

POSZUKIWANIE RACJONALNEGO SPOSOBU UKŁADANIA ŚCIEGÓW SPAVALNICZYCH NA PODSTAWIE OBLICZEŃ MES

ANDRZEJ SKIBICKI

Streszczenie

Wymagania technologiczne lub wynikające z kształtu przedmiotu prowadzą niekiedy do decydowania się na złożone sposoby układania ściegów spawalniczych. Otrzymanie ciągłej, metalicznej spoiny nie wyklucza istnienia w niej obszarów sprzyjających powstawaniu i rozwijaniu pęknięć lub wywołujących istotne dla dalszego spawania lub eksploatacji deformacje spawalnicze. Obliczono za pomocą MES pole temperatury oraz pozostające naprężenia i deformacje. Analizowano spoinę wykonywaną jednym ściegiem oraz jej wykonywanie dwoma ściegami o kilku sekwencjach i kierunkach. Stosowano nieliniowe własności materiałowe. Użyto programu ANSYS.

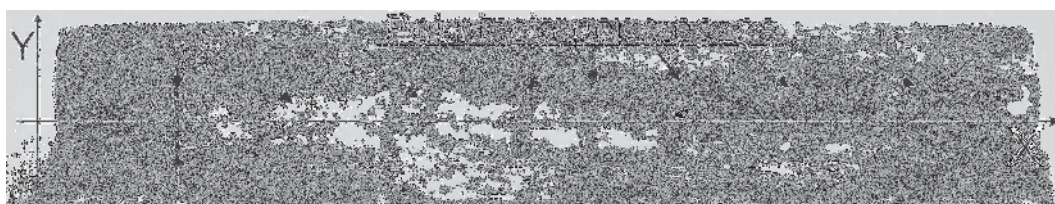
Słowa kluczowe: spawanie, naprężenie, MES, aluminium, sposób układania ściegów

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie metali lekkich i ich stopów jest powszechne, zwłaszcza w konstrukcjach wymagających możliwie małej masy. Najczęściej stosowane jest aluminium, które ze względu na aktywność chemiczną, wysokie współczynniki przewodzenia ciepła i rozszerzalności temperaturowej, stwarza jednak problemy podczas spajania. Niezbędne jest stosowanie szlachetnych gazów osłonowych, niekiedy nawet z obu stron spoiny, starannie dobranych materiałów dodatkowych i zatrudniania spawaczy z wysokimi kwalifikacjami. Dopuszcza się spoiny o większych odstępstwach od stanu idealnego, np. z większymi wadami spawalniczymi. Stosuje się też specjalizowane urządzenia – spawarki. Spawanie stopów aluminium coraz częściej odbywa się z zastosowaniem nowoczesnych źródeł prądu umożliwiających precyzyjne dostarczanie ciepła np. dzięki zastosowaniu łuku okresowo przerywanego. Umożliwia to łatwiejsze wykonywanie spoin o wysokiej jakości bez znaczącego wzrostu kosztów. Poszukiwania innych metod wykonywania spoin trwają nadal i obejmują również kolejność i sposób układania ściegów spawalniczych. Jeżeli ważne jest zmniejszenie wartości pozostających po spawaniu naprężeń i odkształceń to często stosuje się spawanie ze specjalnie zaplanowaną kolejnością wykonywania ściegów lub odcinków spoin. Jednym ze skutecznych sposobów jest celowe zastąpienie pojedynczego długiego ściegu kilkoma innymi ściegami ułożonymi w zaplanowanej kolejności i kierunku. Stosuje się tu np. spawanie równocześnie z dwóch stron, przerywane lub krótkimi odcinkami z krokiem odwrotnym. Interesującym wydaje się sprawdzenie czy technologia ta nie ma ujemnych skutków, widocznych np. przy rozważaniu naprężeń pozostających.

Nagrzewanie niezbędne do stopienia objętości spoiny wprowadza ciepło również do obszarów sąsiednich – strefy wpływu ciepła. Nierozłącznie związane ze spawaniem pole temperatury wywołuje istotne skutki mechaniczne. Uwidaczniają się one poprzez odkształcenia lub pęknięcia

spawanych elementów będące wynikiem sumowania się pospawalniczych naprężeń pozostających z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych. Ryzyko wystąpienia pęknięć wzrasta dla materiałów o małym zapasie plastyczności, np. żeliwa, metali umocnionych przez zgniot lub obróbkę cieplną. Istotnym czynnikiem jest również grubość i stopień utwardzenia spajanych elementów. Przykład pęknięć pospawalniczych przedstawiono na (rys. 1).



Rys. 1. Liczne pęknięcia poprzeczne powstałe w wyniku działania naprężeń pozostających po przetapieniu metodą TIG (141) materiału o małym zapasie plastyczności. Żeliwo, spoina o szerokości b , układana w kierunku x . Badano penetrantem. Pow. $x2$

Źródło: opracowanie własne.

Wiele stopów aluminium uzyskuje swoje wysokie własności mechaniczne dzięki umacnianiu dyspersyjnemu które może obniżać własności plastyczne. Problemy te uniemożliwiają spawanie aluminiowych konstrukcji lotniczych – tak ze względu na odkształcenia jak i naprężenia pospawalnicze.

Próby przeciwdziałania mechanicznym skutkom spawania opierają się często na wyczuciu i doświadczeniu technologa planującego prace spawalnicze, tym bardziej, że często próbną serią nie może być brana pod uwagę. Badania eksperymentalne są kosztowne i skomplikowane. Zniechęcają do analizowania nietypowych, być może skutecznych, rozwiązań.

Wyznaczanie naprężeń i odkształceń pozostających po spawaniu należy podzielić na dwa etapy: obliczenie pola temperatury a następnie wynikającego z niego pola odkształceń i naprężeń [5].

Podstawą do prowadzenia obliczeń temperatury jest ogólna postać równania Fouriera-Kirchhoffa, która w nieruchomym układzie współrzędnych (x_0, y_0, z_0, t) ma postać:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - c_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q(x_0, y_0, z_0, t) \quad (1)$$

Dla ośrodka jednorodnego, po uwzględnieniu operatora ∇ otrzymuje się:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_V}{\lambda} = \frac{c_p \rho \partial T}{\lambda \partial t} \quad (2)$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodzenia ciepła $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$,

c_p – ciepło właściwe przy $p = \text{const}$, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$,

ρ – gęstość, kgm^{-3} ,

T – temperatura, K ,

t – czas, s ,

q_V – objętościowe źródło ciepła, $\text{Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$,

p – ciśnienie.

Analityczne rozwiązanie dla spotykanych w spawalnictwie nieliniowych własności materiałowych, geometrii spawanych elementów i źródeł ciepła jest bardzo utrudnione. Zastosowanie MES (Metoda Elementu Skończonego) pozwala na uzyskanie rozkładu temperatury, także niestacjonarnego, dla wielu przypadków praktycznych.

Z kolei zgodnie z metodą opracowaną przez Okerbłoma podstawą do wyznaczenia odkształceń jest wartość względnych odkształceń wewnętrznych w obrębie spoiny. Można je określić jako:

$$|\mathcal{E}| = \mathcal{E}_T - \Delta \quad (3)$$

gdzie:

\mathcal{E}_T – względne odkształcenie temperaturowe,

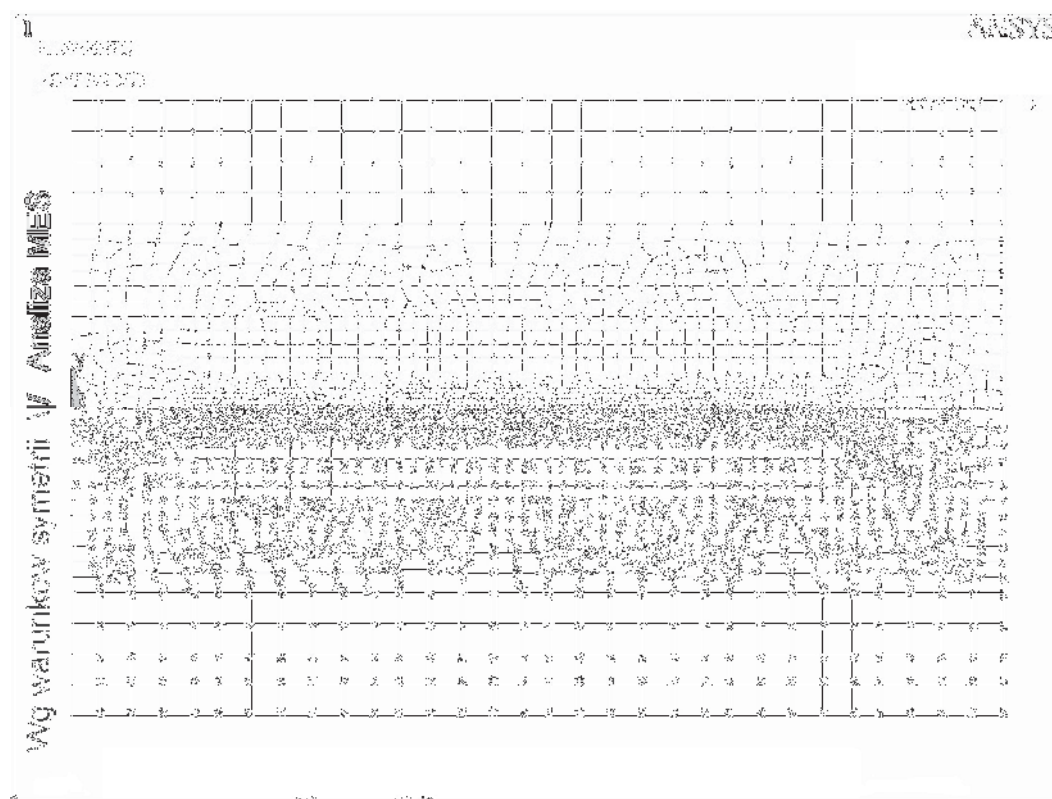
Δ – względne odkształcenie rzeczywiste.

Praktyczne zastosowanie metody Okerbłoma wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających dotyczących materiału spawanego, np. o idealnych własnościach sprężysto-plastycznych, odniesienia wartości parametrów materiałowych do średniej temperatury – tj. uznania ich za stałe [5]. Przy dążeniu do uzyskania dokładniejszych rozwiązań skłania to do stosowania MES, zwłaszcza jeżeli pole temperatury zostało wcześniej obliczone tą metodą. Uzyskanie rozwiązań analitycznych dla przedstawionych w artykule rozłożonych źródeł ciepła, dodatkowo ruchomych w sposób niejednostajny, staje się praktycznie niemożliwe.

Wynika z tego że metody analityczne i analityczno-wykreślne mają ograniczony zakres stosowania z powodu zmiennych nieliniowo (w funkcji temperatury i innych czynników) własności materiałowych elementów spawanych. Pojawiają się też trudności przy modelowaniu złożonych cykli cieplnych. Stosując MES można na drodze obliczeniowej uzyskać wartości nieustalonych i pozostających pól naprężeń i odkształceń. Istnieje przy tym bardzo duża możliwość definiowania geometrii (kształt przedmiotu, rozkład mocy w źródle, zmienność w czasie, jego trajektoria itp.). Spawanie stopów aluminium jest często utrudnione – tak ze względów metalurgicznych jak i wynikających ze spawania pól temperatury, odkształceń i naprężeń. Wyraźnie inne niż dla stali własności np. $\lambda(T)$, $\alpha_T(T)$, $R_e(T)$ zmieniają przebieg spawania i utrudniają zastosowanie znanych z praktyki, dla stali, sposobów. Wraz ze wzrostem wymiarów konstrukcji, powiększaniem się grubości i długości spoin problemy stają się coraz wyraźniejsze. Wcześniejsze poznanie rozkładów przejściowych i pozostających: temperatury, deformacji i naprężeń, umożliwić może opracowanie lepszych technologii (np. mniejsze naddatki, naprężenia, deformacje). Znając pole temperatury może określić właściwą energię liniową, kolejność układania spoin i ściegów oraz wielkość jeziorka. Zastosowano do tego celu MES. Na podstawie zgodności wyników własnych obliczeń i eksperymentu [6] prowadzonych dla trudno modelowalnego materiału typu stal, można sądzić że metoda nadaje się również dla innych materiałów, w tym stopów aluminium. Decyzja o sposobie układania ściegów powinna być podjęta przy uwzględnieniu wszelkich dostępnych przesłanek i informacji, zwłaszcza jeżeli ma odbiegać od przemysłowych paradygmatów. Dlatego też stosowanie symulacji MES może być ważnym narzędziem, istotnie wpływającym na podejmowane decyzje.

2. Model numeryczny

Obliczenia prowadzono dla płytki o wymiarach 150x200x3.8mm, ze stopu PA20, spawaną w osi symetrii na odcinku 100mm, z prędkością 10mm/s. Symetria pozwala na wykonywanie obliczeń dla połowy odpowiednio utwardzonej płytki. Dwuwymiarowa sieć elementów, o zróżnicowanej grubości (od 3.8 do 5mm) jest identyczna dla temperaturowej i strukturalnej części obliczeń, (rys. 2).



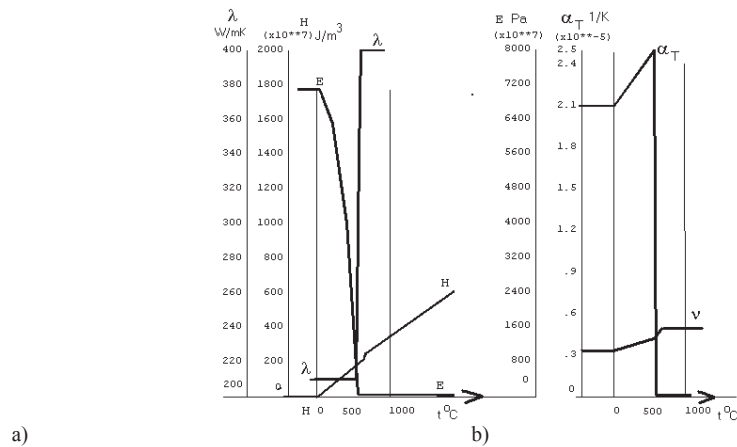
Rys. 2 Sieć elementów użyta w obliczeniach

Źródło: opracowanie własne.

Zastosowano 1337 elementów czworokątnych, czterowęzłowych: SHELL w części temperaturowej i PLANE w części strukturalnej. Użyto programu Ansys. Stosując MES korzystano z zależności przedstawionych np. w [1,2,8]. Na górnej i dolnej powierzchni płytki uwzględniono konwekcję. Własności termiczne materiału zależą od temperatury (rys. 3 i rys. 4 [1,4,5]).

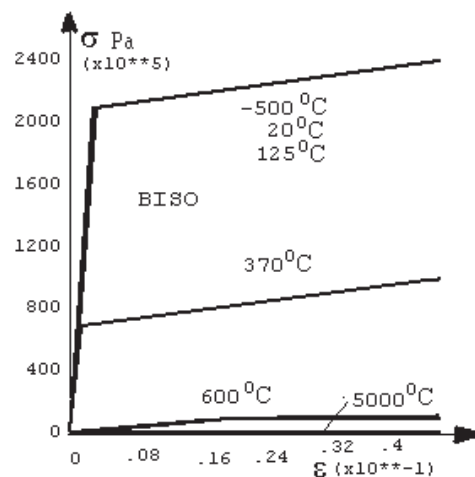
Zastosowano rozłożone, objętościowe źródło ciepła działające podobnie do spawalniczego łuku elektrycznego. Moc =2.6 kW, co odpowiada 4.0 kW przy $\eta_{MIG}=65\%$. Symulowano 10.3s spawania (z krokiem 0.1s) i chłodzenie do 800s (prawie równomierne 20°C). Zestawienie 9 analizowanych

sposobów wykonywania ściegów i kolejność spawania przedstawiono na (rys. 5). Sposoby wykonywania ściegów opracowano wg wskazówek technologicznych zawartych w [3,7]. Po zmianie rodzaju elementów na strukturalne model utwierdzono i prowadzono kolejne kroki obliczeń obciążając go polem obliczonej temperatury dla odpowiedniej chwili czasu.



Rys. 3 Własności fizyczne stopu aluminium użyte w obliczeniach: a) współczynnik przewodzenia ciepła λ , entalpia H , moduł sprężystości E , b) współczynnik rozszerzalności temperaturowej α_T , współczynnik Poissona ν ,

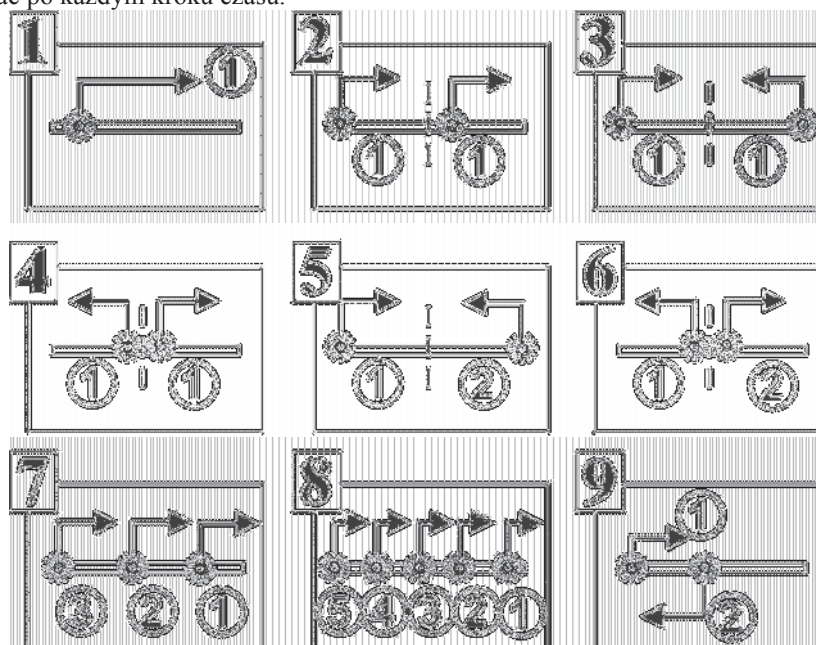
Źródło: [4, 5].



Rys. 4 Własności wytrzymałościowe stopu aluminium użyte w obliczeniach, w zależności od temperatury

Źródło: [1, 4, 5].

Stosowano krok czasu 0.001s, wzrastający po 12 sekundzie symulowanego procesu. Mechaniczne własności materiału w funkcji temperatury przedstawiono na (rys. 3 i rys. 4 [1,4,5]). Analogicznie do utraty wytrzymałości i stabilności metali w miarę podwyższania temperatury model tracił stabilność numeryczną, co wymuszało stosowanie małych kroków czasu (0.001s) i wielu iteracji (ok. 16000) przedłużających obliczenia (ok. 10000s czasu pracy procesora). Uzyskane dla danej chwili czasu pole deformacji i naprężeń było punktem wyjścia dla kolejnego kroku itd. Wyniki można zapisać po każdym kroku czasu.



Rys. 5 Zestawienie sposobów wykonywania ściegów (1–9), kolejność spawania (①, ②,...)

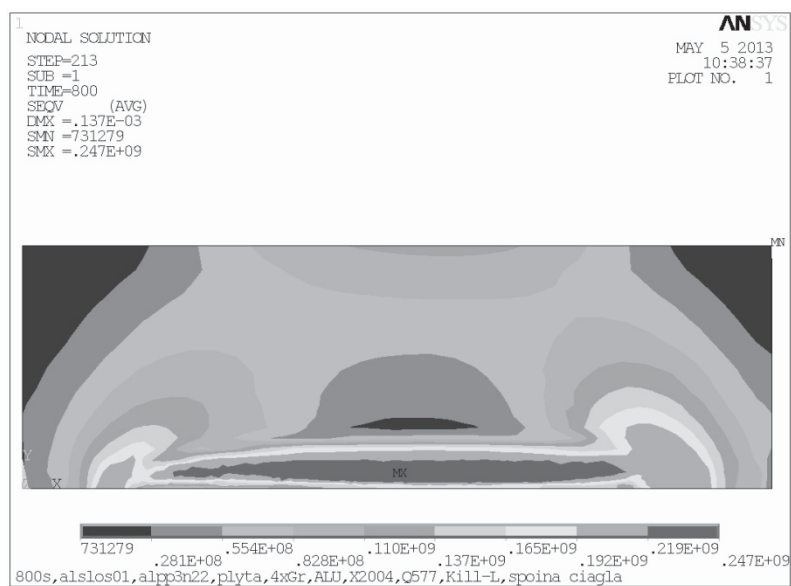
Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiono pięć ważniejszych wykresów pozostających naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa: na rys. 6 po spawaniu 1 ściegiem ciągłym (cykl 1 na rys. 5), na (rys. 7) po spawaniu dwoma równoczesnymi, współbieżnymi ściegami (cykl 2), na (rys. 8) po spawaniu dwoma kolejnymi dosobnymi ściegami (cykl 5), na (rys. 9) 5 krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym (cykl 8). oraz na (rys. 10) 3 krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym (cykl 7). Wykresy powierzchniowe przedstawiono zawsze dla jednej z symetrycznych (względem osi spoiny) połówek modelu.

Tab. 1 Wyliczone wartości naprężeń i odkształceń pozostających (maksymalne)

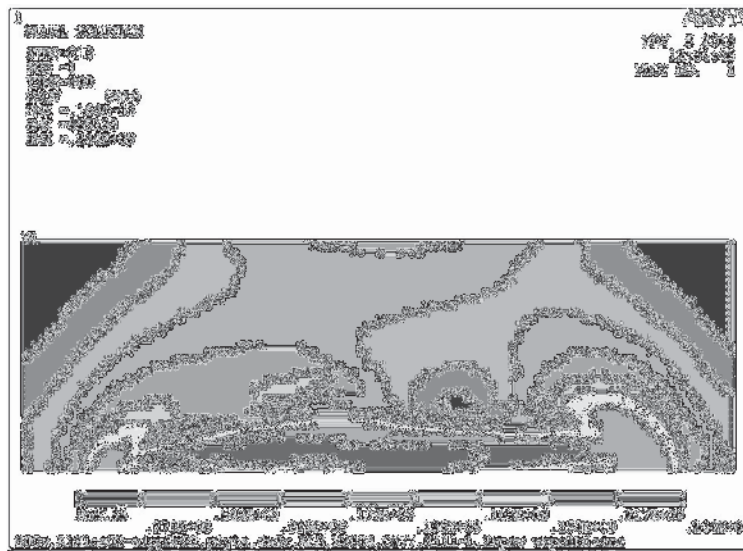
Sposób spawania wg. rys.5	Naprężenia pozostające (800 s), MPa					Deformacja, mm
	Wzdłużne, σ_x		Poprzeczne, σ_y		zredukowane	
	max.	min.	max.	min.	Hubera-Misesa	
1	272	-117	160	-197	247	0,137
2	272	-119	154	-184	244	0,164
3	289	-144	115	-191	254	0,176
4	275	-96	160	-194	259	0,179
5	287	-169	159	-182	258	0,192
6	278	-93	180	-218	245	0,152
7	279	-142	160	-179	242	0,168
8	277	-126	183	-193	242	0,145
9	285	-166	165	-204	251	0,169

Źródło: opracowanie własne.



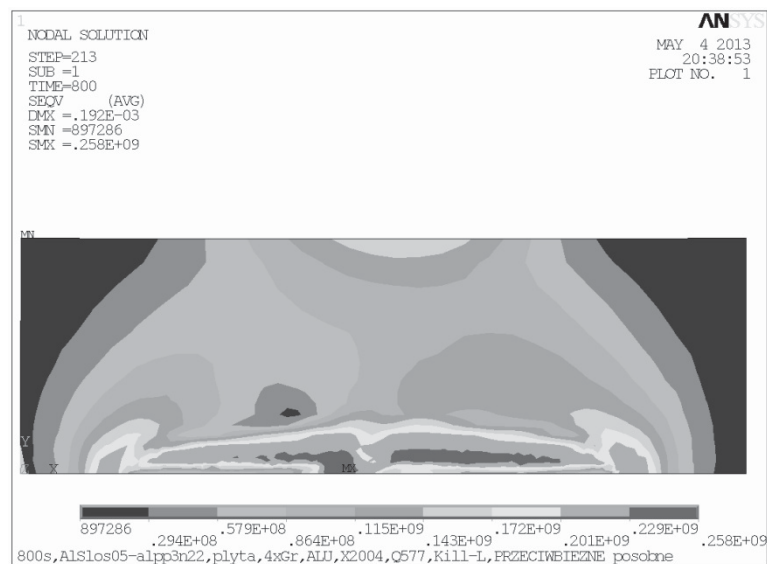
Rys. 6. Pozostające naprężenia własne po spawaniu ściegiem ciągłym (rys. 5 p. 1)

Źródło: opracowanie własne.



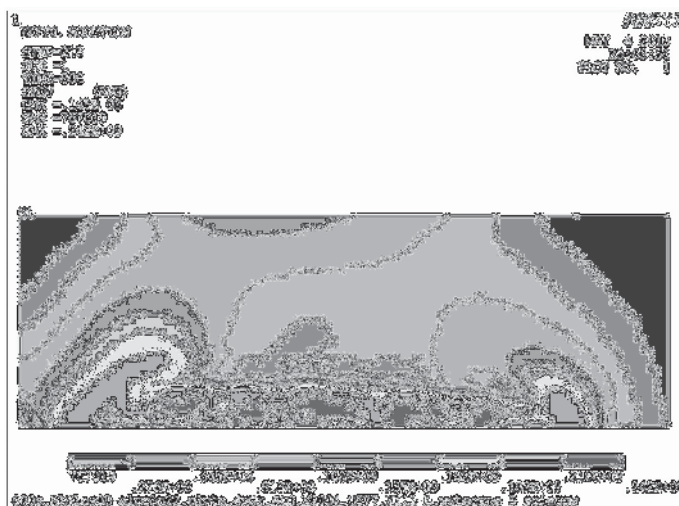
Rys. 7. Pozostające naprężenia własne po równoczesnym spawaniu 2 współbieżnymi ściegami (rys. 5 p. 2)

Źródło: opracowanie własne.

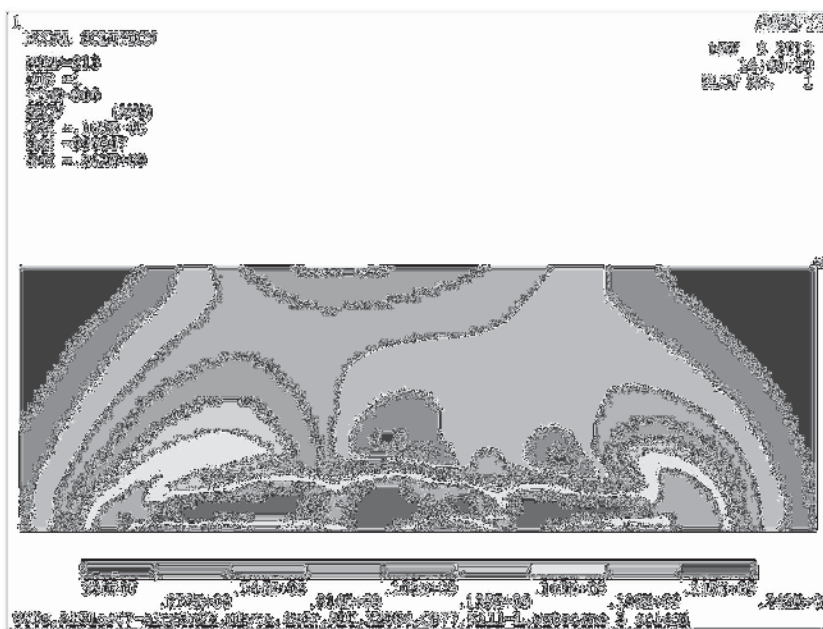


Rys. 8. Pozostające naprężenia własne po spawaniu 2 kolejnymi, dosobnymi ściegami (rys. 8 p. 5)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9 Pozostające naprężenia własne po spawaniu 5 ściegami z krokiem odwrotnym (rys. 5 p. 8)
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10 Pozostające naprężenia własne po spawaniu 3 ściegami z krokiem odwrotnym (rys. 5 p. 7)
Źródło: opracowanie własne.

W każdym z przedstawionych obliczeń rozkład temperatury jest zgodny z założeniami teoretycznymi i nie wskazuje na wady niepełnego przetopu. Analizowano naprężenia pozostające. W tabeli 1 przedstawiono maksymalne naprężenia wzdłużne, poprzeczne i zredukowane. Przedstawiono również obliczone wartości odkształceń (uzyskano również kształt po spawaniu). Obliczenia MES umożliwiają uzyskanie znacznie większej ilości i kategorii wyników, które z braku miejsca nie zostały w artykule zamieszczone.

Osobna analiza składowych pola naprężeń może dotyczyć naprężeń wzdłużnych i poprzecznych które decydują o najczęściej występujących rodzajach pęknięć spawalniczych. Znajomość tych wartości może wskazywać sposoby mocowania elementów przed spawaniem.

Znajomość odkształceń pozostających może pomóc w planowaniu naddatków technologicznych lub przybliżyć jakie będzie po spawaniu położenie punktów charakterystycznych np. otworów montażowych. Istnieje możliwość zbudowania modelu wcześniej wykonanej spoiny i sprawdzenia czy sposób spawania nie wpłynął niekorzystnie na rozkład naprężeń pozostających, np. tworząc miejsca ich kumulacji. Istniejący model numeryczny może być stosunkowo szybko zmieniany. Sprawdzenie naprężeń i deformacji dla innego, należącego do tej samej grupy, materiału (o ile wystarczająco dokładnie znane są jego własności materiałowe) wymaga niewielkiego nakładu pracy. Poszukiwanie optymalnego rozwiązania ułatwia możliwość zmiany parametrów spawalniczych: liniowej prędkości spawania, rozkładu i sumarycznej mocy symulowanego źródła ciepła lub sposobu układania ściegów. Ponieważ niektóre sposoby redukcji odkształceń i naprężeń pospawalniczych bazują na stosowaniu podgrzewania wstępnego przydatnym i możliwym jest wprowadzenie odpowiednich danych do modelu numerycznego. Uwzględnienie podwyższonej lub obniżonej temperatury otoczenia, wpływającej na efekty spawanie, również jest możliwe. Przedstawione wyniki pochodzą z rozwiązań uzyskanych dla modelu dwuwymiarowego. Charakterystyczne dla takiego modelowania niewielka grubość spawanych elementów jest bardzo często spotykana. Model dwuwymiarowy dostarcza wartościowych wyników przy akceptowalnym czasie obliczeń. Prowadzenie obliczeń krokami poprzez kolejne chwile czasu udostępnia niestabilne pola temperatury i naprężeń. Analiza takich wyników wymaga specjalistycznej wiedzy, np. o wpływie na materiał cyklu ściskanie-rozciąganie.

3. Wnioski i spostrzeżenia

- 1 Spawanie 1 ściegiem (cykl 1 /rys. 5) zazwyczaj prowadzi do niższych niż w innych przypadkach wartości pozostających naprężeń wzdłużnych i poprzecznych. Ze względu na ich rozkład na płaszczyźnie blachy naprężenia zredukowane (Hubera-Misessa) jednak nie są najniższe. Deformacje pozostające są najniższe.
- 2 Spawanie dwoma ściegami w zależności od sposobu jego przeprowadzenia może istotnie, również szkodliwie, zmienić pozostające naprężenia i deformacje. Dla sposobu (6) uzyskano obniżenie zredukowanych naprężeń pozostających przy nieznacznie większych deformacjach. Dla sposobu (5) otrzymano bardzo wysokie wartości naprężeń zredukowanych, wzdłużnych i poprzecznych oraz największe deformacje.
- 3 Wyniki wskazują że spawanie 5 krótkimi odcinkami ściegiem wstecznym (cykl 8) prowadzi do najniższych wartości naprężeń zredukowanych, przy czym obszary o najwyższych wartościach są niewielkimi, izolowanymi wyspami. Deformacje pozostające są nieznacznie większe niż dla (cykl 1).

- 4 Zmniejszenie ilości ściegów przypadających na badaną długość spoiny z 5 do 3 (cykl 7) prowadzi do podniesienia wartości naprężeń i deformacji.
- 5 Wyniki obliczeń wskazują że spawanie krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym może prowadzić do ograniczenia pozostających po spawaniu naprężeń i odkształceń, pod warunkiem jednak poprawnego dobrania długości, kierunku i kolejności ich układania.
- 6 Różnica wartości naprężeń maksymalnych, chociaż nie przekracza 10% i przy niepełnym obciążeniu statyczny może mieć znaczenie drugorzędne, to jednak dla obciążeń zmęczeniowych lub dla materiałów o podwyższonej skłonności do pęknięcia może być istotna.
- 7 Małe obszary koncentracji naprężeń mogą pozostać niezauważone podczas badań eksperymentalnych – MES jest więc ważnym narzędziem badawczym umożliwiającym pełniejsze poznanie wpływu sposobu i kolejności układania ściegów na stan naprężeń pospawalniczych.
- 8 Decyzja o sposobie układania ściegów powinna być racjonalnym kompromisem pomiędzy efektami ekonomicznymi a wymaganiami wobec naprężeń i deformacji pozostających. Wynikające z rozwiązań numerycznych powinny być wykorzystywane gdy kultura techniczna wykonawcy umożliwia utrzymanie jakości kraterów początkowych i końcowych oraz przestrzeganie zaleceń technologicznych przez spawaczy.
- 9 Na rozkład naprężeń i odkształceń ma wpływ sztywność zamocowania elementu, jednakowa we wszystkich przedstawionych obliczeniach. Istnieje możliwość uwzględnienia innych, występujących w praktyce, sztywności. Pełna analiza trójwymiarowego modelu jest uzależniona od dostępności wydajnych komputerów.

Bibliografia

1. Argyris J.H., Szimmat J., Willam K.J.: *Finite Element Analysis of Arc-welding Process*. Numerical Methods in Heat Transfer. 1985.vol. III.
2. Goldak J. i in.: *Computer Modeling of Heat Flow in Welds*. Metallurgical Transactions B. 1986, nr 9, s. 587–600.
3. Jakubiec M., Lesiński K., Czajkowski H.: *Technologia konstrukcji spawanych*. WNT Warszawa 1987.
4. Radaj D.: *Heat effects of welding*. Springer Verlag, Berlin, 1992.
5. Ranatowski E.: *Elementy fizyki spajania metali*. Wyd. ATR Bydgoszcz, 1999.
6. Skibicki A.: *Identyfikacja stanu termicznych i mechanicznych skutków procesu spawania wybranych elementów z uwzględnieniem metod numerycznych*. Praca doktorska, ATR Bydgoszcz, Wydział Mechaniczny, 1998.
7. Śledziwski E.: *Konstrukcje spawane*, WSiP, Warszawa 1974.
8. Zienkiewicz O.C.: *Metoda Elementów Skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.

PLANNING OF RATIONAL SEQUENCES FOR WELD BEADS ON THE BASIS OF FEM CALCULATION

Summary

Heat, necessary for welding, casue to deformation and stresses. Right technology can decrease this deformation and stresses. With FEM simulation is possible to calculate his value. At the paper was shown simulation of butt welding of aluminum. Temperature-dependent material properties were used. Here were compared effects of different beads: one string, divided to 2,3, or 5 steps with centripetal, isotropy and back-reversed-steps, with combined welding sequences.

Keywords: welding, FEM, aluminum, stress, residual

Andrzej Skibicki
Faculty of Mechanical Engineering
University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz
Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
e-mail: askibic@utp.edu.pl