

## Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

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

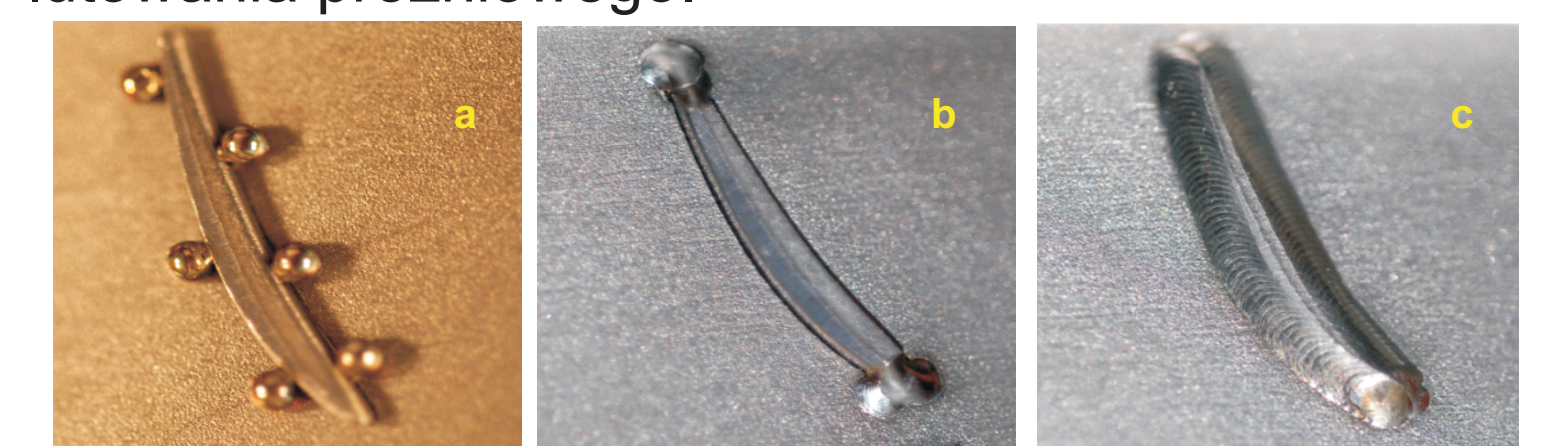
### Wyniki badań

#### Opracowanie technologii spawania laserowego elementów lotniczych

Dotychczasowa technologia szepiania łopatek wirnika aparatu kierującego ogranicza się do ich ustalenia za pomocą kulek z użyciem klasycznego kondensatorowego zgrzewania rezystancyjnego. Zaletą tej metody jest prostota i ograniczenie wymagania co do kwalifikacji personelu wykonującego szepianie. Niestety czas niezbędny do ustalenia (szepiania) łopatek względem pierścienia aparatu kierującego jest co najmniej 5-krotnie dłuższy niż w przypadku proponowanego mikroszepiania impulsowego. Utrudniona jest również automatyzacja procesu. Istotny wpływ na wtopienie ma moc impulsu i czas jego trwania.

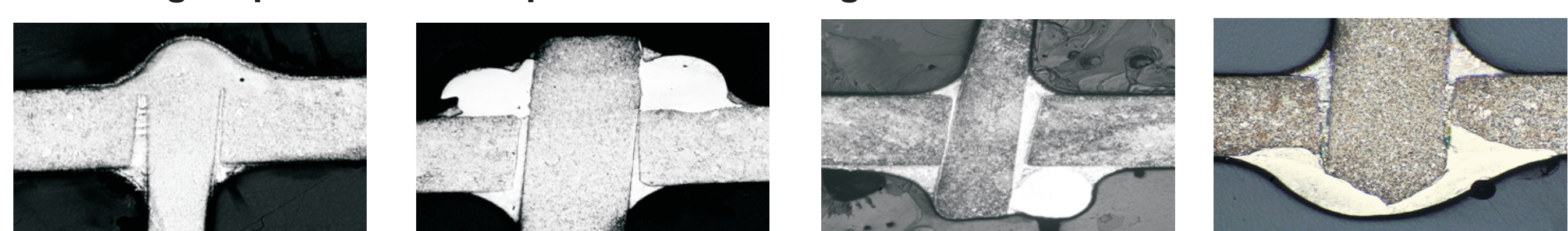


Zespół PCz dokonał analizy konstrukcji i technologii wykonania aparatu kierującego silnika lotniczego. W jej wyniku podjęto próby zastąpienia dotychczas stosowanej kombinacji technologicznej: szepianie kondensatorowe stalowymi kulkami pośredniczącymi łopatek aparatu do jego wieńca z następnym lutowaniem, nową technologią: laserowym, punktowym spawaniem ustalającym łopatkę w wieńcu z lutowaniem końcowym łopatek do wieńca aparatu. Docelowo proponowana technologia spawania łopatek laserem, mogłaby zostać wprowadzona na całym obwodzie i pełnym przekroju złącza: łopatkę – wieńca aparatu, eliminując drogi i złożony proces lutowania próżniowego.



Sposoby szepiania i łączenia łopatek z pierścieniem aparatu kierującego: a) szepianie tradycyjne (przedlutownicze) za pomocą kulek, b) szepianie proponowane (przedlutownicze) z zastosowaniem mikroszepiania; c) zastąpienie stosowanego obecnie lutowania przez mikroszepianie.

#### Technologie lutowania z przygotowaniem konwencjonalnym i metodą spawania laserowego – porównanie na podstawie metalografii



Spawanie laserem łopatek bez materiału dodatkowego, Łopatkę umieszczoną w wieńcu w miejscu styku z kuleczką ustalającą po lutowaniu, Złącze łopatek – wieńca wykonane dotychczasową konwencjonalną metodą z użyciem kulek ustalających, Łopatkę umocowaną punktowym laserem, bez materiału dodatkowego, a następnie lutowaną.

