

Andrzej SKIBICKI

NAPRĘŻENIA POZOSTAJĄCE PO SPAWANIU KRÓTKIMI ODCINKAMI, OBLICZANE Z ZASTOSOWANIEM MES

Streszczenie: Podczas spawania powstaje ciepło, które prowadzi do deformacji i naprężeń pozostających. Odpowiednio dobrana technologia spawania może zmniejszyć składowe naprężeń i odkształceń pozostających. Symulacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwala obliczyć ich wartości. Symulowano różne sposoby układania ściegu łączącego doczołowo aluminiowe blachy. Porównano efekty spawania ściegami: pojedynczym ciągłym, z podziałem na dwa ściegi o różnej kolejności i kierunku układania oraz z podziałem na trzy lub pięć ściegów układanych z krokiem wstecznym. Użyto własności materiałowych nieliniowo zależnych od temperatury.

Słowa kluczowe: spawanie, naprężenia, pozostające, MES, aluminium

1. WPROWADZENIE

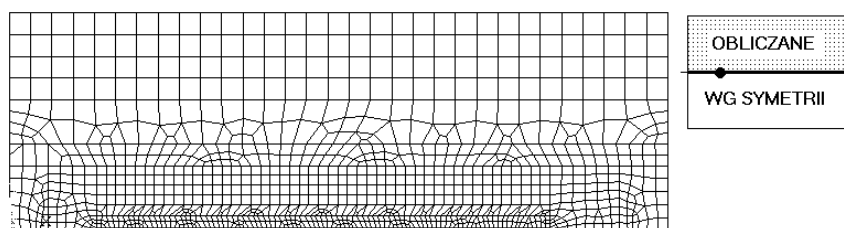
Ustawiczne dążenie do zmniejszenia masy konstrukcji kieruje uwagę konstruktorów w stronę metali lekkich i ich stopów. Spawanie stopów aluminium coraz częściej odbywa się z zastosowaniem nowoczesnych źródeł prądu, umożliwiających precyzyjne dostarczanie ciepła, np. dzięki zastosowaniu łuku okresowo przerywanego. Pozwala to na łatwiejsze wykonywanie spoin o wysokiej jakości bez znaczącego wzrostu kosztów. 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. Możliwe i celowe jest zastąpienie pojedynczego długiego ściegu kilkoma innymi ściegami ułożonymi w zaplanowanej kolejności i kierunku. Interesującym wydaje się sprawdzenie, czy technologia ta nie ma ujemnych skutków, widocznych np. przy rozważaniu naprężeń pozostających.

Skutki mechaniczne wywołuje nierozłącznie związane ze spawaniem pole temperatury. Uwidaczniają się one poprzez odkształcenia lub pęknięcia spawanych elementów, będące wynikiem sumowania się pospawalniczych naprężeń pozostających z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych. Próby przeciwdziałania temu zjawisku opierają się często na wyczuciu i doświadczeniu technologa planującego prace spawalnicze, tym bardziej, że niekiedy próbna seria nie może być brana pod uwagę. Badania eksperymentalne są kosztowne i skomplikowane. Zniechęcają do analizowania nietypowych, być może skutecznych, rozwiązań. Metody analityczne i analityczno-wykresłne mają ograniczony zakres sto-

sowania z powodu zmiennych nieliniowo (w funkcji temperatury T 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. Wyniki badań dla ściegów ciągłych przedstawiono w [1, 2, 6]. Spawanie stopów aluminium jest często utrudnione – tak ze względów metalurgicznych, jak i wynikających ze spawania pól temperatury, odkształceń i naprężeń. Wyraźnie inne własności niż dla stali, np. $\lambda(T)$, $\alpha_T(T)$, $R_c(T)$, 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 nadatki, naprężenia, deformacje). Znając pole temperatury, można określić właściwą energię liniową, kolejność układania spoin i ściegów, wielkość jeziorka. Zastosowano do tego celu metodę elementu skończonego (MES). Na podstawie zgodności wyników własnych obliczeń i eksperymentu [6] prowadzonych dla trudno modelowalnego (ze względu na skokową zmianę wszystkich własności podczas przemiany $\alpha \rightarrow \gamma$ i wykazującej przechłodzenie przemiany $\gamma \rightarrow \alpha$) materiału typu stal, można sądzić że metoda nadaje się też dla innych materiałów, w tym także stopów aluminium.

