

POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET BUDOWY MASZYN
SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII
AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ MECHANICZNY



*spawanie, technologia, łuk pulsujący,
MES, temperatura, naprężenia*

Andrzej SKIBICKI*

DOBÓR TECHNOLOGII IMPULSOWEGO SPAWANIA STOPÓW ALUMINIUM NA PODSTAWIE ANALIZY MES TEMPERATURY I NAPRĘŻEŃ

W artykule omówiono spawanie stopu aluminium EN 5019 za pomocą impulsowego łuku GTAW (141). Celem było wspomoczenie procesu doboru parametrów spawania oraz sprawdzenie, jak wpływają one na temperaturę, przetop, wartość i rozkład pospawalniczych odkształceń i naprężeń. Proces spawania symulowano za pomocą MES, dla ruchomego, rozłożonego źródła ciepła działającego w sposób ciągły lub zadany impulsowy. Zastosowano zależne od temperatury własności materiałowe temperaturowe i mechaniczne oraz dwuwymiarowy model numeryczny (2D). Na podstawie obliczonych rozkładów temperatury wykluczono parametry nie pozwalające na uzyskanie poprawnego przetopu. Analiza wyników wskazała na lokalne spiętrzenia naprężeń chwilowych i pozostających o wartościach wyższych od powstających po spawaniu ciągłym, w tym naprężeń rozciągających i zmniejszających wytrzymałość zmęczeniową i odporność na pęknięcie.

1. WSTĘP

Zastosowanie stopów aluminium jest powszechne. Korzystne własności materiałowe pozwalają na stosowanie ich jako tworzywa elementów konstrukcyjnych – obciążonych, ozdobnych i odpornych na korozję. Stosowanych jest wiele metod kształtowania stopów aluminium, np. odlewanie, obróbka plastyczna, skrawanie oraz spawanie i zgrzewanie.

Aluminium stawia szczególne wymagania technologiom spawalniczym, zwłaszcza odnośnie wysokiej jakości spoin. Stąd stosowanie szlachetnych ga-

* Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

zów ochronnych, często wraz z łukiem impulsowym, w metodach GTAW (141) i GMA (131,137).

Pomimo zgromadzenia wielu danych doświadczalnych spawanie aluminium i jego stopów wciąż pozostawia pewne obszary niepewności. Istnieje potrzeba ograniczenia ilości prób technologicznych przy doborze parametrów oraz określenia termicznych i mechanicznych skutków (pola temperatury, odkształceń i naprężeń) procesu spawania. Wraz z wprowadzeniem spawania impulsowego ilość parametrów wzrosła, przy czym spawanie aluminium stwarza trudności większe niż spawanie stali. Wyniki obliczeń mogą określić, czy analizowany zestaw parametrów pozwala uzyskać żądany przetop lub szerokość łoża oraz określić zasięg strefy wpływu ciepła (SWC). Odkształcenia i naprężenia pospawalnicze mogą stać się przedmiotem analizy jeszcze przed wykonaniem spoiny. Podjęta na takiej podstawie optymalizacja parametrów może stać się jednym z środków uzyskania wysokiej jakości spawanych połączeń stopów aluminium.

Stosowanie łuku impulsowego ma dodatnie skutki dla przenoszenia stopiwa w łuku oraz metalurgii i krystalizacji jeziorka spawalniczego. Umożliwia również precyzyjne dostarczanie ciepła. Spawanie aluminium GTAW wymusza impulsowe dostarczanie ciepła ze względu na zmienną biegunowość umożliwiającą katodowe oczyszczanie powierzchni. Spawanie impulsowe mogą wymuszać również wymogi estetyczne.

Informacje o oddziaływaniu łuku impulsowego na pola odkształceń i naprężeń są wciąż niepełne, podjęto więc próbe ich obliczenia.

Badania numeryczne postanowiono przeprowadzić używając metody elementów skończonych (MES), która sprawdziła się przy modelowaniu spawania stali obciążonej przemianami fazowymi [7]. Postanowiono symulować spawanie łukiem ciągłym oraz łukiem impulsowym o zróżnicowanej charakterystyce. Przyjęty program badań ma pozwolić na porównanie spoin o różnej i równej energii liniowej q_l oraz różnych parametrów pulsu.

