

Analiza numeryczna procesu spawania łącznika spawalniczego stal-aluminium

Numerical analysis of the welding process of steel-aluminum welding connector

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki symulacji procesu spawania łącznika spawalniczego o konfiguracji stal S235JR-aluminium A5083 z międzywarstwą tytanu Grade 1 oraz aluminium A1050. W publikacji zaprezentowano parametry materiałowe modelu, a także wyniki pierwszych obliczeń w postaci rozkładów temperatury oraz naprężeń własnych wywołanych przez proces łączenia materiałów.

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych; symulacja; spawanie; łączniki spawalnicze

Abstract

The paper presents the results of the numeric welding simulation performed for S235JR-aluminum A5083 transition joint. The paper presents material parameters used in the model calculations. Results of the first calculations were presented in the form of the residual stresses distributions induced by the process of joining materials.

Keywords: finite element method; simulation; welding; transition joint

Wstęp

Symulacja procesu spawania materiałów konstrukcyjnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) znajduje coraz szersze zastosowanie w projektowaniu maszyn i urządzeń. Zespolenie nieliniowej analizy termicznej oraz mechanicznej umożliwia między innymi określenie rozkładów temperatury, deformacji i naprężeń wewnętrznych wywołanych procesem spawania. Uzyskane informacje pozwalają na optymalizację procesu łączenia materiałów [3]. W nowoczesnych konstrukcjach inżynierskich często wykorzystuje się połączenia pomiędzy materiałami o różnych właściwościach wytrzymałościowych i mikrostrukturalnych. Przykładem tego typu złączy są połączenia stal-aluminium, szeroko stosowane w przemyśle stoczniowym oraz motoryzacyjnym [5]. Technologia spawania umożliwia łączenie stali oraz aluminium z wykorzystaniem ciepła generowanego za pośrednictwem np. łuku elektrycznego. Jednak ciepło doprowadzane do układu może powodować powstawanie kruchej intermetalicznej struktury Fe_xAl_y , co ma istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe uzyskiwanych połączeń np. wytrzymałość na rozciąganie [7]. Alternatywą dla bezpośredniego procesu spawania jest zastosowanie złączy śrubowych lub nitów co w znaczącym stopniu może wpłynąć na masę oraz aspekty ekonomiczne związane z dozorem technicznym maszyn i urządzeń. Zastosowanie kompozytowych łączników spawalniczych,

opartych np. o zgrzewane wybuchowo lub walcowane na gorąco materiały wielowarstwowe pozwala na stosowanie technologii spawania bez konieczności prowadzenia dodatkowych zabiegów technologicznych. Wykorzystanie łączników spawalniczych wiąże ze sobą konieczność analizy konstrukcji między innymi pod kątem naprężeń własnych obecnych w konstrukcji. W pracy zaprezentowano wyniki symulacji procesu spawania łącznika spawalniczego o konfiguracji stal S235JR-aluminium A5083 z międzywarstwą tytanu Grade 1 oraz aluminium A1050.

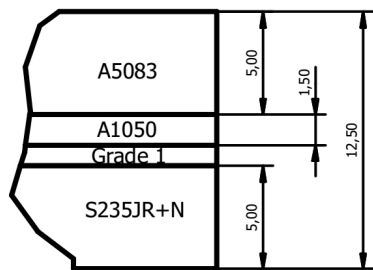
Właściwości materiałów

Analizie poddano konstrukcję łącznika składającą się z: aluminium A5083 (5 mm), aluminium A1050 (1,5 mm), tytanu Grade 1 (1 mm), stali S235JR+N (5 mm). Wymiary symulowanego układu kompozytu zaprezentowano na rysunku 1.

