

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

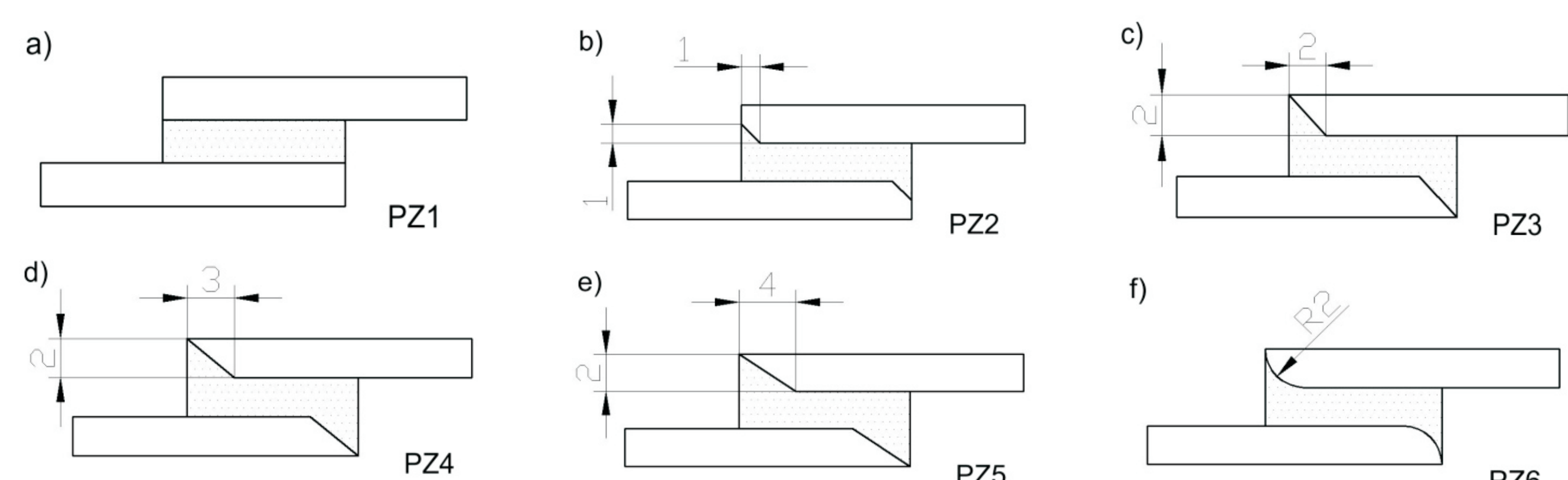
Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań

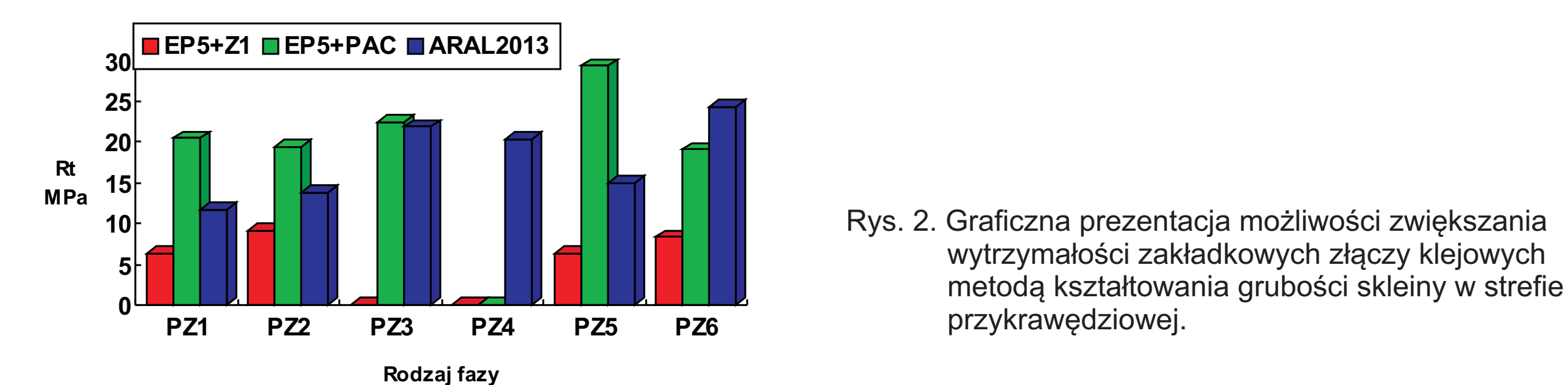
Kierunki doskonalenia wybranych połączeń stosowanych w konstrukcjach lotniczych

Połączenia klejowe coraz częściej stosowane są w przemyśle lotniczym do wytwarzania lekkich konstrukcji, stawiane są im coraz wyższe wymagania co do wielkości przenoszonych obciążeń, trwałości i niezawodności. Tradycyjne metody opracowywania konstrukcji i technologii połączeń klejowych, oparte na prostych wzorach obliczeniowych oraz instrukcjach producentów klejów, nie mogą sprostać tym wymaganiom. Właściwym narzędziem do projektowania wysokowytrzymałych połączeń klejowych są systemy komputerowe wspomagające prace inżynierskie CAE wykorzystujące metodę elementów skończonych oraz wiedza dotycząca konstrukcyjnych i technologicznych sposobów zwiększania wytrzymałości złącza klejowego.