2. MODEL NUMERYCZNY

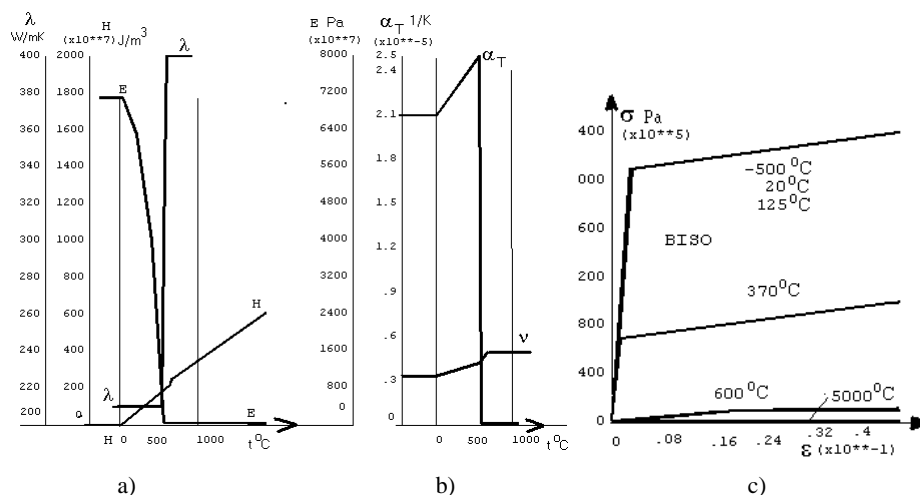
W trakcie obliczeń rozważano płytkę ze stopu PA20 o wymiarach $150 \times 100 \times 3,8$ mm, spawaną wzdłuż osi symetrii na odcinku 100 mm, z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Symetria rozważanego zagadnienia pozwala na wykonywanie obliczeń dla $\frac{1}{2}$, odpowiednio utwierdzonej, płytki. Dwuwymiarowa sieć elementów, o zróżnicowanej zadanej grubości (3,8-5,0 mm), identyczna dla temperaturowej i strukturalnej części obliczeń, przedstawiono na rysunku 1. Sieć była generowana półautomatycznie, ale według ręcznie zadanej kolejności.



Rys. 1. Sieć elementów użyta w obliczeniach
Fig. 1. Finite element mesh used in calculation

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 i mechaniczne materiału zależą od temperatury (rys. 2) [4, 5].



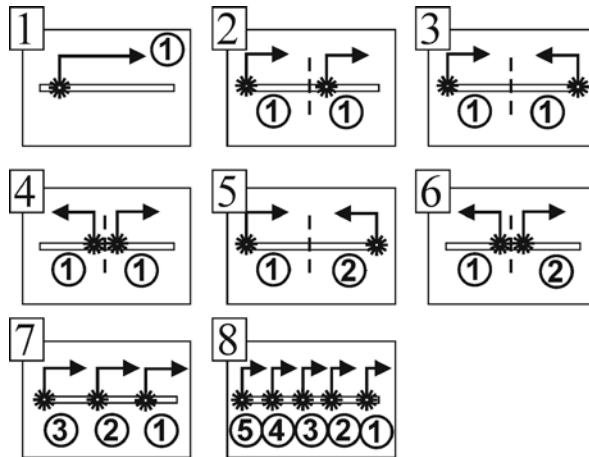
Rys. 2. Własności fizyczne stopu aluminium użyte w obliczeniach:

- a) współczynnik przewodzenia ciepła λ , entalpia H, moduł sprężystości E,
- b) współczynnik rozszerzalności temperaturowej α_T , współczynnik Poissona ν ,
- c) własności wytrzymałościowe R_e i E_T [4, 5]

Fig. 2. Properties for the aluminium alloy, as function of the temperature:

- a) thermal conductivity λ , enthalpy H, elastic module E, b) thermal dilatation α_T , Poisson ratio ν ,
- c) yield stress R_e , hardening module E_T [4, 5]

Zastosowano rozłożone, objętościowe źródło ciepła działające podobnie do spawalniczego łuku elektrycznego o mocy 2,6 kW, co odpowiada 4,0 kW przy $\eta = 65\%$. Symulowano 10,3 s spawania (z krokiem 0,1 s) i chłodzenie aż do 800 s procesu, uzyskując prawie równomierne 20°C w całym modelu. Zestawienie ośmiu analizowanych sposobów wykonywania ściegów i kolejność spawania przedstawiono na rysunku 3. Po zmianie rodzaju elementów na strukturalne model utwierdzono i obciążając go polem wcześniej obliczonej temperatury z odpowiedniej chwili czasu – prowadzono kolejne kroki obliczeń. Stosowano krok czasu 0,001 s, wzrastający stopniowo po 12. sekundzie symulowanego procesu. Analogicznie do utraty wytrzymałości i stabilności metali w miarę podwyższania temperatury model tracił stabilność numeryczną. Wymuszało to stosowanie małych kroków czasu (0,001 s) i wielu iteracji (ok. 16000). Przedłużało to obliczenia do ok. 10000 s pracy procesora. Uzyskane dla danej chwili czasu pole deformacji (przemieszczenia w płaszczyźnie XY) i naprężeń było punktem wyjścia dla kolejnego kroku czasu – aż do zakończenia założonego czasu spawania i chłodzenia. Wyniki można zapisać po każdym kroku czasu.

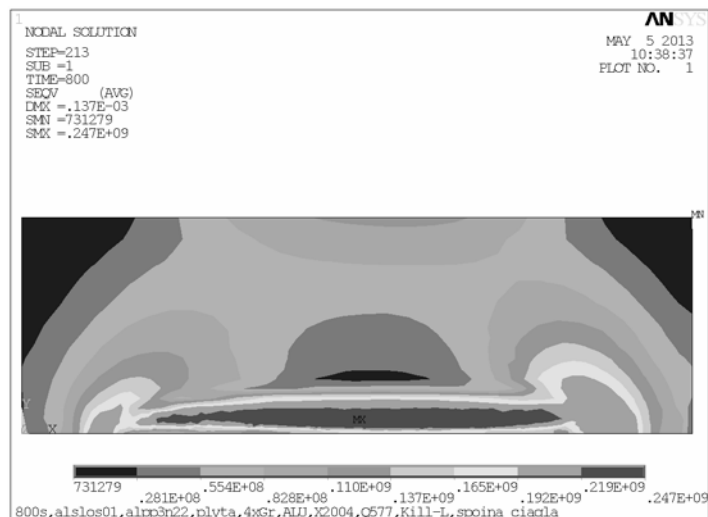


Rys. 3. Zestawienie sposobów wykonywania ściegów (1-8), kolejność spawania (①②③④⑤)

Fig. 3. Pictorial diagram of welds (1-8), welding sequence (①②③④⑤)