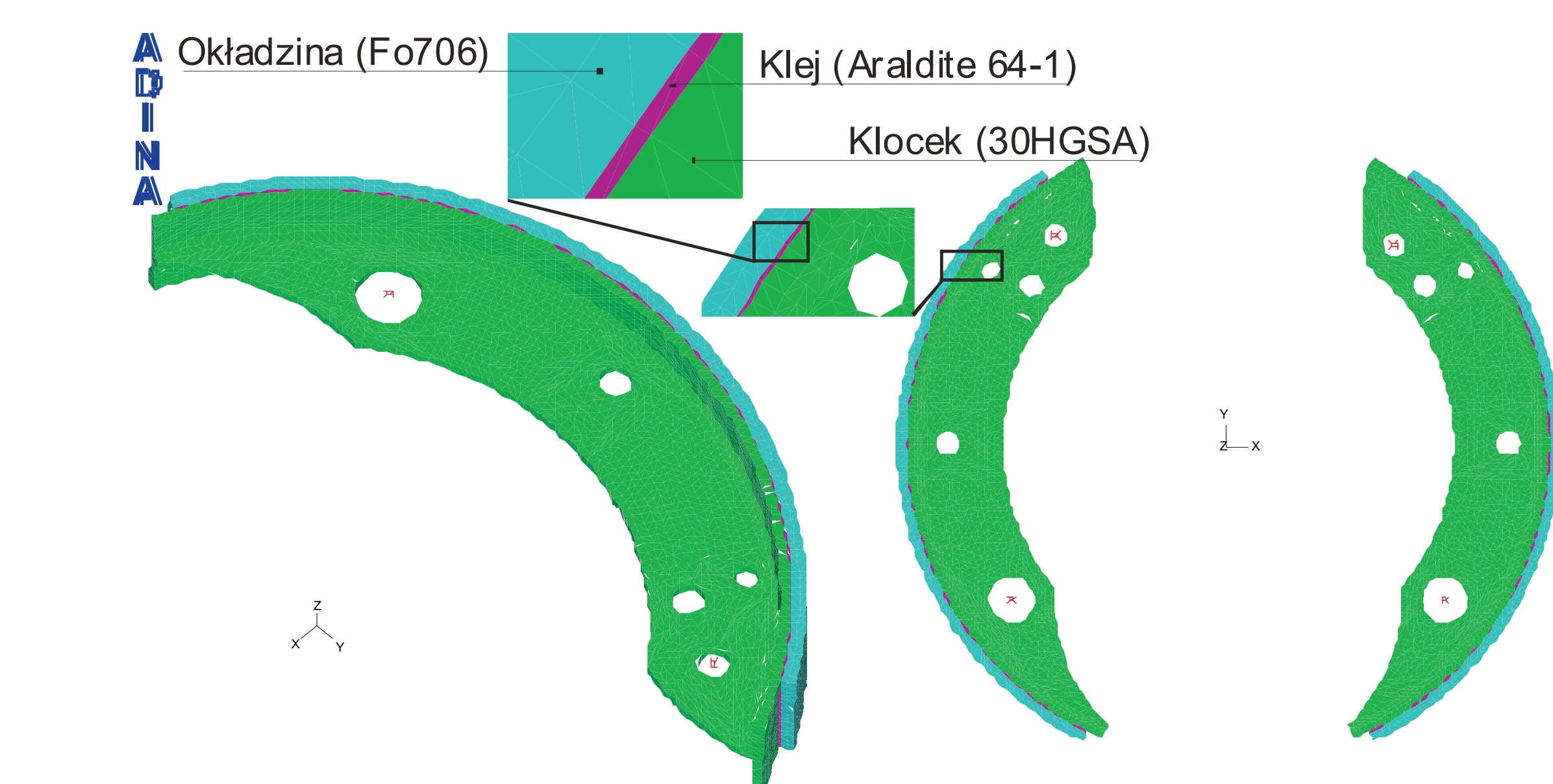
### Wnioski

1. Spawanie przedlutownicze laserem jest alternatywną technologią do obecnie stosowanej w montażu aparatu, gdyż umożliwia jednoznaczne, szybkie i niepowodujące zmian w materiale podstawowym szepianie łopatek do wieńca.
2. Spawanie laserowe nie utrudnia wprowadzania i wnikanía lutu do szczeliny.
3. Spawanie laserowe może wzmacniać złącze: łopatkę – wieńca, tworząc monolityczne połączenie, jednak może utrudnić demontaż łopatek w razie ich eksploatacyjnego uszkodzenia.
4. Spawanie wiązką lasera może być stosowane bez użycia materiału dodatkowego.
5. W celu uzyskania spawania „na wskrosz” należy zastosować wyższe moce lasera od użytych w niniejszych próbach. Jest to technicznie możliwe, gdyż np. wycinanie otworów pod łopatkę w wieńcu odbywa się również laserem.