Prowadzone dotychczas badania wykazały, że wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych zależy od sztywności złącza w strefie zakładki. Stosowane dotychczas rozwiązania konstrukcyjne zwiększające sztywność lub ją zmniejszające powodowały wzrost pracochłonności przygotowania półfabrykatów lub wykonywania połączeń. Opracowano nowy sposób zwiększania wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych polegający na wykonaniu od strony spoiny klejowej fazy lub promienia na całej długości krawędzi łączonych części (rys. 1). Umożliwia to w sposób celowy kształtować grubość spoiny klejowej w strefie przykrawędziowej i zmniejszać sztywność złącza. Badania eksperymentalne wykazały, że zmieniając tym sposobem grubość spoiny klejowej w strefie przykrawędziowej można zwiększyć wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych o 10 – 107% (rys. 2).



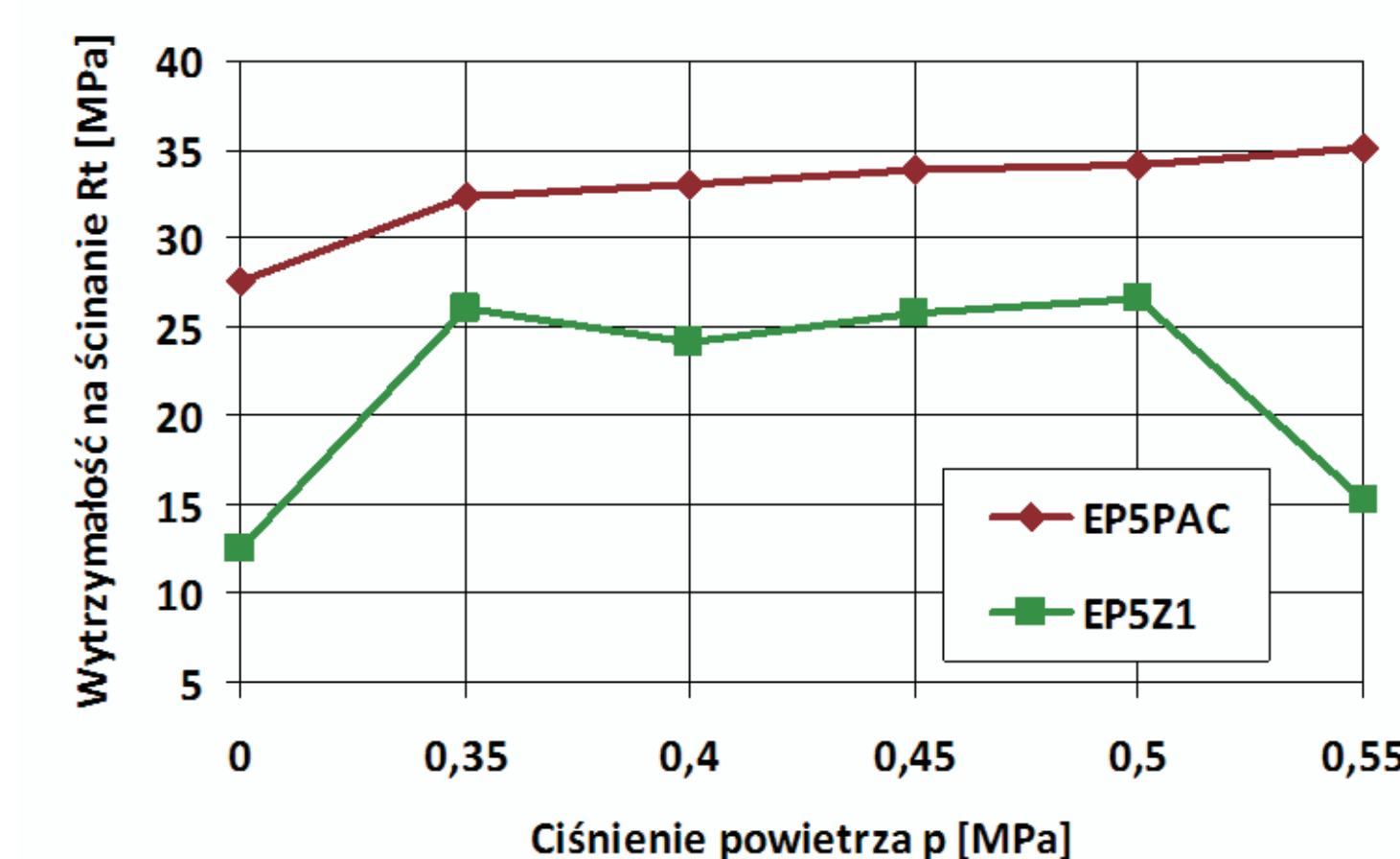
Rys. 1. Schematy konstrukcji strefy przykrawędziowej w badanych zakładkowych połączeniach klejowych - warianty: a) PZ1, b) PZ2, c) PZ3, d) PZ4, e) PZ5, f) PZ6



Rys. 2. Graficzna prezentacja możliwości zwiększania wytrzymałości zakładkowych złączy klejowych metodą kształtowania grubości sklejiny w strefie przykrawędziowej.