2. BADANIA NUMERYCZNE

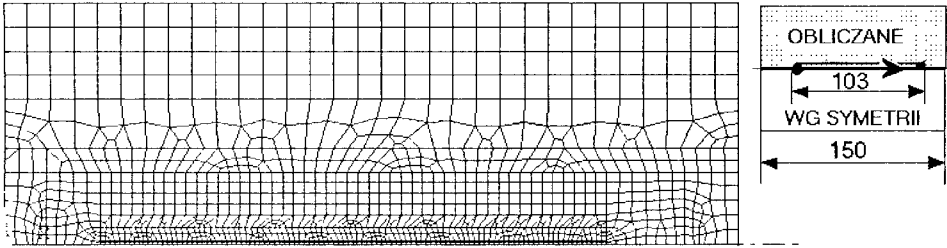
W trakcie obliczeń rozważano płytkę ze stopu EN 5019 (tab. 1) o wymiarach $100 \times 150 \times 3,8$ mm, spawaną w osi symetrii na odcinku 103 mm, z prędkością 10 mm/s.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu EN 5019, % masowe
Table 1. The chemical composition of EN 5019, % of the mass

EN 5019 (AlMg5)	Al	Mg	Mn	Ti
	reszta	5%	0,4%	0,1%

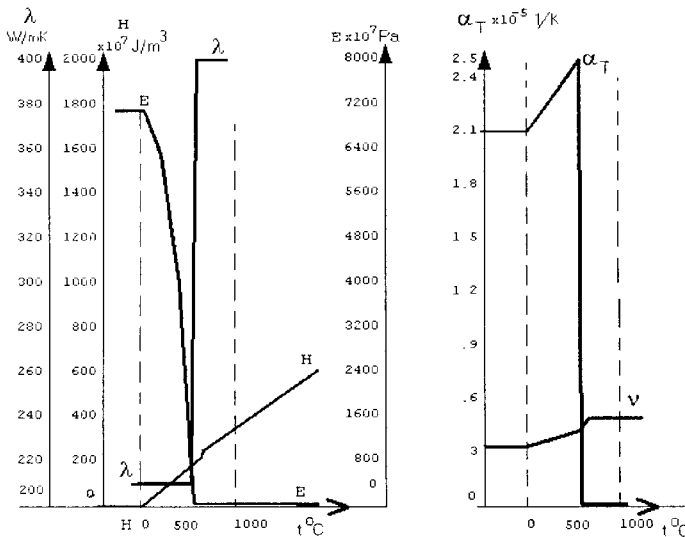
Spoina zaczynała się i kończyła po ok. 24 mm od brzegów elementu i została ułożona w rowku o szerokości 1,6 mm, przygotowanym na I. Spoina powstawała z udziałem podawanego materiału dodatkowego. Odpowiednio dobrane warunki utwierdzenia i symetria pozwoliły na wykonywanie obliczeń dla połowy

plytki. Dwuwymiarowa sieć elementów, o wielostopniowo zróżnicowanej grubości (od 3,8 mm dla blachy do maksymalnie 5 mm dla spoiny), identyczna dla temperaturowej i strukturalnej części obliczeń, jest pokazana na rysunku 1.



Rys. 1. Sieć elementów skończonych użytych w obliczeniach
Fig. 1. FEM mesh used in calculation

Zastosowano 1248 elementów, głównie czworokątnych, czterowęzłowych: SHELL w części temperaturowej i PLANE w części strukturalnej. Dwuwymiarowy (2D) model jest wystarczający przy tego typu spoinach, szczególnie wobec dużej przewodności cieplnej aluminium. Wraz z przemieszczaniem się źródła ciepła przywracano do modelu „zabite” wcześniej elementy, tworzące początkowo rowek spawalniczy. Użyto programu Ansys. Stosując MES korzystano z zależności przedstawionych przez autorów [1,2,8].



