

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

Spawanie lotniczych stopów tytanu

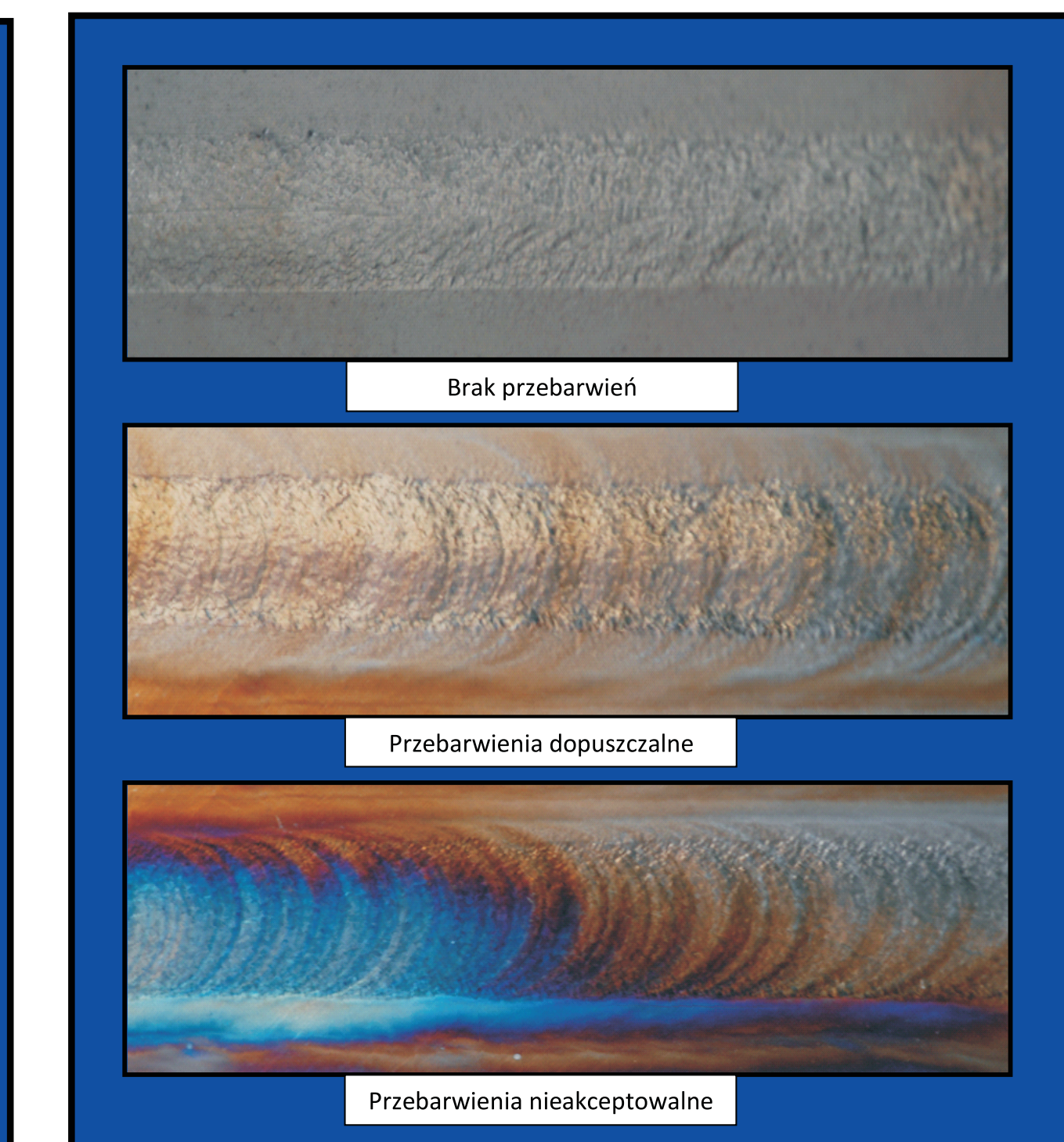
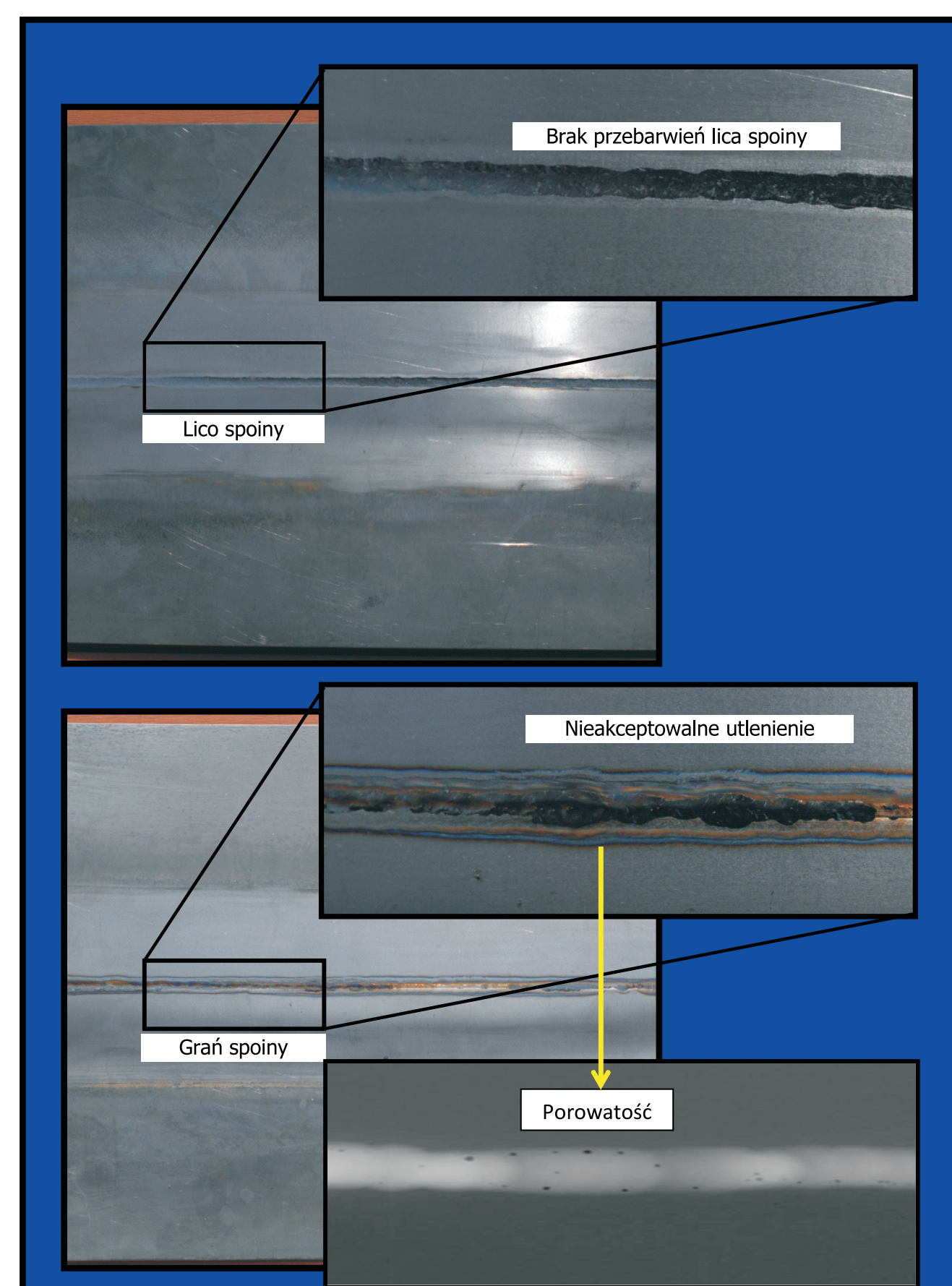
Welding of titanium alloys in aircraft applications

Przedmiotem zadania jest określenie warunków spawania oraz ocena możliwości zastosowania niekonwencjonalnych lukowych metod łączenia stopów tytanu stosowanych na konstrukcje lotnicze.