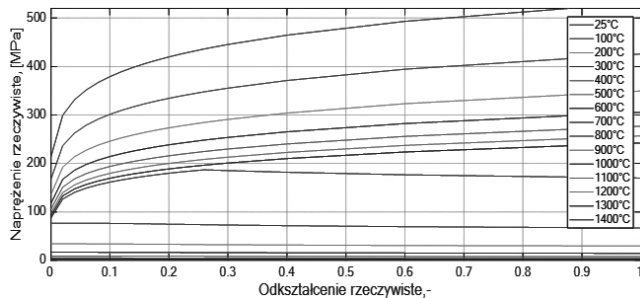
Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem analizy nieliniowej dla parametrów materiałowych zmiennych w funkcji temperatury. Dane materiałowe zostały określone na podstawie badań eksperymentalnych (tabl. I) oraz danych dostępnych w literaturze [1,4,6,8÷10]. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe materiałów przed procesem zgrzewania w temperaturze pokojowej zaprezentowano w tablicy I.

Dr inż. Mateusz Kowalski – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: m.kowalski@po.opole.pl



Rys. 1. Wymiary kompozytu wielowarstwowego w milimetrach
Fig. 1. Multilayer composite thickness dimensions in millimeters



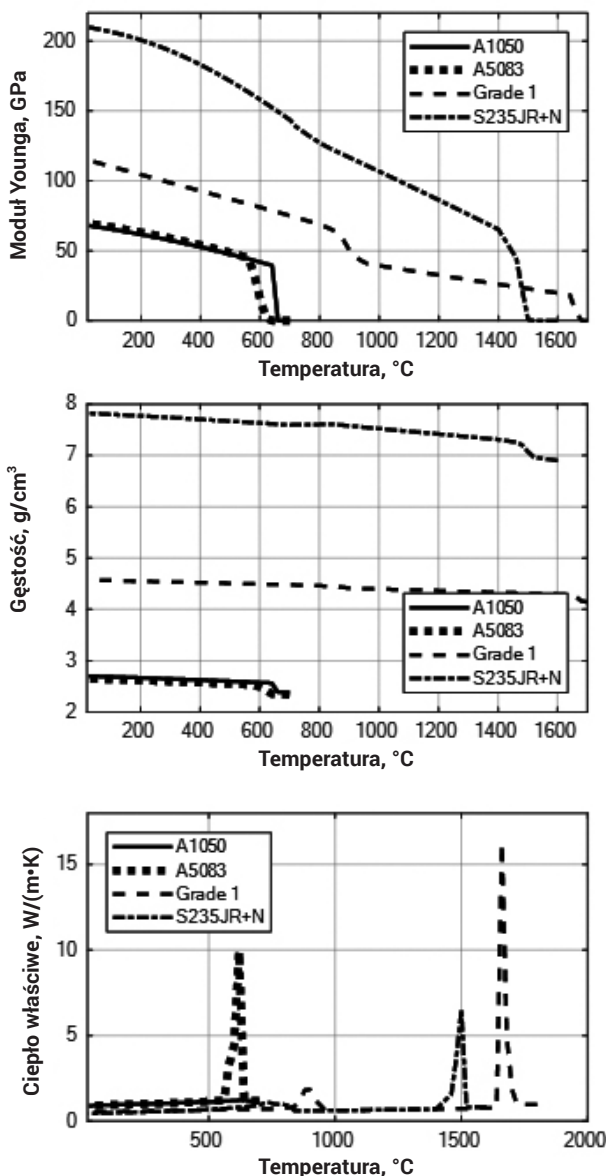
Rys. 2. Krzywe płynięcia stali S235JR+N w zależności od temperatury
Fig. 2. Flow curves for S235JR+N in temperature dependence