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

Fig. 2. Physical properties of used aluminium alloy: a) thermal conductivity λ , enthalpy H , Young's modul E , b) thermal expansion α_T , Poisson ratio ν

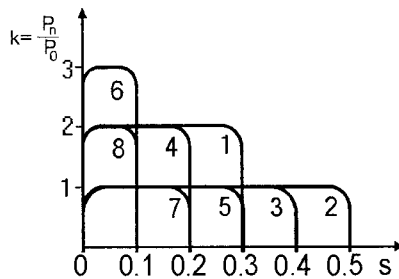
Na górnej i dolnej powierzchni płytki uwzględniono wymianę ciepła z otoczeniem poprzez konwekcję. Własności cieplno-fizyczne materiału zależą od temperatury (rys.2a, za [4,6]). Uwzględniono ciepło krystalizacji oraz zmianę współczynnika przewodzenia ciepła λ w funkcji temperatury wraz z ujęciem wpływu intensywnego mieszania jeziorka spawalniczego.

Zastosowano ruchome, nierównomiernie rozłożone, objętościowe źródło ciepła, działające podobnie do spawalniczego łuku elektrycznego. Jego moc $P_0 = 2,6$ kW, co odpowiada $P_A = 4,7$ kW mocy łuku przy sprawności $\eta = 55\%$ [3]. Dla uwzględnienia pulsacji mocy łuku przyjęto, że: okres pulsu to 0,5 s; został on podzielony na 5 przedziałów po 0,1 s.

W czasie każdego z tych przedziałów można wprowadzać (lub nie) ciepło do modelu numerycznego. Spośród wielu możliwych cykli do analizy wybrano osiem, zestawionych w tabeli 2 i schematycznie przedstawionych na rysunku 3.

Tabela 2. Puls łuku i maksymalne, wyliczone, wartości naprężeń pozostających
Table 2. Welding-arc impulses and calculated residual stresses (maximal)

Nr	$k = P_n/P_0$	Wypełnienie okresu mocą P_n	Maksymalne naprężenia pozostające (800 s), MPa				
			wzdłużne	poprzeczne	Huber-Misses	plastyczne	
1	2	3/5	-151 +283	-198 +158	0 +250	0 +265	
2	1	5/5	-120 +269	-200 +168	0 +245	0 +260	
3	1	4/5	-91 +265	-187 +164	0 +246	0 +264	
4	2	2/5	-98 +263	-193 +175	0 +245	0 +260	
5	1	3/5	-66 +264	-183 +183	0 +246	0 +246	
6	3	1/5	-80 +261	-183 +193	0 +250	0 +254	
7	1	2/5	-42 +258	-146 +195	0 +230	0 +233	
8	2	1/5	-51 +267	-174 +206	0 +238	0 +245	

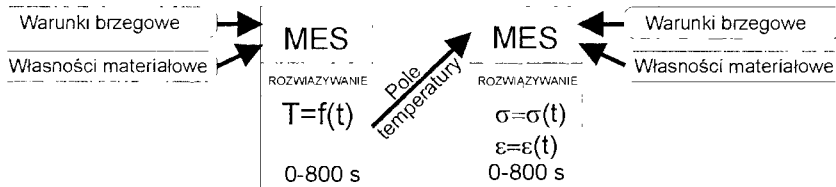


Rys. 3. Schemat cykli łuku impulsowego, k w funkcji czasu
Fig. 3. Diagram k -time for used arc impulses

W wybranych cyklach (1, 4, 6, 8) stosowaną moc P_n źródła ciepła zwiększono dwu- lub nawet trzykrotnie względem P_0 . W cyklach 3 i 4, 5 i 6, 7 i 8 uzyskano parami równe średnie energie liniowe. Symulowano 10,3 s spawania (z podstawowym krokiem czasu 0,1 s) i późniejsze chłodzenie do 800 s, otrzy-

mując prawie równomierną temperaturę 20°C (z rosnącym stopniowo, do 50 s, krokiem czasu).

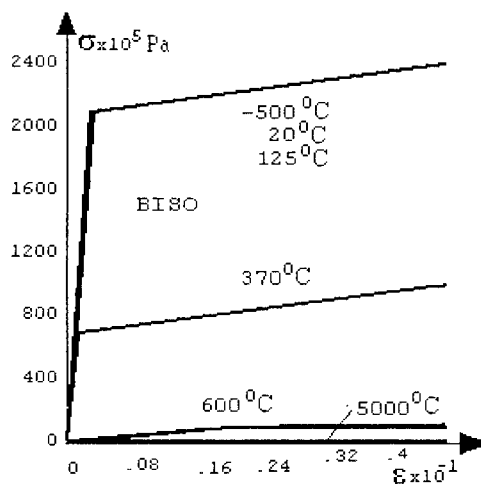
Po zmianie rodzaju elementów skończonych z temperaturowych na strukturalne, model utwierdzono w osi symetrii i prowadzono kolejne kroki obliczeń strukturalnych obciążając go polem temperatury z odpowiedniej chwili czasu, zgodnie z rysunkiem 4.



