

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

Opracowali:

**mgr inż. Rafał Banak – Politechnika Świętokrzyska,
Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce**

**dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych
Problemów Techniki PAN, Warszawa**

**dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk –
Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych
Technologii Metali, Kielce**

**Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem
oprogramowania CFD**

**Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika
Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut
Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa**

1. Wstęp

Źródło promieniowania laserowego, dzięki możliwości pełnej automatyzacji, wąskiej strefie wpływu ciepła oraz szybkości, stało się jednym z najchętniej wykorzystywanych sposobów spawania w przemyśle. Spawanie laserowe umożliwia łączenie materiałów trudno topliwych i trudnospawalnych a uzyskane spoiny są zwykle dużo lepszej jakości niż przy zastosowaniu alternatywnych metod. Ze względu na głębokość i charakter przetopu można wyróżnić dwa główne rodzaje spawania: przewodnościowe i głębokie.

Laserowe spawanie przewodnościowe, pomimo stosunkowo niewielkiego wykorzystania w przemyśle, wydaje się mieć wiele zalet. W porównaniu do spawania z kanałem parowym, proces ten przebiega stabilniej, nie występuje tutaj zjawisko wrzenia i intensywnego parowania metalu. Absorpcja promieniowania laserowego zmienia się jedynie w zakresie kilku procent. Dzięki tym cechom otrzymane spoiny są zwykle wolne od wielu wad spawalniczych powstających w wyniku spawania głębokiego [1]. Główną wadą tego typu spawania jest fakt, że maksymalne głębokości spoin są dużo mniejsze niż w przypadku spawania z tzw. keyholem.

Ze względu na obszar wykorzystania spawania przewodnościowego często niezbędne jest, aby wymiary spoiny lub też maksymalne temperatury procesu nie przekroczyły pewnych wartości krytycznych (np. w przypadku spawania elementów elektronicznych) przy jednoczesnym uzyskaniu dostatecznie dużej strefy mieszania się materiałów łączonych. W przypadku drogich materiałów badania niszczące oraz przetopy próbne mogą być dużym obciążeniem finansowym nie dając jednocześnie jednoznacznych rezultatów.

Biorąc pod uwagę trudności z bezpośrednią obserwacją procesu spawania nie sposób jest wyznaczyć empirycznie zjawisk występujących w jego trakcie. Dlatego też duża część badaczy skupia się głównie na efektach spawania – najczęściej analizując kształty otrzymanych spoin. Do lepszego poznania wspomnianych zjawisk często wykorzystuje się modele matematyczne i numeryczne. W [2] Rosenthal przedstawił model analityczny na ruchome źródło ciepła wykorzystując teorię zaproponowaną przez Fouriera. Do tej pory jest to jeden z najpopularniejszych analitycznych modeli wykorzystywanych do analizy rozkładu pola temperatur w trakcie spawania. Należy jednak zauważyć, że model ten jest obarczony błędem ze względu na założenie, że w bezpośrednim obszarze przetopu temperatury dążą do nieskończoności. Od czasu powstania modelu Rosenthala proponowano wiele innych modeli analitycznych, jednak ze względu na silne nieliniowości i stopień skomplikowania procesu spawania, przybliżają jego przebieg w ograniczonym stopniu [3]–[5].

Dużo dokładniejszą alternatywą dla modeli analitycznych wydają się być analizy metodą elementów skończonych [6]. Obecnie analizy numeryczne są dominującą metodą w obszarze modelowania procesu spawania. Ze względu na obręb prowadzonych analiz można wyróżnić dwa główne nurty: analizy mechaniczne, obejmujące zagadnienia związane z odkształceniami i naprężeniami oraz analizy przepływu ciepła i masy, w których badane są zjawiska zachodzące wewnątrz jeziora spawalniczego. Drugi rodzaj analiz numerycznych przeprowadzany jest z wykorzystaniem oprogramowania typu CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) i uwzględnia zjawiska związane z efektami napięcia powierzchniowego, zmian lepkości ciekłego metalu, ruchu turbulentnego itd. Przeprowadzone analizy pozwalają na wyznaczenie m.in. prędkości ruchu w jeziorce spawalniczym, kształtu i rozmiaru strefy przetopienia oraz rozkładu pola temperatur.

W poniższej pracy przedstawiono model numeryczny procesu laserowego spawania przewodnościowego, oparty o metodę objętości skończonych, zbudowany z wykorzystaniem komercyjnego pakietu Ansys Fluent 15.0.7.

**Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem
oprogramowania CFD**

**Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika
Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut
Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa**

2. Model numeryczny

Solwer, wykorzystywany w programie Fluent, dla wszystkich symulowanych typów przepływu domyślnie rozwiązuje równania zachowania masy i pędu. W przypadku modeli obejmujących zagadnienia związane z wymianą ciepła wprowadzane jest dodatkowe równanie zachowania energii. Dodatkowe równania wprowadzane są również przy wykorzystaniu modelu przepływu turbulentnego.

Prawo zachowania masy można zapisać w postaci [7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość, t – czas, v – wektor prędkości.

Prawo zachowania pędu w postaci ogólnej przedstawia równanie [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + (\rho \vec{g}) + \vec{F} \quad (2)$$

gdzie: τ – tensor naprężeń lepkich, g – siła grawitacji, F – siły zewnętrzne.

W przypadku omawianego modelu dodatkowo wprowadza się równanie energii powiązane z mechanizmem wymiany ciepła [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

gdzie: E – energia, k_{eff} – przewodność cieplna całkowita (przewodność właściwa + przewodność turbulencji), T – temperatura, S_h – definiowalne źródło energii.

Z uwagi na fakt, że symulowanych przepływach kryterialna wartość liczby Reynoldsa jest większa od 50 [8] do modelu włączono przepływ turbulentny k- ϵ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) \\ &\quad - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: k – energia kinetyczna turbulencji, ϵ – stopień dyssypacji energii, G_k – generacja energii ze względu na gradienty prędkości, G_b – generacja energii turbulencji na skutek wyporu. W modelu wykorzystuje się stałe: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ przyjęte na podstawie literatury [9].

W celu symulacji procesu topnienia i krzepnięcia wykorzystywana jest jednodomenowa metoda entalpowa zaproponowana przez Vollera i Prakasha [10]. Metoda ta zakłada, że w całej

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

domenie obliczeniowej Ω rozwiązywany jest ten sam układ równań różniczkowych. W tym celu został wprowadzony tzw. współczynnik udziału frakcji cieczy β . Współczynnik ten przyjmuje wartości z zakresu od 0 – dla obszarów, gdzie materiał jest w fazie stałej, do 1 – dla obszarów, gdzie materiał jest płynem. Wartości pośrednie odpowiadają za obszar międzyfazowy, traktowany jako strefa pseudoporowata. Dzięki temu wyliczane prędkości są tłumione w miarę zmniejszania się współczynnika β .

Jako warunek brzegowy na powierzchni oświetlonej wiązką laserową przyjęto [11]:

$$-k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} = I_L \cdot A - \alpha(T - T_o) - \sigma \epsilon_p (T^4 - T_o^4) - pu(t) \quad (5)$$

Warunek ten zakłada rozkład promieniowania laserowego o modzie TEM₀₀ (mod podstawowy) oraz straty ciepła ze względu na promieniowanie oraz konwekcję. Zdecydowano się również na uwzględnienie strat ciepła ze względu na parowanie materiału. Warunek ten zaprogramowano z wykorzystaniem możliwości oferowanych przez program Fluent dopisując odpowiednie komendy w tzw. user defined functions.

W (5) straty ciepła ze względu na parowanie materiału opisuje równanie zaproponowane przez Bułgakova [12]:

$$pu(T_s) = \frac{(1 - \beta)}{\rho} \left(\frac{m}{2\pi k T_s} \right)^2 p_b \exp \left[\frac{L}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (6)$$

gdzie: L – ciepło parowania, T_b – temperatura wrzenia, p_b – ciśnienie, T_s – temperatura powierzchni.

Domena obliczeniowa o wymiarach 100x40x20 mm, wykorzystana w prezentowanym modelu została wykonana z 1.5 mln elementów sześciennych. W miejscu występowania największych gradientów temperatury, a więc w obszarze oddziaływania wiązki laserowej, siatka została zagęszczona. W celu zminimalizowania ilości czasu i wymaganych zasobów obliczeniowych skorzystano z modelu symetrycznego względem płaszczyzny równoległej do ruchu wiązki laserowej. Testowano wpływ rozmiaru oczek siatki obliczeniowej i przy rozmiarze 10 μm stwierdzono, że kolejne zagęszczenia siatki nie mają istotnego wpływu na wyniki obliczeń. W celu zapewnienia kryteriów zbieżności dla równania energii = 10⁻⁶ oraz dla równań ciągłości, pędu i turbulencji = 10⁻³ ustalono krok czasowy równy 2.5·10⁻⁵ s.