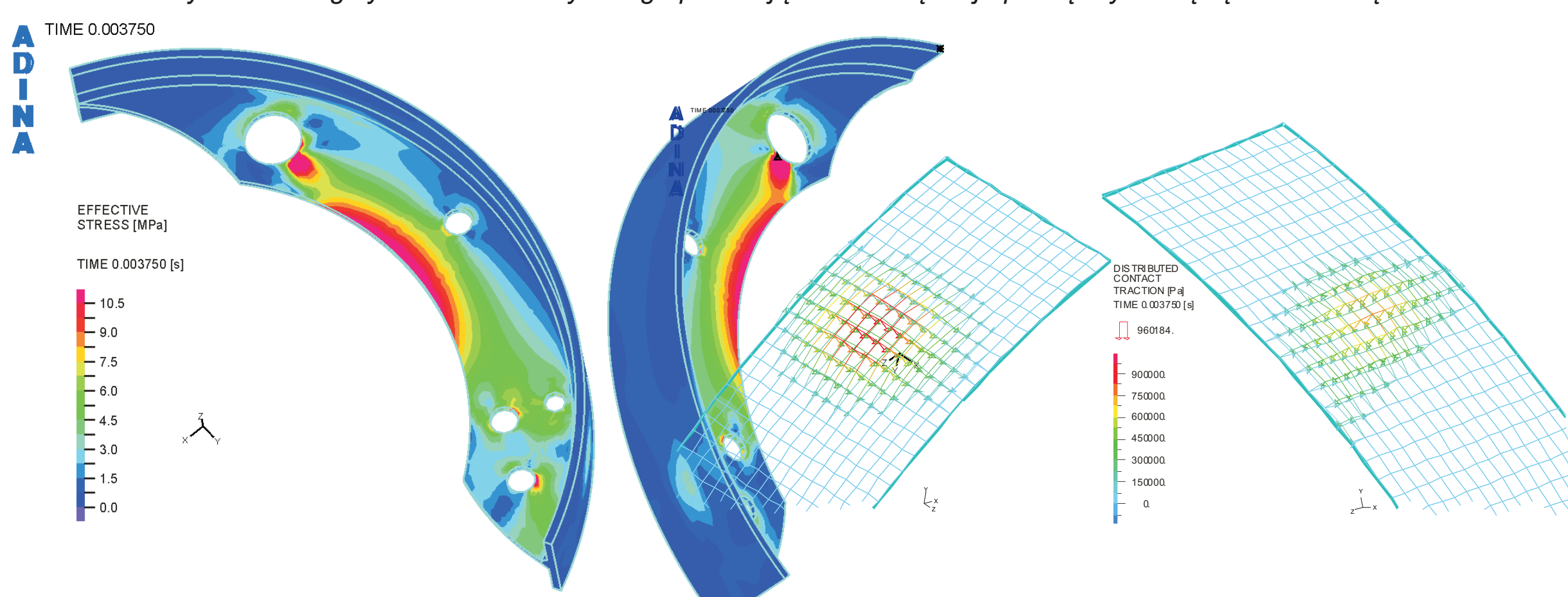
### Wyniki badań

#### Opracowanie metodyki modelowania numerycznego za pomocą MES lotniczych układów hamulcowych

Bębnowy układ hamulcowy jest stosowany w wielu aplikacjach lotniczych. Analizowany przykład jest stosowany w śmigłowcu Mi-2. Dotychczas stosowane rozwiązanie łączyło okładzinę cierną hamulca ze szczęką za pomocą nitów. Z uwagi na konieczność stosowania nowych bezazbestowych okładzin ciernych, które pękają przy stosowaniu technologii nitowania istnieje potrzeba zastosowania klejenia okładzin ciernych do hamulca. Opisano sposób modelowania oraz główną koncepcję analizy numerycznej hamulca bębnowego. Pomiędzy okładziną i bębniem założono powierzchnie kontaktu ze współczynnikiem tarcia  $\mu=0,3$ . W modelu numerycznym założono, że szczęki hamulcowe posiadają otwory, w których następuje ich utwierdzenie za pomocą sworzni oraz otwory, w których przyłożono obciążenie siłą. Na rysunku 1 pokazano szczegóły połączenia okładziny cierniej hamulca bębnowego do szczęki hamulcowej poprzez warstwę kleju. Rysunki 2 i 3 prezentują przykładowe wyniki obliczeń numerycznych realizowanych w ramach projektu.



Rys.1. Szczegóły modelu numerycznego pokazujące warstwę kleju pomiędzy szczęką a okładziną



Rys.2. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] na powierzchni lewej szczęki. Rys.3. Szczegóły rozkładu nacisków kontaktowych na powierzchni okładzin ciernych.

### Wnioski

Zaprezentowany model numeryczny hamulca bębnowego zostanie wykorzystany do dalszej analizy w ramach projektu. Symulacje numeryczne ukierunkowane będą na poznanie zjawisk zachodzących między okładziną a szczęką hamulcową z uwzględnieniem zmian, jakie wprowadza ciepło tarcia. Symulacje numeryczne umożliwiają: analizowanie wszystkich warunków pracy hamulca, łatwą zmianę parametrów, szybkie uzyskiwanie danych o systemie, badanie sytuacji hipotetycznych występujących w lotnictwie.