Model obliczeniowy

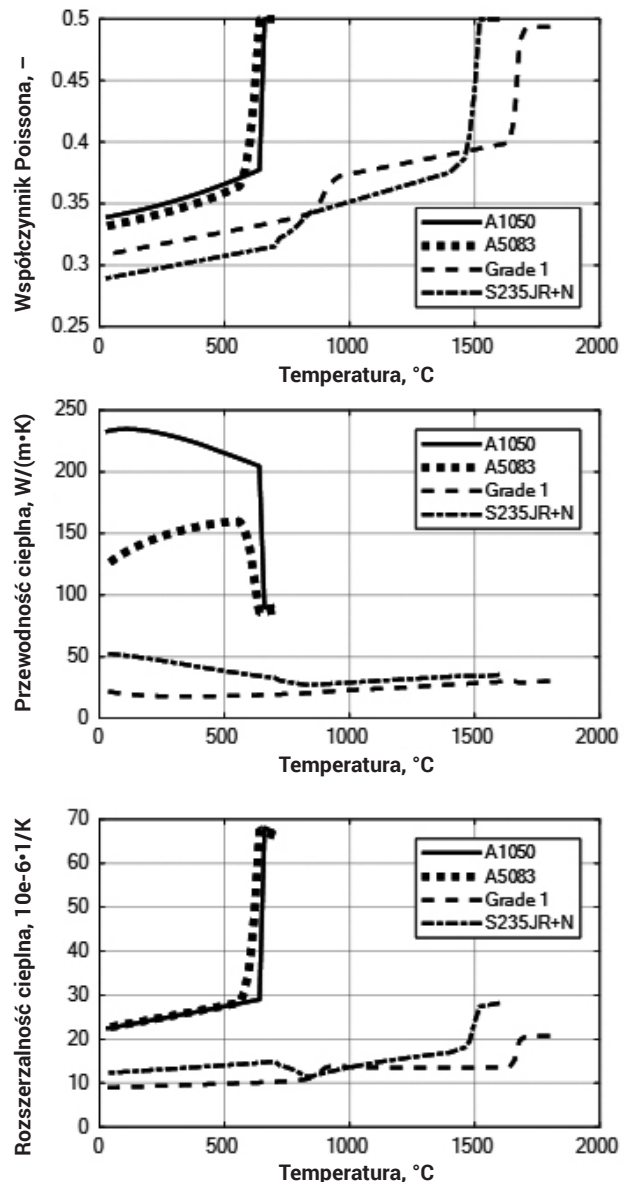
W obliczeniach uwzględniono krzywe płynięcia dla poszczególnych materiałów. W zależności od właściwości materiału powyżej wartości ok. 0,7 temperatury topnienia oddziaływanie zjawiska umocnienia na stabilność obliczeń jest coraz niższe (rys. 2). Na rysunku 3 zaprezentowano właściwości fizyczne materiałów w funkcji temperatury. Dane zostały zaprezentowane w zakresie od temperatury 25 °C do temperatury topnienia dla poszczególnych materiałów.

Model obliczeniowy
Symulacje przeprowadzono dla układu zaprezentowanego na rysunku 4a. W analizie wykorzystano sześcienné elementy skończone. Łączna liczba elementów skończonych wynosiła 10780, liczba węzłów 15840. Połączenia pomiędzy poszczególnymi warstwami kompozytu zdefiniowano w sposób uproszczony, pomijając falisty przebieg złącza charakterystyczny dla kompozytów wytworzonych w technologii wybuchowej (rys. 4b).

W obliczeniach uwzględniono modele spoin. Wysokości oraz długości spoin dla stali i aluminium wynosiły 3 mm. Modele spoin generowano z wykorzystaniem wektora czasu co pozwoliło na symulację prędkości spawania. W obliczeniach uwzględniono parametry technologiczne procesu w postaci