Rys. 4. Przebieg niesprzężonych obliczeń MES temperatury i naprężeń
Fig. 4. Uncoupled MES calculation of temperature and stress

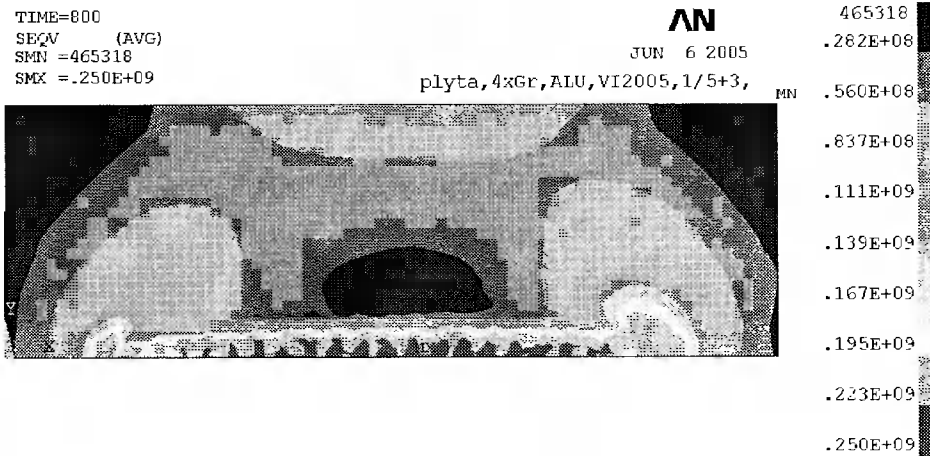
Stosowano krok czasu 0,01 s, wzrastający po 15 s symulowanego procesu. Mechaniczne własności materiału w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 2b i rysunku 5 [4,5,6].

Analogicznie do utraty wytrzymałości i stabilności metali w miarę podwyższania temperatury model tracił stabilność numeryczną. Wymuszało to stosowanie zmniejszonych kroków czasu (0,001 s) i dodatkowo wielu iteracji (w sumie ok. 16000), przedłużających obliczenia (do ok. 28000 s czasu obliczeniowej pracy procesora Pentium III, 1.0 GHz). Uzyskane dla danej chwili czasu pole deformacji i naprężeń było punktem wyjścia dla kolejnego kroku obliczeń, aż do uzyskania 800 s. Wyniki można zapisać po każdym kroku czasu.

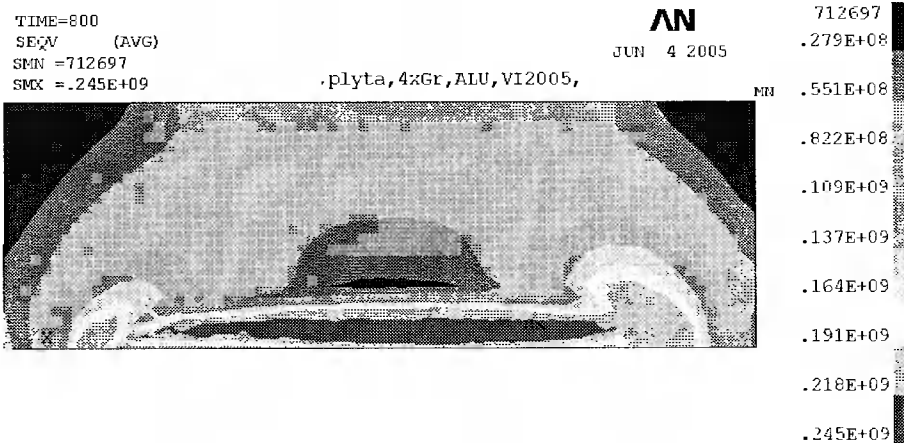


Rys. 5. Zależność odkształcenie–naprężenie w zależności od temperatury
Fig. 5. Stress–strain diagram – dependency from temperature