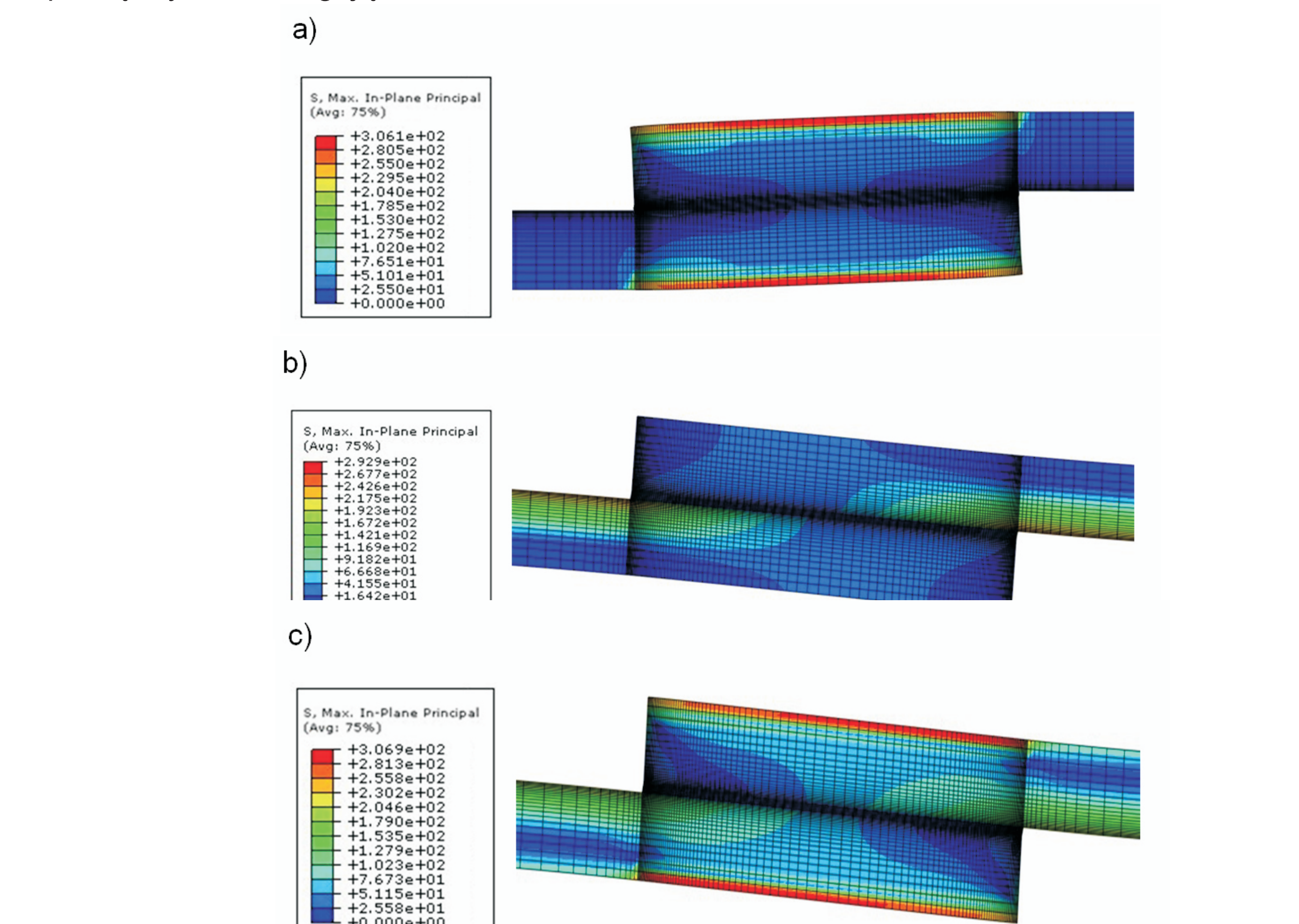
Wykonana metodą elementów skończonych analiza stanu naprężeń w spoinie klejowej o zmiennej grubości w strefie przykrawędziowej wykazała, że zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne powoduje zmniejszenie maksymalnych naprężeń występujących w spoinie. Główne normalne naprężenia σ , ulegają zmniejszeniu o 19 – 44%, naprężenia normalne σ_{yy} (oddzierające) o 22 – 32% oraz naprężenia tnące τ_{xy} o 13 – 30%.

Sprawdzono możliwość zwiększania wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych metodą strumieniowego nagniatania dynamicznego (pneumokulkowania). Wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + PAC wzrosła po pneumokulkowaniu o 6 - 57% zaś połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + Z1 o 18 - 112% (rys. 3).



Rys. 3. Wpływ ciśnienia powietrza podczas pneumokulkowania na wytrzymałość na ścinanie R, zakładkowych połączeń ze stali S235JR sklejonych kompozycjami Epidian 5 + PAC (EP5PAC) oraz Epidian 5 + Z1 (EP5Z1)

Wzrost wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych poddanych nagniataniu dynamicznemu spowodowany jest konstytuowaniem w strefie przykrawędziowej wstępnych naprężeń ściskających (rys. 4), które zmniejszają koncentrację naprężeń pochodzących od obciążenia zewnętrznego. Przeprowadzona metodą elementów skończonych analiza stanu naprężeń w spoinie klejowej połączeń umocnionych metodą pneumokulkowania wykazała, że nagniatanie strumieniowe powoduje zmniejszenie głównych naprężeń normalnych (Maximal. Principal stress) o 4,5 - 17,5%; naprężeń normalnych σ_{yy} w kierunku osi y (naprężeń oddzierających) o 9,3 - 35,2% oraz naprężeń normalnych σ_{xx} w kierunku osi x (naprężeń rozciągających) jest mniejsza o 8,1 - 29,9%, natomiast maksymalne naprężenia tnące τ_{xy} (styczne) w płaszczyźnie xy globalnego układu współrzędnych nie ulegają zmianie.



