki równej 0.4 mm. Zaznaczono izotermy odpowiadające temperaturom topnienia obu materiałów oraz temperaturze topnienia niklu. Można zauważyć, że dla kąta 45° nachylenia wiązki do powierzchni próbki, czas trwania impulsu, przy którym dochodzi do odpowiedniego przetopu zawiera się w przedziale 13 – 20 ms. Dla czasu krótszego niż 13 ms dochodzi jedynie do nadmiernego przetopu platyny zaś dla czasu powyżej 30 ms strefa mieszania się obu materiałów nie przekracza 0.03 mm. Dalsze zwiększanie czasu oddziaływania wiązki lasera zmniejsza obszar mieszania się metali i prowadzi do występowania wad spawalniczych. W spawaniu laserowym, aby zmienić ilość energii dostarczanej przez impuls często modyfikuje się ogniskową w wyniku czego otrzymuje się różne średnice plamki lasera. Na rysunku 2b przedstawiono rozkład temperatur charakterystycznych w zależności od średnicy plamki lasera. Największą strefę mieszania się niklu z platyną wynoszącą 0.08 mm uzyskano przy średnicy 0.1 mm (energia impulsu 8 J, czas trwania impulsu 20 ms). Przy mniejszych średnicach moc impulsu jest na tyle duża, że temperatury w spoinie przekraczają temperaturę parowania niklu co prowadzi do jego intensywnego parowania. W przypadku, gdy promień wynosi 0.25 mm energia jest zbyt mała i dochodzi jedynie do przetopu niklu. Pamiętając, że progowa wartość gęstości energii dla spawania przewodnościowego

wynosi $10 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ do dalszych badań przyjęto promień $r_0 = 0.125 \text{ mm}$ ($8152 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$).



Rys. 2. Rozkład temperatur charakterystycznych w funkcji: a) czasu trwania impulsu lasera, b) promienia plamki lasera (mm). Linia ciągła – temperatura topnienia niklu, linia kreskowana – temperatura topnienia platyny, linia kropkowana – temperatura parowania niklu.

Wyniki optymalizacji parametrów procesu przedstawiono na rysunku 3 uzyskano regularną strefę przetopu nakładki z elektrodą pozbawioną deformacji i wad spawalniczych. Zwiększenie czasu trwania impulsu pozwoliło dostarczyć więcej energii zwiększając tym samym strefę mieszania się materiałów. Prawidłowy dobór kąta przy jednoczesnym zmniejszeniu promienia plamki pozwolił na dokładne umiejscowienie lasera i zmniejszeniu uszkodzeń wynikających z oddziaływania wysokich temperatur. Maksymalne temperatury wewnątrz jeziora spawalniczego nie przekroczyły temperatury parowania niklu co pozwoliło na zredukowanie defektów i wad spawalniczych.

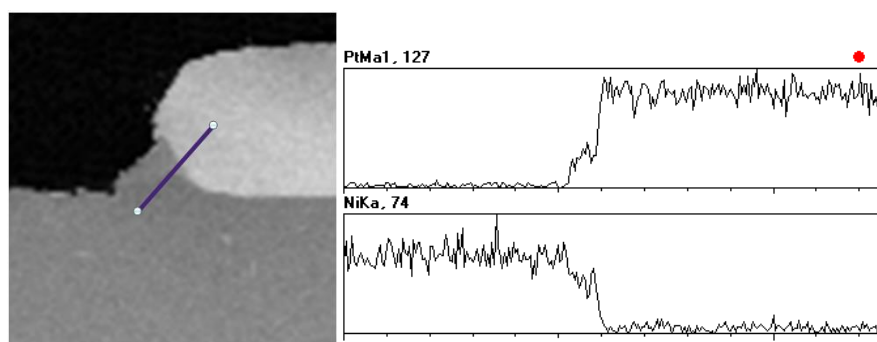


Rys. 3. Wyniki optymalizacji procesu: a) temperatura powierzchni, b) obliczony rozkład zawartości składników w spoinie, c) kształt strefy przetopionej po zakończeniu działania impulsu.