Głównym celem realizowanego zadania jest określenie warunków prowadzenia procesu spawania lukowego, których stosowanie umożliwi uzyskiwanie jakościowych złączy spawanych ze stopów tytanu Grade 2 i Grade 5. Wymienione wytyczne mają ustalić warunki, których przestrzeganie jest konieczne podczas łączenia elementów konstrukcji wykonanych z wysokowytrzymałych stopów metali stosowanych w przemyśle lotniczym.

The focus of the work is determination of welding parameters and assessment of applicability of unconventional arc welding methods to joining titanium alloys in aircraft applications.

The goal of the work is determination of arc welding process parameters that allow achieving high quality welding joints for titanium Grade 2 and Grade 5. The aforementioned parameters should be the basis for creation of welding guidelines that will specify conditions necessary for welding construction elements made of aircraft alloys.



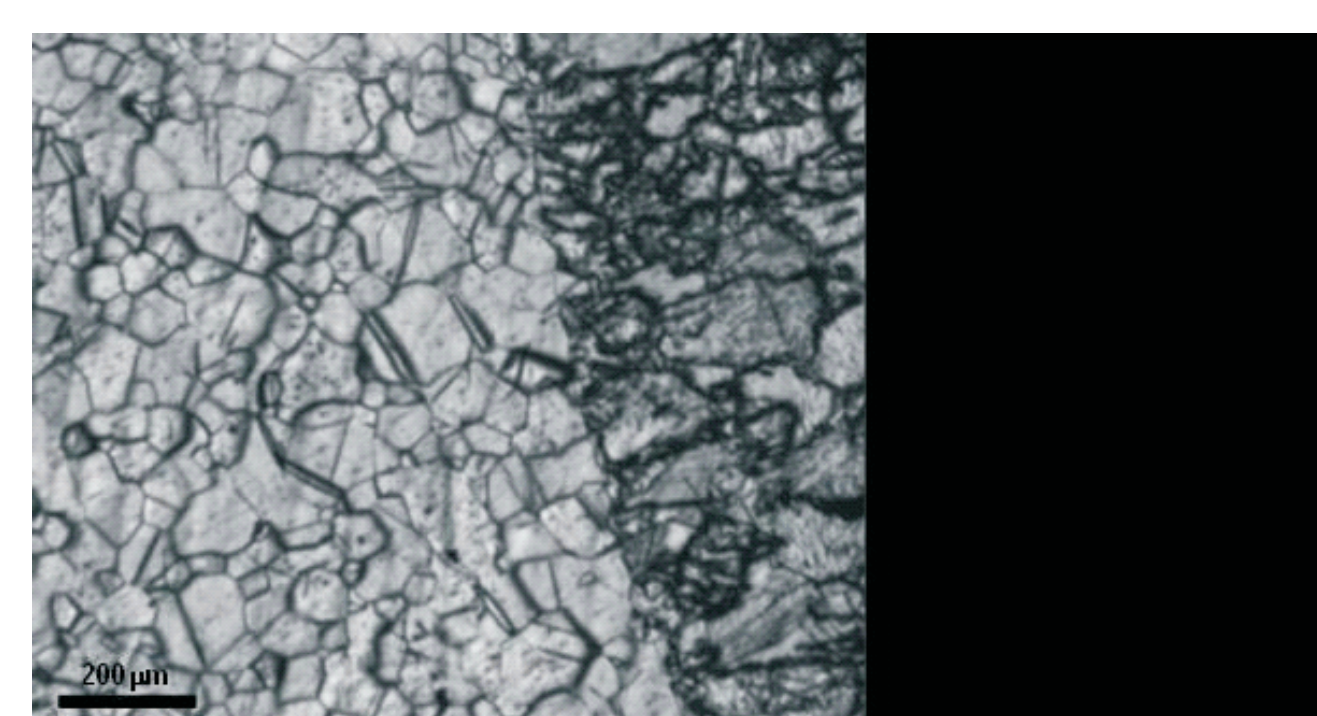
Rys. 2. Stopnie utlenienia w złączu spawanym tytanu (Grade 5)
Fig. 2. Oxidation levels in titanium Grade 5 welding joint

Tabela 1. Spawalność stopów tytanu
Table 1. Weldability of titanium alloys

Stop tytanu	Spawalność	Materiał dodatkowy
Czysty tytan handlowy		
Ti-0,15 O ₂	A	ERTI-1
Ti-0,20 O ₂	A	ERTI-2
Ti-0,35 O ₂	A	ERTI-4
Ti-0,2Pd	A	ERTI-7
Stop α		
Ti-5 Al-2,5Sn	B	ERTI-6
Ti-5 Al-2,5 Sn ELI*	A	ERTI-6ELI
Ti-6 Al-4V ELI	A	ERTI-SELI
Stop α+β		
Ti-7 Al-4Mo	C	ERTI-12
Ti-8Mn	D	Spawanie nie jest zalecane

*ELI – Extra low interstitial impurities (zawartość pierwiastków tworzących z tytanem roztwór międzywęzłowe: węgiel, wodór, tlen, azot jest mniejsza zarówno w spoiwie jak i materiale podstawowym); A- bardzo dobra spawalność, B- dobra spawalność, C- ograniczona spawalność do specjalnych aplikacji (możliwe pęknięcia przy wysokim utwardzeniu), D = spawanie nie jest zalecane (pęknięcia występują przy niewielkim utwardzeniu) należy stosować podgrzewanie wstępne w zakresie 150-180°C a następnie obróbkę cieplną po spawaniu.

