

Modele spawalniczych źródeł ciepła w analizie pola temperatury

Welding heat source models in the analysis of temperature field

Streszczenie

W pracy przedstawiono charakterystykę podstawowych rodzajów modeli spawalniczych źródeł ciepła wykorzystywanych w analizie pola temperatury. Pierwsza część pracy obejmuje genezę modeli źródeł ciepła przy spawaniu oraz opis takich modeli jak model płaski dyskowy, oraz model podwójnie elipsoidalny Goldaka. W dalszej części pracy przedstawiono przykłady zbudowanych modeli numerycznych spawanych płyt, w których zaimplementowano cztery różne modele źródeł ciepła: dyskowy, podwójnie elipsoidalny, prostopadłościenny i hybrydowy. Zobrazowano wyniki obliczeń numerycznych (MES) w postaci rozkładów pola temperatury w analizowanych modelach oraz dokonano porównania otrzymanych wyników.

Słowa kluczowe: pole temperatury; modele źródeł ciepła; modelowanie MES

Abstract

The paper presents the characterization of basic types of welding power heat sources used in the analysis of temperature field. The first part of the paper contains the genesis of heat source models used for welding processes.

It describes mainly the flat disk and double-ellipsoid Goldak models. The second part of the paper presents as an example numerical (FEM) models of welding heat sources. Four types of disk, double-ellipsoid, cuboid and hybrid models were constructed. The results of temperature field obtained from these models were presented and analyzed in comparison to each other. The results of temperature distribution show that it is very important to select adequate type of heat source model for the simulation of a welding process.

Keywords: temperature field; heat source model; FEM modeling

Wstęp

Pole temperatury w procesach spajania odgrywa kluczową rolę i jest przedmiotem wielu badań i analiz [1÷4]. Rozkład temperatury ma wpływ na wiele czynników, które decydują o jakości otrzymanego złącza spawanego. Wymienić tu można takie aspekty jak np. strukturę spoiny i obszaru strefy wpływu ciepła oraz jej wielkość, czy też powstające deformacje i naprężenia własne [5,6]. Charakter pola temperatury jaki powstaje podczas spawania zależy od zastosowanej metody spawania, a w szczególności od rodzaju i parametrów spawalniczego źródła energii. Dlatego też znajomość rozkładu temperatury jaki powstaje podczas spawania jest niezwykle cenna, ponieważ pozwala przewidywać pewne zjawiska w materiałach spawanych, a przez to sterować parametrami spawania w taki sposób, aby złącze spawane charakteryzowało się pożądanymi własnościami. Do wyznaczenia pola spawalniczego pola temperatury stosuje się metody analityczne (uproszczone), numeryczne (oparte na MES) oraz eksperymentalne

(np. pomiary kamerą termowizyjną czy z użyciem termopar). Z uwagi na koszt prowadzenia badań eksperymentalnych bardzo szybko rozwinęły się metody numeryczne, oparte na metodzie elementów skończonych, gdzie rozwiązuje się równanie przewodnictwa cieplnego Fouriera przy założonych warunkach brzegowych określających wymianę ciepła z otoczeniem.

Jednakże wykorzystanie analizy MES nie jest takim łatwym zadaniem, jak mogłoby się to wydawać. Zbudowanie odpowiedniego modelu obliczeniowego wymaga często dużo czasu, jednak raz zbudowany z powodzeniem może być stosowany w kolejnych analizach. Dodatkowo złożoność procesów, jakie towarzyszą spawaniu, zmusza do stosowania szeregu odpowiednich uproszczeń i przybliżeń. Całość sprawia, że otrzymanie poprawnych wyników jest zadaniem trudnym, lecz mimo tego oszczędności i zalety wynikające z zastosowania modelowania z wykorzystaniem metod numerycznych są niepodważalne.

Mgr inż. Damian Rochalski; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW; dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: dgol@wip.pw.edu.pl

Istnieje bardzo duża ilość modeli źródeł ciepła stosowanych w analizach numerycznych. Różnią się one między sobą przede wszystkim liczbą płaszczyzn, w których działają, kształtem oraz rozkładem ciepła. Bardzo ważnym aspektem są również oczekiwania, jakie postawione są w danej analizie. Inne modele będą wykorzystywane w przypadku analizy naprężeń poprzecznych w spoinie, a inne w przypadku naprężeń wzdłużnych. Ich mnogość spotykana w dostępnej literaturze wynika z faktu, iż każdy badacz chcąc uzyskać wyniki jak najbliższe rzeczywistości, podejmuje próby opisanie źródła ciepła w nowy sposób, który często jest pewnym rozwinięciem dostępnych modeli. Z tego powodu niemożliwym się wydaje opisanie wszystkich modeli źródeł ciepła, dlatego też w niniejszej pracy zostaną przedstawione te najważniejsze, które wywarły największy wpływ na rozwój modelowania pola temperatury.

Modele źródeł ciepła stosowane w analizie pola temperatury przy spawaniu

Modelowanie numeryczne procesów spawania ma głównie na celu ocenę rozkładu pola temperatury oraz towarzyszących im naprężeń, których wielkość i rozkład mogą znacząco wpływać na trwałość eksploatacyjną złącza spawanego. Zanim na dobre rozwinęły się techniki komputerowe wykorzystywane do modelowania procesów spawania trwały prace mające na celu oszacowanie pola temperatury przy spawaniu w sposób analityczny.