Dodatkowo wykonano zglądy poprzeczne spoiny, które badano na mikroskopie metalograficznym. W wybranych strefach spoiny dokonano analizy liniowego

rozkładu wybranych pierwiastków. W opracowaniu przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych badań.

Na rysunku 4. przedstawiono spoinę wykonana według parametrów wyznaczonych na podstawie modelu teoretycznego. Należy zauważyć, że składniki uległy wymieszaniu w dobrym stopniu.



Rys. 4. Rozkład pierwiastków w złączu wzdłuż zaznaczonej linii.

3. WNIOSKI

Prezentowano model przewodnościowego spawania laserowego, który został użyty do zbadania procesu spawania nakładek platynowych z elektrodami niklowymi. Przeanalizowano wpływ czasu trwania impulsu, rozmiaru plamki lasera oraz kąta nachylenia wiązki na rozkład pola temperatur. Dla zaprezentowanych kształtów przedmiotu oraz materiałów i możliwych do uzyskania parametrów pracy lasera nie jest możliwe uzyskanie przetopu na całej powierzchni styku nakładka – elektroda bez przekroczenia temperatury parowania niklu. W celu zapobieżenia temu problemowi część producentów wykorzystuje jednocześnie (lub bezpośrednio po sobie) spawanie opornościowe i laserowe. Parametry pracy lasera Nd:YAG przyjęte do obliczeń zostały przyjęte na podstawie parametrów pracy lasera użytego do spawania w eksperymencie. Kształty przetopień uzyskane z obliczeń numerycznych są bliskie do tych otrzymanych ze zglądów. Można zatem stwierdzić, że zaprezentowany model spawania materiałów różnoimiennych może być wykorzystany do weryfikacji i optymalizacji procesu spawania nakładek platynowy na świece zapłonowe do silników na biogaz.

Podziękowania

Praca została opracowana w ramach grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) nr PBS1/B5/13/2012.

LITERATURA

1. S. Javan, S.V. Hosseini and S. Sh. Alaviyou, 'An experimental investigation of spark plug temperature in bi-fuel engine and its effect on electrode erosion' International Journal of Automotive Engineering, 2012,2, 21-29.
2. B. Grabas, 'An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects', Archives of Metallurgy and Materials, 2015, T:60, Z:1, 33-39.
3. M. Scendo, J. Trela, N. Radek, 'Influence of laser power on the corrosive resistance of WC-Cu coating', Surface & Coatings Technology, 2014, 401-407.
4. Y. D. Huang, A. Pequegnat, J. C. Feng, M. I. Khan, Y. Zhou, Science and Technology of Welding and Joining, 2011,16, 648-656
5. W. B. Lineton, Patent number US7795790 B2 (2010)
6. S. Z. Shuja and B. S. Yilbas, 'Laser induced heating of coated carbon steel sheets: Consideration of melting and Marangoni flow' Optics & Laser Technology 2013, 47,47–55
7. G. Phanikumar, P. Dutta, K. Chattopadhyay, 'Computational modeling of laser welding of Cu-Ni dissimilar couple', Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35B, 339–350.
8. T. Moscicki and J. Radziejewska, 'Numerical simulation and experimental analysis of simultaneous melting and burnishing of 304 stainless steel with oscillatory laser heat source', Kovove Mater., 2013, 51, 37–44
9. K. C. Mills, 'Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys', 2012, Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited.
10. J. Xie, A. Kar, J. A. Rothenflue, and W. P. Latham, 'Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO₂, Nd:YAG and chemical oxygen-iodine lasers' Journal of Laser Applications, 1997, 9, 77

INFLUENCE OF LASER WELDING PARAMETERS ON Ni-Pt WELD PROPERTIES OF THE SPARK PLUG PAD FOR BIOFUEL ENGINES

SUMMARY

The interaction of laser beam with dissimilar metals during welding process was studied theoretically. A finite element based three-dimensional transient heat transfer and fluid flow model was applied for prediction of the temperature distribution and material mixing field as well as weld dimensions. The model was used for study and optimization of process parameters of welding of Ni – Pt spark plug for bio-fuel engine. The influence of the laser pulse duration, focus diameter and the angle of incidence of the laser beam to the surface on temperature field were analyzed. The shape of the melting pool obtained from the theoretical model was close to experimental results