

# 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 Test results

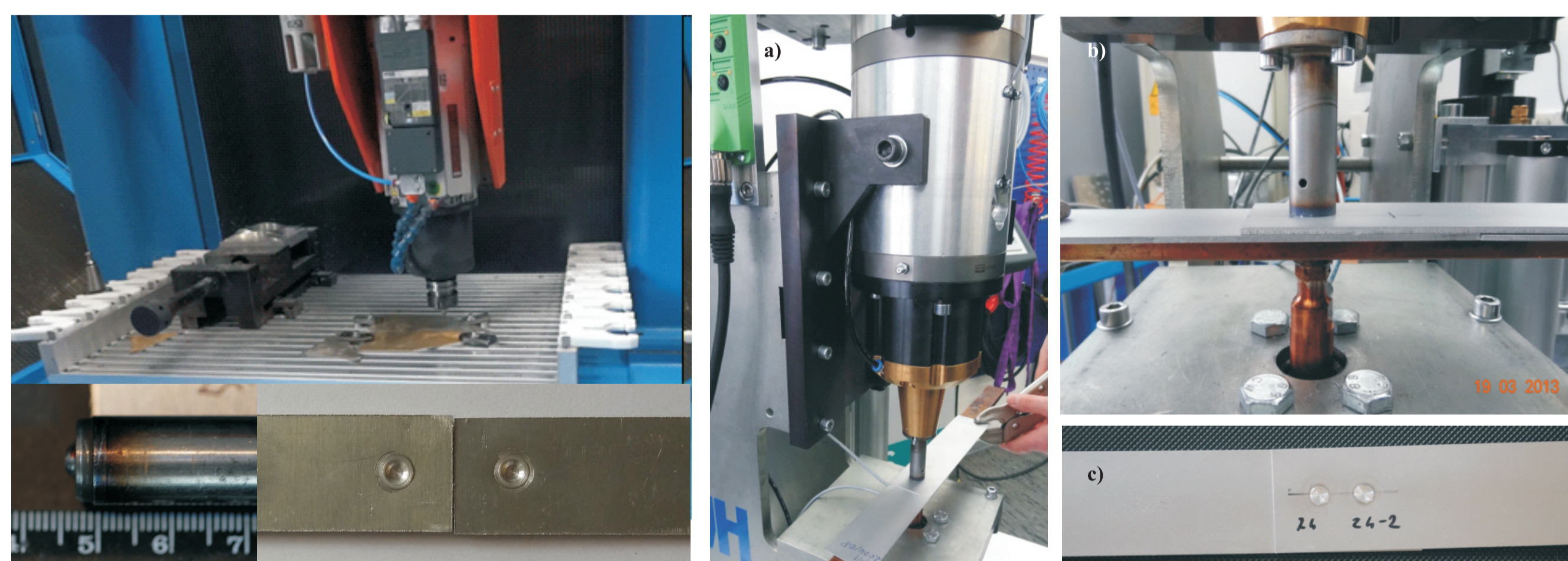
#### Badania doświadczalne i analiza jakości złączy zakładkowych zgrzewanych punktowo metodą FSSW

##### Experimental research and analysis of quality of the overlap friction stir spot welded joints

Przedmiotem zadania jest ocena wytrzymałości złączy zakładkowych wykonanych ze stopów aluminium grupy 7xxx zgrzewanych punktowo z zastosowaniem technologii zgrzewania tarcowego FSSW oraz z chowanym trzpieniem RFSSW. Głównym celem prób eksperymentalnych było uzyskanie informacji jaka jest nośność złącza zakładkowego zgrzewanego tarcowo z mieszanym materiałem, poddanego obciążeniu wywołującemu ścinanie. Ocenie poddano stosunek wytrzymałości złączy zgrzewanych do wytrzymałości materiału rodzimego wykonanych z zastosowaniem technologii zgrzewania punktowego bezkraterowego RFSSW. In the work the strength of overlap joints made of 7xxx series aluminum alloys was assessed. The joints were created using friction stir spot welding, FSSW, and refill friction stir spot welding, RFSSW, technologies. The main goal of experimental tests was to acquire the information about the efficiency of the friction stir welded overlap joints. During tests shear load was applied to the joints. The ratio of joint strength to parent material strength was analyzed. The joints were created using refill friction stir spot welding technology.