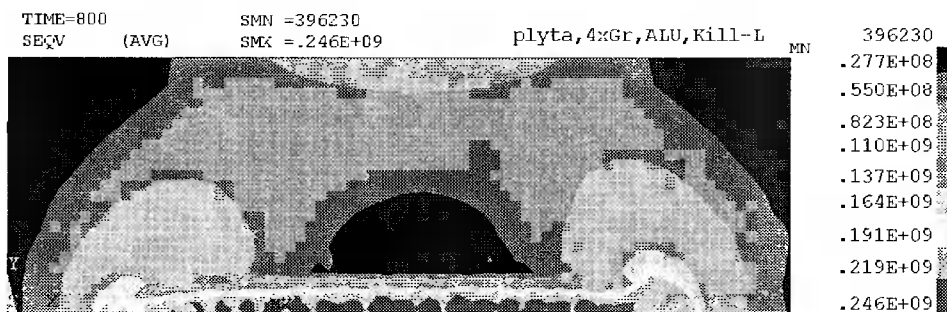
Przedstawiono trzy ważniejsze, przykładowe, pozostające naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera-Missesa: na rysunku 6 po spawaniu bez pulsacji łuku ($P_n = P_0$, cykl 2 na rysunku 3), na rysunku 7 i rysunku 8 przy pulsie: 0,1 s prądu i 0,4 s przerwy (odpowiednio $P_n = 3P_0$, cykl 6 i $P_n = P_0$, cykl 5). Wykresy powierzchniowe pokazano dla poddanej obliczeniom połowy próbki.



Rys. 6. Pozostające naprężenia własne, po spawaniu łukiem ciągłym (w Pa, tab. 2 p. 2)
Fig. 6. Residual stress after welding with constant arc power (in Pa, Table 2 p. 2)



Rys. 7. Pozostające naprężenia własne, po spawaniu łukiem pulsującym (w Pa, tab. 2 p. 6)
Fig. 7. Residual stress after welding with pulsed-power arc (in Pa, Table 2 p. 6)



Rys. 8. Pozostające naprężenia własne po spawaniu łukiem pulsującym (w Pa, tab. 2 p. 5)

Fig. 8. Residual stress after welding with pulsed-power arc (in Pa, Table 2 p. 5)

3. ANALIZA WYNIKÓW

W pierwszej fazie doboru parametrów prowadzono analizę nieustalonego pola temperatur; obliczone rozkłady temperatury są zgodne z założeniami teoretycznymi. Sprawdzano, czy dla przyjętej mocy P i sposobu pulsacji łuku izotermi przekroczą temperaturę krystalizacji, wskazując na uzyskanie odpowiedniego przetopu. Odrzucono zestawy parametrów nie prowadzące do przetopu, lub też takie, gdzie kolejne spoiny punktowe nie łączyły się ze sobą i nie tworzyły spoiny ciągłej. Odrzucano również spoiny zbyt szerokie, jako grożące przepaleniem spawanych elementów. Pozostałe zestawy parametrów mogą być badane dalej eksperymentalnie lub numerycznie.

Analizowano naprężenia pozostające. W tabeli 2 przedstawiono maksymalne (+ i -) naprężenia wzdłużne, poprzeczne, zredukowane i plastyczne wg linii $\sigma - \epsilon$ (rys. 5) modelu plastycznego płynięcia materiału. W drugiej fazie doboru parametrów kierowano się wartościami naprężeń pozostających. Pulsujący charakter łuku zmniejsza energię liniową spawania, co powinno prowadzić do zmniejszenia wartości naprężeń pozostających. Zaobserwowano, że zmniejszenie to nie jest jednak znaczne, zaś niektóre składowe pola naprężeń pozostających uzyskują wartości maksymalne większe niż w spoinie ciągłej. Pola temperatury i naprężeń postanowiono zatem zbadać dla łuku pulsującego o tak zwiększonej mocy P_n , aby uzyskać średnią energię liniową porównywalną ze spawaniem łukiem ciągłym. Również w tych przypadkach dla łuku pulsującego zaobserwowano większe wartości maksymalne wybranych składowych pola naprężeń. Lokalizacja maksimów była wieloobszarowa, wzdłuż osi spoiny i wyraźnie związana z działaniem kolejnych impulsów mocy łuku. Obszary koncentracji miały niewielkie wymiary i duży gradient analizowanych wartości. Gdyby za kryterium optymalizacji uznano rozkład naprężeń pozostających, to stosowanie łuku pulsującego powinno być starannie rozważone. Obszary skupiające naprężenia są podatniejsze na zniszczenie, szczególnie na pęknięcie. Ich położenie może zbiec