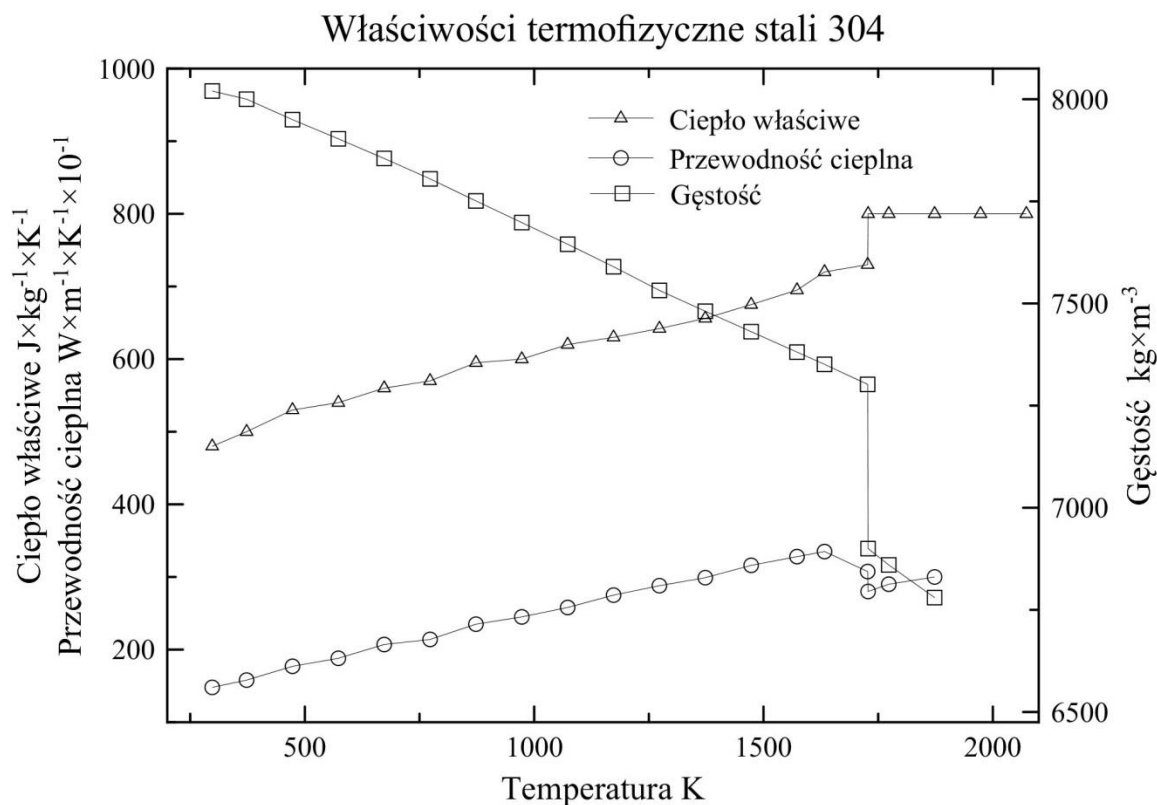
Materiałem przetapianym była stal nierdzewna 304. Ze względu na popularność tego materiału w literaturze istnieje dobrze udokumentowana baza właściwości termofizycznych wykorzystanych do modelowania procesu spawania [13]. Rysunek 1 przedstawia zmienne parametry materiałowe stali nierdzewnej 304. Jako parametry stałe przyjęto: ciepło topnienia 26·10³ J·kg⁻¹, stała gazowa 8314.3 J·kg⁻¹·mol⁻¹·K⁻¹, temperatura solidus 1658 K, temperatura liquidus 1723 K, temperatura parowania 3135 K, temperatura otoczenia 300 K, ciśnienie otoczenia 1.013·10⁵ Pa, masa molowa cząsteczki stali 55.8 g·mol⁻¹, ciepło parowania 6.09·10⁶ J·kg⁻¹, współczynnik emisyjności 0.4, absorpcja 0.05, temperaturowy współczynnik napięcia powierzchniowego 4.9·10⁻⁴ N·m⁻¹·K⁻¹.