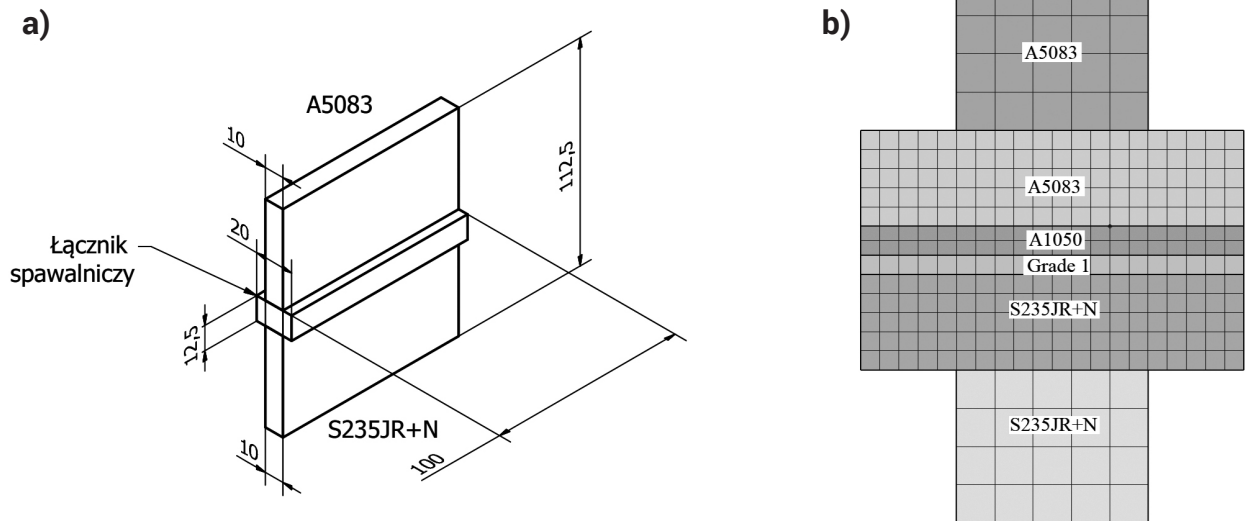


Rys. 3. Właściwości fizyczne materiałów
Fig. 3. Physical properties of the materials



Tablica I. Własności mechaniczne badanych materiałów przed połączeniem, temperatura pokojowa
Table I. Mechanical properties of materials before cladding in the room temperature

Materiał	Właściwości wytrzymałościowe				
	R _{p02} , MPa	R _m , MPa	E, MPa	G, MPa	ν, -
Stal S235JR+N	235	350÷370	220000	84000	0,3
Tytan Grade 1	189÷215	308÷324	100000	38000	0,37
Aluminium A1050	20	65÷95	69000	25900	0,33
Aluminium A5080	125	275÷350	71000	26800	0,33



Rys. 4. Model łącznika spawalniczego: a) kształt i wymiary układu, b) siatka elementów skończonych
Fig. 4. Model of welding connector: a) shape and dimensions of the system, b) mesh of finite elements

wolumetrycznego obciążenia układu strumieniem ciepła generowanego wg rozkładu Goldaka [2] (rys. 5) o wymiarach charakterystycznych zaprezentowanych w tablicy II.

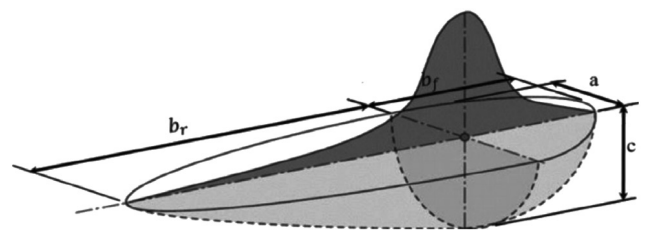
Analizę wykonano dla spoin pachwinowych po stronie stali i aluminium z uwzględnieniem rozkładów temperatury i naprężeń własnych. We wszystkich częściach symulowanego układu zastosowano model kinematycznego umocnienia materiału.

Wyniki analizy

Wyniki analizy przedstawiono w formie warstwic temperatury podczas procesu spawania oraz naprężeń własnych po połączeniu materiałów. Maksymalne wartości temperatur w kompozycie wielowarstwowym mogą być istotne między innymi ze względu na mechanizm powstawania tlenków w złączu stal-tytan w podwyższonych temperaturach.

Na rysunku 7 zaprezentowano przykładowe cykle cieplne dla punktów znajdujących się powierzchni bocznej łącznika obliczone w połowie długości układu. Ze względu na relatywnie niewielką szerokość złącza w materiale wielowarstwowym podczas spawania aluminium A5083 może zachodzić zjawisko oddzielenia warstwy aluminium.

Na rysunku 8 zaprezentowano wykresy naprężeń własnych obecnych w konstrukcji po procesie spawania wg hipotezy HMM. Maksymalna wartość naprężenia w blasze A5083 wynosiła ok. 150 MPa. W złączach materiału wielowarstwowego odnotowano naprężenia w zakresie od 100 do 144 MPa. Uzyskane wartości przekraczają granicę plastyczności tytanu Grade 1 oraz aluminium A1050. Wzrost naprężenia w warstwie stalowej w odległości ok. 50 mm od złącza spawanego wynika z kolejności łączenia elementów. Proces spawania aluminium powoduje deformację łącznika, która powoduje zjawisko zginania blachy stalowej.