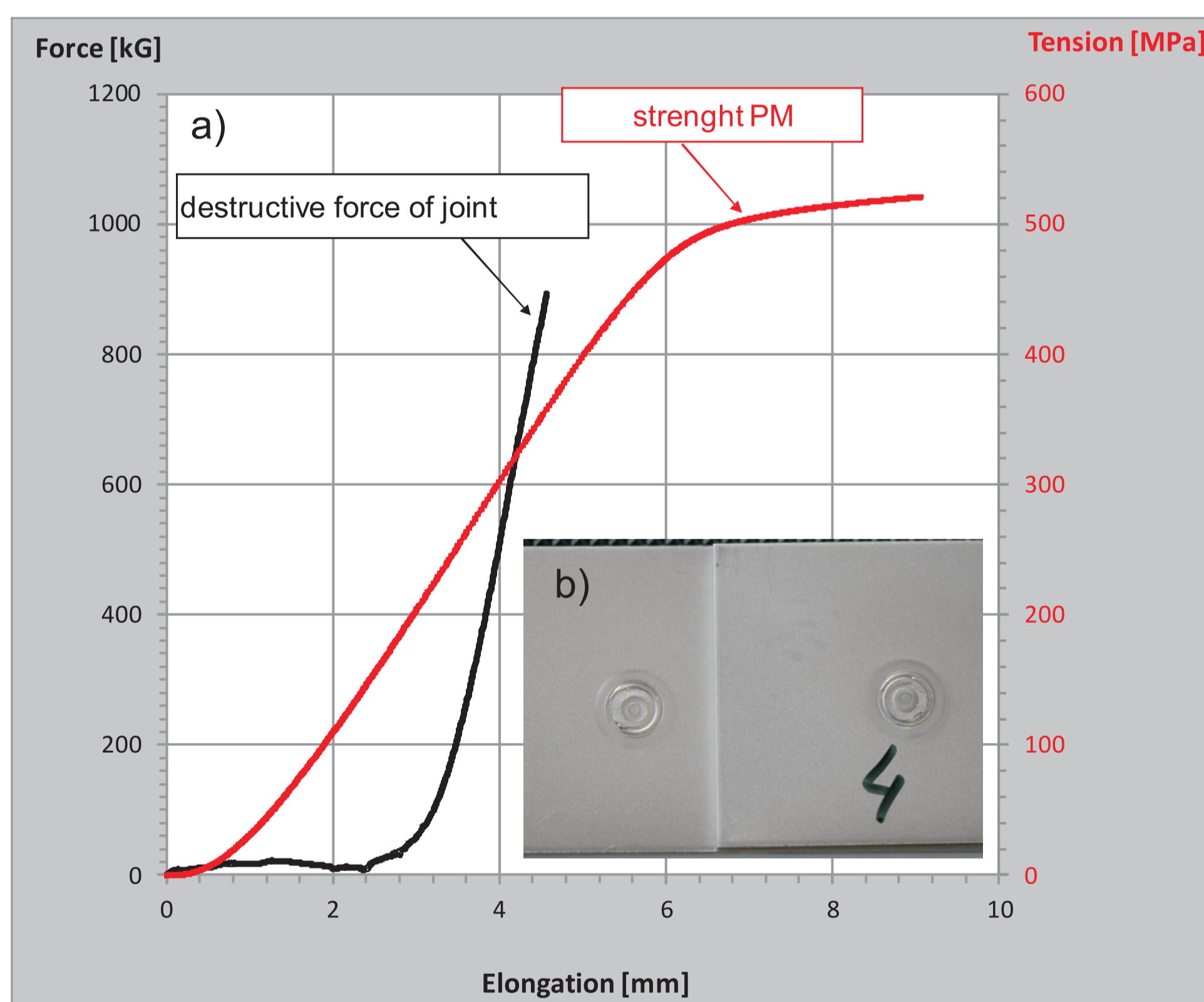
#### Badania eksperymentalne

Wykonano badania łączenia stopów lekkich grupy D16T za pomocą punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszczaniem FSSW. Zgrzewano zakładkowo blachy o grubości 0,6 mm narzędziem monolitycznym. Dodatkowo przeprowadzono próby łączenia punktowego z zamykaniem krateru blach o grubości 2,5 mm ze stopu aluminium 7075 T6, na stanowisku wyposażonym w głowicę RPS 100. Tests on joining light alloys of the D16T group using the Friction Stir Spot Welding (FSSW) method were carried out in the Department of Welding Technology of the Czestochowa University of Technology. Sheets with thickness of 0.6 mm were overlap welded with a monolithic tool. In addition, tests of refill friction stir spot welding of 2.5 mm-thick 7075 T6 aluminum alloy sheets were carried out on a testing stand equipped with a head RPS 100.