3. WYNIKI

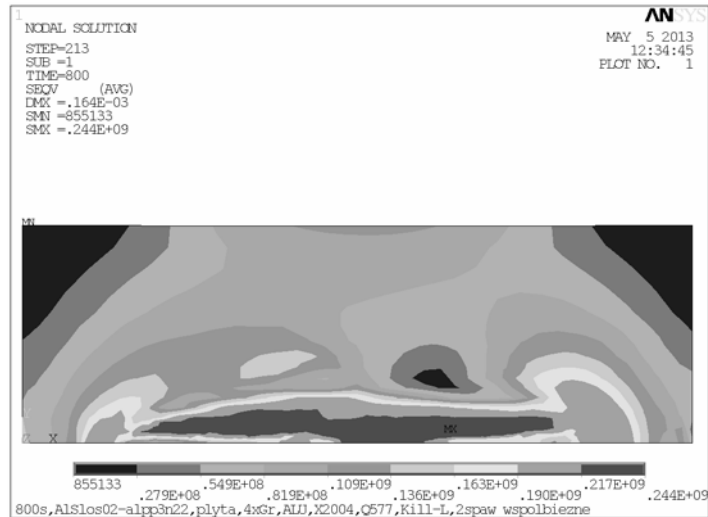
Przedstawiono cztery ważniejsze wykresy pozostających naprężeń zredukowanych (wg hipotezy Hubera-Misesa): na rysunku 4 po spawaniu 1 ściegiem ciągłym (cykl 1 na rys. 3), na rysunku 5 po spawaniu dwoma równoczesnymi, współbieżnymi ściegami (cykl 2), na rysunku 6 po spawaniu dwoma kolejnymi dosobnymi ściegami (cykl 5), oraz na rysunku 7 po spawaniu 5 krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym (cykl 8). Przedstawiono izolinie na jednej z symetrycznych (względem osi spoiny) połówek modelu.



Rys. 4. Pozostające zredukowane naprężenia własne po spawaniu ściegiem ciągłym (rys. 3, p. 1)

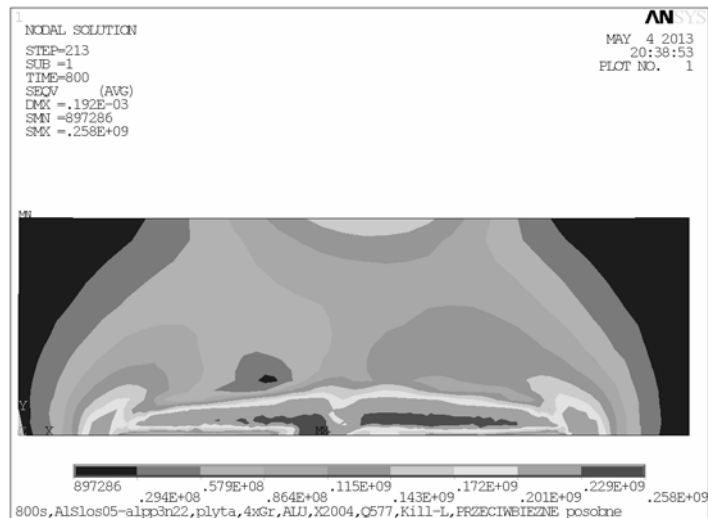
Fig. 4. Residual stresses (Huber-Misses), after one string bead (Fig. 3, p. 1)

Napężenia pozostające po spawaniu...



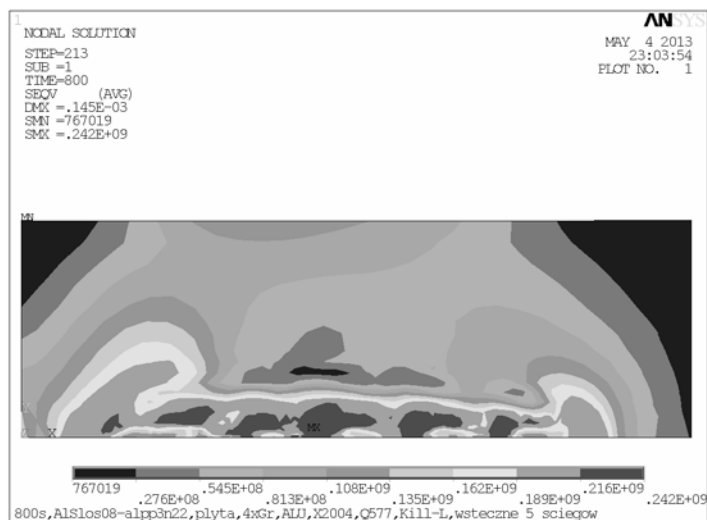
Rys. 5. Pozostające zredukowane napężenia własne po równoczesnym spawaniu 2 współbieżnymi ściegami (rys. 3, p. 2)