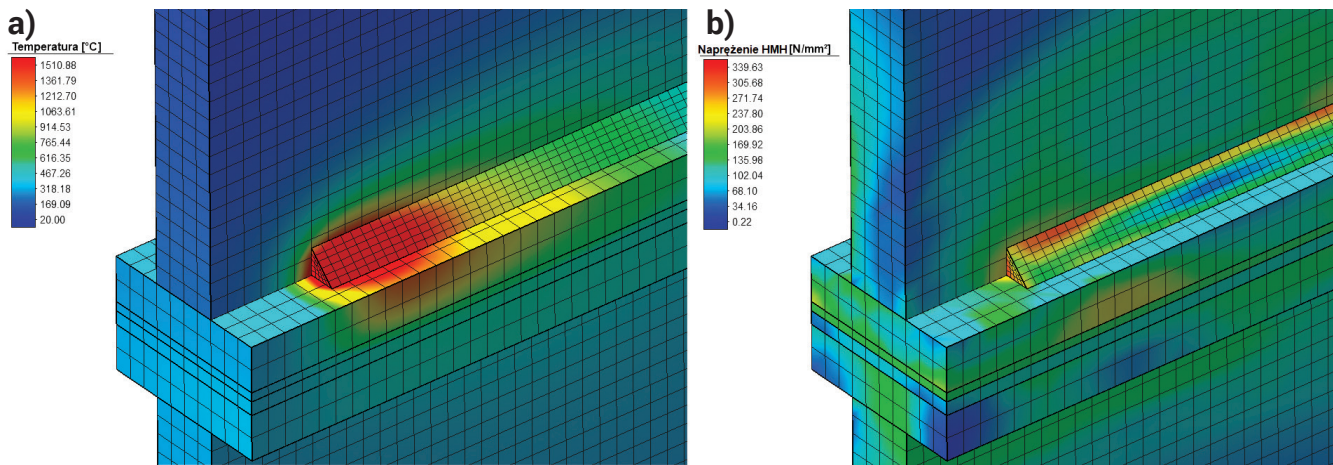


Rys. 5. Model rozkładu ciepła wg Goldaka
Fig. 5. Goldak model of heat distribution

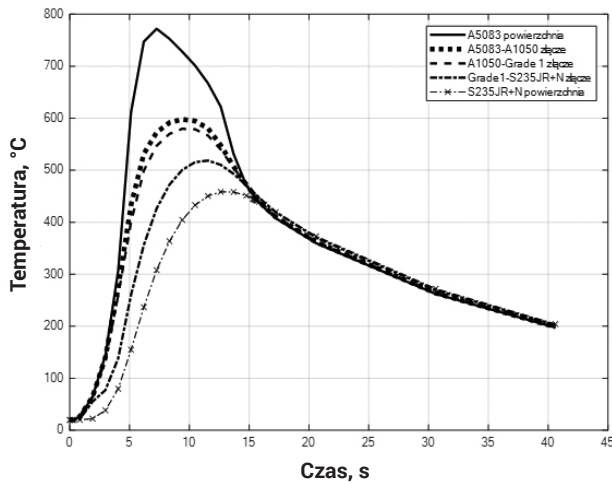
Tablica II. Parametry procesu spawania oraz zastosowanego źródła ciepła
Table II. Welding and heat source parameters

Materiał	Parametry spawania			Parametry źródła ciepła			
	I [A]	V [V]	v [cm/min]	b _r [mm]	b _r [mm]	a [mm]	c [mm]
Aluminium	230	22,8	30	2,2	7,2	2,7	3,7
Stal	220	26,5	30	2,5	7,2	2,6	3,5