Jak wspomniano do obliczeń przyjęto płaski rozkład mocy laserowej. Przetop doświadczalny został przeprowadzony na laserze CO₂ TRUMPF TruFlow 6000 generującym promieniowanie o długości fali 10.6 μm. W celu zapobieżenia przejścia w proces spawania głębokiego wiązkę rozogniskowano unosząc głowicę lasera o 20 mm nad wysokość domyślną.

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Dzięki temu uzyskano plamkę o promieniu $r = 10^{-3}$ m. Moc lasera wynosiła 6 kW zaś prędkość posuwu $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Rys. 1. Wykres zmienności parametrów stali nierdzewnej 304 w zależności od temperatury – opracowanie własne na podstawie [13].

Oprócz parametrów zmiennych przedstawionych na rys. 1. wprowadzono również zależności lepkości od temperatury [13]:

$$\mu(T) = 10^{\frac{-0.622+2478}{T}} \cdot 0.001 \quad (7)$$

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem infrastruktury PL-Grid. Czas obliczeniowy z wykorzystaniem 8 procesorów i 8 GB pamięci operacyjnej trwał 52 h. Należy zauważyć, że czas ten wynikał głównie z dobrania dość małego kroku czasowego, który zapewniał kryteria zbieżności rozwiązania.

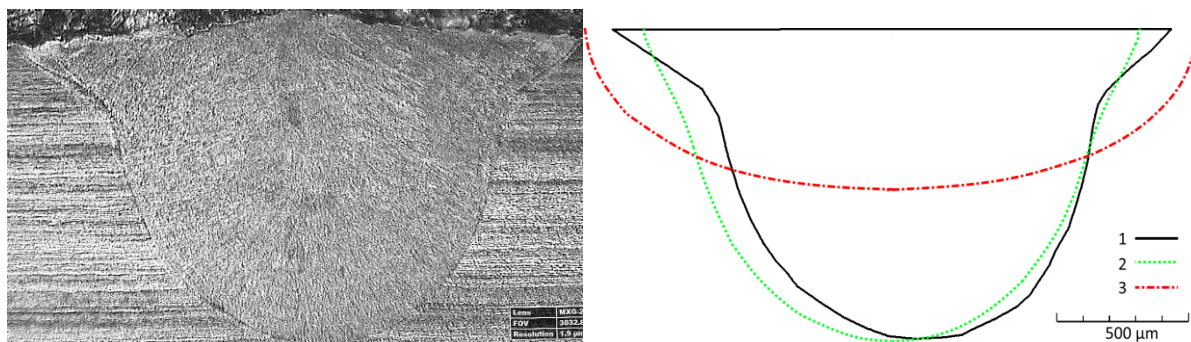
3. Wyniki analizy numerycznej

Rezultaty analizy numerycznej porównano z wynikami otrzymanymi ze zglądu. Na rys. 2. przedstawiono kształt strefy przetopienia. Głębokość spoiny otrzymanej w trakcie przetopu wyniosła $1140 \mu\text{m}$ zaś szerokość przy powierzchni $2095 \mu\text{m}$. W przypadku obliczeń wielkości te wyniosły odpowiednio $1095 \mu\text{m}$ oraz $1836 \mu\text{m}$. Błąd obliczeń głębokości przetopu wyniósł 4%, dla szerokości spoiny błąd wyniósł 12%. Dość duża odchyłka pomiędzy wartością zmierzoną