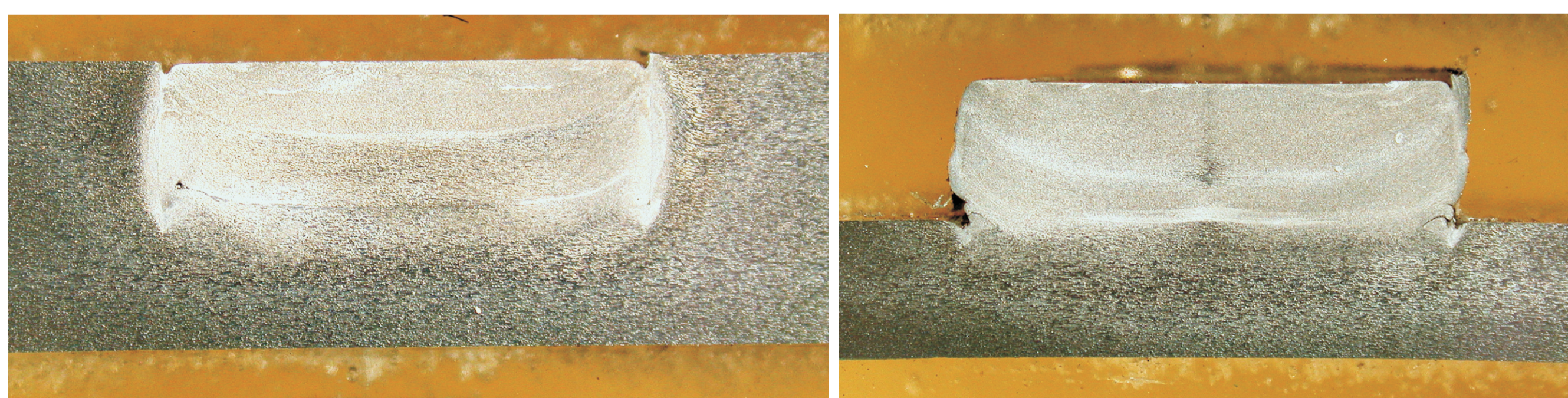


Rys. 3. Stanowisko do zgrzewania tarcowego FSW i FSSW (CNC BFN 0705 KIMLA) a) głowica, b) narzędzie, c) widok zgrzein punktowych.  
Fig. The FSW and FSSW friction welding testing stand (CNC BFN 0705 KIMLA) a) head, b) tool, c) view of the spot welds

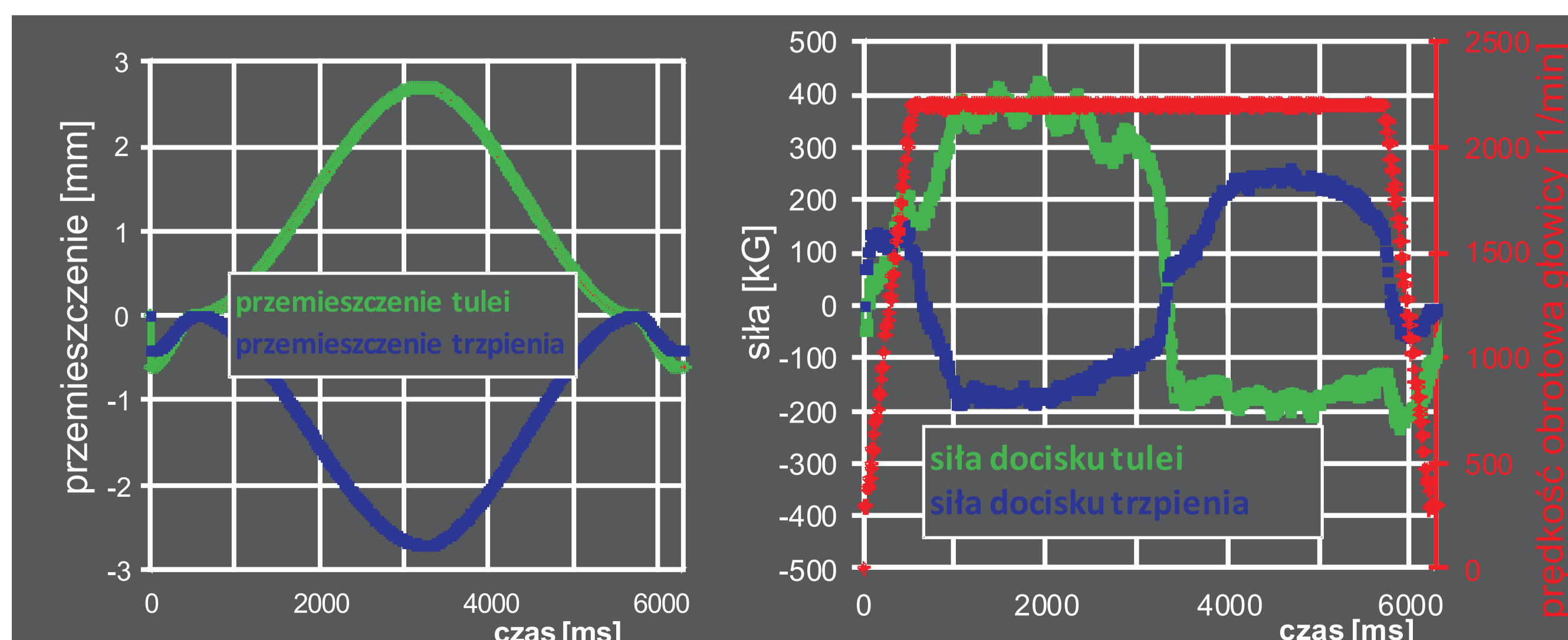
W trakcie prób rejestrowano prędkość i moment obrotowy działający na narzędzie. Dodatkowo w procesie RFSSW monitorowano przemieszczenia trzpienia i tulei oraz siłę docisku wywieraną na trzpieniu i tuleję. The velocity and the turning moment acting upon the tool were recorded during testing. Additionally in the RFSSW process, mandrel and sleeve displacements and the pressure force acting on the mandrel and the sleeve were monitored.



Rys. 3. Wytrzymałość materiału rodzimego (MR) i złącza zgrzewanego tarcowo metodą RFSSW; a) wykresy siła-wydłużenie, wytrzymałość wydłużenie, b) widok złącza po próbie ścinania.  
Fig. 3. Strength of the parent material (PM) and the FSSW friction welded joint; a) force-elongation and strength-elongation graphs, b) view of a joint after breaking.