Modele źródeł ciepła o jednorodnym rozkładzie

Już w 1946 roku Rosenthal [7] przedstawił analityczne rozwiązanie rozkładu temperatury, co stało się podstawą do rozwoju opisu źródeł ciepła przy spawaniu. Rosenthal przedstawił rozwiązanie analityczne rozkładu temperatury dla przemieszczającego się punkowego źródła ciepła:

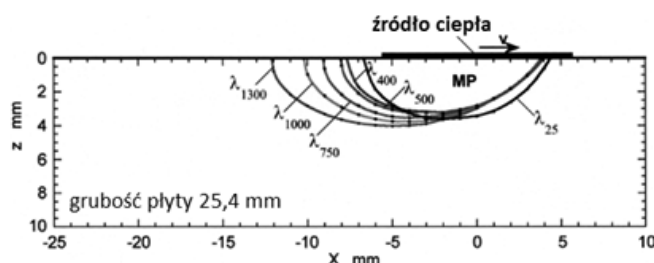
$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi kr} e^{-\frac{v(r-x)}{2\alpha}} \quad (1)$$

gdzie:

- T – temperatura,
- r – odległość od źródła ciepła,
- q – ciepło wprowadzone przez źródło,
- k – przewodność cieplna,
- α – dyfuzyjność cieplna.

Wyniki doświadczalne pomiarów pola temperatury przy spawaniu pokazały, że równanie Rosenthala daje dobrą zgodność rozwiązania dla danej wielkości spoiny, ale nie niesie ze sobą informacji o kształcie jeziora ciekłego metalu. Prowadzi także do przeszacowania głębokości spoiny oraz do niedoszacowania szerokości spoiny przy wysokich parametrach technologicznych spawania. Wynikało to z przyjęcia punkowego źródła ciepła, które daje nieskończenie wysoką ilość wprowadzonego ciepła w pobliżu punkowego źródła ciepła. Również niezbyt realistycznie wyglądał obszar strefy wpływu ciepła dla przeprowadzonych obliczeń.

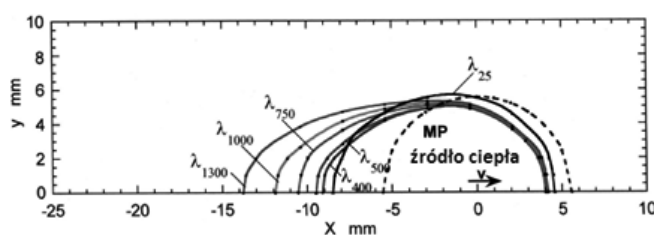
Z kolei Pavelic [8] wykorzystując metodę różnic skończonych (MRS) zbudował liniowy model źródła ciepła dla określenia rozkładu temperatury w dwuwymiarowej płycie. W eksperymencie tym niezbędne do przeprowadzenia analizy było ustalenie warunków brzegowych (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład ciekłego jeziora metalu (MP) przy liniowym modelu źródła ciepła [9]

Fig. 1. Distribution of weld metal pool (MP) in a linear heat source model

Kolejnymi ważnymi modelami dwuwymiarowymi były cylindryczne oraz kwadratowe modele źródeł ciepła. Polegały one na tym, iż po ustaleniu ich wielkości wewnątrz przyjętego obszaru przypisywało się im wartość energii spawania po oszacowaniu wszelkich strat ciepła. Następnie takie źródło przemieszczało się wzdłuż spawanego przedmiotu z prędkością odpowiadającą prędkości spawania (rys. 2).



Rys. 2. Rozkład ciekłego jeziora metalu (MP) przy cylindrycznym modelu źródła ciepła [9]

Fig. 2. Distribution of weld metal pool (MP) in a cylindrical heat source model

Opisane powyżej modele źródeł ciepła ze względu na swoje działanie w dwóch płaszczyznach nie dają dokładnego odwzorowania pola temperatury na głębokości płyty. Z tego powodu podjęto próby zastosowania modeli trójwymiarowych, co stało się możliwe wraz z rozwojem technologii oraz zwiększeniem mocy obliczeniowej komputerów. Zastosowanie prostopadłościennego modelu źródła ciepła doprowadziło do uzyskania znacznie dokładniejszych wyników. Pomimo znacznie dłuższego czasu obliczeń powstała możliwość przeprowadzenia pełnej analizy zachodzących zjawisk wynikających z przemieszczania się spawalniczego źródła ciepła w procesach spawania.

Zastosowanie walcowego modelu źródła ciepła miało szczególne znaczenie w przypadku spawania laserowego, które charakteryzuje się dużą gęstością mocy, co można zasymulować właśnie za pomocą modelu o kształcie walca, w którym rozkład energii jest stały na całej głębokości. Często w analizach symulacji procesów spawania laserowego czy też elektronowego wykorzystuje się również prostopadłościenny model źródła ciepła, także o jednorodnym rozkładzie. Takie uproszczenie wynika często z ograniczeń samych programów komputerowych, ale także ma związek z rzeczywistym kształtem źródła ciepła gdzie np. w procesach spawania elektronowego wiązka elektronów może być skupiona w taki sposób, że przyjmie kształt prostokąta czy też kwadratu na powierzchni płyty.

Modele źródeł ciepła o niejednorodnym rozkładzie

Modele źródeł ciepła o niejednorodnym rozkładzie dają większe możliwości, gdyż pozwalają na lepsze odwzorowanie zjawisk zachodzących w rzeczywistych procesach oddziaływania źródła ciepła na materiał. Z drugiej jednak

strony, nie można jednoznacznie stwierdzić ich przewagi nad modelami o jednorodnym rozkładzie, gdyż zakres ich stosowania może być zupełnie inny.

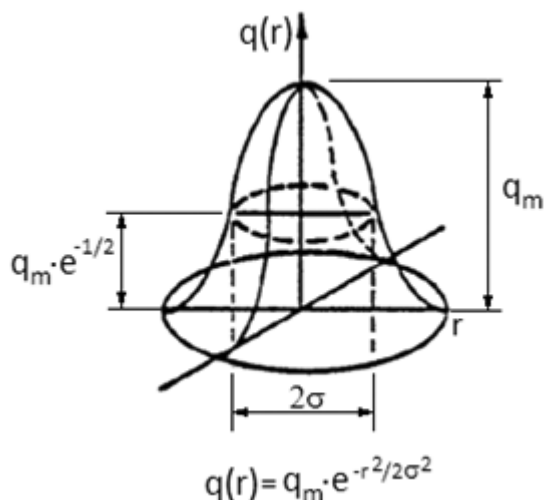
W 1983 roku Eagar and Tsai [10] jako pierwsi zaproponowali model źródła o niejednorodnym rozkładzie dla ruchomego źródła ciepła poruszającego się po półnieskończonej płycie:

$$q(r) = \frac{UIk}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

gdzie:

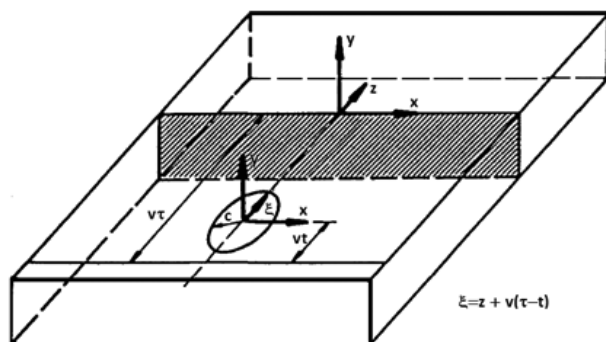
- q – powierzchniowy strumień ciepły w odległości r,
- U – napięcie,
- I – natężenie prądu,
- k – współczynnik sprawności,
- σ – promieniowa odległość od źródła.

Równanie stanowiło jedno z pierwszych przybliżeń umożliwiających ocenę geometrii jeziora ciekłego metalu na bazie fundamentów wymiany ciepła. Podobnie jak w modelu Rosenthala przyjęto założenie braku konwekcji i radiacji na brzegu modelu oraz stałe właściwości cieplne i quasi-stacjonarny półnieskończony ośrodek. W odróżnieniu od równania Rosenthala jedyną różnicą było zastosowanie Gaussowskiego rozkładu źródła ciepła (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład Gaussowski objętościowego źródła ciepła
Fig. 3. Gaussian distribution of volumetric heat sources

Na podstawie powyższego modelu został wyprowadzony dyskowy model źródła ciepła przez Pavelicia [8]. Jest on zaprezentowany wraz z kształtem ciekłego jeziora na rysunku 4.



Rys. 4. Rozkład źródła ciepła i kształt ciekłego jeziora metalu [11]
Fig. 4. The distribution of the heat source and the shape of the weld pool

Zostało zaproponowane równanie, które determinuje rozkład źródła ciepła [3]:

$$q(x, z) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

gdzie:

- q – ciepło spawania dostarczone na jednostkę powierzchni,
- Q – wytworzona moc łuku elektrycznego przy sprawności η, napięciu U i natężeniu I (ηUI),
- r – promień dysku,
- z – współrzędna lokalna określona wzdłuż ścieżki spawania,
- x – współrzędna lokalna określona wzdłuż prostopadłej do ścieżki spawania.

Dyskowy model źródła ciepła mimo bardzo dobrego odwzorowania kształtu ciekłego jeziora sprawdza się jedynie w zadaniach, gdzie głębokość penetracji ciepła podczas procesu spawania jest pomijalnie mała.

Pomimo że dostępne rozwiązania wykorzystujące dwuwymiarowe (2D) Gaussowskie źródła ciepła pozwalały przewidzieć rozkład temperatury w miejscach bliskich samego źródła, to w dalszym ciągu ich głównym ograniczeniem było to, że nie uwzględniały one wpływu oddziaływania w głąb materiału.

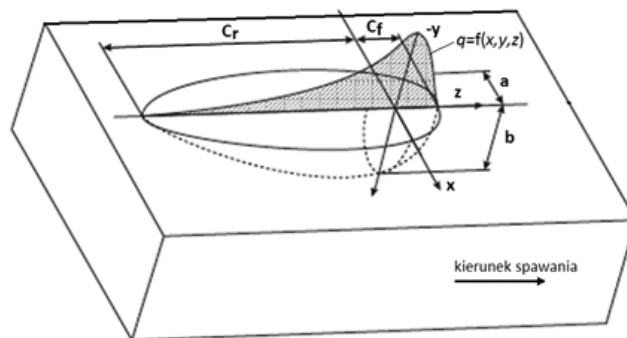
W 1983 roku Goldak [12] jako pierwszy zaproponował trójwymiarowe (3D) podwójnie elipsoidalne ruchome źródło ciepła. Przeprowadzone obliczenia numeryczne pola temperatury w czasie spawania płyty pokazały, że zaproponowane przestrzenne źródło ciepła może wyeliminować wady poprzedniego dwuwymiarowego modelu Gaussowskiego dla oszacowania pola temperatury w złączach spawanych przy znacznie większych głębokościach wtopienia.

Goldak pierwotnie zaproponował pół-elipsoidalne źródło w którym strumień ciepły ma rozkład Gaussa podobny jak dla źródła objętościowego:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}rQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c^2} - \frac{3y^2}{c^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (4)$$

Ten model źródła pozwalał na wyznaczanie gradientów temperatury przed łukiem, które jednak okazały się mniej strome niż wyznaczone doświadczalnie, a z kolei te za źródłem były bardziej strome. Zostało to skorygowane w modelu podwójnie elipsoidalnym źródła ciepła.

Model podwójnie elipsoidalny Goldaka (rys. 5) składa się z dwóch pół-elipsoidalnych objętości, które zostały wspólnie połączone tworząc nowy strumień ciepły. W modelu tym należy więc osobno opisać równaniem dwie pół-elipsy występujące przed oraz za źródłem ciepła przyjmując określone parametry geometryczne: a, b, c, c_f, c_r (rys. 5).



Rys. 5. Model podwójnie elipsoidalny Goldaka spawalniczego źródła ciepła [13]
Fig. 5. A double ellipsoidal Goldak's welding heat source model

Wartości tych parametrów pierwotnie wyznaczono mierząc efekty falowania powierzchni jeziora ciekłego metalu. Z braku innych danych, przyjęto także, że długość elipsy przed źródłem jest równa połowie szerokości spoiny, a długość elipsy za źródłem równa jest jej dwukrotnej szerokości.

Cechą charakterystyczną geometrii podwójnie elipsoidalnej jest to, że może być łatwo wykorzystana zarówno do modelowania spawania z niewielkim wtopieniem łuku spawalniczego, jak i głębszym wtopieniem jak to ma miejsce przy spawaniu laserowym i elektronowym. Rozkład strumienia ciepła w kierunku wzdłużnym ma charakter Gaussowski. Przednia połowa źródła ciepła stanowi ćwiartkę pierwszej elipsy, natomiast tylna połowa źródła jest ćwiartką drugiej elipsy. W takim układzie każdą elipsę definiują cztery parametry, które w sensie fizycznym odpowiadają wymiarom strefy ciekłego jeziora. Znając przekrój tej strefy (np. na podstawie badań) można wyznaczyć parametry źródła ciepła. W pierwszym przybliżeniu Goldak założył, że odległość przed źródłem jest równa połowie szerokości spoiny, a odległość za źródłem jest równa dwóm szerokościom spoiny.

Aby zasymulować efekty nagrzewania łukowego przyjęto, że ciepło wprowadzone jest do materiału jako ciepło wewnętrzne generowane na jednostkę objętości. Dla ułatwienia wprowadza się współrzędną ξ ustawioną w miejscu położenia źródła ciepła i poruszającą się razem z nim. Ramka odniesienia (w modelowaniu MES) obejmująca źródło ciepła i przemieszczająca się podczas spawania jest związana ze współrzędną materiału spawanego zależnością:

$$\xi = z - v(t - \tau) \quad (5)$$

gdzie:

v – prędkość spawania,

τ – czas opóźnienia niezbędny aby określić pozycję źródła ciepła w czasie $t = 0$.

Udziały wagowe przyporządkowane do przedniej i tylnej części elips są oznaczone odpowiednio przez c_f i c_r . Udziały te spełniają zależność $c_f + c_r = 2$. Oznaczając przez q gęstość mocy wewnątrz elipsy (w W/m^3) a parametry a , b i c półosie elips równoległe do osi x , y , ξ otrzymujemy równanie opisujące rozkład gęstości mocy w przedniej ćwiartce elipsy:

$$q_f(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3\xi^2}{c_f^2}\right) \quad (6)$$

oraz w tylnej ćwiartce elipsy:

$$q_r(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3\xi^2}{c_r^2}\right) \quad (7)$$

gdzie:

q_f – moc źródła ciepła na jednostkę objętości przed osią elektrody,

q_r – moc źródła ciepła na jednostkę objętości za osią elektrody,

Q – wytworzona moc łuku elektrycznego przy sprawności η , napięciu U i natężeniu prądu I ,

a – szerokość spoiny określona w kierunku prostopadłym do osi spoiny,

b – wielkość penetracji źródła ciepła w głąb spoiny,

c_f – przednia głębokość penetracji wzdłuż osi spoiny,

c_r – tylna głębokość penetracji wzdłuż osi spoiny.

$$f_f = \frac{2}{\left(1 + \frac{c_f}{c_r}\right)}$$

$$f_r = \frac{2}{\left(1 + \frac{c_r}{c_f}\right)}$$

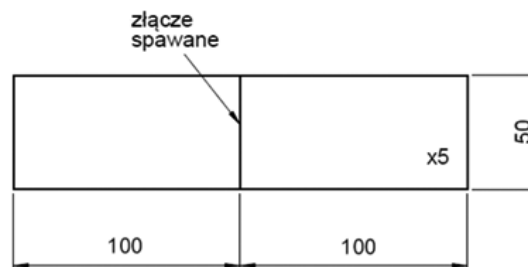
W równaniach tych Q oznacza ciepło występujące w źródle, przy spawaniu łukowym ($Q = \eta VI$). Parametry a , b , c_f i c_r są niezależne i mogą przyjmować różne wartości dla przedniej i tylnej części źródła. Charakterystyczne dla tego modelu jest to, że efekty początku i końca działania źródła ciepła mogą być w nim także uwzględnione. Rozkład przestrzenny ciepła jest obliczony z równań 6 i 7 i wprowadzony do obliczeń pola temperatury jako ciepło generowane w sposób objętościowy. W zależności od zastosowania oraz procesu zostały również opracowane inne objętościowe modele źródła ciepła oparte na Gaussowskim rozkładzie m.in. stożkowy oraz półkuliasty model źródła ciepła, które jednak są stosowane bardzo rzadko i odgrywają mniej znaczącą rolę niż model zaproponowany przez Goldaka.

Przykład modelu numerycznego spawania płyty z wykorzystaniem różnych modeli źródła ciepła

Zaprezentowano cztery modele numeryczne wykorzystujące różne modele spawalniczych źródeł ciepła: model dyskowy, model Goldaka, model prostopadłościenny oraz model hybrydowy. Trzy pierwsze będą wykorzystywały te same wielkości geometryczne dotyczące spawanych blach, jak i parametry bezpośrednio dotyczące samego procesu spawania takie jak moc źródła ciepła oraz prędkość spawania. W przypadku modelu hybrydowego w celu lepszego zobrazowania całego procesu spawania zwiększono grubość blach oraz moc źródła ciepła.

Jako przykład ilustrujący zastosowanie różnych modeli spawalniczych źródeł ciepła przy modelowaniu pola temperatury zbudowano model numeryczny (MES) spawanych doczołowo płyt stalowych o wymiarach 50 x 100 x 5 mm (rys. 6), przy następujących parametrach: $I = 130$ A, $U = 22$ V, $\eta = 0,7$, $V_{sp} = 80$ cm/min. Na podstawie podanych parametrów obliczona została całkowita wartość energii:

$$Q = \eta * I * U = 0,7 * 130 * 22 \approx 2000 \text{ [W]} \quad (8)$$



Rys. 6. Widok płyt biorących udział w procesie spawania
Fig. 6. View of the plates involved in the welding process

Z uwagi na symetrię geometrii modelowanie obejmowało tylko jedną płytę wraz z połową złącza. Analogicznie, zastosowany przy spawaniu model źródła ciepła także jest symetryczny co wystarczy na użycie jego połowy. Takie podejście znacząco zmniejsza czas potrzebny na przygotowanie modelu oraz przeprowadzenie symulacji komputerowej.

W symulacji założono, że wymiana ciepła pomiędzy źródłem ciepła a materiałem spawanym odbywać się będzie jedynie na drodze przewodzenia. Konwekcja oraz radiacja zostały uwzględnione we współczynniku sprawności. Wymianę ciepła pomiędzy materiałem spawanym a otoczeniem opisano poprzez konwekcję, której wielkość (współczynnik) ustalono na poziomie $\alpha_k = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, co odpowiada warunkom panującym w powietrzu bez wymuszonego przepływu (tzw. konwekcja swobodna).

Do celów analizy numerycznej przyjęto właściwości materiałowe stali (przewodność cieplna, ciepło właściwe, gęstość) takie jak dla czystego żelaza na podstawie danych literaturowych [14]. Uwzględniono również ich zmienność w zależności od temperatury. Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu do analizy zagadnień cieplnych i mechanicznych LUSAS FEA v.14.7 opartego na metodzie elementów skończonych.

Model dyskowy

Dyskowy model spawalniczego źródła ciepła należy do modeli o niejednorodnym rozkładzie. Oznacza to, że wewnątrz obszaru w każdym jego punkcie wartość przydzielonego ciepła jest inna, zgodna z rozkładem Gaussa. Największa gęstość ciepła występuje w osi dysku, najmniejsza zaś na obwodzie. Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki symulacji ukazujące pole temperatury w czasie procesu spawania stalowej płyty.



Rys. 7. Pole temperatury w modelu dyskowym źródła ciepła – rzut z góry

Fig. 7. Temperature field in the disk model of heat source – upper projection

Kolor czerwony opisuje obszar jeziora ciekłego metalu. Wyraźnie widać, iż przyjmuje on postać półokręgu – zgodnie z kształtem modelu źródła ciepła. Przed tym obszarem gradient temperatury jest zdecydowanie większy niż za nim, co wynika z przemieszczania źródła ciepła w procesie spawania. Widoczne zniekształcenia linii pola temperatury wynikają z niedokładności modelu numerycznego, jednakże do celów porównawczych jest on akceptowalny.

Na rysunku 8 i rysunku 9 przedstawiono pole temperatury w modelu dyskowym widoczne w rzucie bocznym oraz w przekroju poprzecznym. Otrzymane rozkłady dostarczają cennych informacji na temat kształtu spoiny utworzonej w wyniku zastosowania danego modelu.

W przypadku modelu dyskowego uzyskano szerokość spoiny równą 5,08 mm oraz grubość (głębokość) 1,22 mm.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń możemy również wyznaczyć cykl cieplny w dowolnym punkcie modelu, na podstawie którego wyznacza się czas stygnięcia $T_{8/5}$, który w tym przypadku dla punktu znajdującego się w osi spoiny wynosi 0,6 s (rys.10).

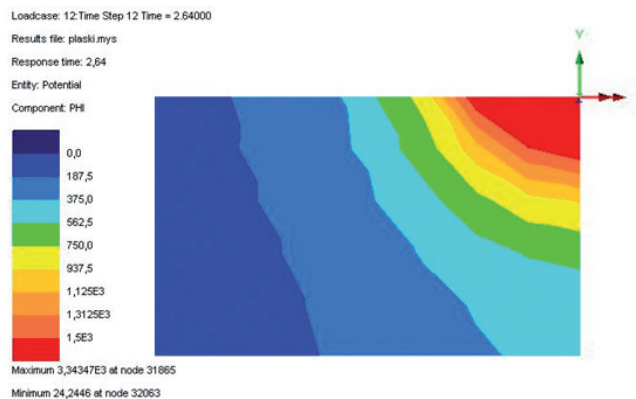
Model Goldaka

Główną cechą modelu Goldaka odróżniającą go od modelu dyskowego jest jego przestrzenne działanie. Ponadto, model ten składa się z dwóch różnych podobszarów: pierwszą pół-eliipsoidę znajdującą się przed osią oraz drugą



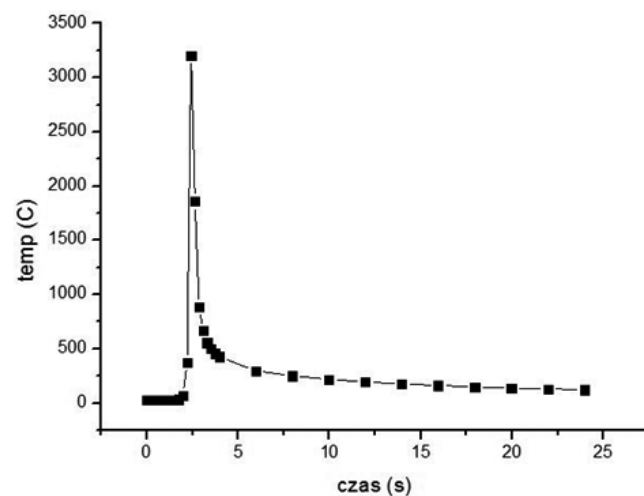
Rys. 8. Pole temperatury w modelu dyskowym – rzut z boku (w linii spoiny)

Fig. 8. Temperature field in the disk model – side projection (in weld line)



Rys. 9. Pole temperatury w modelu dyskowym – przekrój poprzeczny (lewa połowa modelu)

Fig. 9. Temperature field in the disk model – cross section (left half of model)



Rys. 10. Model dyskowy – cykl cieplny dla punktu znajdującego się w osi spoiny

Fig. 10. Disk model - thermal cycle of the point in a weld axis

znajdującą się za nią. Przeprowadzona analiza numeryczna z wykorzystaniem modelu Goldaka zawierała identyczne parametry procesu jak w modelu dyskowym. Różnica wynikała wyłącznie z działania innego rodzaju źródła ciepła.

Oddziaływanie źródła ciepła we wszystkich kierunkach (x,y,z) skutkuje tym, że pole temperatury obrazujące jezioro ciekłego metalu, widoczne na rysunku 11 w rzucie z góry, jest mniejsze niż przy zastosowaniu modelu płaskiego. Maksymalna temperatura, jaką zarejestrowano w modelu Goldaka również uległa zmniejszeniu i wyniosła ok. 2430 °C (rys. 12), co wydaje się oczywiste z uwagi na to, że zmniejszyła się gęstość energii.

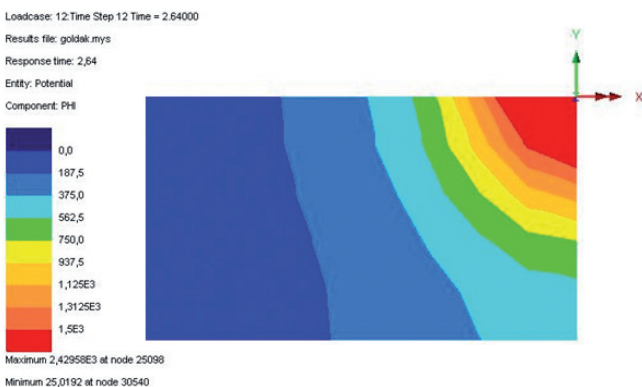
Przekrój poprzeczny (rys. 12 i 13) wyraźnie ukazuje różnicę w geometrii spoiny uzyskanej przy użyciu modelu Goldaka w porównaniu do modelu dyskowego. W tym przypadku



Rys. 11. Pole temperatury w modelu Goldaka – rzut z góry
Fig. 11. Temperature field in Goldak's model – upper projection



Rys. 12. Pole temperatury w modelu Goldaka – rzut z boku (w linii spoiny)
Fig. 12. Temperature field in Goldak's model – side projection (in weld line)



Rys. 13. Pole temperatury w modelu Goldaka – przekrój poprzeczny (lewa połowa modelu)
Fig. 13. Temperature field in Goldak's model – cross section (left half of model)

szerokość spoiny jest mniejsza i wynosi 3,38 mm, z kolei grubość spoiny (głębokość wtopienia) jest większa i osiąga poziom 1,47 mm. Wyliczony na podstawie cyklu cieplnego czas stygnięcia $\tau_{8/5}$ znacząco nie różni się od tego uzyskanego w modelu dyskowym i wynosi 0,59 s.

Model prostopadłościenny

Model prostopadłościenny źródła ciepła, w odróżnieniu od wcześniejszych modeli charakteryzuje się jednorodnym rozkładem mocy, która jest rozłożona w trzech wymiarach. Ma on reprezentować oddziaływanie ciepła w procesach spawania o skoncentrowanej energii, takich jak wiązka lasera czy strumień plazmy. Znany i stosowany do tych procesów jest także model walca, jednakże z uwagi na uproszczenie geometrii do analizy pola temperatury przyjęto wersję modelu o kształcie prostopadłościennym.

Na rysunku 14 przedstawiono wyznaczone w analizie numerycznej pole temperatury dla modelu prostopadłościennego. Jak widać powierzchnia obejmująca obszar ciekłego jeziora metalu w rzucie z góry jest zdecydowanie najmniejsza spośród dotychczas zaprezentowanych modeli. Izotermy przybierają kształt linii ukierunkowanych niemal prostopadle do powierzchni blachy co świadczy o znacznym oddziaływaniu źródła ciepła w głąb grubości materiału.

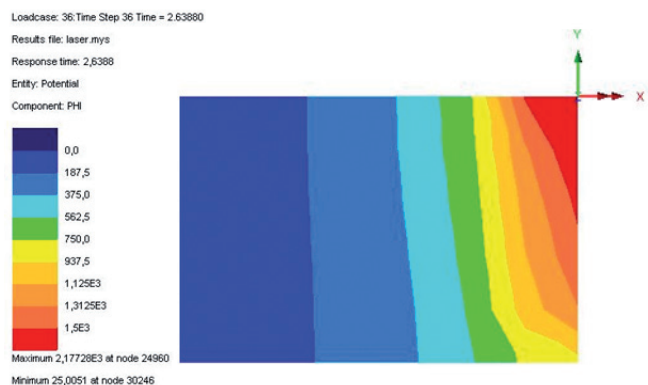
Wyznaczone pole temperatury (rys. 15 i 16) podczas symulacji wykorzystującej model prostopadłościenny prowadzi do otrzymania spoiny o najmniejszej szerokości wynoszącej 5,64 mm. Z drugiej strony uzyskano grubość spoiny równą 2,45 mm. Widać więc, że model prostopadłościenny, lepiej nadaje się do opisu źródła ciepła w postaci skoncentrowanej, jak to ma miejsce w procesach spawania plazmowego czy też laserowego.



Rys. 14. Pole temperatury w modelu prostopadłościennym – rzut z góry
Fig. 14. Temperature field in a cuboid model – upper projection



Rys. 15. Pole temperatury w modelu prostopadłościennym – rzut z boku (w linii spoiny)
Fig. 15. Temperature field in a cuboid model – side projection (in weld line)



Rys. 16. Pole temperatury w modelu prostopadłościennym – przekrój poprzeczny (lewa połowa modelu)
Fig. 16. Temperature field in a cuboid model – cross section (left half of model)

Model hybrydowy

Modele hybrydowe spawalniczego źródła ciepła pojawiły się w momencie powstania procesów spawania hybrydowego, do których należy zaliczyć przede wszystkim spawanie hybrydowe laser + GMA czy też plazma + GMA. W takiej kombinacji mamy do czynienia z równoczesnym oddziaływaniem klasycznego źródła ciepła (GMA) oraz skoncentrowanego źródła ciepła (laser, plazma), które nagrzewają materiał spawany.

W przedstawionej analizie zbudowano model hybrydowy źródła ciepła, który stanowi połączenie modelu Goldaka oraz modelu prostopadłościennego. Dla lepszego

zobrazowania efektu działania modelu hybrydowego zdecydowano się zwiększyć grubość blach modelu geometrycznego do 10 mm. Zwiększono także całkowitą moc źródła ciepła do 7400 W. Pozostałe parametry modelu, w tym prędkość spawania pozostały niezmiennie.

Na rysunku 17 przedstawiono obliczone dla modelu hybrydowego pole temperatury podczas spawania dwóch blach. Widoczny jest dużo większy obszar obejmujący jeziorko ciekłego metalu. Można zauważyć występowanie wąskiego obszaru przetopionego materiału na froncie źródła (oddziaływanie źródła skoncentrowanego), które płynnie rozszerza się i wydłuża w środkowej i tylnej części źródła (klasyczne źródło ciepła).

Połączone oddziaływanie dwóch różnych rodzajów źródeł ciepła jest lepiej widoczne na rysunku 18 gdzie pokazano rozkład pola temperatury w przekroju wzdłużnym złącza biegnącym w linii spoiny. Pierwsze źródło o skoncentrowanym rozkładzie prowadzi do uzyskania głębokiego wtopienia. Widoczny jest wysoki gradient temperatury na przodzie tego źródła, występujący przede wszystkim w kierunku spawania. Drugie źródło ciepła charakteryzuje się znacznie większą długością, mniejszym zasięgiem oddziaływania w głąb materiału pełniąc często funkcję wypełnienia spoiny



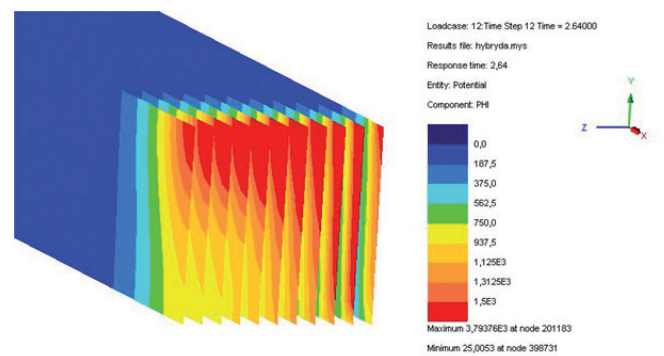
Rys. 17. Pole temperatury w modelu hybrydowym – rzut z góry
Fig. 17. Temperature field in the hybrid model – upper projection

oraz formowania jej lica. Z uwagi na szereg uproszczeń związanych z geometrią modelu źródła ciepła widoczny jest pewien uskok pomiędzy częścią pola temperatury, powstały w wyniku oddziaływania źródła skoncentrowanego oraz klasycznego (rys. 19).



Rys. 18. Pole temperatury w modelu hybrydowym – rzut z boku (w linii spoiny)

Fig. 18. Temperature field in the hybrid model – side projection (in weld line)



Rys. 19. Pole temperatury w modelu hybrydowym – przekroje poprzeczne

Fig. 19. Temperature field in the hybrid model – cross sections

Podsumowanie

Wyznaczenie rozkładu pola temperatury poprzez analizę numeryczną dostarcza nam szereg cennych informacji dotyczących samej spoiny m.in. szerokość, grubość (głębokość wtopienia), strefy wpływu ciepła, czasu stygnięcia w zakresie temperatury 800-500 °C czy też temperatury maksymalnej. Dzięki temu analiza taka jest bardzo cennym narzędziem pozwalającym już na etapie projektowania złączy spawanych ocenić je i dokonać ewentualnych korekt w procesie spawania, które zapewnią uzyskanie korzystniejszych parametrów złącza. W tabelicy 1 zamieszczono wybrane parametry wyznaczone w analizie numerycznej przedstawionych przykładów modeli spawalniczych źródeł ciepła.

Przeprowadzone w pracy analizy numeryczne pola temperatury dla różnych rodzajów spawalniczych źródeł ciepła mają charakter porównawczy, mający na celu głównie pokazanie, jak dla identycznych parametrów spawania uzyskuje się znacznie różniące się od siebie rozkłady pola temperatury podczas spawania. Model Goldaka oparty na podwójnej elipsoidzie i rozkładzie Gaussa daje znacznie lepsze rezultaty w procesach spawania łukowego niż model płaski dyskowy. Z drugiej strony, jeśli interesuje nas jedynie rozkład temperatury na powierzchni spawanego przedmiotu to model dyskowy źródła ciepła może być również z powodzeniem stosowany. Na jego korzyść przemawia fakt szybszego przygotowania procesu oraz krótszy czas obliczeń. W przypadku analiz gdzie głębokość wtopienia jest istotna model ten ustępuje jednak wspomnianemu modelowi przestrzennemu.

W przypadku modelowania procesów spawania wykorzystujących skoncentrowane źródła ciepła jak np. wiązka laserowa duże znaczenie ma wykorzystanie modeli przestrzennych prostopadłościennych oraz walcowych o jednorodnym rozkładzie. Umożliwiają one zbudowanie źródła ciepła o małej średnicy wiązki oraz dużej gęstości energii. Potwierdzają to uzyskane wyniki obliczeń, w których spoina jest o małej szerokości oraz dużej głębokości wtopienia. Modele hybrydowe spawalniczych źródeł ciepła mają w domyśle łączyć w sobie skoncentrowane źródło ciepła z klasycznym źródłem np. opisanym modelem Goldaka. Przedstawiony przykład analizy pola temperatury z wykorzystaniem takiego modelu pokazuje, że nadawać się one mogą do opisu pola temperatury w procesach spawania hybrydowego laser + GMA czy plazma + GMA oraz że mają one duży potencjał rozwoju wynikający z coraz większego rozwoju metod spawania hybrydowego.

Tablica I. Zestawienie porównawcze wybranych parametrów dla różnych modeli spawalniczych źródeł ciepła
Table I. Comparison of selected parameters for different models of welding heat sources

	model			
	dyskowy	Goldaka	prostokątny	hybrydowy
szerokość spoiny [mm]	5,08	3,38	2,40	5,96
grubość spoiny [mm]	1,22	1,47	2,45	9,30
szerokość SWC [mm]	13,00	7,14	5,64	12,20
czas stygnięcia $t_{8/5}$ [s]	0,60	0,59	0,69	2,32
temp maksymalna [°C]	3343	2429	2177	3793
moc źródła [W]	2000	2000	2000	7400
prędkość spawania [mm/s]	13,6	13,6	13,6	13,6
energia liniowa [J/mm]	147,05	147,05	147,05	544,11

Podsumowując, należy stwierdzić, że podczas symulacji numerycznych procesów spawania bardzo ważny jest dobór odpowiedniego modelu spawalniczego źródła ciepła, gdyż tylko w ten sposób możemy uzyskiwać wyniki, które będą zbliżały nas do rzeczywistego zachowania się złącza podczas spawania. Znajomość rozkładu pola temperatury czy obrazowania cykli cieplnych podczas spawania umożliwi otrzymanie dalszych informacji, takich jak struktura powstająca w strefie wpływu ciepła czy też wyznaczenie rozkładu naprężeń własnych w złączu, jak i zobrazowanie rodzaju i wielkości odkształceń w konstrukcjach spawanych.

Literatura

- [1] Komanduri R., Hou, Z.B.: Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part I. General Solutions, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31B, pp. 1353–1370, 2000.
- [2] Golański D., Chmielewski T.: Modelowanie pola temperatury w czasie stygnięcia układu powłoka-podłoże wytworzonego przez natryskiwanie cieplne, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, Zeszyt Nr 230, s. 95–104, 2010.
- [3] Golanski D.: Temperature distribution in a cylindrical Al2O3-steel joint during the vacuum brazing cycle, Journal of Materials Processing Technology, vol.56 (1-4), pp. 945–954, 1996.
- [4] Hudycz M., Chmielewski T., Golański D.: Analysis of Distribution of Temperature and Stresses During the Friction Metallisation of AlN Ceramics with Titanium, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, vol. 60, No. 5 pp. 63–67, 2016.
- [5] Choa JR, Leea B.Y., Moon Y.H., Van Tynec C.J.: Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155–156, pp. 1690–1695, 2004.
- [6] Yi H-J, Kim J-Y, Yoon Y-H, Kang S-S: Investigations on welding residual stress and distortion in a cylinder assembly by means of a 3D finite element method and experiments, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25, Issue 12, pp. 3185–3193, 2011.
- [7] Rosenthal D.: The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments, Trans. ASME, 68-11, pp. 849–866, 1946.
- [8] Pavelic V., Tanbakuchi R., Uyehara O.A., Myers P.S.: Welding Res. Suppl. July, pp. 295–304, 1969.
- [9] Komanduri R., Hou, Z.B.: Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of Variation of Thermophysical Properties with Temperature, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 32B, pp. 483–499, 2001.
- [10] Eagar T.W., Tsai N.-S.: Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources, Welding Journal, Vol. 62(12) pp. 346–355, 1983.
- [11] Krutz G.W. and Segerlind L.J.: Finite element analysis of welded structures, Welding Journal, Vol. 57, pp. 211–216, 1978.
- [12] Goldak J., Chakravarti A, Bibby M.: A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Transactions B, vol. 15, no. 2, pp. 299–305, 1984.
- [13] Francis J.D.: Welding simulation of aluminum alloy joints by finite element analysis, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2002.
- [14] Goldsmith A., Waterman T.E., Hirschorn H.J.: Handbook of thermophysical properties of solid materials, New York 1961.