się z wadami spawalniczymi. Łańcuch leżących na jednej linii obszarów koncentracji naprężeń może sprzyjać gwałtownemu rozwojowi pojawiającego się pęknięcia. Dodatkowo istotne mogą być karby strukturalne na styku kolejnych spoin punktowych. Materiały podatne na korozję naprężeniową mogą korodować w punktach koncentracji, które mając małą powierzchnię mogą tracić materiał punktowo w głąb – szybciej niż przy spoinie ciągłej.

MES pozwala na badanie ciągłej historii obciążenia cieplnego i mechanicznego. Odpowiednie wyniki obliczeń istnieją, są jednak trudniejsze do przedstawienia i analizy. Równoległa analiza nieustalonych pól temperatury i odkształceń może np. wskazać obszary podatne na pęknięcie gorące.

4. SPOSTRZEŻENIA I WNIOSKI

1. Dobór właściwej technologii spawania stopów aluminium może być ułatwiony dzięki dostarczonym przez MES informacjom o temperaturze i naprężeniach.
2. Impulsowe dostarczanie energii, trudne w opisie, ma charakter zmieniający rozkład temperatury i naprężeń. Zmiana dotyczy obszarów występowania oraz wartości maksymalnych. Dla niektórych z badanych kombinacji parametrów spawania i własności materiałowych zmiany okazały się wyraźnie widoczne.
3. Zastosowanie MES jest ważne dla materiałów przewidzianych do pracy w warunkach wyężenia, obciążeń zmęczeniowych i udarowych, skłonnych do pęknięcia lub korozji naprężeniowej.
4. Rozdzielczość znanych metod pomiaru naprężeń pozostających może nie pozwolić na wykrycie małych obszarów koncentracji. MES, mogąca stosować bardzo małe pojedyncze elementy, jest więc cenną metodą badawczą.
5. Dalsze badania wydają się być potrzebne. Powinny dotyczyć również innych grup materiałów spawanych. Należy podjąć badania cyklu chłodzenia po spawaniu impulsowym, ponieważ lokalne chłodzenie może sprzyjać powstawaniu w niektórych stalach kruchych struktur nierównowagowych.

LITERATURA

- [1] Argyris J.H., Szimmat J., Willam K.J., 1985. Finite Element Analysis of Arc-welding Process. Numerical Methods in Heat Transfer III.
- [2] Goldak J. i wsp., 1986. Computer Modeling of Heat Flow in Welds. Metallurgical Transactions B 9, 587-600.
- [3] Myśliwiec M., 1972: Ciepłno-mechaniczne podstawy spawalnictwa. WNT Warszawa.
- [4] Radaj D., 1992. Heat effects of welding. Springer Verlag Berlin.
- [5] Ranatowski E., 1999. Elementy fizyki spajania metali. Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.

- [6] Richter F., 1973. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen. Stahleisen Düsseldorf.
- [7] Skibicki A., 1998. Identyfikacja stanu termicznych i mechanicznych skutków procesu spawania wybranych elementów z uwzględnieniem metod numerycznych. Praca doktorska, WM ATR Bydgoszcz.
- [8] Zienkiewicz O.C., 1972. Metoda Elementów Skończonych. Arkady Warszawa.

Recenzował: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Walczak

PARAMETERS OF PULSED WELD-ARC FOR WELDING OF ALUMINIUM ON THE BASIS OF FEM CALCULATIONS OF TEMPERATURE AND STRESSES

Summary

GTAW pulsed power arc welding of aluminium alloy EN 5019 was investigated. Influence of welding parameters on temperature, penetration and residual stresses was calculated on the FEM simulation. Numerical model had moving, distributed heat source with constant or modulated power. Two dimensional (2D) numerical model with temperature dependent material properties was used. Weld-pool dimensions and locations was used to check results of welding. Residual stresses calculated for pulsed arc were in some cases higher than for constant arc.