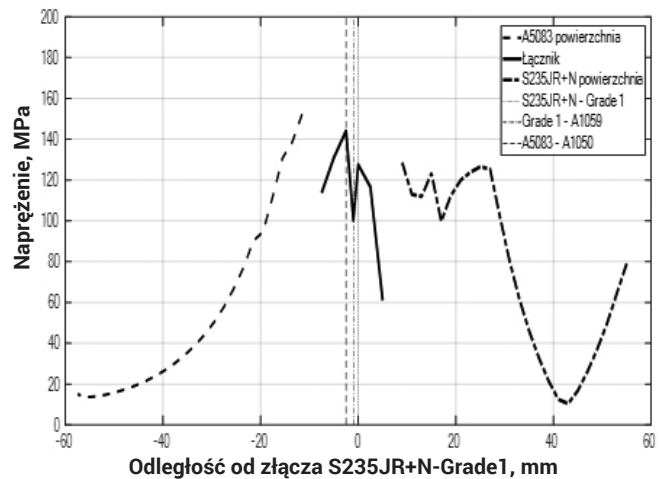
Gdzie: b_r, b_r – kolejno długości frontowej i tylnej części rozkładu, a – połowa szerokości rozkładu źródła ciepła, c – głębokość penetracji źródła ciepła



Rys. 6. Wyniki analizy: a) temperatura podczas spawania stali, b) naprężenia własne wg hipotezy HMH po czasie 500s
 Fig. 6. Analysis results: a) temperature during steel welding, b) residual stress (HMH) after 500s



Rys. 7. Cykle cieplne punktów na powierzchni łącznika
 Fig. 7. Thermal cycles of points on the surface of the transition plate



Rys. 8. Naprężenia własne w konstrukcji łącznika po procesie spawania
 Fig. 8. Residual stresses in the transition joint after the welding process

Wnioski i spostrzeżenia

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski i spostrzeżenia:

- Maksymalne wartości naprężeń ok. 150 MPa odnotowano w blasze A5083. W materiale wielowarstwowym naprężenia zawierały się w przedziale od ok. 100 do 140 MPa.
- Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwia określenie naprężeń wywołanych procesem spawania łącznika. Model wymaga eksperymentalnej weryfikacji poprzez pomiar naprężeń własnych np. z zastosowaniem metod trepancyjnych.
- Parametry procesu spawania mogą wpływać na optymalną konfigurację konstrukcji łącznika (szerokość płyty kompozytu). Zwiększenie objętości materiału spowoduje odprowadzanie większej ilości ciepła podczas spawania zapobiegając np. zjawisku delaminacji złącza.

Literatura

- [1] Altenpohl D.: Aluminium und Aluminiumlegierungen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1965.
- [2] Goldak J., Chakravarti A., Bibby M.: A new finite element model for welding heat sources, MTB. 15, 1984, pp. 299-305.
- [3] Knoedel P., Gkatzogiannis S., Ummerhofer T.: Practical aspects of welding residual stress simulation, Journal of Constructional Steel Research. 132, 2017, pp. 83-96.
- [4] Kumar Singh S., Mohan Tiwari R., Kumar A., Kumar S., Qasim Murtaza, S. Kumar: Mechanical Properties and Microstructure of Al-5083 by TIG, Materials Today: Proceedings. 5, 2018, pp. 819-822.
- [5] Liu W., Ma J., Mazar Atabaki M., Kovacevic R.: Joining of advanced high-strength steel to AA 6061 alloy by using Fe/Al structural transition joint, Materials & Design. 68, 2015, pp. 146-157.
- [6] Purdue University, Thermophysical Properties Research Center, Y.S. Touloukian, C.Y. Ho: Properties of aluminum and aluminum alloys, Thermophysical Properties Research Center, Purdue University, West Lafayette, Ind., 1973.
- [7] Rathod M., Kutsuna M.: Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding, Welding Journal., 2004, pp. 16-26.
- [8] Schoer H.: Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen, 2nd ed., DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2003.
- [9] Seyffarth P., Scharff A., Meyer B.: Grosser Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 1992.
- [10] Yogo Y., Sawamura M., Harada R., Miyata K., Iwata N., Ishikawa T.: Stress-strain curve of pure aluminum in a super large strain range with strain rate and temperature dependency, Procedia Engineering. 207, 2017, pp. 161-166.