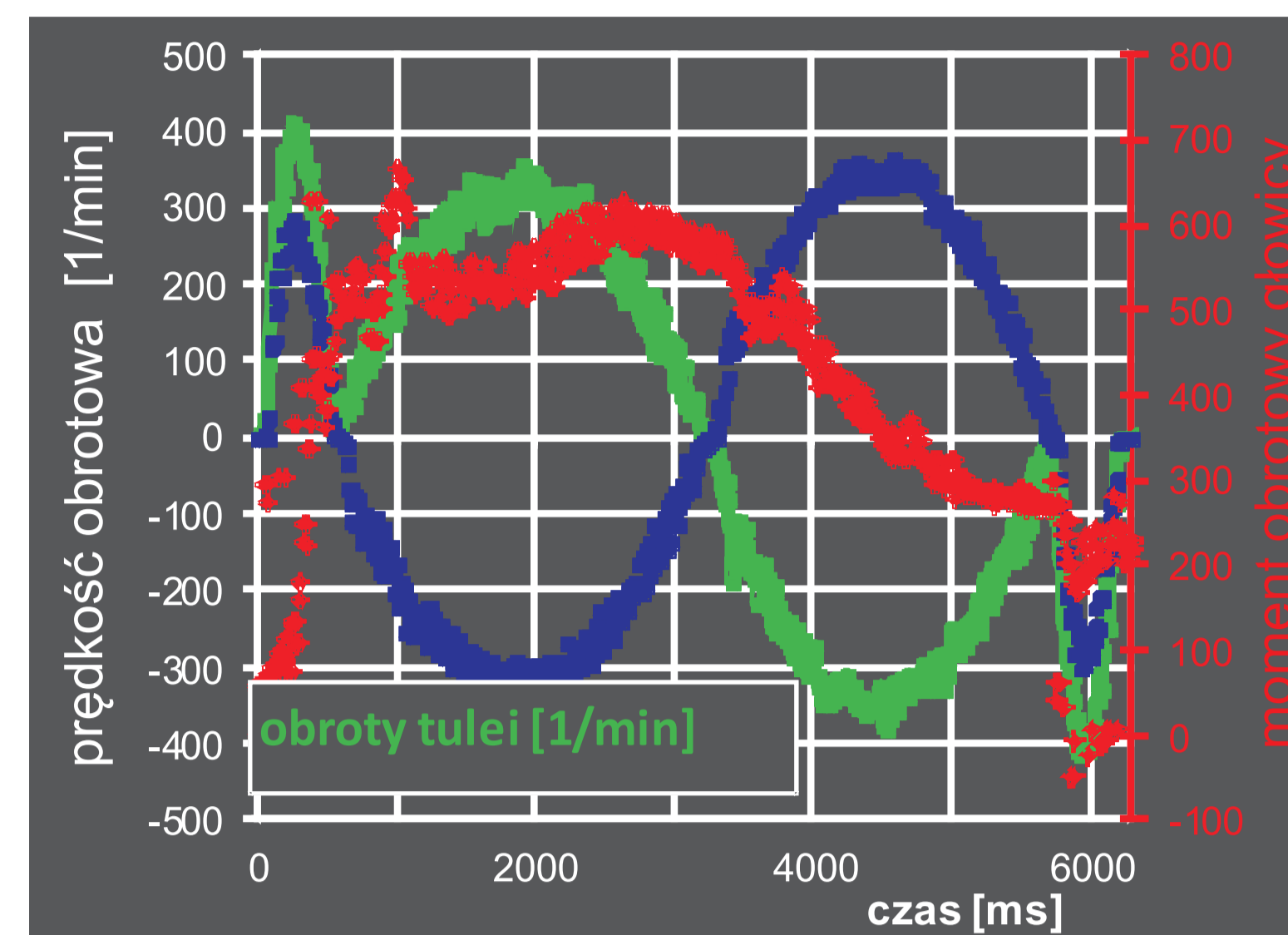


Rys. 4. Makrostruktura złącza zgrzewanego tarcowo RFSSW a) złącze A7075, 2,5+2,5mm; b) złącze po próbie ścinania.  
Fig. 4. The microstructure of an RFSSW welded joint a) A7075 joint, 2.5+2.5mm; b) joint after the shearing test



Rys. 5. Przebieg zmian przemieszczenia się trzpienia i tulei podczas zgrzewania RFSSW głowicą RPS 100 podczas zgrzewania RFSSW (Próba nr 4)  
Fig. The displacement history of the mandrel and the sleeve during RFSSW using RPS 100 head (test 4)

Rys. 6. Przebieg zmian prędkości obrotowej trzpienia i tulei oraz głównego momentu napędowego głowicy RPS 100 podczas zgrzewania RFSSW (Próba nr 4)  
Fig. The history of the rotational speed of the mandrel and the sleeve and the history of the driving torque of RPS 100 head during RFSSW (test 4)



Tabl. Maksymalne wartości parametrów podczas zgrzewania punktowego metodą RFSSW stopu aluminium AW 7075 o grubości 2,5 mm.  
Table. The maximal values of parameters during refill friction stir spot welding of 2.5-mm thick AW 7075 aluminum sheets

Nr próby	2	3	4	5	6	7
główny moment napędowy głowicy	695	671	667	658	621	654
przesunięcie trzpienia [mm]	-2,704	-2,704	-2,702	-2,702	-2,702	-2,702
przesunięcie tulei [mm]	2,703	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704
prędkość obrotowa głowicy [1/min]	2217	2220	2217	2211	2213	2211
siła docisku trzpienia faza I	263	244	261	261	291	269
siła docisku trzpienia faza II	-178	-249	-190	-219	-206	-196
prędkość obrotowa trzpienia faza I [1/min]	363	364	363	368	368	379
prędkość obrotowa trzpienia faza II [1/min]	-347	-354	-351	-346	-354	-348
siła docisku tulei faza I [kG]	408	472	427	505	505	474
siła docisku tulei faza II [kG]	-219	-233	-233	-249	-262	-252
prędkość obrotowa tulei faza I [1/min]	409	417	410	400	408	411
prędkość obrotowa tulei faza II [1/min]	-412	-415	-413	-432	-419	-424

#### Wnioski Conclusions

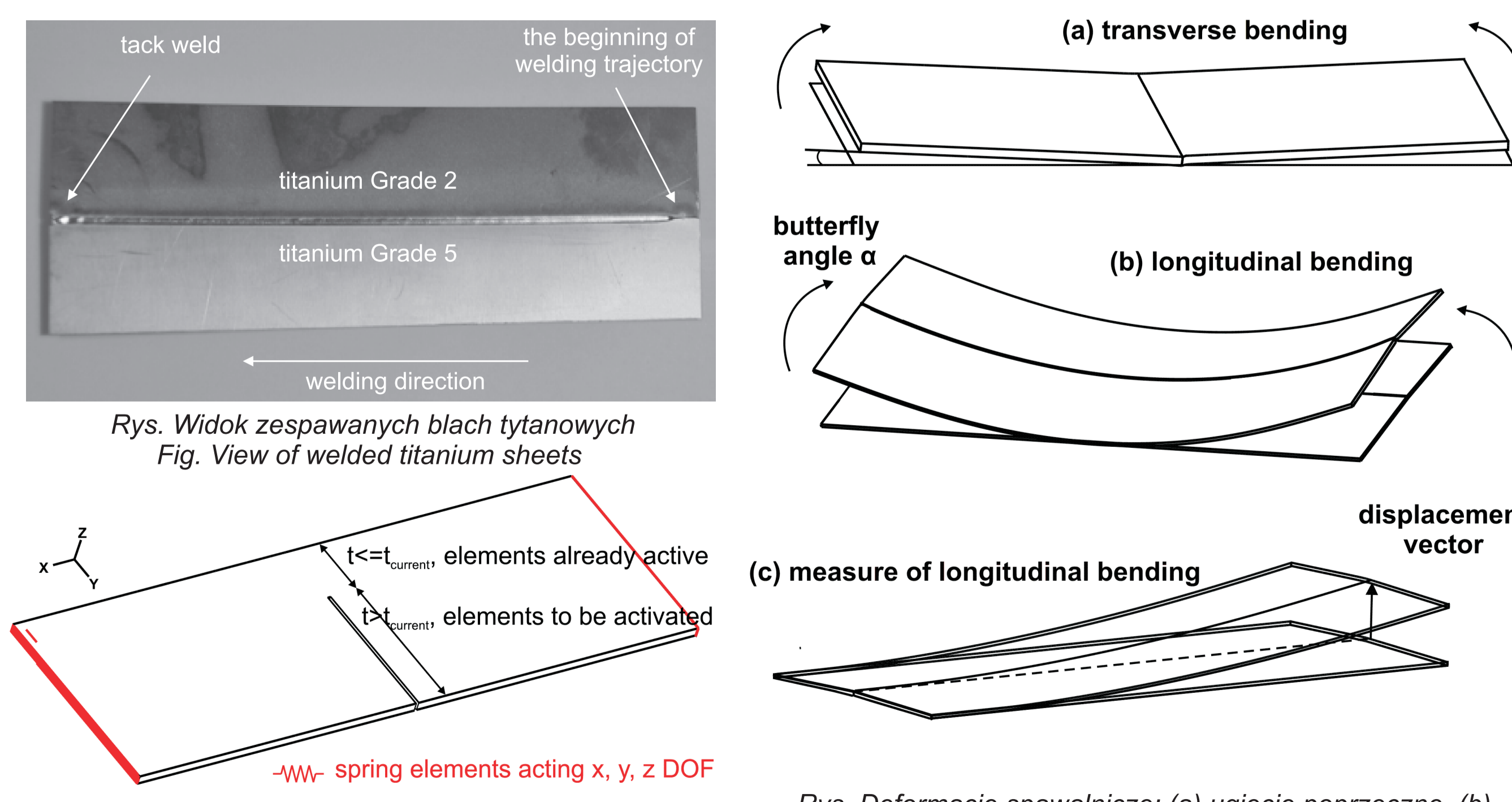
- Podczas ścinania złączy punktowych materiałów wykonanych z zastosowaniem monolitycznych narzędzi stosowanych w metodzie FSW główną wadą jest przede wszystkim tworzenie krateru, który istotnie zmniejsza wytrzymałość połączenia w odniesieniu do zgrzewania narzędziem dzielonym. Mimo to złącza mają wyższą wytrzymałość na ścinanie od oczekiwanych w stosunku do połączeń nitowych.
- Projektując odpowiednie szwy złożone z szeregu równoległych lub przemiennie położonych punktów zgrzewanych w technologii RFSSW, uzyskać można pełną nośność złącza, tzn. uzyskać zerwanie w materiale litym na poziomie wytrzymałości materiału rodzimego.
- Zgrzeiny z wypełnionym jądrem, łączące blachy ze stopu aluminium AW7075 pękły obwodowo wokół zgrzein lub na granicy między łączonymi blachami. Osiągnięte poziomy dezintegracji złączy znacznie przekraczają wymagania stawiane złączom nitowym i nitowo-klejonym.
- Wyższa wytrzymałość złączy wykonanych za pomocą narzędzia z ruchomym trzpieniem wynika bezpośrednio z większej powierzchni czynnej przenoszącej obciążenie zewnętrzne.
- During shearing of spot welded joints created using fixed FSW tools, the occurrence of a post-welding crater, i.e. the absence of material at tool exit, significantly reduces the strength of the joint compared to FSW technologies using adjustable tool. In spite of this, these joints have shear strength higher than that expected of riveted joints.
- The appropriate design of weld layout, consisting of a series of parallelly or alternately situated welding spots, allows for obtaining the full load-carrying capacity, i.e. the material failure will occur in the solid material at a strength level corresponding to the parent material.
- Welds with a filled nugget, joining 2.5-mm thick sheets, were breaking circumferentially around the weld. The obtained joint disintegration levels considerably exceed the requirements imposed on riveted and rivet-glue joints.
- The higher strength of joints created using adjustable tool with mobile mandrel results directly from the larger active area that carries external loads.

#### Wyniki badań Results

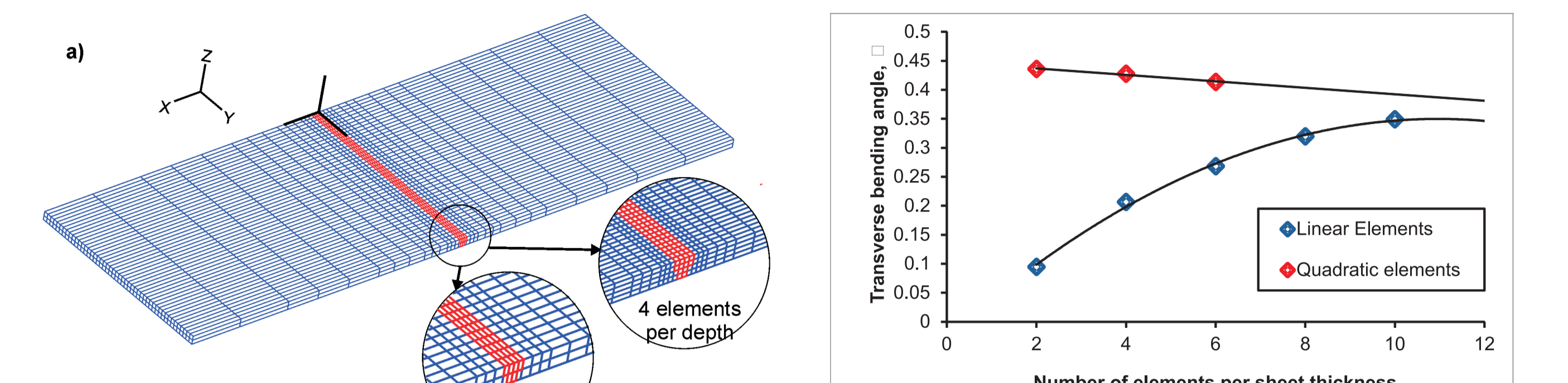
#### Analiza czynników wpływających na deformację cienkich blach podczas symulacji spawania wiązką elektronów

##### The analysis of factors contributing to the deformation of thin sheets during the simulation of electron beam welding

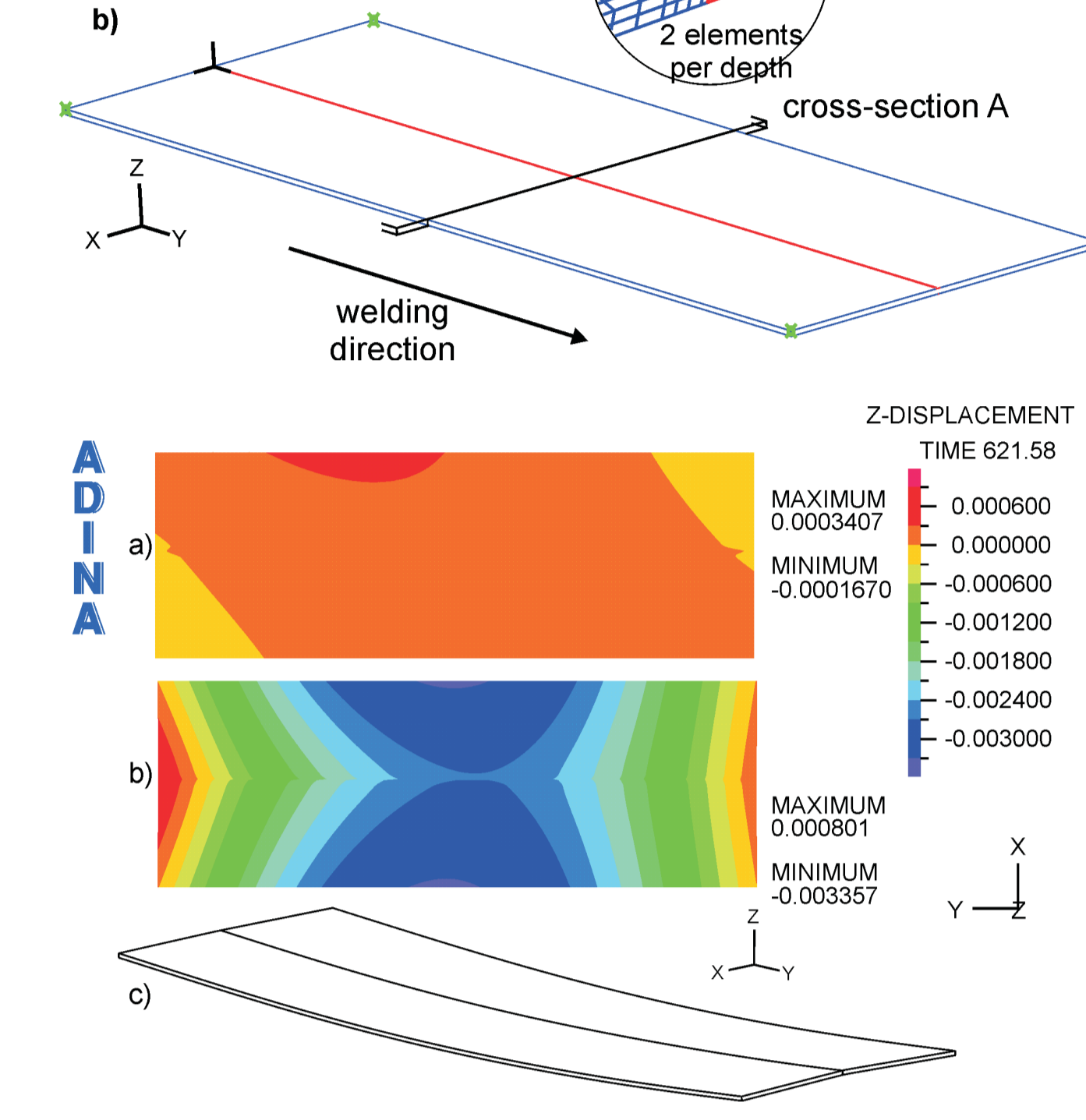
Celem modelu jest określenie pola temperatury, naprężeń i przemieszczeń dla cienkich blach tytanowych spawanych za pomocą wiązki elektronów. Analizowano połączenie blach z tytanu technicznego Grade 2 i stopu tytanu Grade 5. Połączone blachy będą poddawane dalszym operacjom formowania w celu uzyskania różnych komponentów samolotu. Metoda elementów skończonych, MES, została zastosowana do modelowania procesu spawania. Główną trudnością podczas symulacji spawania cienkich blach jest ich tendencja do znacznych deformacji wskutek rozszerzalności termicznej. W pracy przeanalizowano różne czynniki mające wpływ na ugięcie podłużne i poprzeczne blach: odstęp pomiędzy blachami, zależność ugięcia podłużnego od ugięcia poprzecznego, liniowe i kwadratowe elementy, gęstość siatki. Obliczone deformacje porównano z wynikami eksperymentalnymi. The goal of the model is to calculate temperatures, stress and displacement fields that occur in thin sheets during and after the welding process. A joint made of commercially pure titanium - Grade 2 and titanium alloy - Grade 5 - sheet was analysed. The sheets were joined using electron beam welding technology. The joined sheets will be further processed using forming technologies in order to produce the final components of an aircraft. Finite element method was applied to modeling of the welding process. The main difficulty in simulation of welding of thin sheets is their tendency to significant deformation as a result of thermal expansion. In the paper different factors contributing to traverse and longitudinal bending were analyzed: welding gap, dependence of longitudinal bending on traverse bending, linear and quadratic elements, mesh density. The calculated deformations were compared against experimental results.



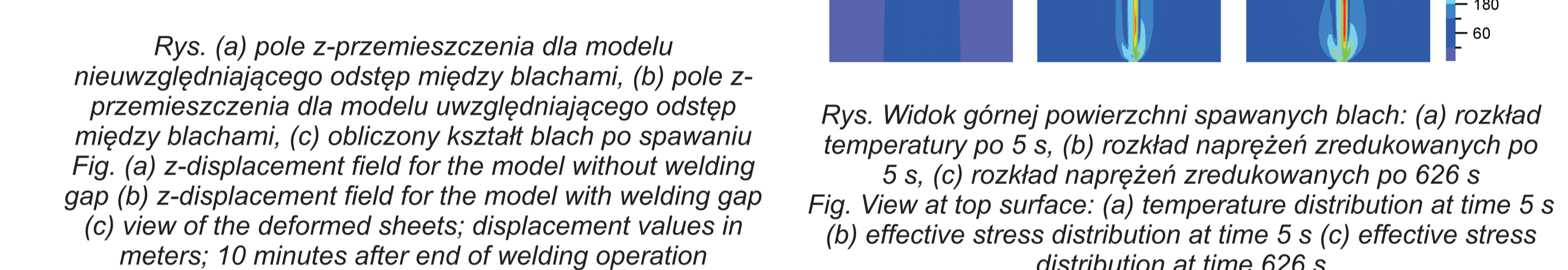
Rys. 7. Model uwzględniający odstęp pomiędzy blachami - elementy są aktywowane przez poruszające się źródło ciepła.  
Fig. Traverse bending tests, boundary condition and welding gap - elements are activated by moving heat source



Rys. 8. Wpływ gęstości siatki MES na kąt ugięcia poprzecznego.  
Fig. Impact of element size on traverse bending angle



Rys. 9. (a) siatka MES dla trajektorii spawania o długości 20 mm, (b) kontur siatki MES dla trajektorii spawania o długości 158 mm.  
Fig. 9. (a) mesh with a 20-mm long welding trajectory (b) outline of mesh with a full 158-mm long welding trajectory



Rys. 10. Widok górnej powierzchni spawanych blach: (a) rozkład temperatury po 5 s, (b) rozkład naprężeń zredukowanych po 5 s, (c) rozkład naprężeń zredukowanych po 626 s.  
Fig. View at top surface: (a) temperature distribution at time 5 s (b) effective stress distribution at time 5 s (c) effective stress distribution at time 626 s

#### Wnioski Conclusions

- Przeprowadzono termomechaniczną analizę spawania za pomocą wiązki elektronów blach tytanowych Grade 2 i Grade 5. Następujące wnioski można wyciągnąć na podstawie wykonanych badań:
- Uwzględnienie odstępu między blachami podczas symulacji procesu spawania ma istotny wpływ na kąt ugięcia poprzecznego dla tych procesów, w których blachy nie są sztywno umocowane.
  - Zastosowanie opcji czasu narodzin dla elementów wypełniających odstęp między blachami zwiększa stopień ugięcia poprzecznego.
  - Zwiększenie liczby elementów liniowych w kierunku grubości blach zwiększa kąt ugięcia poprzecznego. Wpływ dodawania kolejnych elementów w kierunku grubości znacznie maleje znacząco powyżej 8 elementów.
  - Zwiększenie liczby elementów kwadratowych w kierunku grubości blach nie zmienia w sposób znaczący kąta ugięcia poprzecznego.
  - Stopień ugięcia podłużnego jest pozytywnie skorelowany z początkowym kątem ugięcia poprzecznego. Wpływ początkowego ugięcia poprzecznego na ugięcie podłużne zmniejsza się znacząco dla wartości powyżej 1°.
  - Dla modelu MES, który uwzględni odstęp między blachami i którego siatka zawiera 6 elementów liniowych w kierunku grubości, różnica pomiędzy wartością obliczoną przez model MES i rzeczywistą wynosi 5,6% dla kąta ugięcia poprzecznego oraz 17,6% dla długości wektora przemieszczenia końca trajektorii spawania.
  - W obszarze strefy przetopienia maksymalne wartości naprężeń zredukowanych osiągają 300 MPa po stronie tytanu Grade 2 oraz 800 MPa po stronie tytanu Grade 5.
- In the work the thermo-mechanical simulation of the EBW process was investigated. Based on the performed analysis the following conclusions can be made:
- For the simulation of plate welding process taking into account welding gap for a case with no clamping has significant impact on traverse bending. Application of birth element functionality for welding gap elements increases the degree of traverse bending.
  - The higher number of linear element layers in thickness direction contributes to the higher degree of traverse bending. The impact of consecutive element layer increments diminishes significantly above 8 layers.
  - For quadratic elements there is no significant difference in traverse bending angle when the number of element layers is increased.
  - The degree of longitudinal bending is positively correlated with the initial traverse bending. The impact of traverse bending angle on longitudinal bending diminishes significantly for values above 1°.
  - In the analyzed case with the welding gap and 6 linear elements per depth the error introduced by FEM model was 5.6% in case of traverse bending and 17.6% in case of longitudinal bending.
  - In the area of FZ the maximal calculated effective stresses at the side of titanium Grade 2 have value of about 300 MPa and at the side of titanium Grade 5 value of about 800 MPa.

#### 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 klocek hamulcowych hamulca bębnowego wirnika nośnego śmigłowca Mi-2
  - PZL Mielec** - współpraca dotyczy zagadnienia zgrzewania tarcowego z przemieszczaniem
  - 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

#### Publikacje

- Lacki P., Adamus K.: *Numerical simulation of welding thin titanium sheets*, Key Engineering Materials, 549 (2013), pp. 407-414
- Lacki P., Kucharczyk Z., Śliwa R.E., Gałaczyński T.: *Effect of tool shape on temperature field in friction stir spot welding*, Archives of Metallurgy and Materials, 58 (2013), pp.597-601

#### Prace mgr, dr, hab.

**Prace magisterskie planowane**  
Tytuł: *Opracowanie technologii zgrzewania metodą FSW wybranych lotniczych stopów Al-Mg*  
Autor: inż. Gertner Krystian  
Promotor: dr inż. Wojsyk Kwiryn  
Planowany termin obrony: czerwiec - wrzesień 2013

#### Prace doktorskie

Tytuł: *Teoretyczna i eksperymentalna analiza zjawisk termomechanicznych procesu spawania wiązką elektronów*  
Autor: Adamus Konrad  
Promotor: dr hab. inż. Piotr Lacki  
Planowany termin obrony: czerwiec - wrzesień 2013

#### Prace habilitacyjne

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

**Zgłoszenia patentowe**  
- W.121319: Rura ekranowa wymiennika ciepła. Data zgłoszenia: 10.09.2012  
- W.121317: Przeciwność narzędzia do badania wytrzymałości połączenia klejonego okładziny czarnej szczęki hamulcowej. Data zgłoszenia: 10.09.2012  
- P.400706: Narzędzie do badania wytrzymałości połączenia klejonego okładziny czarnej szczęki hamulcowej. Data zgłoszenia: 10.09.2012