Rys. 4. Rozkłady maksymalnych, głównych naprężeń normalnych σ_{xx} (Maximal. Principal stress) w spoinie klejowej połączenia zakładkowego wyznaczone metodą elementów skończonych: a) złącze umocnione metodą pneumokulkowania, b) złącze obciążone siłą zewnętrzną $P = 3000$ N, c) złącze pneumokulkowane i obciążone siłą zewnętrzną $P = 2000$ N

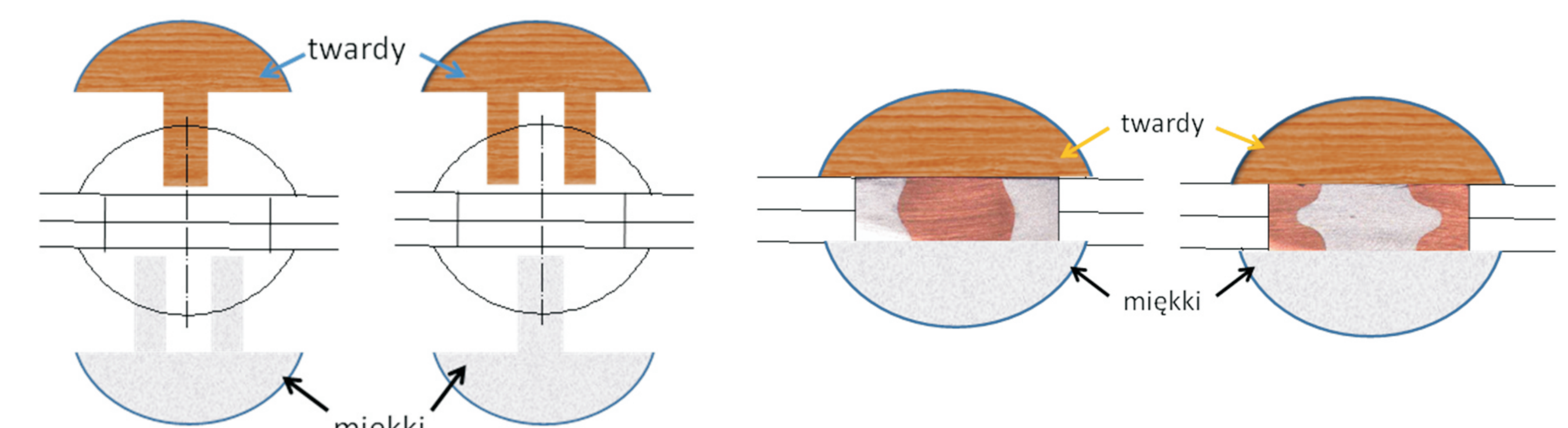
Wytrzymałość połączeń klejowo – nitowych warunkowana jest konstrukcją i technologią ich wykonania. Można oprzeć się tutaj na wielu analogiach do połączeń klejowych. Podobnie jak w połączeniach klejowych jednym z najważniejszych czynników jest rodzaj kompozycji klejowej. Odpowiednio dobrana kompozycja klejowa (właściwości mechaniczne w tym głównie moduł sprężystości postaciowej G_0) może przejąć znaczną część (nawet do 90 % [14]) obciążenia działającego na typowe połączenie mechaniczne (nitowe, śrubowe), obniżając wartość naprężeń stycznych.

Charakterystyczny dla połączeń zakładkowych niekorzystny rozkład naprężeń stycznych (koncentracja przy krawędziach zakładki) można również zmniejszyć poprzez zastosowanie kilku rodzajów kleju. Kleju podkładowego o małej sztywności i podstawowego kleju wiążącego o sztywności większej, lub zastosowanie dwóch lub więcej rodzajów kleju o różnej wytrzymałości i różnym odkształceniu, nanoszonych kolejno obok siebie w kierunku działania siły. Otrzymuje się wówczas inny rozkład naprężeń niż w przypadku jednego rodzaju kleju. Stosując klej o dużym module sprężystości postaciowej w środku połączenia a na końcach zakładki klej o module niższym, można uzyskać równomierniejszy rozkład naprężeń.

Połączenia klejowo – nitowe podobnie jak klejone wrażliwe są na sposób przygotowania powierzchni do klejenia. Odpowiednie jej przygotowanie może zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową nawet do 300 %. Ocena stopnia przygotowania powierzchni – zwilżalności klejonych powierzchni przez kompozycję klejową – może być dokonywana przez precyzyjny pomiar kąta zwilżania powierzchni za pomocą goniometru.

Charakterystyki wytrzymałościowe połączeń klejowo – nitowych zależą od odpowiedniego rozmieszczenia nitów. Zarówno nadmiar nitów, rozmieszczonych z małą podziałką jak również ich niewielka ilość o dużej podziałce, może znacznie obniżyć wytrzymałość połączeń. Optymalna wielkość podziałki nitów uzależniona jest przede wszystkim od: grubości łączonych elementów, rodzaju materiałów i rodzaju kompozycji klejowej. Właściwa podziałka nitów zapewnia równomierny docisk warstwy kleju na całej szerokości złącza. Ze wzrostem grubości łączonych elementów wartość podziałki może ulec zwiększeniu przy niezmienionej wytrzymałości. Fakt ten można tłumaczyć wzrostem sztywności elementów, które pomimo zwiększenia podziałki nitów nadal będą zapewniać równomierny nacisk na warstwę kleju. Wielkość podziałki ma również istotny wpływ na wynikową grubość warstwy kleju, szczególnie w przypadku nitowania połączeń z nieutwardzonym klejem.

Kluczowym etapem wykonania połączenia klejowo-nitowego jest proces nitowania. Jest rzeczą znaną, że podczas nitowania część siły zamykającej nity jest przenoszona na warstwę kleju. W skrajnych przypadkach klej jest wyciskany z obszarów bezpośrednio przylegających do nitu, tworząc pierścieniowate niedoklejenia. Wyciskany klej przemieszczany jest w kierunku promieniowym od nitów powodując jego nierównomierne rozmieszczenie tj. obszary o niejednakowej grubości warstwy kleju, a to z kolei wpływa niekorzystnie na wytrzymałość połączeń. Najlepsze rezultaty jakościowe i wytrzymałościowe pozwalają uzyskać metody nitowania radialnego. Zamykanie nitów jest wówczas stopniowe, trzon nitu jest równomiernie ścisany, szczelną wypełniając otwór. Możliwość uszkodzenia warstwy kleju jest niewielka. Metody te można stosować do nitowania połączeń z utwardzoną i nieutwardzoną warstwą kleju. Innym sposobem zmniejszenia niekorzystnego oddziaływania procesu nitowania jest zastosowanie niekonwencjonalnych nitów składanych, dwustronnych z możliwością kontrolowania siły wciśnięcia w otworze i siły ściskającej łączone elementy bez konieczności kształtowania łba nitu, rysunek 5.



Rys. 5. Koncepcja nitu dwustronnego - przed zakuciem i po zakuciu

Przeprowadzona analiza literatury wskazuje, że współcześnie prowadzone są badania mające na celu doskonalenie wszystkich technologii stosowanych w konstrukcjach lotniczych. W przypadku połączeń spawanych doskonalenie jest ukierunkowane na poszukiwanie optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych spoin, dobór najodpowiedniejszych sposobów obróbki cieplnej modyfikacji, technologii wykonywania spoin oraz poszukiwanie możliwości łączenia przy wykorzystaniu tej technologii różnych materiałów (przykładowo metali i kompozytów).

Doskonalenie połączeń lutowniczych jest ukierunkowane na poszukiwanie nowych stopów lutowniczych, które będą pozwalały na efektywne łączenia różnorodnych materiałów (w tym metali i kompozytów). Prowadzone są także badania nad obróbką cieplną i rozwiązaniami konstrukcyjnymi złączy poprawiającymi ich wytrzymałość. Badania zmierzające do doskonalenia połączeń klejowych są ukierunkowane na modyfikowanie klejów, badanie wpływu przygotowania powierzchni na właściwości połączenia, badania wpływu różnorodnych czynników środowiskowych na trwałość połączenia oraz badanie właściwości połączeń klejowych materiałów kompozytowych.

Doskonalenie połączeń zgrzewanych jest ukierunkowane na poszukiwanie możliwości łączenia różnych materiałów (w tym metalicznych z kompozytowymi). Połączenia takie są możliwe dzięki wprowadzeniu pomiędzy łączone elementy dodatkowych materiałów. Analiza literatury wskazuje, że w porównaniu z innymi technologiami łączenia badania połączeń nitowanych mają mniejszy zakres. Opisywane w literaturze dotyczą głównie zagadnień wytrzymałościowych.

W konstrukcjach lotniczych obserwuje się również współcześnie tendencje do minimalizowania liczby połączeń części poprzez wykonywanie różnorodnymi technologiami części o bardzo złożonych kształtach.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- „Dynamics of sandwich plates weakened by single/multiple debonding” V.Burlyayenko, T.Sadowski, 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM 2009), 18-21 maja 2009, Zielona Góra. Proceedings, str. 139-140
- „On the problem of cracks propagation in orthotropic polymer matrix composite under uniaxial tension” T.Sadowski, L.Marsavina, E.Craciun, 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM 2009), 18-21 maja 2009, Zielona Góra. Proceedings, str. 401-402
- „Experimental investigations and numerical modelling of adhesive joint of aluminium strips reinforced by rivets for industrial applications” T.Sadowski, M.Kneć, P.Golewski, 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2009), 22-23 czerwca 2009, Rzym, Włochy. Proceedings, str. 42-43
- „Effective Properties for Sandwich Plates with Aluminium Foil Honeycomb Core and Polymer Foam Filling” T.Sadowski, J.Bec, IWCM19, Constanta (Rumunia), 3-5 września 2009-10-12, Proceedings, str. 119
- „Damage and failure processes of hybrid adhesive bonded and riveted joints” T.Sadowski, E.Zarzecka-Raczkowska, P.Golewski, IWCM19, Constanta (Rumunia), 3-5 września 2009-10-12, Proceedings, str. 117
- „Dynamic Modelling of Sandwich Plates Containing Single/Multiple Debonding” V.Burlyayenko, T.Sadowski, IWCM19, Constanta (Rumunia), 3-5 września 2009, Proceedings, str. 105
- „On the new continuum damage theory for modelling of polymer matrix composites” T.Sadowski, K.Osina, ICSAAM – 2009, Tarbes (Francja) 7-10 września 2009, Proceedings, str. 88

Minisymposiuma:

- Organizacja minisymposiumu na 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM 2009), 18-21 maja 2009, Zielona Góra MSB: Computational Mechanics of Composite Materials and Structures Organizer: - Rene de Borst (Eindhoven University of Technology, Netherlands) - Tomasz Sadowski
- Organizacja „Special Session” na 19th International Workshop on Computational Mechanics of Materials (IWCM19, 2009), 1-4 września 2009, Constanta (Rumunia) Tytuł sesji: Modern Composite Materials Applied in Aerospace Organizer: Tomasz Sadowski

Rublikiacje

- T.Sadowski, L.Marsavina, N.Peride, E.-M.Craciun, Cracks propagation and interaction in an orthotropic elastic material: analytical and numerical methods, Computational Materials Science 46 (2009) str. 687-693
- T.Sadowski, M.Kneć, P.Golewski, Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets, International Journal of Adhesion and Adhesives (Elsevier 2010 – zaakceptowane do druku)
- V.Burlyayenko, T.Sadowski, Influence of skin/core debonding on free vibration behaviour of foam and honeycomb cored sandwich plates, International Journal of Non-linear Mechanics (Elsevier 2010 – on-line available)

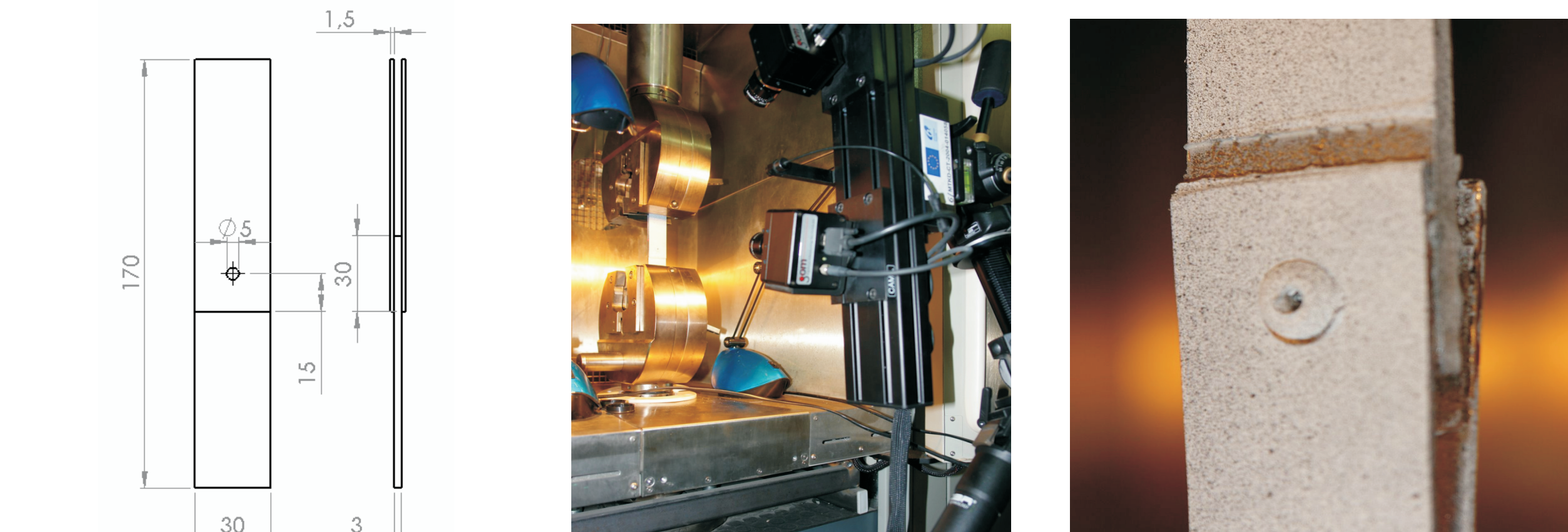
Prace mgr, dr, hab.

Praca doktorska:
Tytuł: Badania eksperymentalne i teoretyczne rozwoju pęknięć w połączeniach klejowych
Autor: mgr inż. Marcin Kneć, Status: W realizacji przez autora. Przewidywana realizacja: 2012r.

Praca habilitacyjna
Tytuł: Zagadnienia modelowania połączeń hybrydowych elementów konstrukcji lotniczych w warunkach obciążeń termicznych i uderzeniowych
Autor: dr inż. Ewa Zarzecka-Raczkowska, Status: Praca rozpoczęta w 2009 r.

Wyniki badań

Połączenia hybrydowe klejowo-nitowe
Połączenia hybrydowe stosowane są w następujących zakładach: PZL Mielec Sp. z o.o., WSK „PZL Rzeszów” S.A. Rzeszów i PZL Świdnik S.A.
Celem badań było zaobserwowanie wpływu wprowadzenia nita do połączenia klejowego. Tego typu połączenia hybrydowe w porównaniu z tradycyjnym cechują następujące właściwości:
- większa wytrzymałość na rozciąganie,
- sztywniejsza struktura,
- dwuetapowy proces pęknięcia przed całkowitym zniszczeniem,
- lepsza odporność na korozję



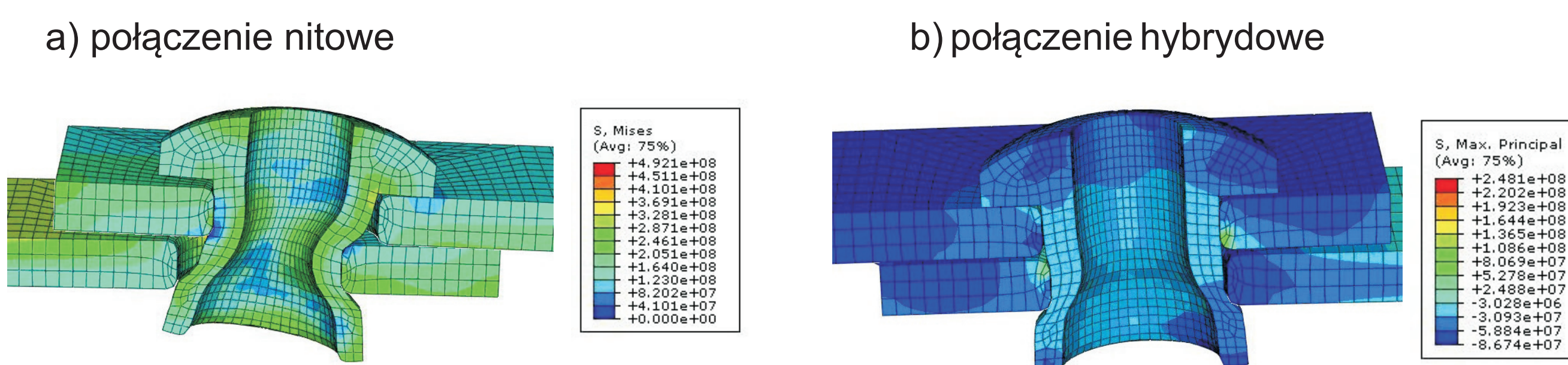
Rys. 1. Schemat badanego połączenia nitowo-klejowego poddawanego próbie rozciągania

Próbkę stanowiły połączenia klejowe dwunakładowe oraz zakładkowe blach stalowych. Rozważano trzy przypadki:

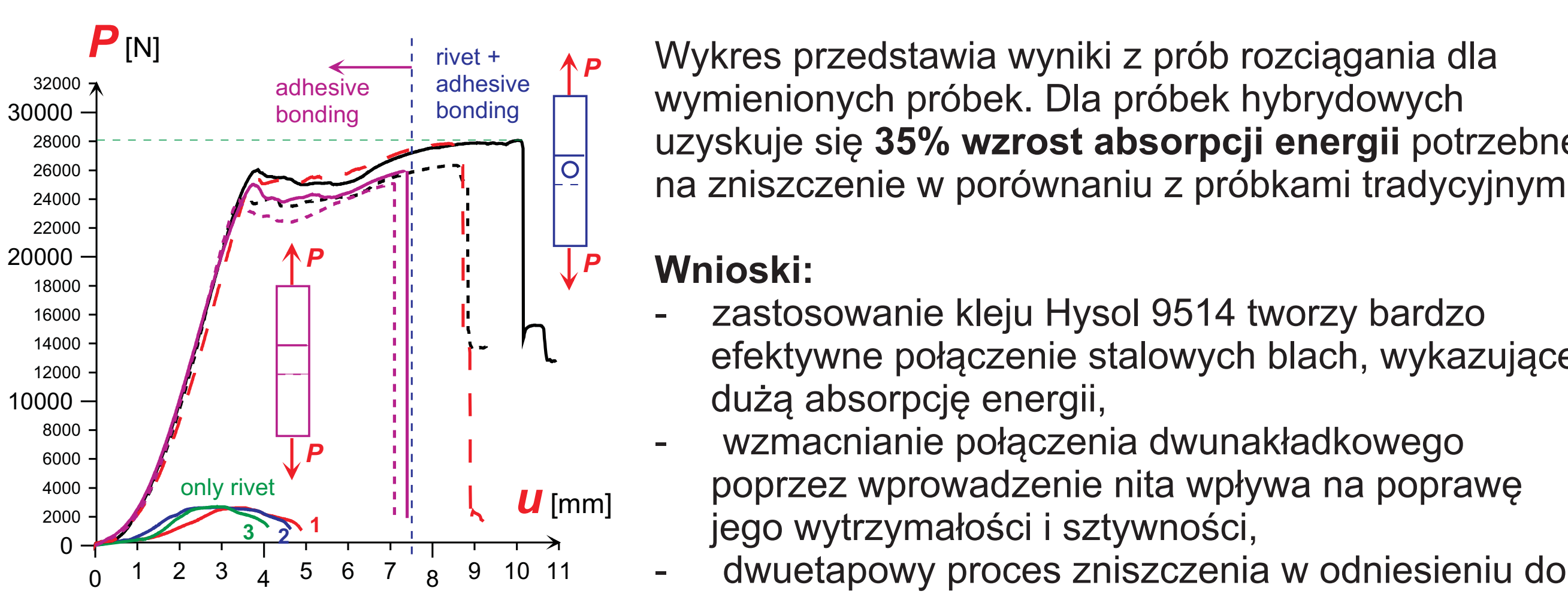
- połączenie klejowe,
- połączenie klejowe z nitem umieszczonym w centralnej części zakładki,
- połączenie nitowe.

Stosowano nity aluminiowe zrywalne o średnicy 4,8mm oraz klej epoksydowy Loctite Hysol 9514.

Rys. 2 przedstawia wyniki dla tej samej wartości obciążenia. Daje się zauważyć **mniejsze deformacje** samego nita oraz **mniejszy poziom naprężeń** w połączeniu klejowo – nitowym



Rys. 2. Analiza numeryczna procesu rozciągania połączenia nitowo-klejowego przy jednoosiowym rozciąganiu.



Rys. 3. Wyniki analiz eksperymentalnych połączenia nitowo-klejowego przy jednoosiowym rozciąganiu.

Wykres przedstawia wyniki z prób rozciągania dla wymienionych próbek. Dla próbek hybrydowych uzyskuje się **35% wzrost absorpcji energii** potrzebnej na zniszczenie w porównaniu z próbkami tradycyjnymi.

Wnioski:

- zastosowanie kleju Hysol 9514 tworzy bardzo efektywne połączenie stalowych blach, wykazujące dużą absorpcję energii,
- wzmacnianie połączenia dwunakładowego poprzez wprowadzenie nita wpływa na poprawę jego wytrzymałości i sztywności,
- dwuetapowy proces zniszczenia w odniesieniu do połączenia hybrydowego znacząco podnosi (35%) absorpcję energii prowadzącą do ostatecznego zniszczenia.

Przykłady zastosowania



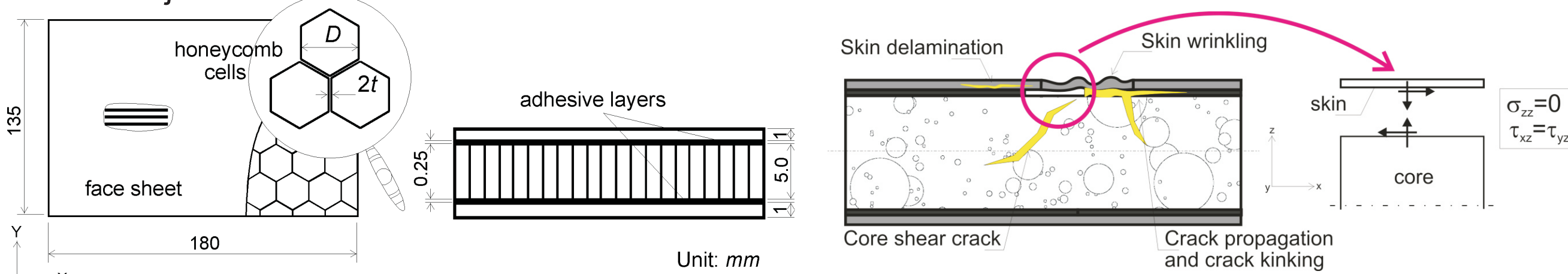
Rys. 4. Mocowanie poszycia płatowców w PZL Mielec: Skytack i Bryza.

Rys. 5. Kadłuby helikopterów – Sokół (PZL Świdnik)

Przykłady współpracy

W ramach wizyt technicznych zespołu ZB15 w czterech zakładach Doliny Lotniczej odbyły się rozmowy i dyskusje wypracowano oryginalne koncepcje wprowadzenia nieznanych w Polsce i niestosowanych w Lotnictwie Technologicznym:

- łączenia hybrydowego klejowo-nitowego elementów konstrukcji lotniczych PZL Mielec Sp. z o.o. i PZL Świdnik S.A.),
- opracowanie sposobu obliczania połączeń hybrydowych (PZL Mielec Sp. z o.o. i PZL Świdnik S.A.),
- opracowanie metody obliczeń odpowiedzi dynamicznej płyt sandwichowych o wypełniaczu w postaci plastra pszczołego i pianki poliuretanowej, która zawiera nieciągłości technologiczne klejenia.



Rys. 6. Delaminacja płyty sandwichowej

Wnioski

Połączenia hybrydowe klejowo-nitowe
Opracowano technologie wykonania połączeń hybrydowych klejowo-nitowych. Przedstawiono numeryczny sposób modelowania lotniczych połączeń hybrydowych klejowo-nitowych poddanych oddziaływaniu jednoosiowych stanów rozciągania. Blachy stalowe połączone zostały klejem Hysol 9514 i dodatkowo wzmacnione nitami. Numeryczne modelowanie przeprowadzono w kodzie ABAQUS, opisując warstwę kleju za pomocą elementów kohezyjnych. Taki sposób umożliwia analizę procesu stopniowej degradacji warstwy kleju przy wzrastającym obciążeniu zewnętrznym. Przeprowadzone wyniki badań z zastosowaniem systemu ARAMIS potwierdzają zasadność przyjętych założeń w modelu numerycznym i możliwość jego zastosowania do bardziej skomplikowanych typów połączeń.

Niedokładności technologiczne wykonania płyt sandwichowych
Płyty sandwichowe dla potrzeb lotnictwa posiadają wady technologiczne w postaci niedoklejen na granicy warstwy zewnętrznej i rdzenia płyty. W zadanu rozwiązano zagadnienie drgań własnych płyt sandwichowych z nieciągłościami na granicach połączeń komponentów płyty. Zbudowano model numeryczny opisujący płyty z wadami technologicznymi w komercyjnym kodzie ABAQUS. Na odpowiedź dynamiczną konstrukcji zasadniczy wpływ ma obszar nieciągłości oraz jej kształt.

Przewiduje się wykonanie badań płyt sandwichowych we współpracy z PZL Świdnik S.A., jak również badania odpowiedzi dynamicznej wybranych połączeń hybrydowych. Przewiduje się również opracowanie technologii połączeń hybrydowych typu „nitowanie bez nita” oraz symulacje numeryczne