Fig. 5. Residual stresses (Huber-Misses), after simultaneously welding with 2 isotropy beads (Fig. 3, p. 2)



Rys. 6. Pozostające zredukowane napężenia własne po spawaniu 2 kolejnymi, dosobnymi ściegami (rys. 3, p. 5)

Fig. 6. Residual stresses (Huber-Misses), after simultaneously welding with 2, followings, centripetal beads (Fig. 3, p. 5)



Rys. 7. Pozostające zredukowane naprężenia własne po spawaniu 5 ściegami z krokiem odwrotnym (rys. 3, p. 8)

Fig. 7. Residual stresses (Huber-Mises), after simultaneously welding with 5, back-reversed-steps beads (Fig. 3, p. 8)

Obliczony rozkład temperatury wskazuje na uzyskanie pełnego przetopu w każdym z cykli. Głównym celem symulacji było uzyskanie naprężeń pozostających. W tabeli 1 zestawiono maksymalne naprężenia wzdłużne, poprzeczne i zredukowane. Przedstawiono również obliczone wartości deformacji (maksymalnego przemieszczenia węzłów na płaszczyźnie XY, uzyskano również kształt blachy po spawaniu). Obliczenia MES umożliwiają uzyskanie znacznie większej ilości i kategorii wyników, które mogą podlegać ukierunkowanej analizie.

Tabela 1. Wyliczone wartości naprężeń i odkształceń pozostających (maksymalne)
 Table 1. Calculated residual stresses and deformations (maximal)

Sposób spawania wg rysunku 3	Naprężenia pozostające [MPa]				zreduk. wg Hubera-Misesa	Deformacja [mm]
	wzdłużne, σ_x		poprzeczne, σ_y			
	max	min.	max	min.		
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

4. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

1. Spawanie 1 ściegiem (cykl 1/rys. 3) zazwyczaj prowadzi do niższych niż w pozostałych sposobach wartości pozostających naprężeń wzdłużnych i poprzecznych. Naprężenia zredukowane (Hubera-Misessa) nie są jednak najniższe z analizowanych sposobów. Deformacje pozostające są najniższe.
2. Wyniki wskazują, że spawanie 5 krótkimi odcinkami krokiem odwrotnym (cykl 8) prowadzi do najniższych wartości naprężeń zredukowanych. Obszary o najwyższych wartościach są niewielkimi, izolowanymi wyspami. Deformacje są nieznacznie większe niż dla cyklu 1.
3. Zmniejszenie liczby ściegów przypadających na badaną długość spoiny z 5 do 3 (cykl 7) prowadzi do zwiększenia wartości naprężeń i deformacji.
4. Spawanie dwoma ściegami w zależności od sposobu jego przeprowadzenia może istotnie, również niekorzystnie, 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.
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 obciążeniu statycznym 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.

LITERATURA

- [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, 9, 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] ŚLEDZIEWSKI E.: Konstrukcje spawane. WSiP Warszawa, 1974.
- [8] ZIENKIEWICZ O.C.: Metoda Elementów Skończonych. Arkady Warszawa, 1972.

RESIDUAL STRESSES AFTER SHORT-STEPS WELDING, CALCULATED WITH FEM

Summary: Heat, necessary for welding, cause 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. 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. Temperature-dependent material properties were used.

Key words: welding, FEM, aluminum, stress, residual