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

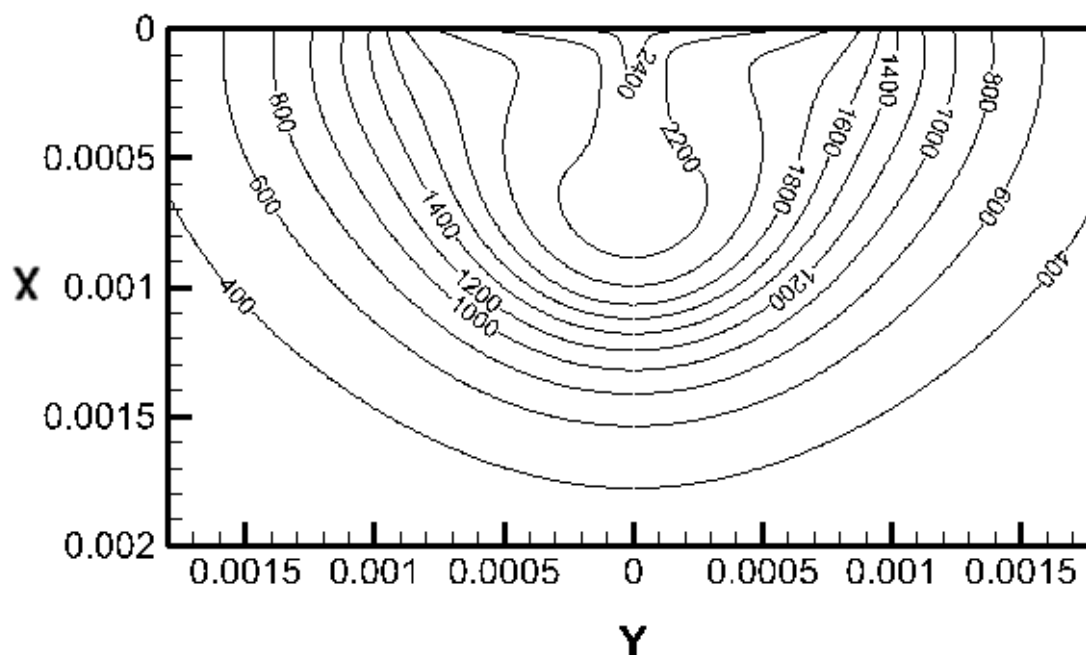
Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

a obliczoną może wynikać z faktu, że wykorzystany laser w rzeczywistości generuje wiązkę o modzie TEM₀₁*.



Rys. 2. Po lewej zdjęcie makrograficzne zglądu spoiny, po prawej kontur spoiny (1), obliczony profil przetopu (2), obliczony profil przetopu bez uwzględnienia napięcia powierzchniowego (3).

Na rys. 3. Przedstawiono rozkład pola temperatur dla wybranego punktu znajdującego się bezpośrednio na drodze ruchu wiązki laserowej. Jak wynika z analizy maksymalna temperatura wyniosła 2400 K. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że obszar o tej temperaturze jest stosunkowo niewielki. Jak zauważono w [3] występowanie zawyżonych temperatur to często występujący błąd przy modelowaniu procesu spawania z wykorzystaniem źródła powierzchniowego.



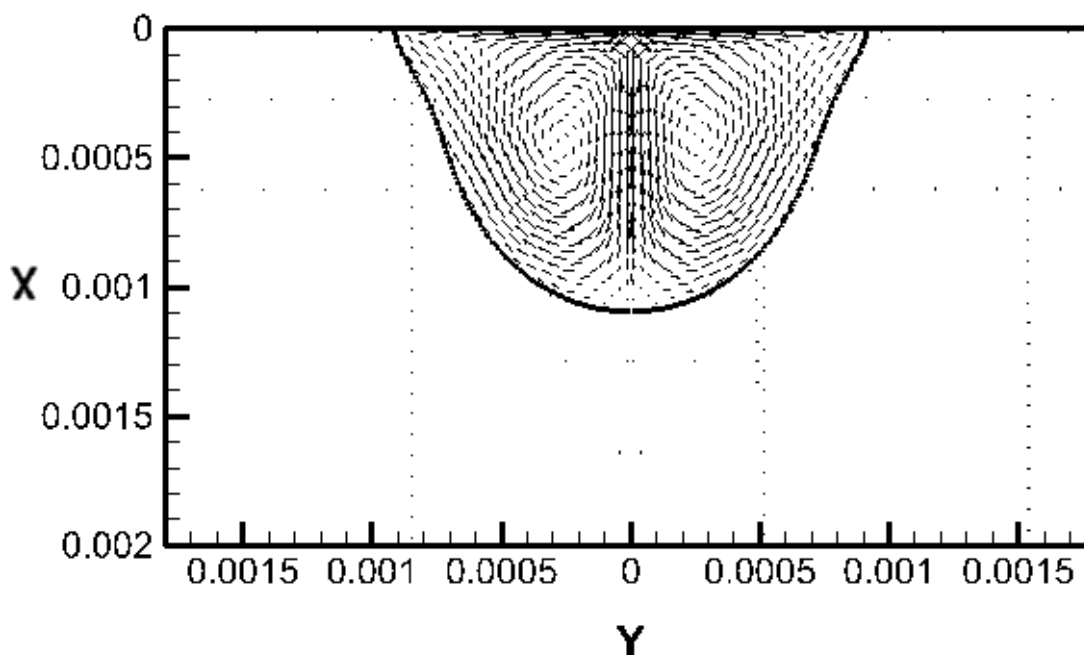
Rys. 4. Izotermy dla punktu znajdującego się pod wiązką laserową w chwili $t = 0.1$ s.