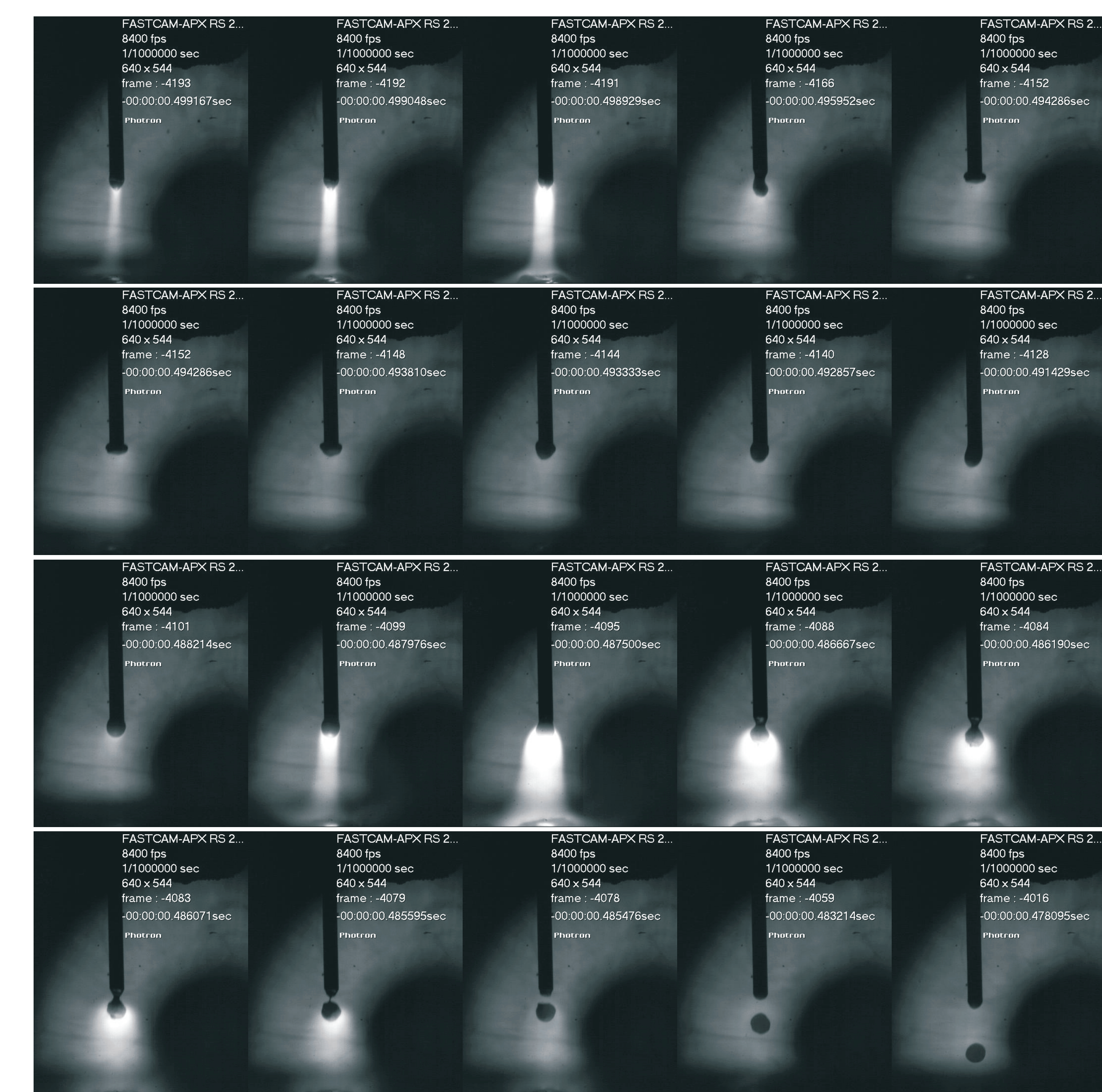
Rys. 1. Złącze spawane tytanu Grade 2 metodą TIG DCEN bez materiału dodatkowego (l=1mm; gaz osłonowy Ar 4,5; podkładka gazowa – powietrze)
Fig. 1. Titanium Grade 2 welding joint created with TIG DCEN method without consumables (l=1mm; shielding gas Ar 4,5; gas backing – air)



Rys. 3. Mikrostruktura złącza spawanego z tytanu metodą TIG DCEN: Is=140A, Vs=20cm/min
Fig. 3. Microstructure of titanium welding joint created with TIG DCEN: Is=140A, Vs=20cm/min

Zmodyfikowane spawanie impulsowe Double Puls

Z przeprowadzonych badań wynika, że połączenia zrealizowane ściśle dozowanym materiałem dodatkowym z jednoczesnym ograniczeniem wprowadzonej do materiałów spawanych energii jest perspektywiczną drogą otrzymywania złączy spawanych, których obecność w konstrukcjach nie powoduje znacznych naprężeń i odkształceń spawalniczych. Idea ta może prowadzić do otrzymania podczas spawania tytanu pół cieplnych o małych rozpiętościach wzdłużnej i poprzecznej. Oznacza to możliwość stosowania wyższych i krótszych konstrukcji osłonowych na palnikach, przyspieszenia procesu spawania, otrzymanie złączy o mniejszych ziamach z niższymi od dotychczas uzyskiwanych naprężeniami wewnętrznymi a zatem i odkształceniami spawalniczymi. Zmniejszenie może ulec również zakres stosowania oraz nastąpić uproszczenie i skrócenie zabiegów prowadzących do ograniczenia odkształceń końcowych. Możliwe staje się ponadto zmniejszenie zużycia drogiej dodatków oraz energii elektrycznej.



Rys. 4. Przebieg procesu odrywania kropli metalu w procesie spawania lotniczych stopów tytanu Double Puls
Fig. 4. Droplet formation during welding of titanium aircraft alloy - Double Puls

Wnioski Conclusions

Celem uzyskania złączy spawanych ze stopów tytanu należy przestrzegać szeregu zaleceń związanych z oczyszczeniem złącza i jego zabezpieczeniem przed dostępem powietrza w trakcie procesu spawania oraz zastosowania odpowiedniej obróbki cieplnej.

Wykonane próby pokazują, że nowe procesy spawania jak Double Puls mogą być wykorzystane do łączenia elementów odpowiedzialnych konstrukcji spawanych. Wykazano możliwości ograniczenia naprężeń i odkształceń spawalniczych w złączach poprzez zastosowanie zmodyfikowanego spawania impulsowego. Proces ten może zostać użyty do spawania materiałów wrażliwych na przegrzanie oraz w procesach spajania mających pozostawiać znikome naprężenia i odkształcenia końcowe. Do materiałów tych zaliczyć można wrażliwy na rozrost ziaren tytanu.

Sposób łączenia materiałów zrealizowany z jednoczesnym ograniczeniem wprowadzonej do materiałów spawanych energii jest perspektywiczną drogą otrzymywania złączy spawanych, których obecność w konstrukcjach nie powoduje znacznych naprężeń i odkształceń spawalniczych. Idea ta może prowadzić do otrzymania podczas spawania, co jest szczególnie ważne dla materiałów trudnospawalnych, pół cieplnych o małych rozpiętościach. Oznacza to możliwość uzyskiwania złączy z niższymi od dotychczas poziomami naprężeń wewnętrznych a zatem i odkształceniami spawalniczymi. Zmniejszeniu może ulec również zakres stosowania oraz nastąpić uproszczenie i skrócenie zabiegów prowadzących do ograniczenia odkształceń końcowych.

In order to create welding joints for titanium alloys the number of rules regarding joint cleaning, atmospheric gas protection during welding and appropriate heat treatment should be obeyed.

The performed tests show that new processes such as Double Plus can be used for joining load bearing construction elements. It was shown that it is possible to reduce welding stresses and strains in joints using modified pulse welding. This process can be used for welding materials susceptible to overheating and for welding processes that are required to introduce minimal stress and strain levels lower than it was possible so far can be created. It may be possible to simplify and reduce scope of operations that are intended to reduce residual stresses.

Joining of materials with simultaneous minimization of introduced energy is promising way of creating welding joints that don't introduce significant welding stresses and strains in constructions. This approach allows for achieving small size heat zones during welding which is particularly important for materials characterized by poor weldability. Welding joints with internal stress and strain levels lower than it was possible so far can be created. It may be possible to simplify and reduce scope of operations that are intended to reduce residual stresses.

Wyniki badań Results

Teoretyczna i eksperymentalna analiza zjawisk termo-mechanicznych dla procesu spawania wiązką elektronów

Theoretical and experimental analysis of thermo-mechanical phenomena during electron beam welding process

Celem pracy jest analiza wpływu parametrów sterujących procesem spawania wiązką elektronów na geometrię strefy przetopienia i rozkład naprężeń w próbce.

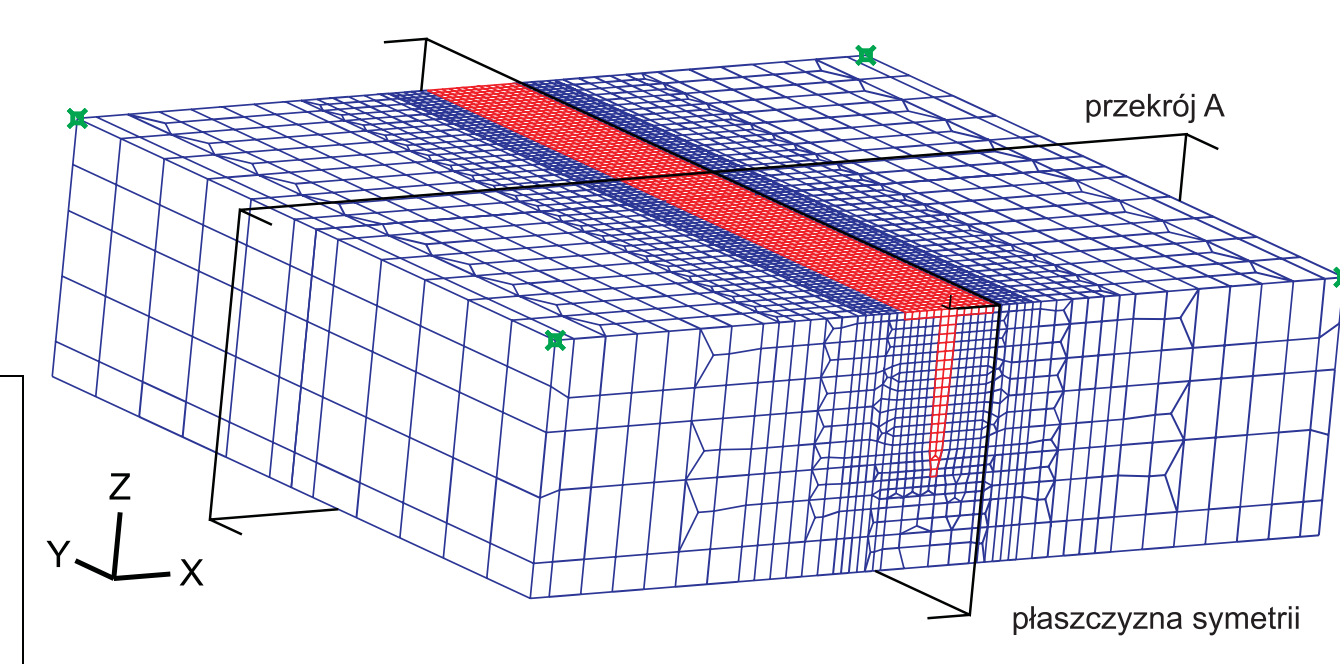
Technologia spawania wiązką elektronów jest stosowana w przemyśle lotniczym do łączenia elementów strukturalnych i przenoszących obciążenia, wykonanych ze stopów tytanu i aluminium oraz do łączenia elementów podwozia wykonanych z wysoko-wytwarzalnej stali.

W ramach badań eksperymentalnych wykonano 49 spoin dla stali 18-10 przy użyciu różnych parametrów sterujących. Analizowane parametry uwzględniały szybkość spawania, natężenie prądu wiązki, napięcie przyspieszające, zogniskowanie wiązki, odchylenie wiązki oraz częstotliwość prądu odchylenia. Metoda Partial Least Squares, PLS, została wykorzystana do budowy modelu przewidującego geometrię strefy przetopienia na podstawie parametrów sterujących.

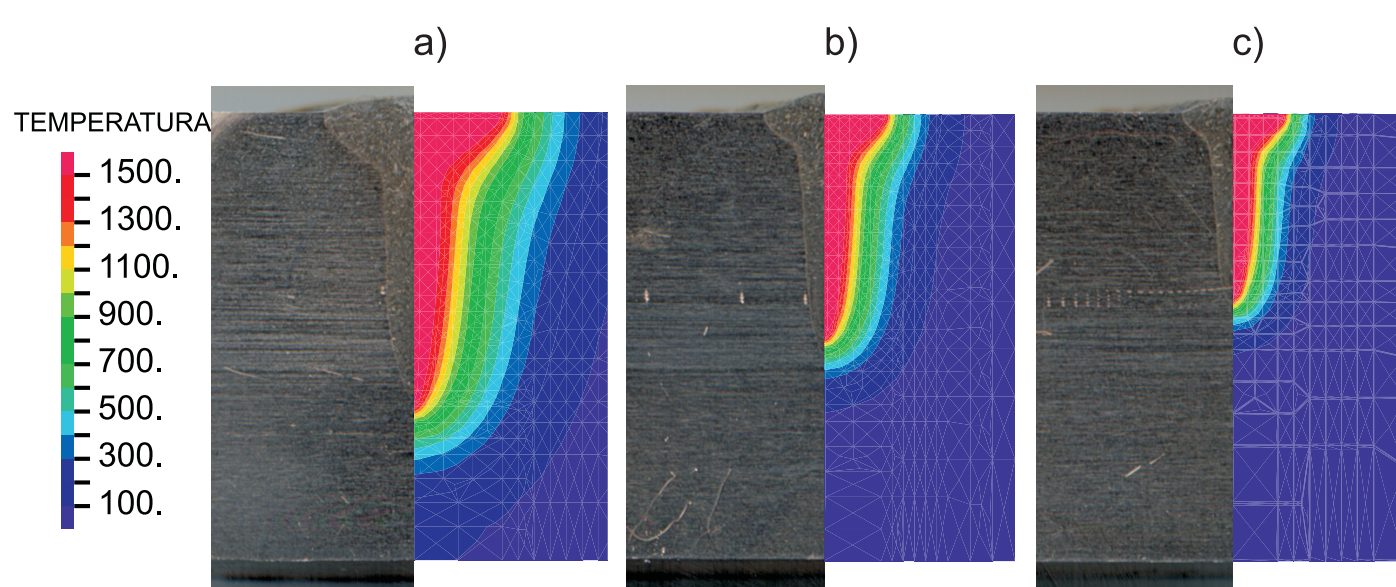
Informacje dostarczone przez model PLS na temat geometrii strefy przetopienia zostały następnie wykorzystane do kalibracji źródła ciepła. Model numeryczny wykorzystujący Metodę Elementów Skończonych, MES, został wykorzystany do opisu rozkładu temperatury i naprężeń w czasie procesu spawania. Obliczone pole temperatury zostało porównane z rzeczywistą strefą przetopienia. Model PLS-MES przewiduje kształt strefy przetopienia z zadowalającą dokładnością. Wartości obliczonych naprężeń zostały porównane z pomiarami dokonanymi przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej.

Tabela 1. Spoiny dla których wykonano symulację rozkładu naprężeń
Table 1. The welds for which simulation of stress distribution was performed

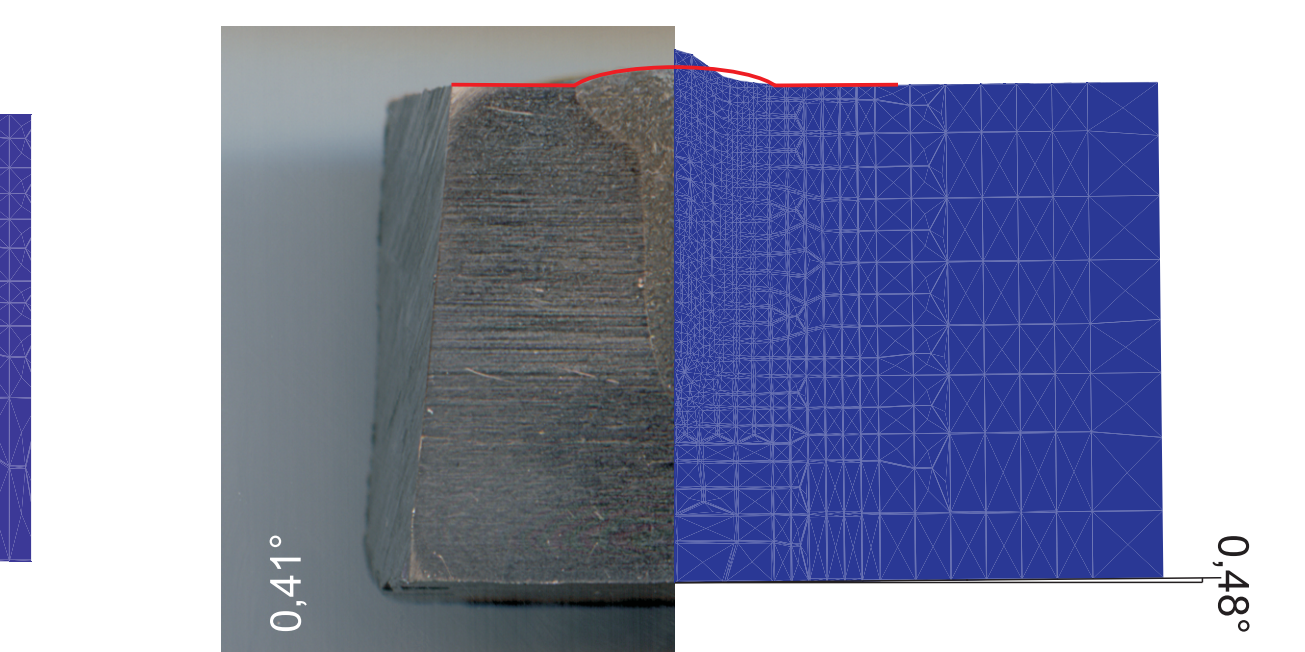
przekrój spoiny	A1	A2	A3	A4	A5
szersokość spawania	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s



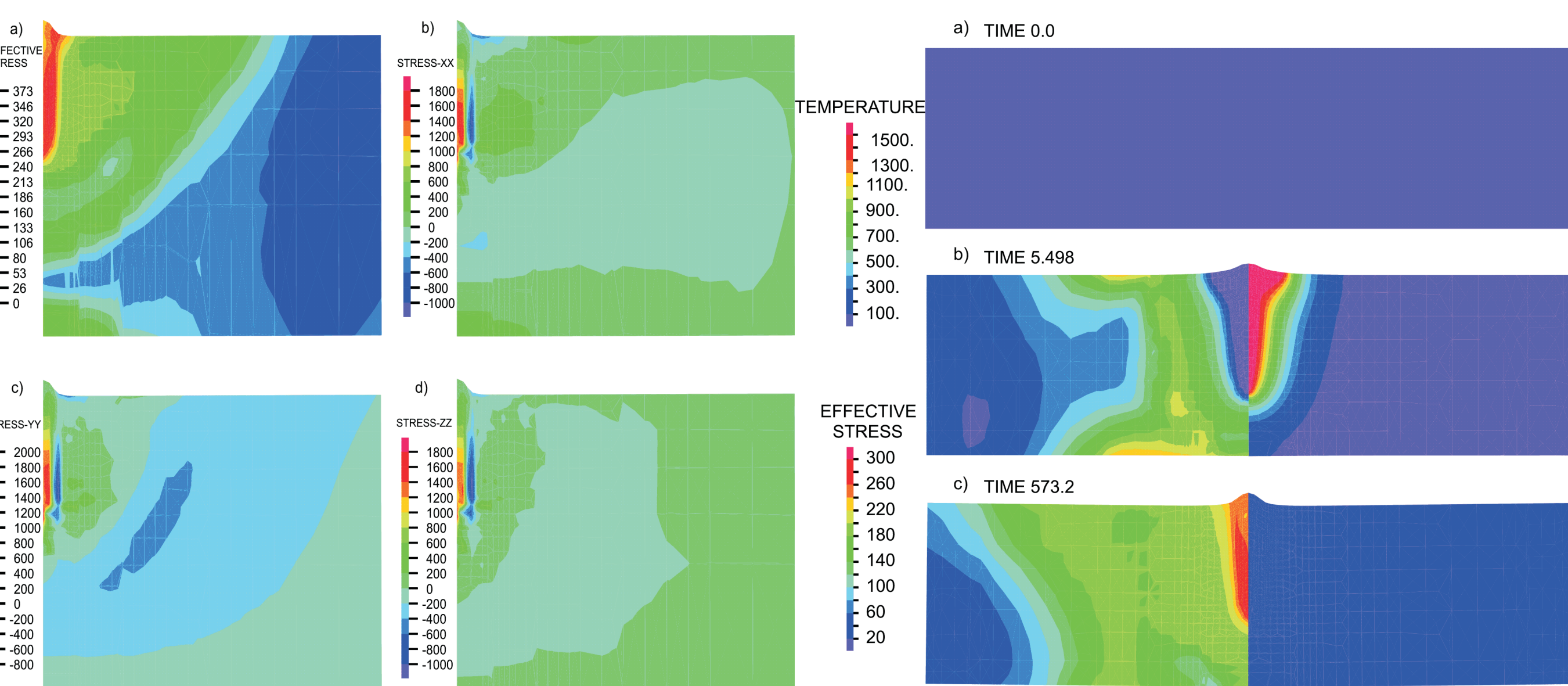
Rys. 1. Porównanie makrostruktury spoiny i obliczonego rozkładu temperatury dla spoin: (a) A1, (b) A2, (c) A3
Fig. 1. Comparison of weld macrostructure and calculated temperature distribution for welds: (a) A1, (b) A2, (c) A3



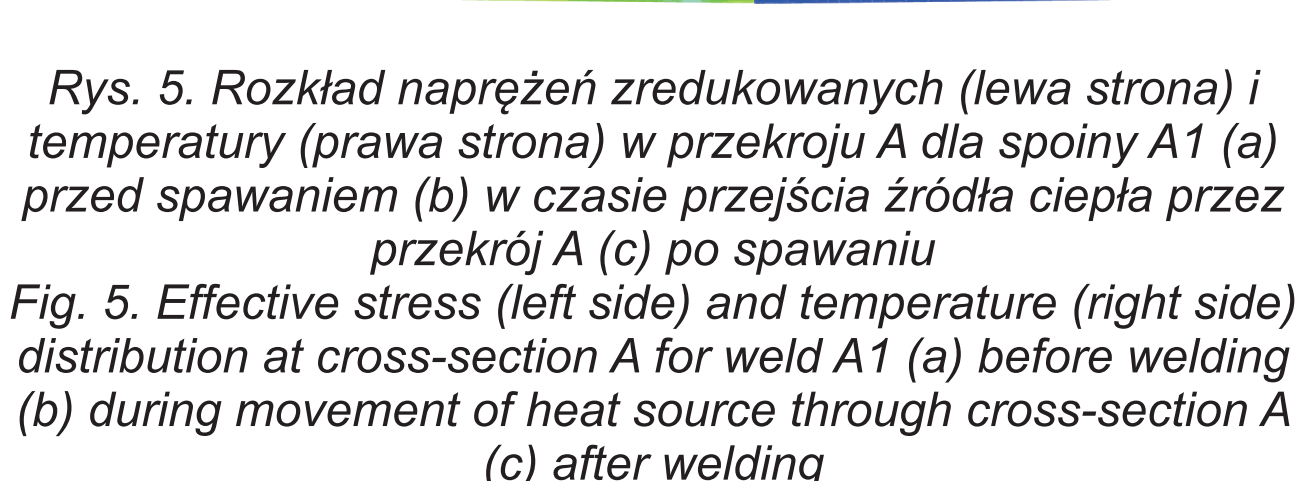
Rys. 2. Porównanie makrostruktury spoiny i obliczonego rozkładu temperatury dla spoin: (a) A1, (b) A2, (c) A3
Fig. 2. Comparison of weld macrostructure and calculated temperature distribution for welds: (a) A1, (b) A2, (c) A3



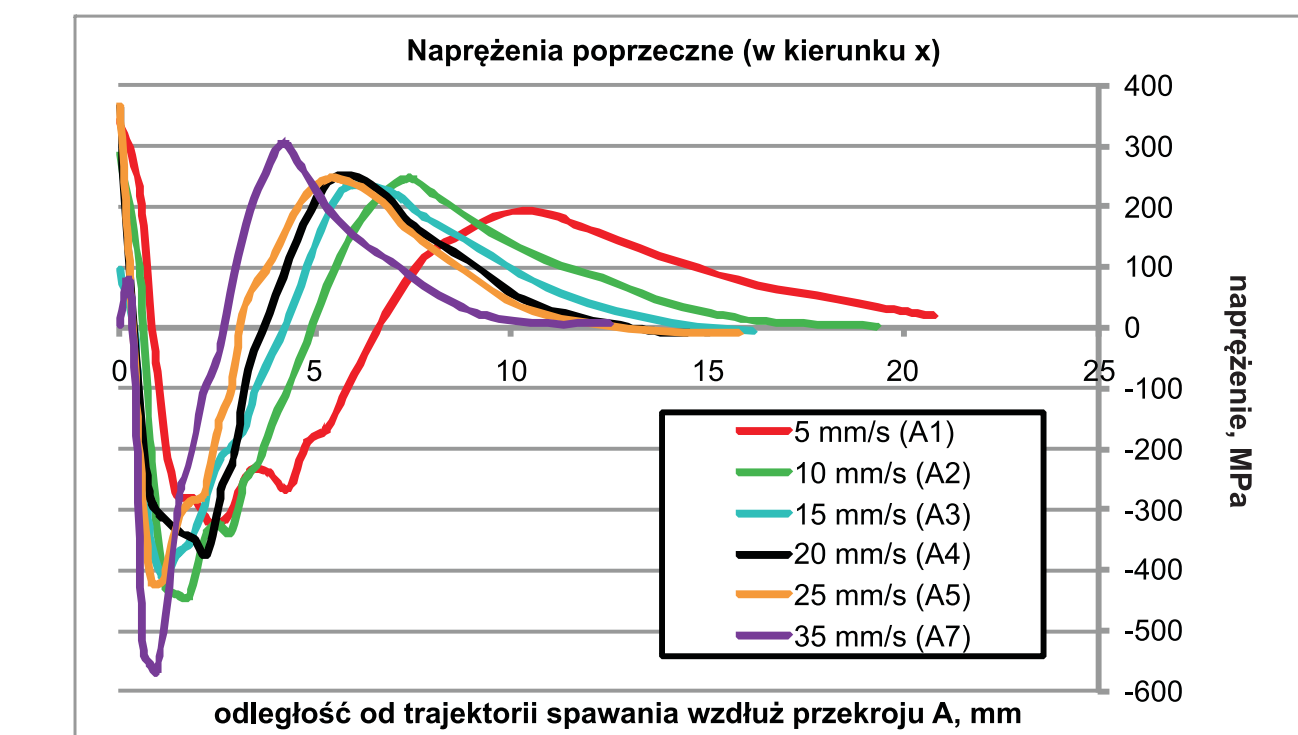
Rys. 3. Porównanie obliczonego i rzeczywistego kąta ugięcia płyty dla spoiny A1
Fig. 3. Comparison of calculated and measured plate bending for weld A1



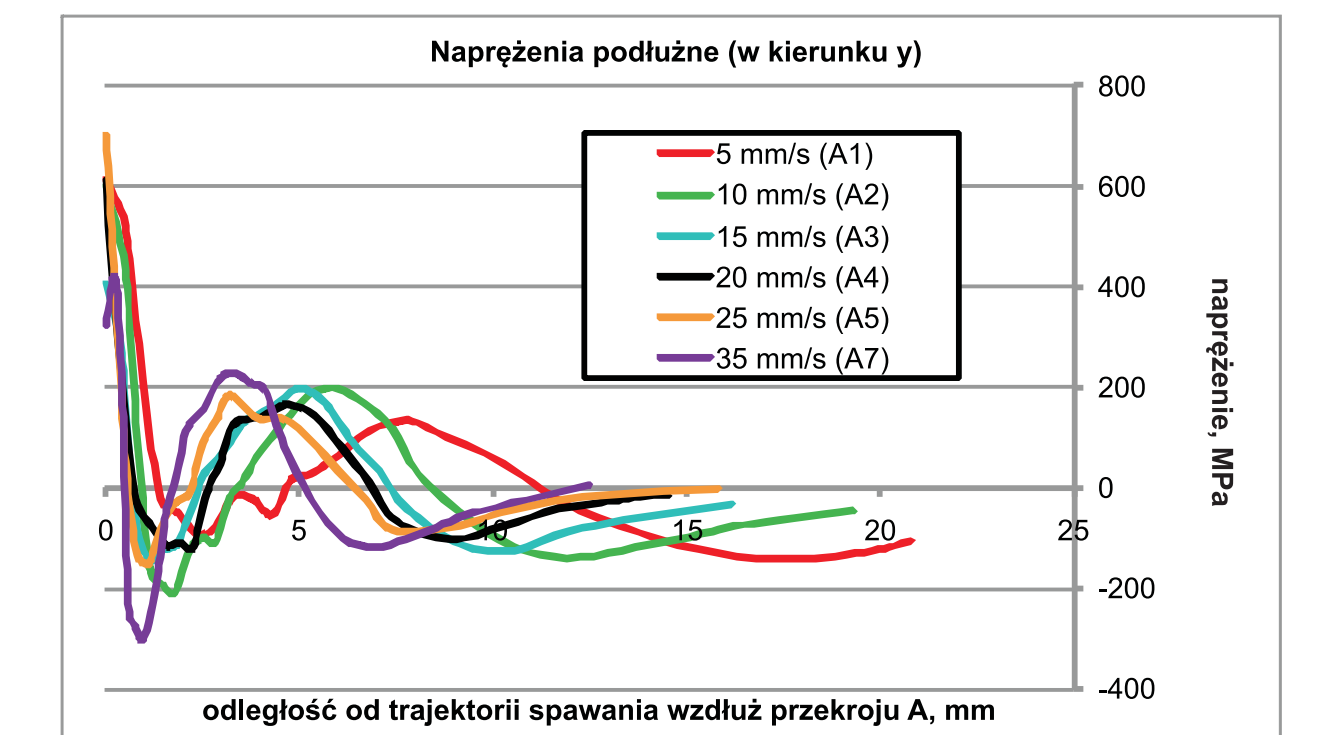
Rys. 4. Rozkład naprężeń w przekroju A 10 minut po zakończeniu spawania dla spoiny A7 (a) naprężenia zredukowane (b) naprężenia poprzeczne (c) naprężenia podłużne (d) naprężenia wzdłuż grubości
Fig. 4. Stress distribution in cross-section A 10 minutes after welding operation ended for specimen A7 (a) effective stress (b) traverse stress (c) longitudinal stress (d) along thickness stress



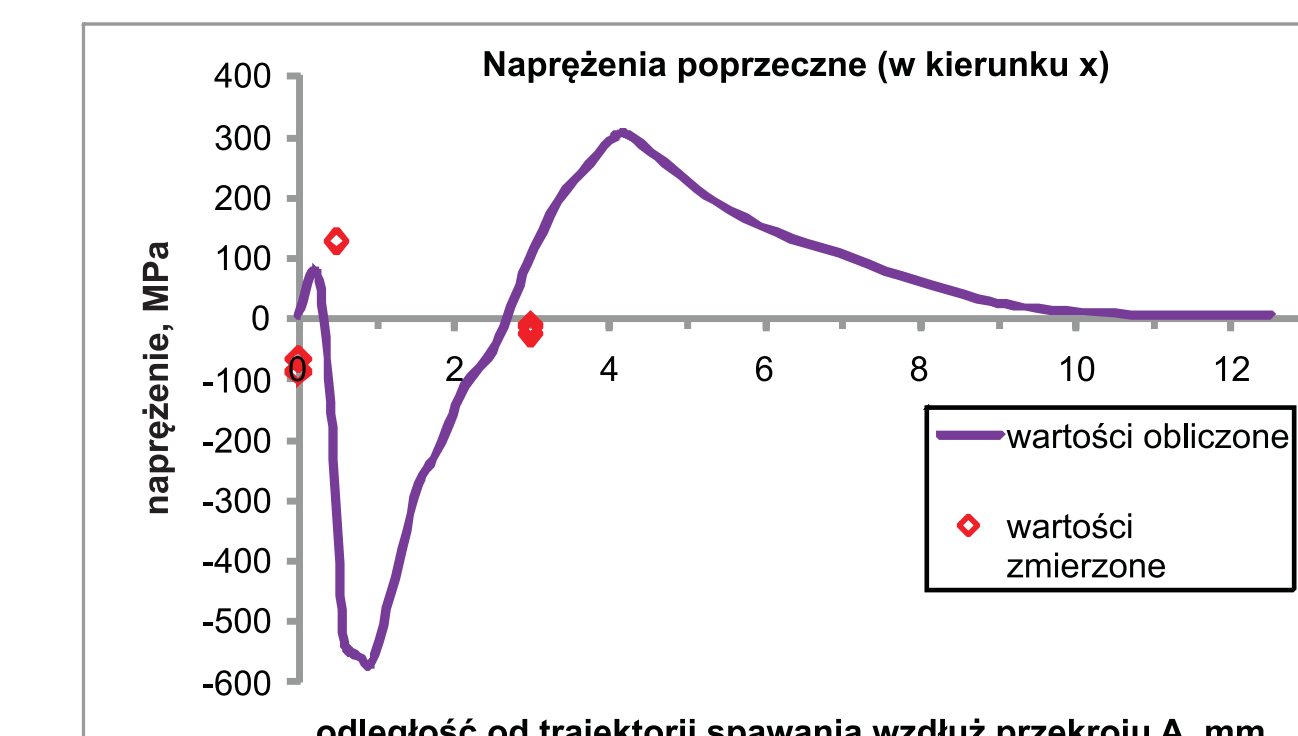
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych (lewa strona) i temperatury (prawa strona) w przekroju A dla spoiny A1 (a) przed spawaniem (b) w czasie przejścia źródła ciepła przez przekrój A (c) po spawaniu
Fig. 5. Effective stress (left side) and temperature (right side) distribution at cross-section A for weld A1 (a) before welding (b) during movement of heat source through cross-section A (c) after welding



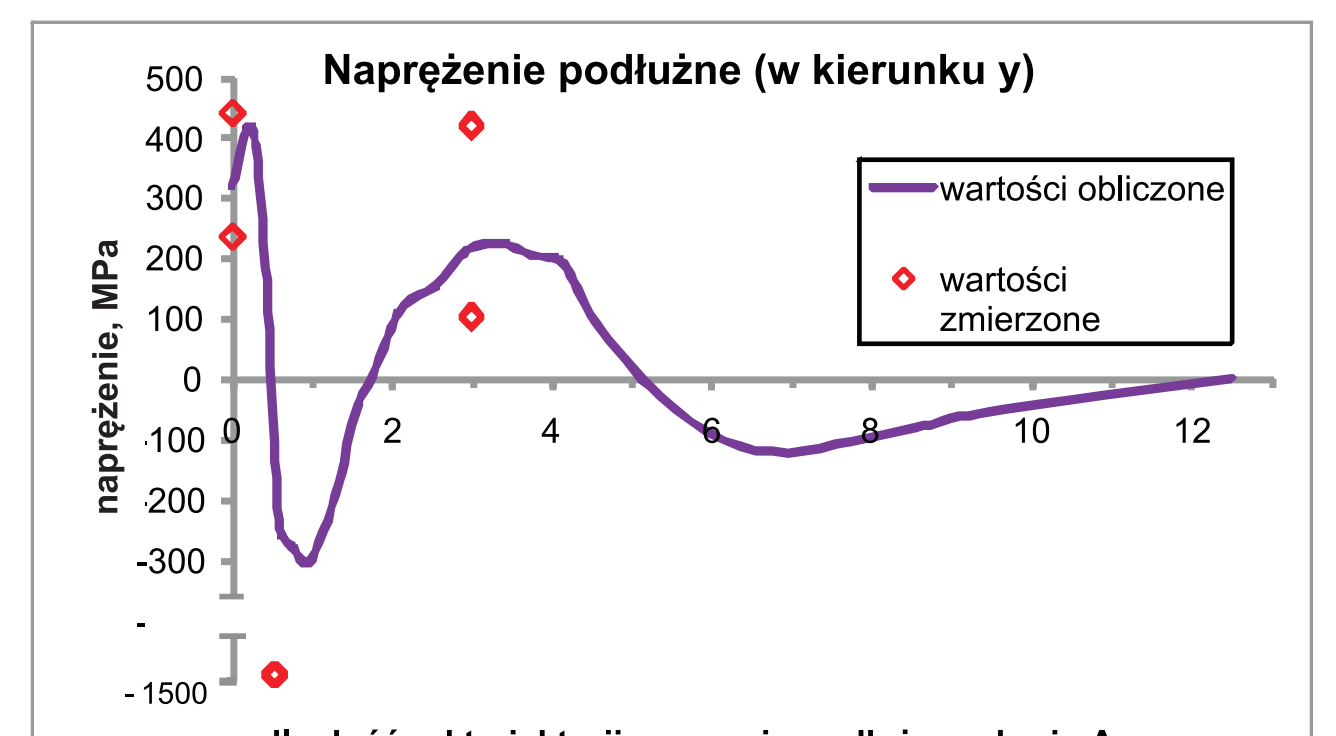
Rys. 6. Naprężenia poprzeczne na górnej powierzchni wzdłuż przekroju A 10 minut po zakończeniu spawania
Fig. 6. Traverse stress on the top surface measured along cross-section A 10 minutes after welding operation ended



Rys. 7. Naprężenia podłużne na górnej powierzchni wzdłuż przekroju A 10 minut po zakończeniu spawania
Fig. 7. Longitudinal stresses on the top surface measured along cross-section A 10 minutes after welding operation ended



Rys. 8. Naprężenia poprzeczne wzdłuż przekroju A na górnej powierzchni dla spoiny A7 – porównanie wartości obliczonych i zmierzonych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej
Fig. 8. Traverse stresses along cross-section A at top surface for weld A7 - comparison of calculated values and x-ray diffraction measurements



Rys. 9. Naprężenia podłużne wzdłuż przekroju A na górnej powierzchni dla spoiny A7 – porównanie wartości obliczonych i zmierzonych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej
Fig. 9. Longitudinal stresses along cross-section A at top surface for weld A7 - comparison of calculated values and x-ray diffraction measurements

Wyniki badań Results

W pracy zaproponowano metodę PLS do jako model przewidujący geometrię przekroju poprzecznego strefy przetopienia dla procesu spawania wiązką elektronów. Model źródła ciepła został skalibrowany na podstawie wyników dostarczonych przez model PLS. Następnie wykonano symulacje termo-mechaniczne dla różnych szybkości spawania. Na podstawie analizy zgromadzonych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

W analizowanym zakresie parametrów sterujących procesem spawania model PLS wprowadza następujące średnie błędy dla przekroju poprzecznego strefy przetopienia: 6.9% dla głębokości, 3.6% dla szerokości, 6.9% dla konturu oraz 7.8% dla pola powierzchni.

Połączony model PLS-MES przewiduje kształt strefy przetopienia z zadowalającą dokładnością. Dla szybkości spawania 5 mm/s kąt ugięcia spawanej płyty został przewidziany z 17% błędem.

Rozmiar stref naprężeń ściskających i rozciągających maleje wraz ze wzrostem szybkości spawania.

Metoda dyfrakcji rentgenowskiej została wykorzystana do weryfikacji dokładności modelu PLS-MES w zakresie przewidywania naprężeń poprzecznych i podłużnych na górnej powierzchni płyty. Porównanie wartości obliczonych i zmierzonych pokazuje, że jest zgodność jakościowa.

In the paper PLS model was suggested for prediction of FZ cross-section geometry for EBW process. Heat source model was calibrated based on the PLS model results. Subsequently thermo-mechanical simulations were performed for different welding speeds. The following conclusions can be drawn from the analysis of the results:

In the analyzed range of welding control parameters PLS model introduces average error of: 6.9% for weld depth, 3.6% for weld width, 6.9% for weld contour, and 7.8% for weld area.

Combined PLS-FEM model predicts geometry of FZ with satisfying accuracy.

For the welding speed of 5 mm/s bending angle of welded plate was predicted with 17% error.

The size of compressive and tensile stress layers decreases with increasing welding speed.

X-ray diffraction method was used for verification of PLS-FEM model accuracy with respect to traverse and longitudinal stress values in the top surface. Comparison of calculated and measured results showed that there is qualitative agreement.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

W zakresie realizowanych badań zespół P.Cz. współpracuje z podmiotami przemysłowymi:

- WSK Świdnik** - współpraca dotyczy zagadnienia klejenia okładzin hamulcowych do klocków hamulcowych hamulca bębnowego wirnika nośnego śmigłowca Mi-2
- PZL Mielec** - współpraca dotyczy zagadnienia zgrzewania tarcowego z przemieszaniem
- P&W Kalisz** - współpraca dotyczy badania możliwości zastąpienia technologii lutowania spawaniem w aparatach kierujących.
- WSK Rzeszów** - współpraca dotyczy optymalizacji procesu spawania wiązką elektronów

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

- Kudła K., Wojsyk K.: **Metody poprawy właściwości eksploatacyjnych złączy spawanych**. XVIII Konferencja Spawalnicza "Spawanie w energetyce", Jarnołtówek 24-26.IV.2012
- Lacki P.: **Symulacja numeryczna procesu spawania blach tytanowych typu TWB spawanych metodą TIG**. XIX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt.: Advanced Forming Technologies and Nano-Structured materials, Opalenica k.Poznania 6-9.V.2012
- Kudła K., Wojsyk K.: **Ekonomiczne stosowanie spoin pachwinowych w konstrukcjach spawanych**. Postęp Innowacje i wymagania jakościowe procesów spajania, Szczecin 22-24.V.2012

Publikacje

Kudła K., Wojsyk K.: **Metody poprawy właściwości eksploatacyjnych złączy spawanych**. Przegląd Spawalnictwa 5/2012, str.51-53

Prace mgr, dr, hab.

- Rafał Czerniak: **Technologiczne metody podwyższania właściwości mechanicznych spoin i zgrzein**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
- Krzysztof Gertner: **Właściwości złączy zgrzewanych metodą FSW**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

Prace inżynierskie planowane

- Wojciech Gasz: **Opracowanie technologii spawania nadstopów niklu ze stalami stopowymi**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Paweł Michalski: **Analiza energii liniowej w procesie spawania STT**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Mariusz Mrozki: **Analiza energii liniowej w procesie spawania CMT**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Zbigniew Cimciach: **Badanie jakości spawanych cienkościennych konstrukcji tytanowych**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

Prace doktorskie

Tytuł: **Teoretyczno doświadczalna analiza procesu spawania wiązką elektronów**
Autor: Adamus Konrad
Promotor: dr hab. inż., Piotr Lacki
Status: w trakcie realizacji

Prace habilitacyjne

Tytuł: **Energia liniowa spawania i możliwości jej obliczania**
Autor: Wojsyk Kwiryn
Status: w trakcie realizacji