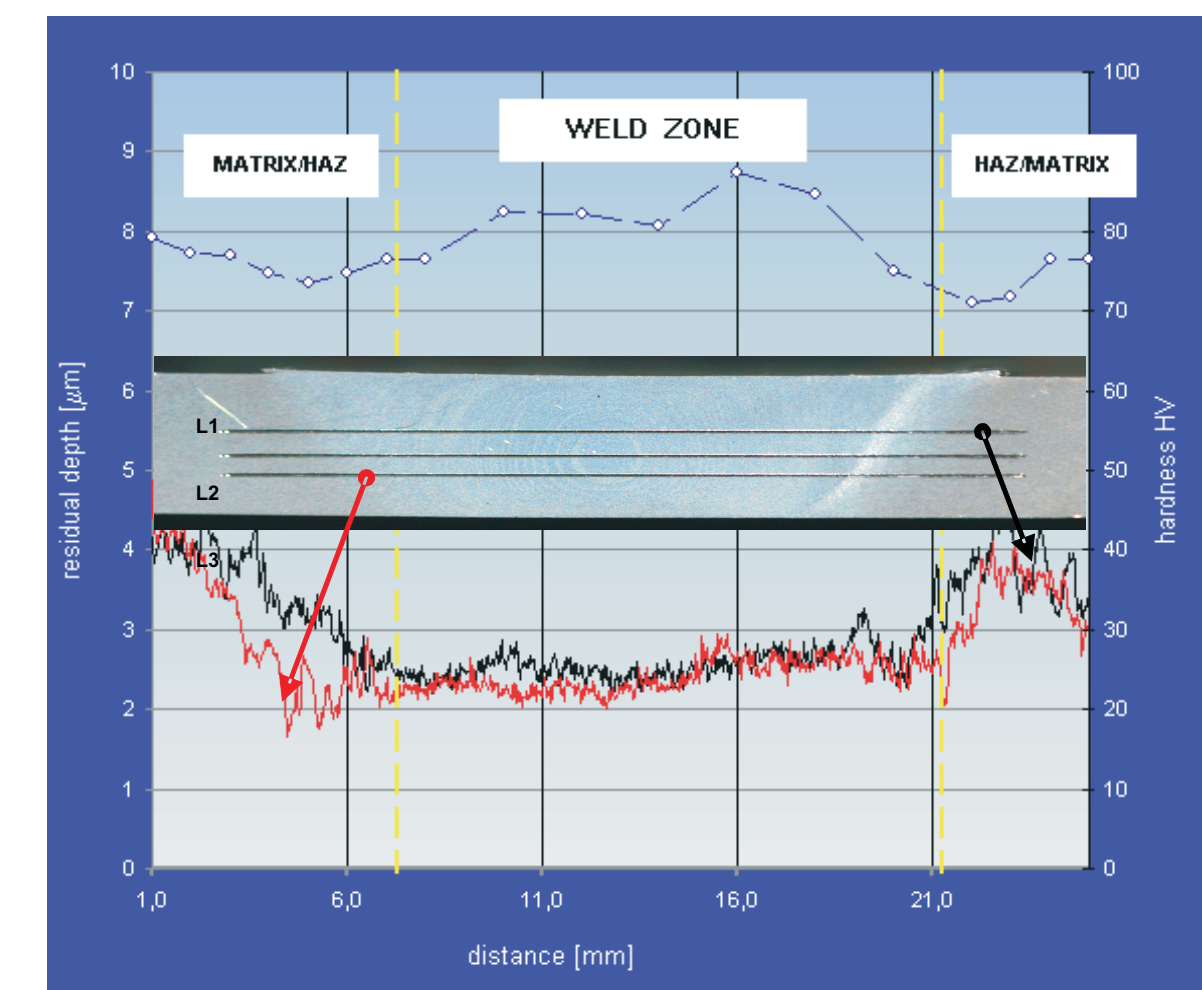
### Wyniki badań

#### Badania doświadczalne i analiza jakości złączy doczołowych zgrzewanych metodą FSW materiałów stosowanych na konstrukcje lotnicze

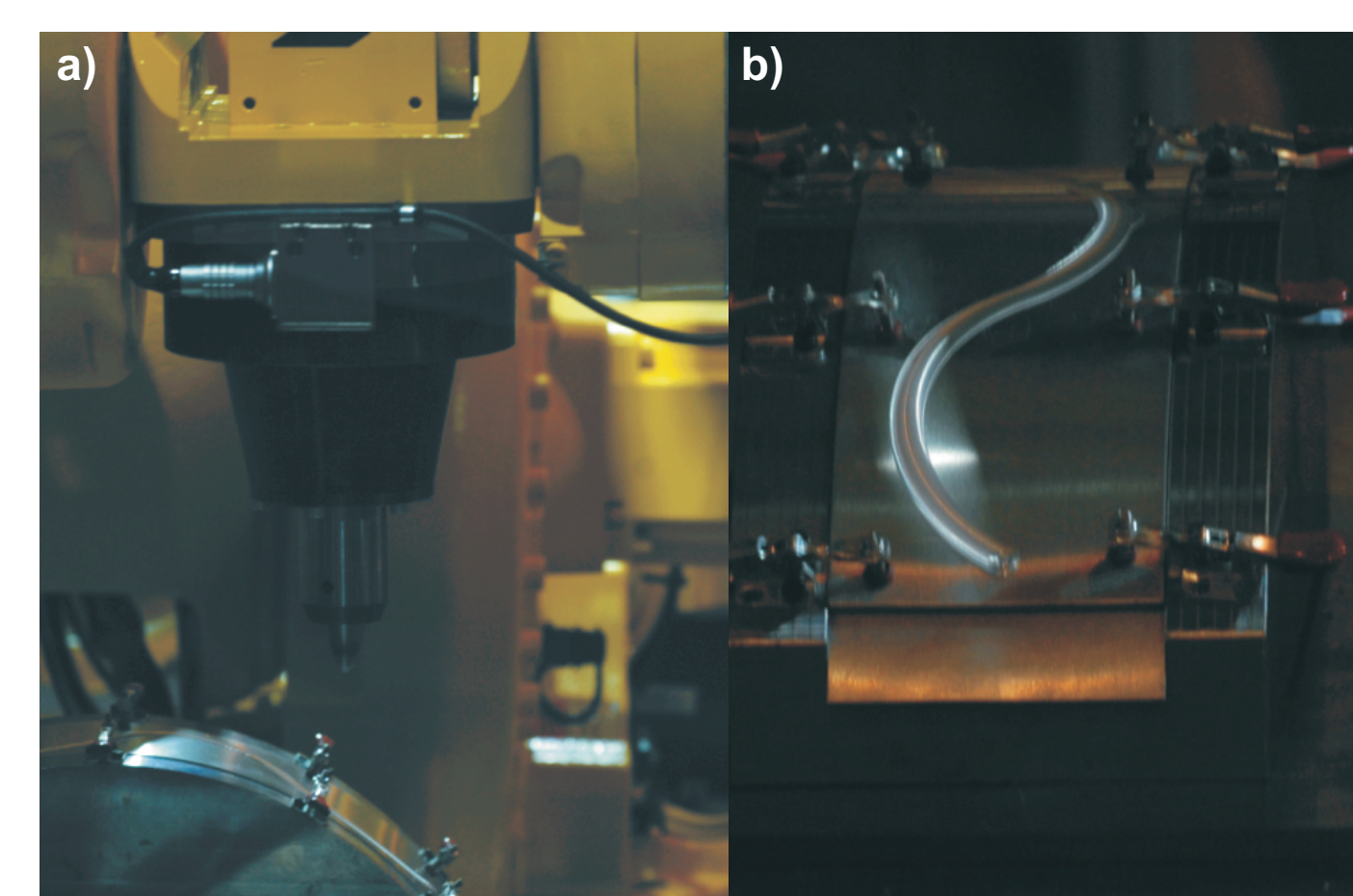
Głównym celem realizowanego zadania jest wprowadzenie do krajowego przemysłu lotniczego technologii nierozłącznego spajania konstrukcji z zastosowaniem zgrzewania FSW (Friction Stir Welding). Wymieniona technologia ma zastąpić docelowo, dotychczas stosowane, technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych z użyciem nitowania lub spawania laserowego, ze szczególnym uwzględnieniem aluminium jako materiału konstrukcyjnego.

Tabela. Zależność głębokości przemieszania od siły docisku podczas zgrzewania FSW

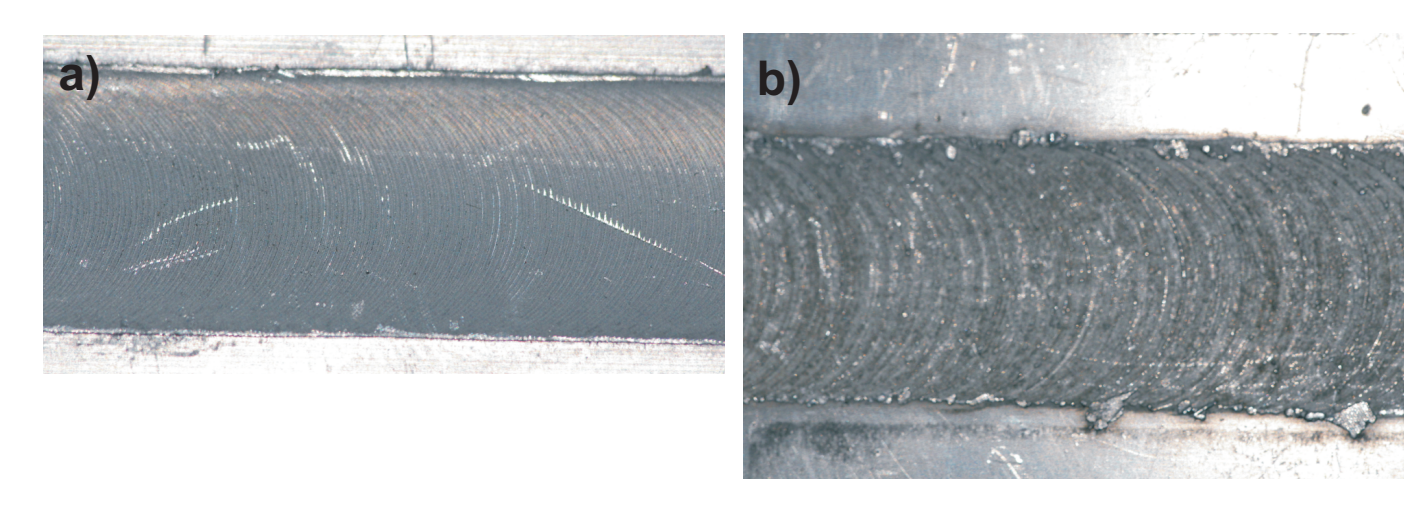
Siła docisku [kG]	Głębokość strefy przemieszania [mm]		
	Stopy serii 200x	Stopy serii 500x	Stopy serii 600x
600	1,5	2,0	3,0
1250	2,5	3,5	5,0
2500	5,0	7,0	10
5000	9,0	10	18
10000	18	20	35
15000	25	40	60
20000	70	75	100



Rozkład twardości i resztkowej głębokości w aluminiowym złączu zgrzewanym metodą FSW



Stanowisko do zgrzewania FSW a) głowica z narzędziem, b) widok złącza



Widok lica zgrzeiny wykonanego z użyciem a) kontroli siły docisku, b) kontroli położenia narzędzia

### Wnioski

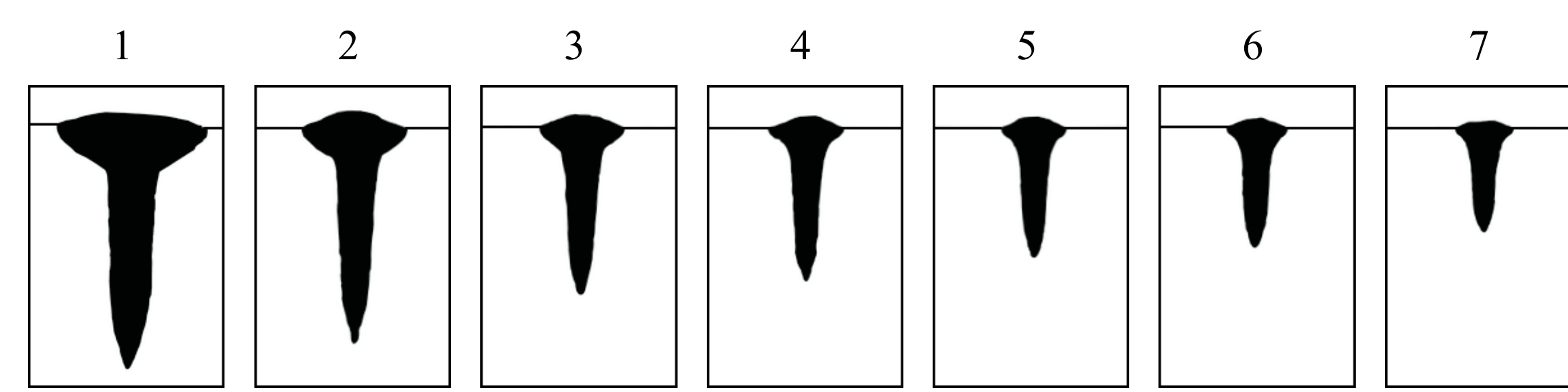
1. Przeprowadzone próby wykazują lepszą jakość złączy, przy zastosowaniu takiego ustalenia narzędzia aby jego powierzchnia czółowa znajdowała się poniżej powierzchni materiału w zakresie od 0,15-0,4mm. Powoduje to przyspieszenie nagrzewania metalu i zwiększenie ciśnienia wywieranego na metal w stanie półplastycznym. Dodatkowe polepszenie jakości złącza uzyskuje się przez zwiększenie kąta pochylenia narzędzia tak, aby tylna część wieńca była bardziej zagłębiona niż część przednia.
2. Najwyższą jakość złączy uzyskuje się prowadząc proces z zastosowaniem technologii wykorzystującej kontrolę siły docisku narzędzia do powierzchni metalu.
3. Wykonane badania twardości złączy zgrzewanych z aluminium wskazują, że obszar zgrzeiny charakteryzuje się największą twardością, która przewyższa o około 10-12 jednostek HV twardość materiału rodzimego. W strefie wpływu ciepła następuje niewielka utrata twardości w stosunku do twardości MR.
4. Zmiana parametrów zgrzewania tj. prędkości obrotowej narzędzia i jego prędkości przesuwno zachowuje postać charakterystyki rozkładu twardości i niewiele zmienia twardość w strefie odkształcenia termomechanicznego.
5. Wytrzymałość złączy zgrzewanych z użyciem technologii FSW przewyższa o około 30% wytrzymałość połączeń wykonanych z zastosowaniem spawania łukowego. Zerwanie następuje zawsze w SWC złącza od strony spływu, dlatego niezbędne jest zastosowanie zabiegów dodatkowych zwiększających wytrzymałość złącza w tej strefie.

### Wyniki badań

#### Analiza przekroju poprzecznego spoiny dla procesu spawania wiązką elektronów

##### Wpływ parametrów sterujących na przekrój poprzeczny spoiny

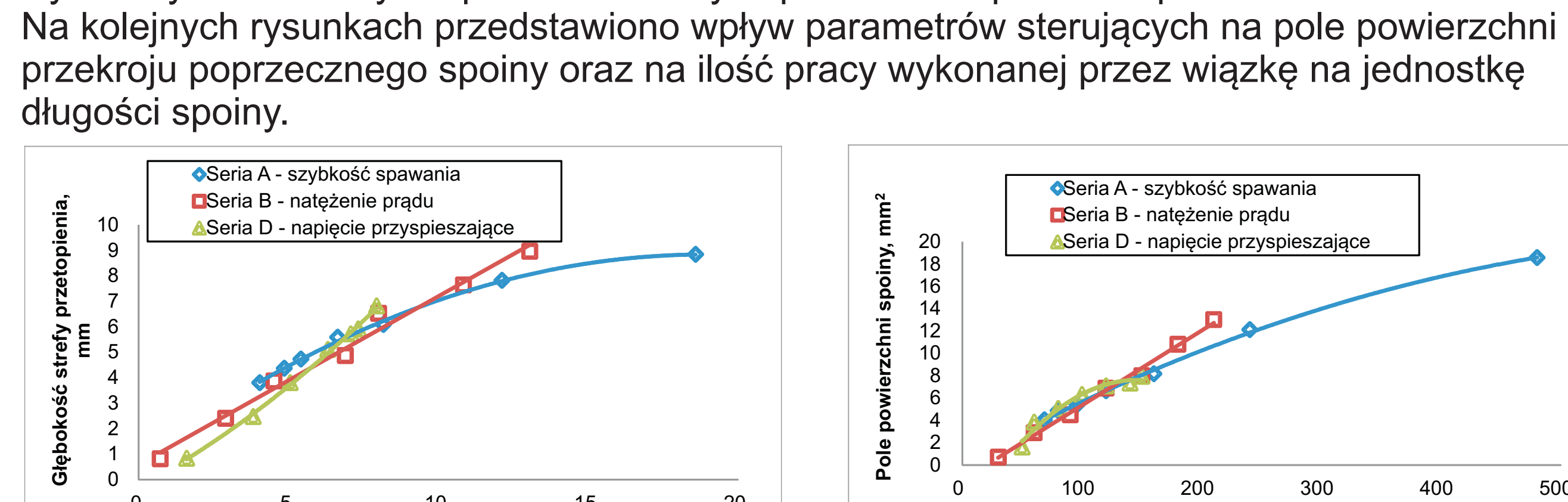
W ramach kalibracji spawarki określono podstawowy zestaw parametrów sterujących procesem spawania wiązką elektronów. Następnie dla każdego z parametrów sterujących wykonano serię spoin. Dla danej serii zmieniano tylko wartość wybranego parametru. Pozostałe parametry przyjmowały wartości z zestawu podstawowego. Dla parametru określającego odległość ogniska od powierzchni wykonano 2 serie: jedną dla wiązki zogniskowanej powyżej powierzchni spawanego elementu i drugą dla wiązki zogniskowanej poniżej. Łącznie wykonano 7 serii po 7 spoin w każdej serii.



Przekroje spoin dla przykładowo dla serii A

##### Porównanie pola powierzchni spoiny i pracy na jednostkę długości

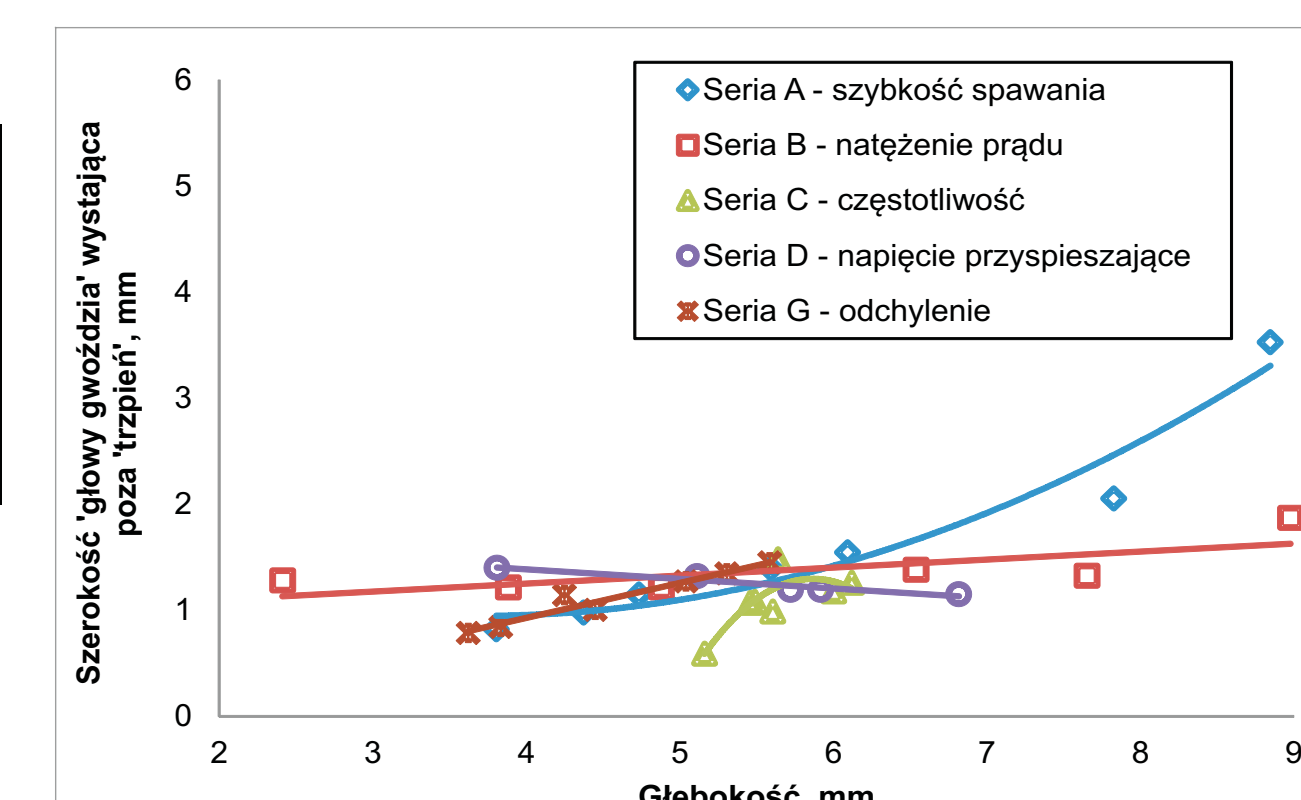
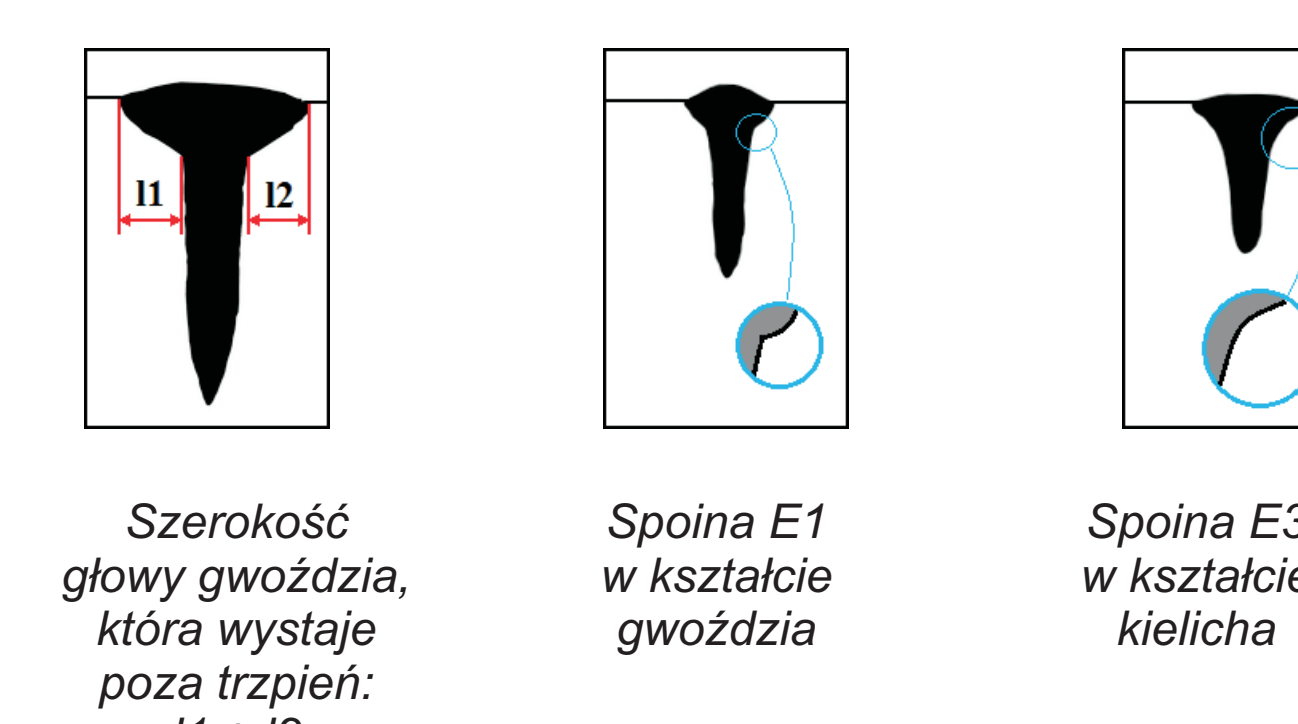
Zbadano wpływ parametrów wejściowych procesu spawania na pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny. Przyjęto, że zmiany objętości spoiny są proporcjonalne do zmiany pola przekroju poprzecznego spoiny. Znajac moc wytworzoną w spoinie dla danego zestawu parametrów i znając wpływ parametrów sterujących na pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny, które jest proporcjonalne do ilości mocy wytworzonej w spoinie, można wyznaczyć ilość mocy w spoinie dla różnych parametrów procesu spawania. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wpływ parametrów sterujących na pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny oraz na ilość pracy wykonanej przez wiązkę na jednostkę długości spoiny.



Wpływ pola powierzchni spoiny na głębokość dla wybranych parametrów. Zestawienie zależności pola powierzchni spoiny od pracy odniesionej do jednostki długości dla parametrów mających wpływ na pracę odniesioną do jednostki długości

#### Minimalizacja 'głowy gwoźdźcia'

Część spoin przyjmuje charakterystyczny kształt 'gwoźdźcia', który cechuje się ostrym przejściem pomiędzy głową a trzpieniem. Dla tych spoin największe naprężenia występują w górnej części spoiny poniżej części 'głowy gwoźdźcia' wystającej poza trzpień. Wysoka koncentracja naprężeń może prowadzić do powstawania pęknięć w czasie krystalizacji.



Zależność między głębokością spoiny a szerokością 'głowy gwoźdźcia', która wystaje poza trzpień

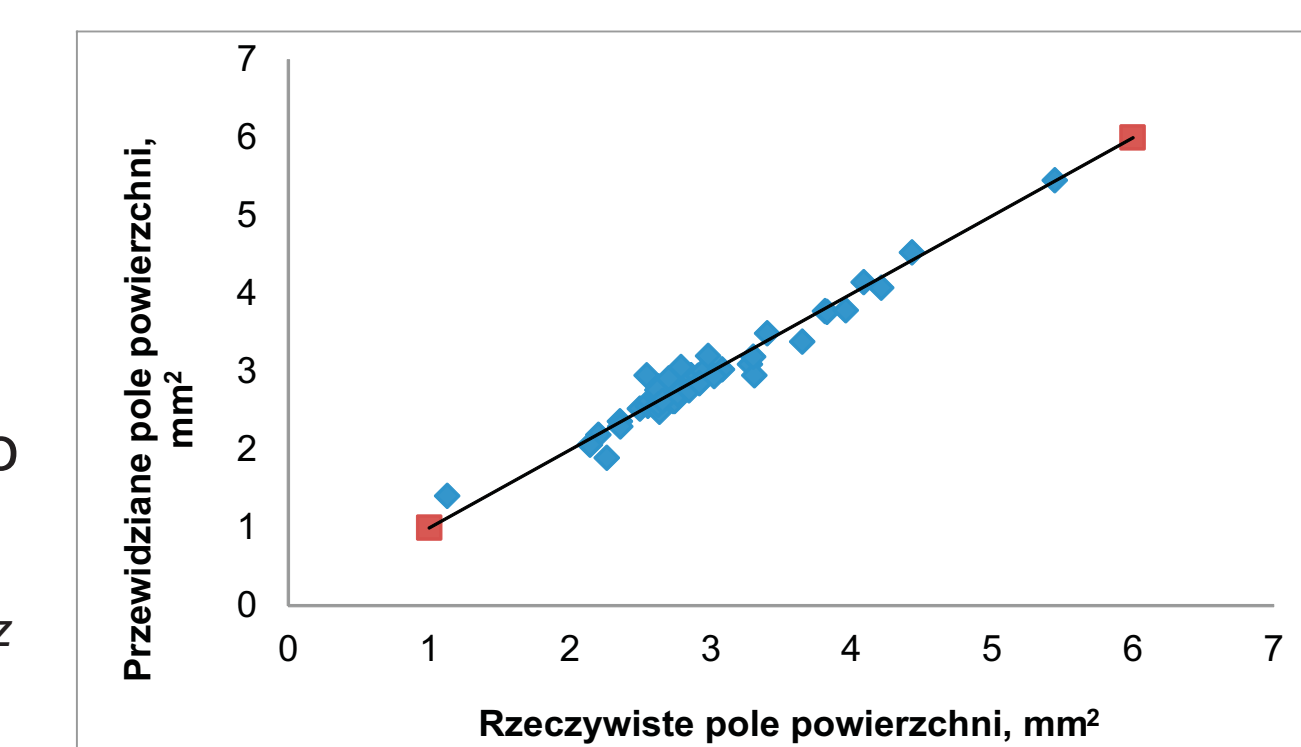
#### Model PLS pola powierzchni

Przy użyciu metody Partial Least Squares, PLS, opracowano model przewidujący pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny na podstawie wielkości sterujących. Jako zmienne wejściowe do modelu przyjęto parametry sterujące z następującymi modyfikacjami:

- dla napięcia uwzględniono dodatkowo kwadrat jego wartości,
- dla szybkości uwzględniono jej odwrotność i dodatkowo kwadrat tej odwrotności,
- odległość ogniska rozbito na 2 zmienne odpowiadające odległości powyżej i poniżej powierzchni spawanego materiału.

Jako dane służące do budowy modelu przyjęto wszystkie 49 spoin.

Porównanie rzeczywistej i przewidzianej przez model PLS powierzchni przekroju spoiny



### Wnioski

Przyjętą metodę analizy zależności pomiędzy parametrami spoiny a geometrią spoiny oraz metodę budowy modelu przewidującego można zastosować do innych technologii spawania oraz do innych parametrów określających geometrię spoiny.

#### Wnioski szczegółowe:

- dla szybkości spawania mniejszej niż 15 mm/s uzyskuje się mniejszą głębokość spoiny dla tej samej ilości ciepła wytwarzanego w spoinie w porównaniu do serii, w której zwiększono wartość natężenia prądu,
- dla tej samej wielkości pracy odniesionej do jednostki długości, natężenie prądu i napięcie przyspieszające dawało spoiny o zbliżonej powierzchni,
- dla spoin o powierzchni większej niż 7 mm<sup>2</sup> zwiększenie napięcia dawało nieznacznie większą głębokość niż zwiększenie natężenia. Ograniczenie zwiększania głębokości za pomocą napięcia jest jego maksymalna wartość 150 kV odpowiadająca głębokości około 8 mm,
- dla spoin o kształcie gwoźdźcia parametrem, który najlepiej zmniejsza część głowy wystającą poza trzpień gwoźdźcia jest częstotliwość oscylacji wiązki. Najlepsze wyniki uzyskano dla częstotliwości 200 Hz,
- otrzymano model przewidujący powierzchnię przekroju spoiny wprowadzający średni błąd 4%.

### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

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 przemieszeniem
- 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

#### Referaty

1. Lacki P., Adamus K., Wojsyk K., Zawadzki M.: *Numerical simulation of electron beam welding process of Inconel 706 sheets*. 14 International Conference on Sheet Metal. SheMet 2011. Leuven, Belgium
2. Adamus K.: *Przewidywanie geometrii jeziora spawalniczego na podstawie parametrów procesu spawania wiązką elektronów*. 31.V-2.VI.2011 - XVII Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza, Międzyzdroje
3. Kudła K., Wojsyk K.: *Możliwości sterowania geometrią wtopienia podczas spawania i napawania z wykorzystaniem równoważnych normowanych energii liniowych*. 31.V-2.VI.2011 - XVII Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza, Międzyzdroje

#### Publikacje

1. Lacki P., Adamus K., Wojsyk K., Zawadzki M.: *Numerical simulation of electron beam welding process of Inconel 706 sheets*. Key Engineering Materials Vol. 473 (2011) pp 540-547
2. Lacki P., Adamus K., Wojsyk K., Zawadzki M., Nikielczyk Z.: *Modeling of heat source based on parameters of electron beam welding process*. Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 56 (2011) Issue 2, pp.455-462
3. Lacki P., Adamus K.: *Numerical simulation of the electron beam welding process*. Computers & Structures, Volume 89, Issues 11-12, June 2011, Pages 977-985 (w druku)

#### Prace inżynierskie obronione:

1. Pietrzak Emil: *Jakość złączy spawanych wiązką elektronów i sposoby jej podwyższania*. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
2. Stasiak Michał: *Technologie spawania stali 30HGS i jej odpowiedników gwarantujące uzyskiwanie obrabialnych skrawaniem złączy*. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

#### Prace inżynierskie planowane

1. Wojciech Gasz: *Opracowanie technologii spawania nadstopów niklu ze stalami stopowymi*. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
2. Paweł Michalski: *Analiza energii liniowej w procesie spawania STT*. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
3. Mariusz Mroziak: *Analiza energii liniowej w procesie spawania CMT*. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
4. Wojciech Tyka: *Badania jakościowe szepiania bez udziału materiału dodatkowego w procesie spawania TIG*. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
5. Rafał Aleksander: *Możliwości ograniczenia ilości wprowadzanego ciepła podczas spawania nowoczesnych stopów metali*. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
6. Zbigniew Cimcho: *Badanie jakości spawanych cienkościennych konstrukcji tytanowych*. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

#### Prace habilitacyjne

1. Tytuł: *Energia liniowa spawania i możliwości jej obliczania*. Autor: Wojsyk Kwiryn (w trakcie realizacji)