Na rys. 5. przedstawiono wykres prezentujący rozkład wektorów prędkości w jeziorku spawalniczym. Dodatni współczynnik temperaturowy napięcia powierzchniowego powoduje, że ruch ciekłego metalu odbywa się od brzegów jeziorka do środka przetopu. Napięcie

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

powierzchniowe odgrywa dużą rolę w procesie kształtowania się przetopu i dla stopów żelaza głównie zależy od ilości siarki w składzie. Skalę wpływu zjawiska zilustrowano na rys. 2, gdzie przedstawiono wykres strefy przetopienia bez uwzględnienia mechanizmu napięcia powierzchniowego.



Rys. 5. Kontur strefy przetopionej wraz z wektorami prędkości ruchu w jeziorce spawalniczym.

Prędkości w jeziorce spawalniczym dla składowej X wyniosły $0.975 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zaś dla składowej Y $1.095 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ co potwierdza słuszność wykorzystania modelu przepływu turbulentnego.

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że modele numeryczne procesu spawania laserowego dają dobre odwzorowanie przeprowadzonych przetopów. Jak wspomniano we wstępie może mieć to znaczący wpływ na obniżenie kosztów projektowania nowych połączeń spawanych. Z punktu widzenia naukowego analiza numeryczna daje głębszy wgląd w procesy zachodzące w trakcie spawania. Wyznaczenie pola prędkości i temperatur ma fundamentalne znaczenie przy określaniu sposobu mieszania się składników w trakcie przetopu dwóch lub więcej materiałów.

W porównaniu do metod analitycznych ten typ obliczeń jest wielokrotnie bardziej wymagający pod względem zapotrzebowania na moc obliczeniową, czas obliczeń oraz czas przygotowania modelu. Należy jednak zauważyć, że w obecnych czasach to metody numeryczne stały się głównym narzędziem zarówno badaczy jak i inżynierów procesu. Stało się tak dzięki szybkiemu wzrostowi mocy obliczeniowych komputerów oraz dużej dokładności tworzonych modeli.

Zaproponowany model CFD pozwala na wyznaczenie stref przetopienia, rozkładu temperatur wraz z pozostałymi parametrami znajdującymi się w obszarze zainteresowania.

Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem oprogramowania CFD

Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Bibliografia

- [1] D. Assuncao, S. Ganguly, D. Yapp, and S. Williams, "Conduction mode: broadening the range of applications for laser welding," 2012.
- [2] D. Rosenthal, *The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments*, 1946.
- [3] S. Bag, a. Trivedi, and a. De, "Development of a finite element based heat transfer model for conduction mode laser spot welding process using an adaptive volumetric heat source," *Int. J. Therm. Sci.*, 2009.
- [4] W. Zowczak, "Uproszczone pole temperatury dla analizy procesu spawania laserowego," *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011.
- [5] B. Grabas and E. Mazur, "Obliczenia teoretyczne kształtu laserowej spoiny punktowej," *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008.
- [6] X. He, "Finite Element Analysis of Laser Welding: A State of Art Review," *Mater. Manuf. Process.*, January 2013.
- [7] Ansys, "ANSYS FLUENT theory guide," 2009.
- [8] N. Chakraborty, "The effects of turbulence on molten pool transport during melting and solidification processes in continuous conduction mode laser welding of copper–nickel dissimilar couple," *Appl. Therm. Eng.*, 2009.
- [9] B. E. Launder and D. B. Spalding, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 1972.
- [10] V. R. Voller and C. Prakash, "A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987.
- [11] T. Mościcki and J. Radziejewska, "Numerical simulation and experimental analysis of simultaneous melting and burnishing of 304 stainless steel with oscillatory laser heat source," *Kovove. Mateialy*, 2013.
- [12] A. V Bulgakov and N. M. Bulgakova, "Thermal model of pulsed laser ablation under the conditions of formation and heating of a radiation-absorbing plasma," *Quantum Electronics*, 1999.
- [13] K. C. Mills, *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

**Modelowanie procesu przewodnościowego spawania laserowego z wykorzystaniem
oprogramowania CFD**

**Opracował: mgr inż. Rafał Banak, dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak, prof. PŚk - Politechnika
Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Kielce dr inż. Tomasz Mościcki – Instytut
Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa**