

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

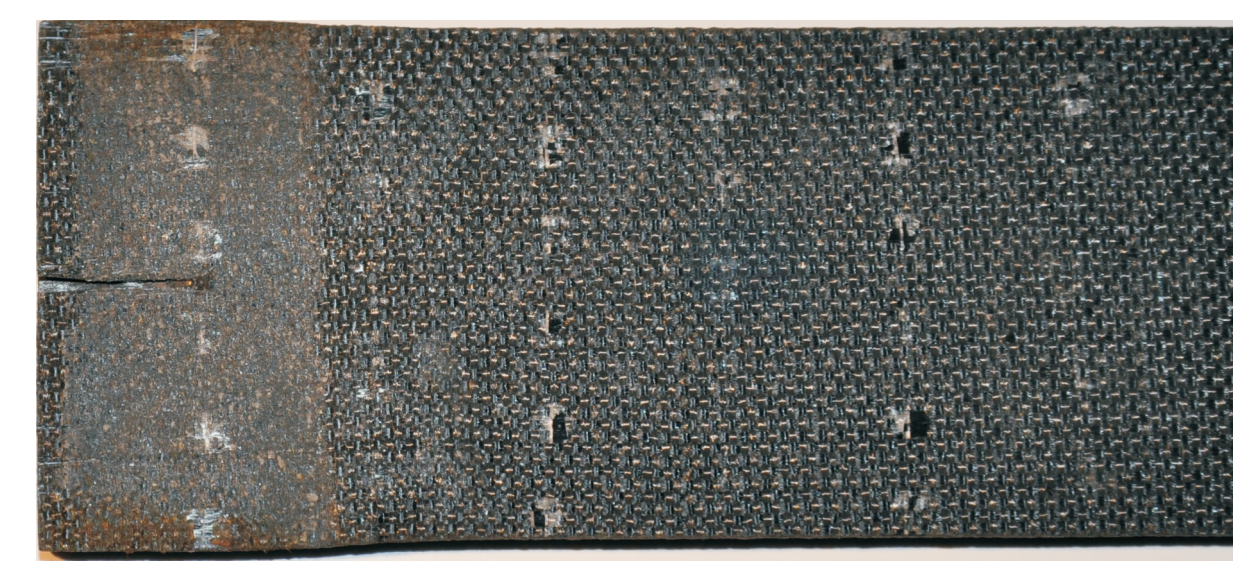
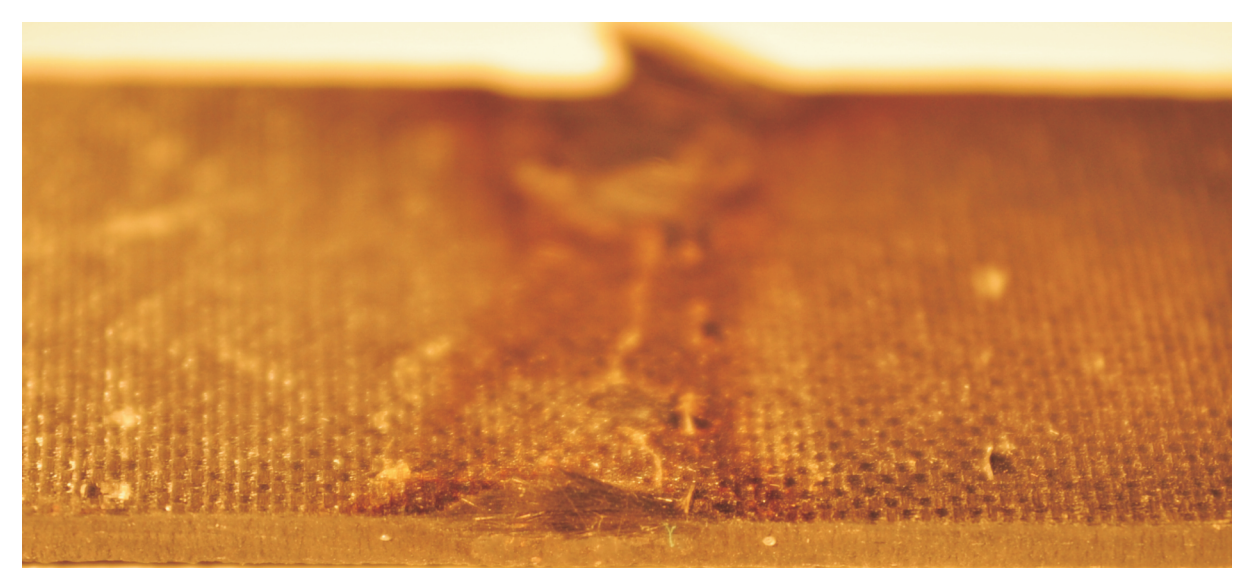
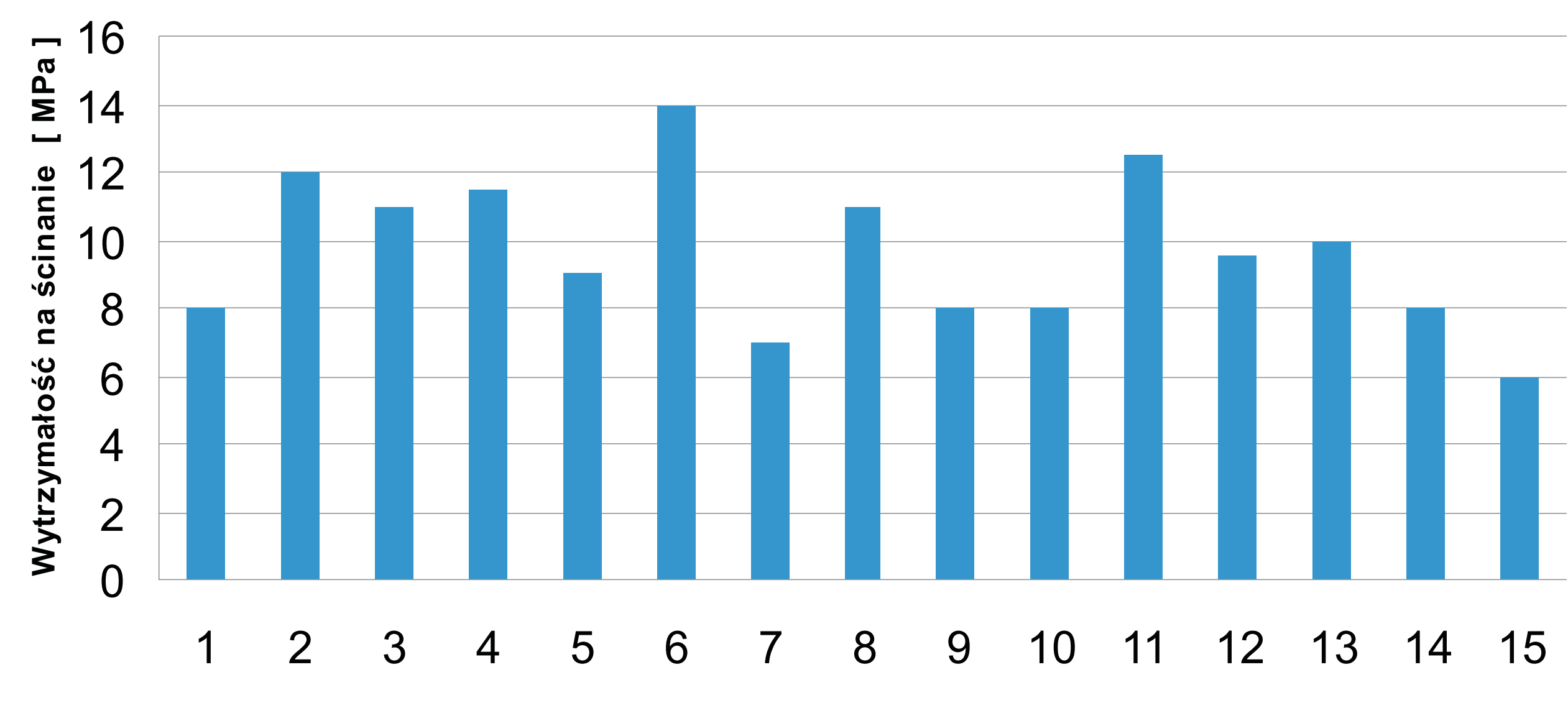
Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

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

Wyniki badań Results

Połączenie kompozytów epoksydowych przy pomocy termoplastycznej żywicy PEEK, żywicy termoutwardzalnej SA70 Gurit oraz kleju Araldit 2015. The combination of epoxy composite connections using PEEK thermoplastic resin, thermosetting resin SA70 and glue Araldit 2015.

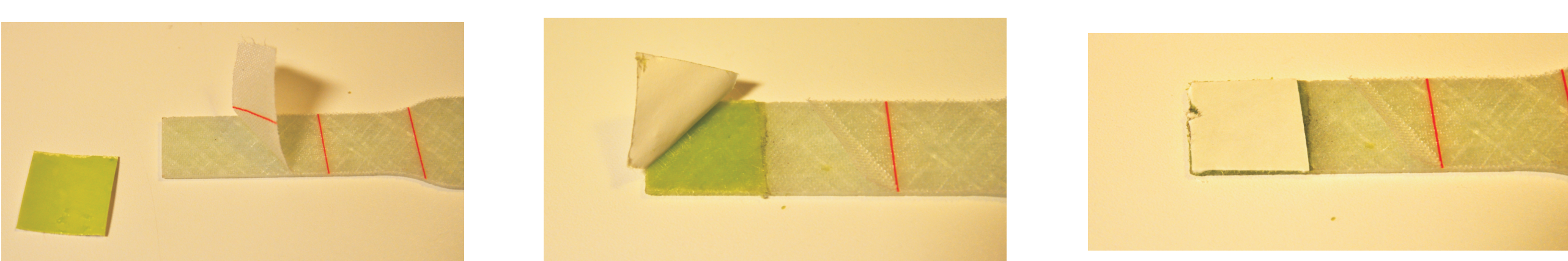
Połączenie epoksyd - PEEK - epoksyd



Rys.2. Temperatura wymagana do uzyskania prawidłowego połączenia przy pomocy żywicy PEEK powoduje uszkodzenia żywicy epoksydowej. Fig.2. The temperature required to achieve a proper connection with the PEEK resin, epoxy resin cause damage to epoxy composite

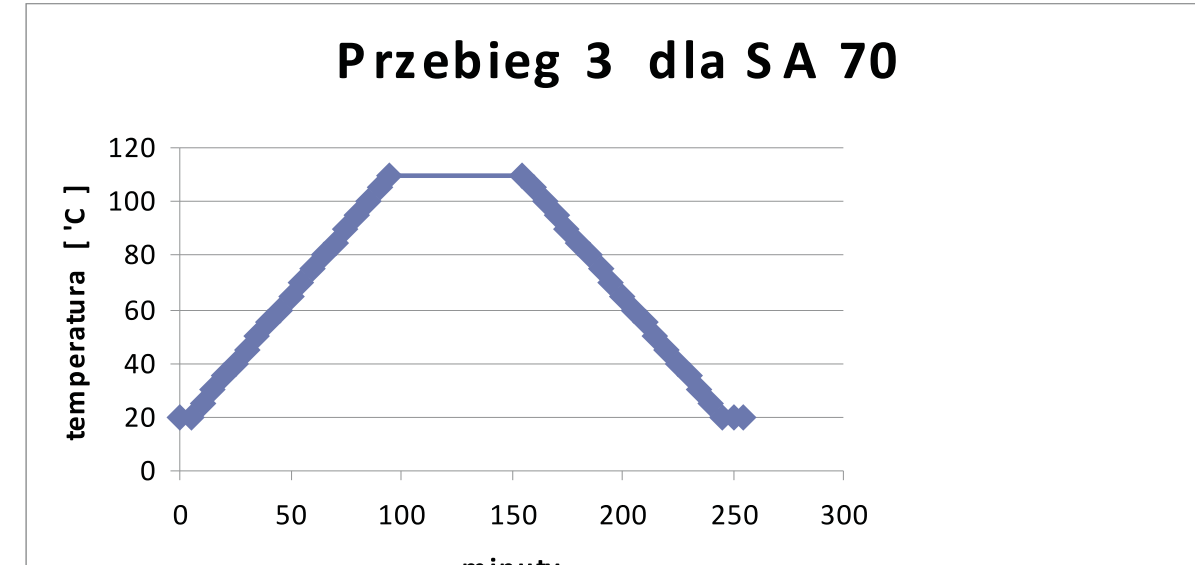
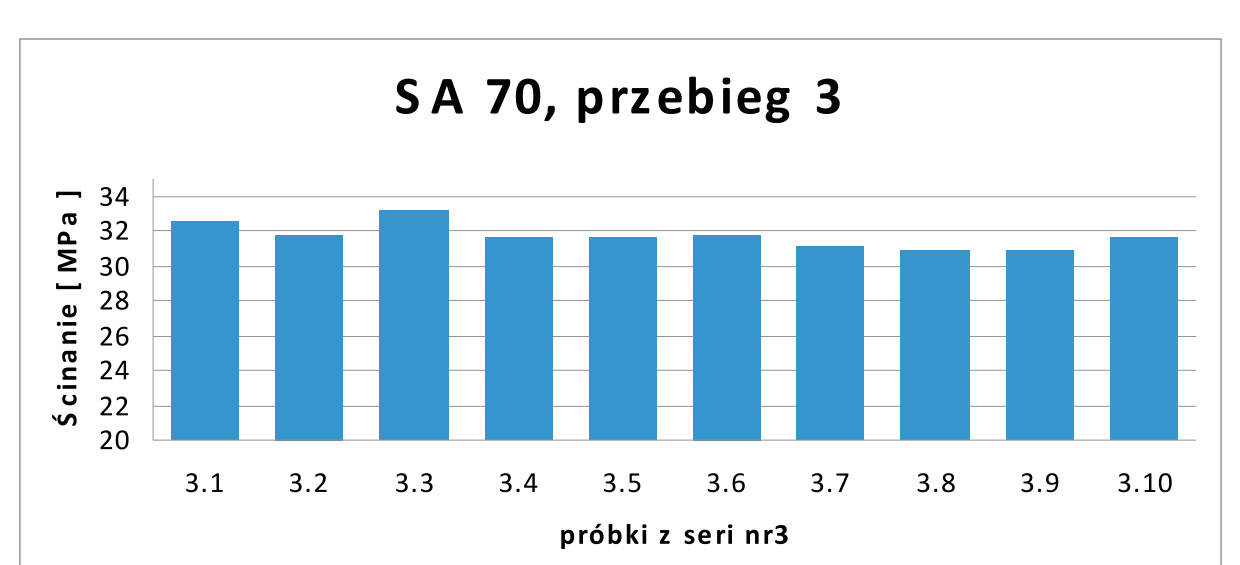
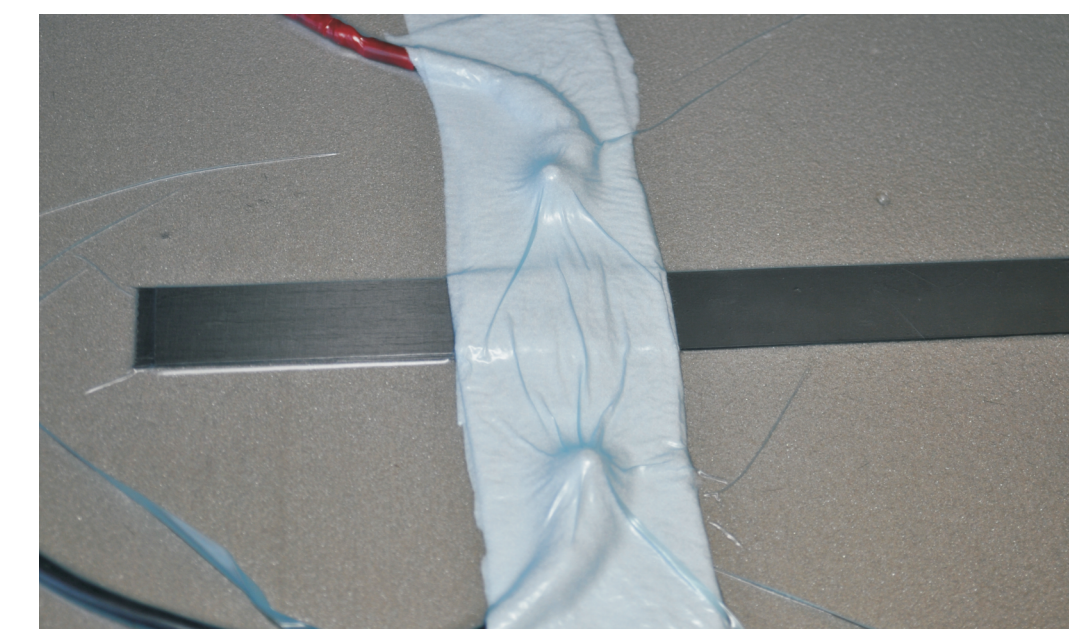
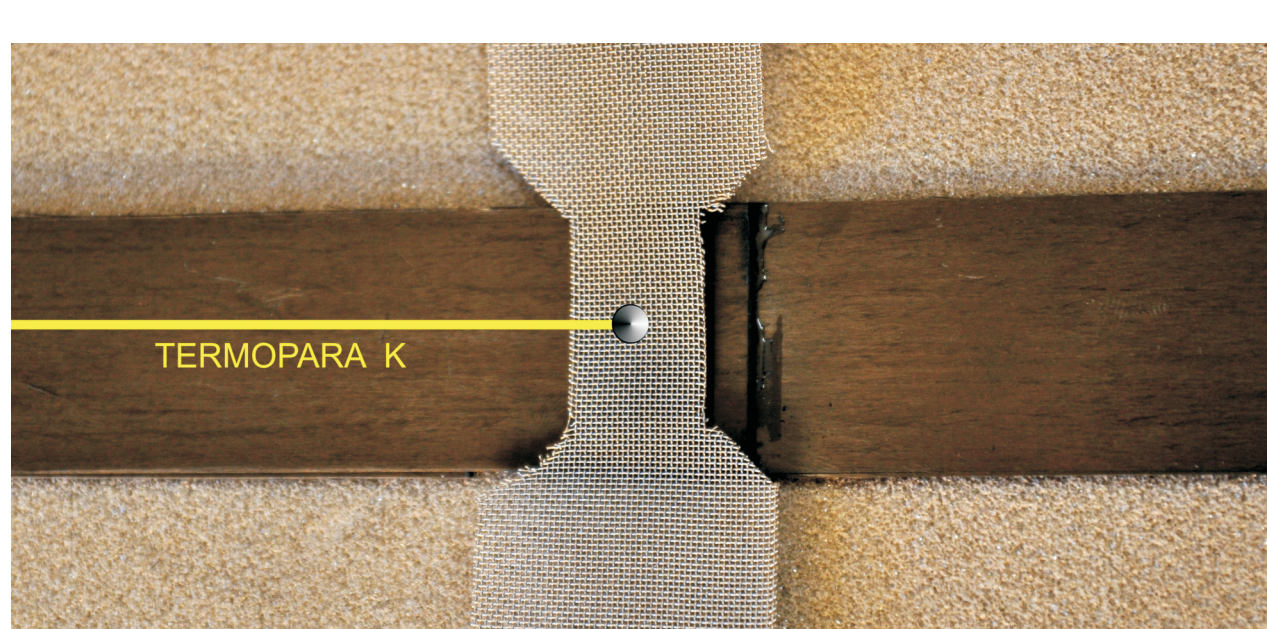
Rys.3. Znaczne odkształcenia (do 15% w grubości) w kompozycie epoksydowym pod wpływem temperatury oraz ciśnienia podczas zgrzewania. Fig.3. Significant strain (up to 15% in thickness) in the epoxy composite under heat and pressure during the welding process.

Połączenie kompozytu epoksydowo przy pomocy żywicy utwardzalnej SA70 Gurit.



Aplikacja żywicy termoutwardzalnej SA 70 Gurit na próbkę z kompozytu epoksydowo szklanego. Żywica w temperaturze pokojowej może być obrabiana mechanicznie - cięta, formowana do różnych kształtów przez okres 20 dni.

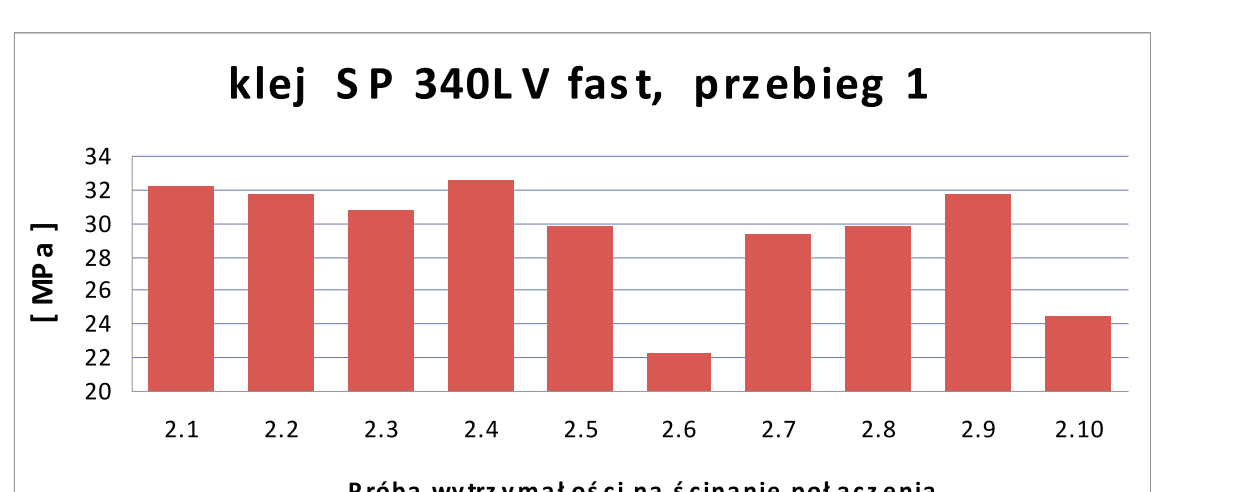
Żywica Sa70 przeznaczona jest do obróbki w próżni oraz temperaturze w zakresie 70-120°C. Nie ma konieczności stosowania autoklawu jak w przypadku klasycznych materiałów typu pre-preg, dla tego też została wykorzystana do wykonania połączeń kompozytów przy zastosowaniu elementu grzejnego z siatki odporowej. Zastosowanie próżni pozwala usunąć powietrze z połączenia przed procesem utwardzania się żywicy oraz powoduje równomierne rozłożenie docisku pomiędzy klejowymi elementami. Katalogowa wytrzymałość na ścinanie 35,5 Mpa



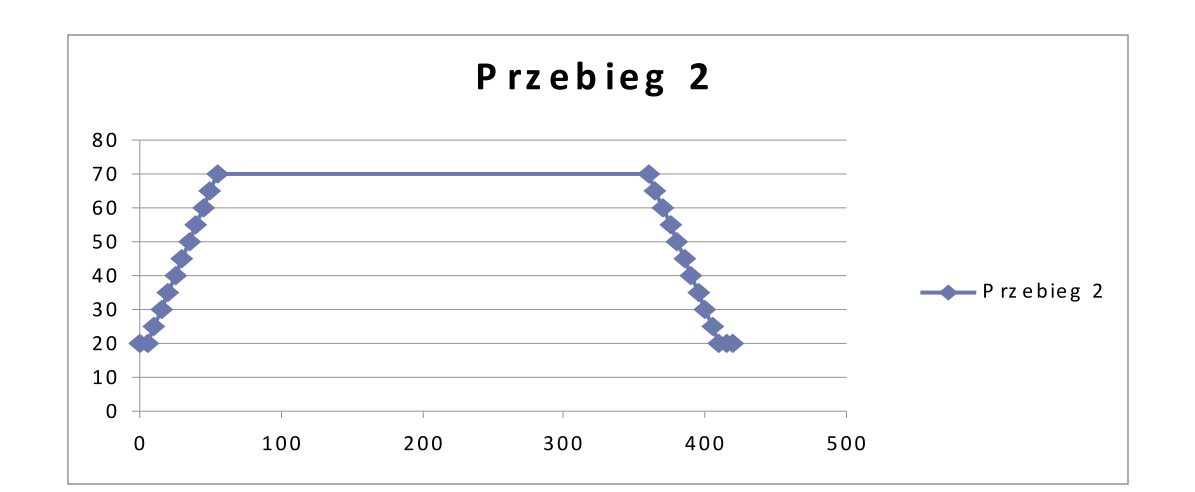
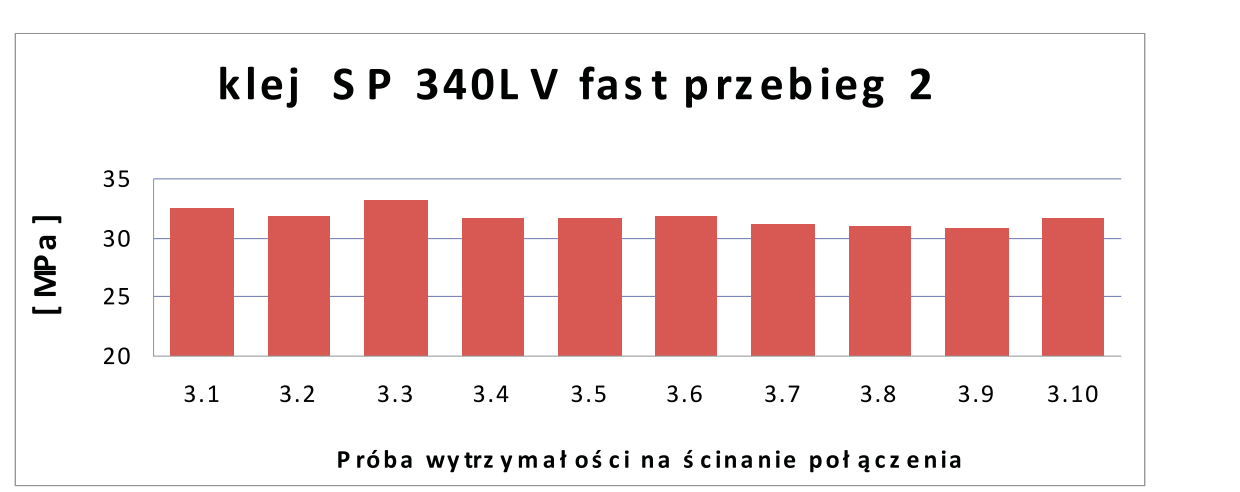
Tab.2. Wytrzymałość na ścinanie w złączy z żywicy Sa70 dla kompozytu epoksydowo szklanego. Table 2. Tensile shear connectors for resin SA70 and glass - epoxy composite.

Rys.5. Temperatura w złączy podczas procesu utwardzania. Fig.5. The temperature in the joint during the curing

W celach porównawczych zostało wykonane połączenie próbek przy pomocy kleju Araldit 2015. Połączenie zostało wykonane w dwóch opcjach - zgodnie z kartą katalogową kleju oraz wygrzewaniem przy pomocy siatki grzewczej w próżni.



Połączenie kompozytu epoksydowo szklanego przy pomocy kleju Araldit 2015. Utwardzanie oraz wygrzewanie w komorze termicznej bez próżni.



Połączenie kompozytu epoksydowo szklanego przy pomocy kleju Araldit 2015. Utwardzanie oraz wygrzewanie w komorze termicznej bez próżni.

Wnioski Conclusions

- Zastosowanie żywicy termo plastycznej PEEK jest praktycznie ze względu na uszkodzenia kompozytu epoksydowego pod wpływem wysokiej temperatury. Zmniejszenie temperatury uniemożliwia wytworzenie adhezji pomiędzy żywicą peek i epoksydową.
- Żywica termoutwardzalna umożliwiła wykonanie bardzo dokładnego połączenia i w połączeniu z lokalnym grzaniem w próżni znacznie redukuje czas wykonania połączenia oraz uprasza proces technologiczny.
- Zastosowanie klejów epoksydowych i grzania lokalnego przy pomocy siatki jest możliwe ale z zachowaniem procesów utwardzania rekomendowanych przez producentów - przyspieszenie tego procesu powoduje zniszczenie kleju - zgazowanie złącza.

Dalsze prace prowadzone będą nad wykonywaniem połączeń przy pomocy żywicy termoutwardzalnej SA70.

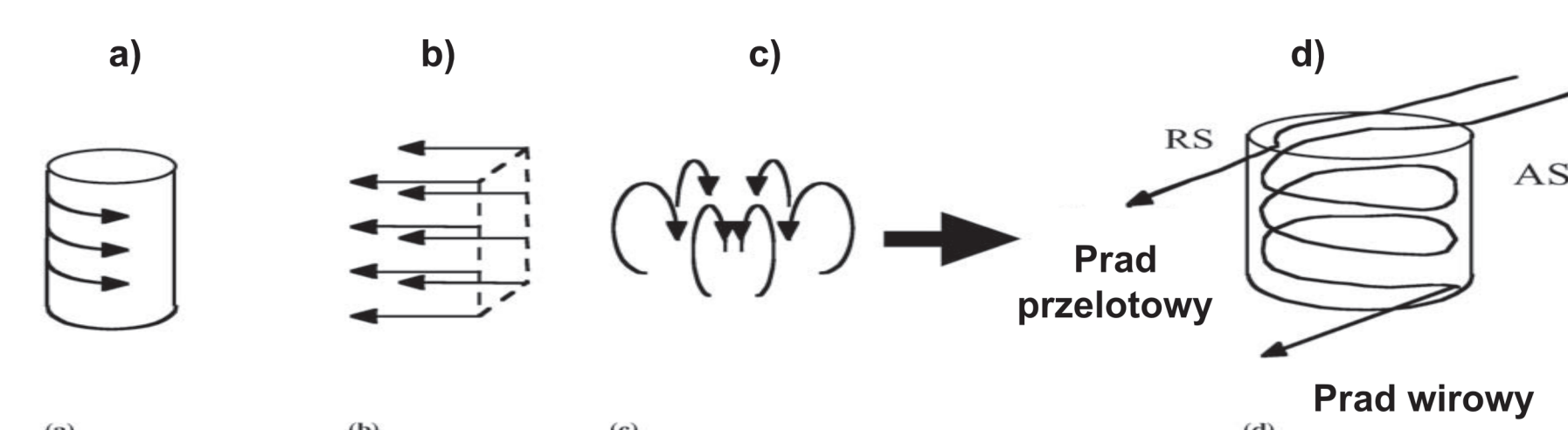
- The use of thermo plastic resin, PEEK is practically due to kompozytu epoksydowego damage under high temperature. Reduce temperature prevents the formation of adhesion between the epoxy resin and peek.
- Thermosetting resin allowed the execution of very fine combination and combination with local heating in a vacuum greatly reduces the time of the call and asks the technological process.
- Using glue and heating epoxydowych with the local grid is possible, but subject to hardening processes recommended by the manufacturers - the acceleration of this process results in the destruction of glue - gasification joint.

Further work will be carried out over the performance of connections with a thermosetting resin SA70.

Wyniki badań Results

Analiza zjawiska plastycznego płynięcia w zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem

Analysis of plastic flow in friction stir welding



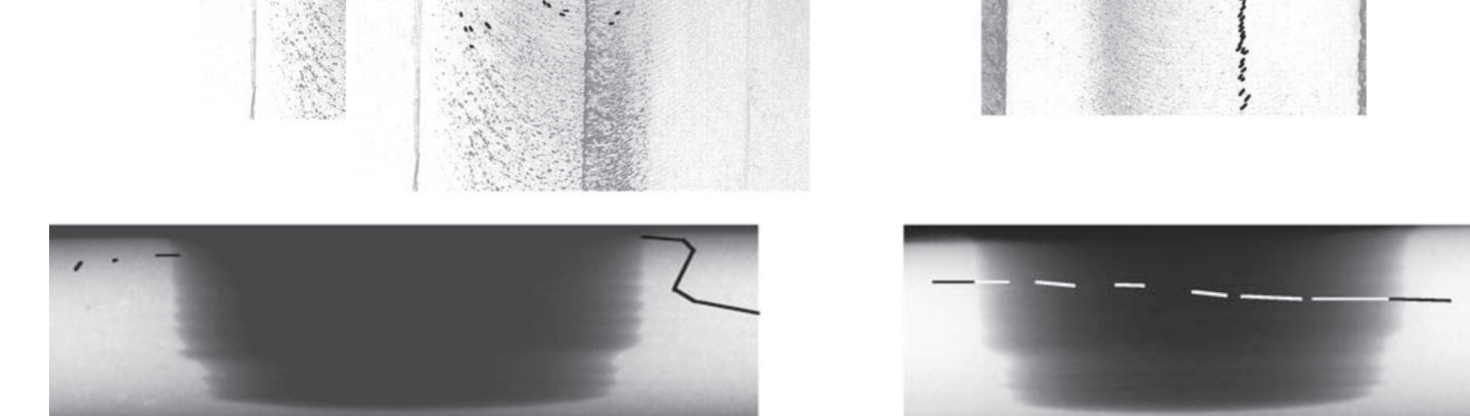
Rys. 1 Model Nunes-a - Trzy pola przepływu nieściśliwego w zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem: a) obrót ciała sztywnego, b) jednostajne przesunięcie oraz c) pierścieni wirowy łączą się d) w dwa prądy przepływu

Fig.1. Nunes Model - Three incompressible flow fields of the friction stir weld. (a) Rigid body rotation, (b) uniform translation, and (c) ring vortex combine to form (d) two flow currents. RS, retreating side; AS, advancing side

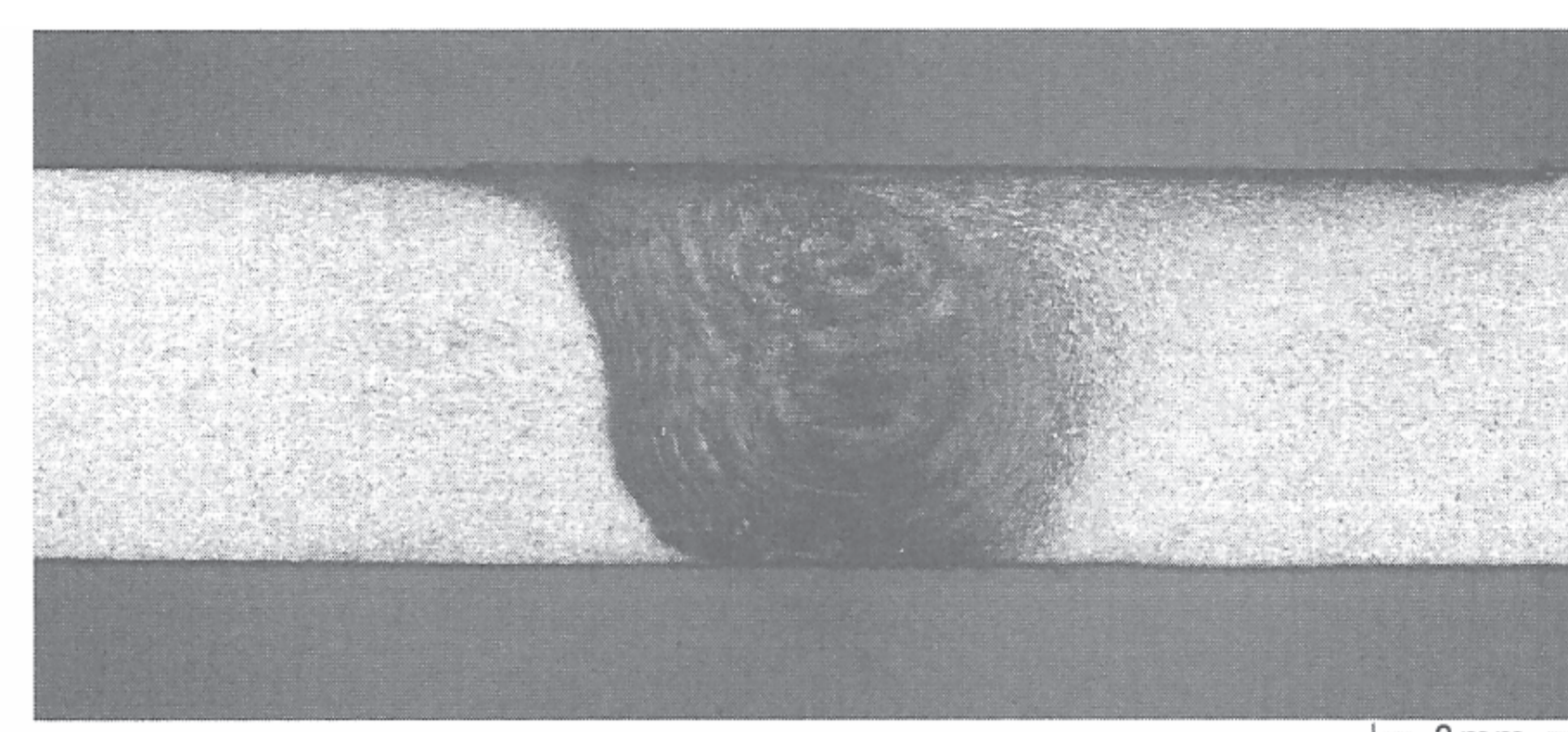
Nunes opiera swój model fizyczny przepływu metalu w procesie FSW jako warunki kinematyczne opisujące ruch metalu. Jest to podział procesu FSW na trzy pola nieściśliwych przepływów (rys. 1), które łączą się, tworząc dwa różne prądy. W modelu tym, pole rotacji ciała sztywnego narzucone przez osiowo obracający się trzpień narzędzia modyfikowane jest przez pierścieniowe pole wirowe otaczające trzpień wymuszone przez skok gwintu na trzpieniu. Te dwa pola przepływu, ograniczone przez strefę ścinania, są jednostajnie przesuwane wzdłuż długości zgrzewanego panelu. Metal nie biorący udziału w pierścieniowym przepływie wirowym przechodzi wokół trzpienia narzędzia w tzw. prądzie przelotowym przepływu, podczas gdy metal biorący udział w pierścieniowym przepływie wirowym doświadcza wysokiego stopnia przetwarzania termomechanicznego, ponieważ może przechodzić wokół trzpienia narzędzia więcej niż jeden raz. Zmiany w funkcji trzpienia narzędzia są odzwierciedlone w ruchu metalu w górę lub w dół, jak opisano przez wir przepływu. W modelu kinematycznej Nunes, metal na stronie RS zgrzeiny jest odbierane z przodu narzędzia i osadza się bezpośrednio za narzędziem, w bardzo krótkim czasie przebywania w polu obrotowym dookoła narzędzia. Określa się to jako przelotowy prąd przepływu metalu. Materiał zgrzeiny z strony AS trzpienia znajduje wystarczająco długo w przepływie obrotowym wokół narzędzia, aby zostać uwieczniony przez stopniowy promieniowy dopływ metalu na górę trzpienia. Promieniowy dopływ metalu jest częścią pierścienia obiegu wiru wywołanego przez gwint na trzpieniu. Cyrkulacja napędza uwieczniony metal w dół trzpienia. Nakładanie się obrotu wokół trzpienia z tym przepływem w dół wynika wzorzec wiru lub prąd wirowy, gdzie przepływ zgrzewanego metalu pojawia się dalej w dół trzpienia narzędzia, gdy cyrkulacja zaczyna poruszać się na zewnątrz. Odwrócenie kierunku gwintu zmienia kierunek przepływu w zgrzewanym metalu prądu wirowego z dołu do góry - wzdłuż trzpienia (rys. 3). Teoria ta znajduje swoje potwierdzenie w badaniach laboratoryjnych przy użyciu różnego rodzaju metod znacznikowych zjawiska plastycznego płynięcia metalu w procesie zgrzewania tarciovego z przemieszaniem.

Rys. 2 Górne zdjęcia rentgenowskie to widok płaski na fragmenty zgrzane tarciovym z przemieszaniem pokazują zmianę umiejscowienia markera zgrzeiny w stosunku do wejścia do strefy zgrzeiny: (a) marker w osi narzędzia; (b) marker po stronie splotu zgrzeiny RS.

Dolne zdjęcia rentgenowskie to widok z boku na otwór wyjściowy zgrzeiny pokazują zmianę umiejscowienia markera zgrzeiny w stosunku do wejścia do strefy zgrzeiny: (a) marker w osi narzędzia; (b) marker po stronie splotu zgrzeiny RS.



Wynikiem prawidłowej identyfikacji obszaru oraz stref uplastycznienia i wpływu ciepła w wyniku optymalnie dobranych parametrów procesu jest osiągnięcie zgrzeiny o wysokich własnościach mechanicznych tak jak przedstawiono to na rysunku 3. Strefa zmieszania tej zgrzeiny wyraźnie wskazuje zgrzeinę wolną od wad objętościowych w której strefa przepływu wywołana przez trzpień jest tylko nieznacznie mniejsza niż szerokości strefy przepływu wywołanej przez opór powstałej na powierzchni obrabianego przedmiotu. Ponadto można zauważyć, że zawarte w pasy strefy zmieszania nie wykazują funkcji chaotycznego przepływu i są prawie symetryczne pomiędzy każdą stroną złącza.



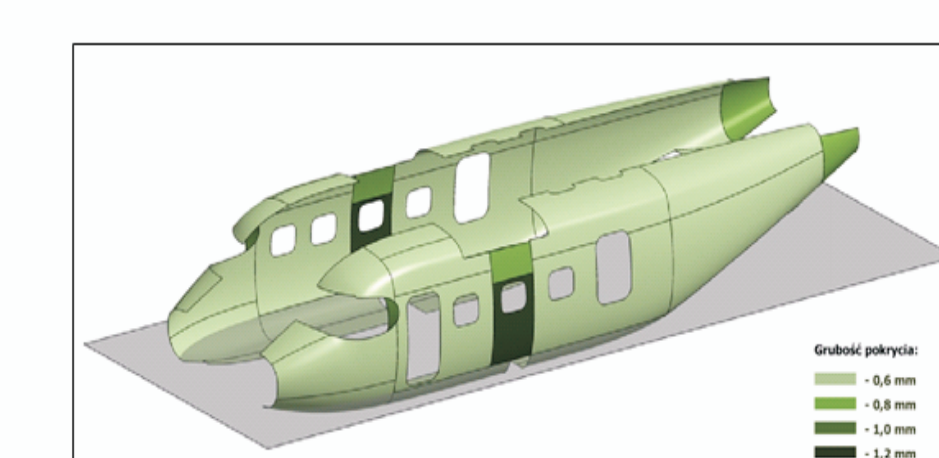
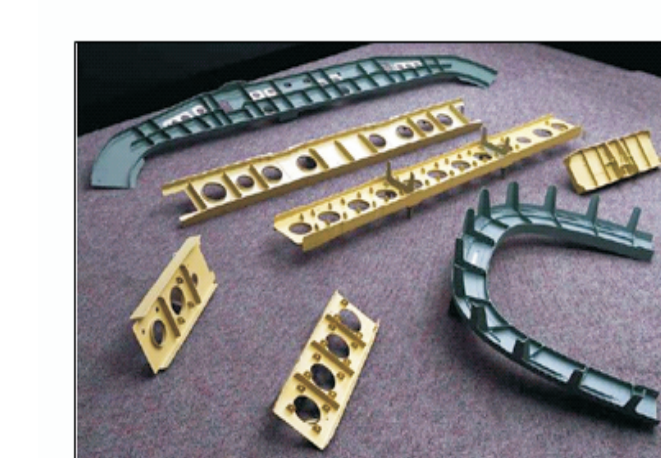
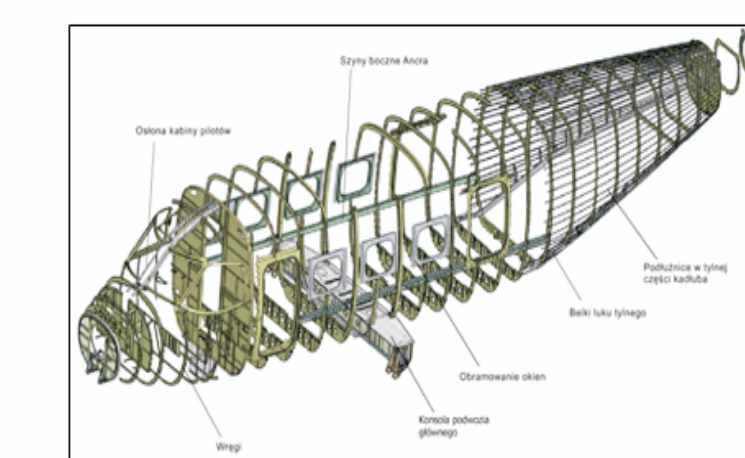
Rys. 3 Przekrój przez złącze FSW stopu aluminium 2024-T351 o grubości 4mm. Narzędzie: średnica spiralnej opory 13mm; średnica trzpienia stożkowego 5mm; trzpień gwintowany z trzema płaskimi ścięciami. Parametry procesu: prędkość obrotowa narzędzia 1200 obr/min, prędkość zgrzewania liniowa 300mm/min, siła osiowa 8kN

Fig. 3 Section view via FSW join of 4 mm aluminum alloy 2024-T351 plates. Tool: 13mm diameter scroll shoulder; 5mm diameter tapered and threaded pin with three flats. Process parameters: tool speed 1200 rpm, weld travel speed 300mm/min, axial force 8kN

Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Program badań został opracowany we współpracy z PZL Mielec i dotyczy badań i opracowania technologii łączenia cienkościennych elementów struktur lotniczych ze stopów aluminium za pomocą metody zgrzewania tarciovego z przemieszaniem (FSW – Friction Stir Welding)

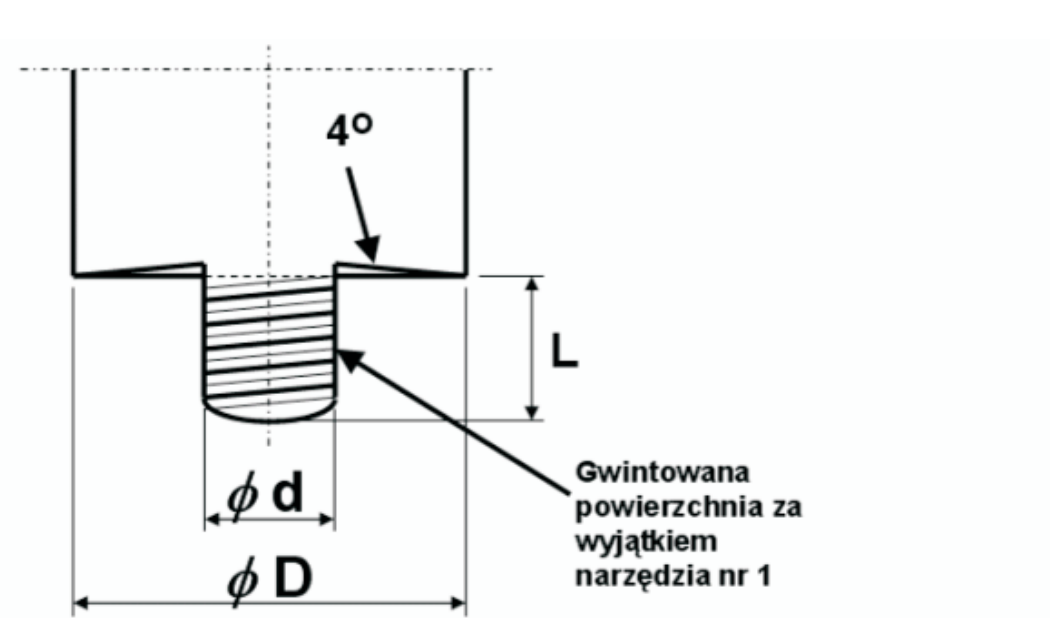
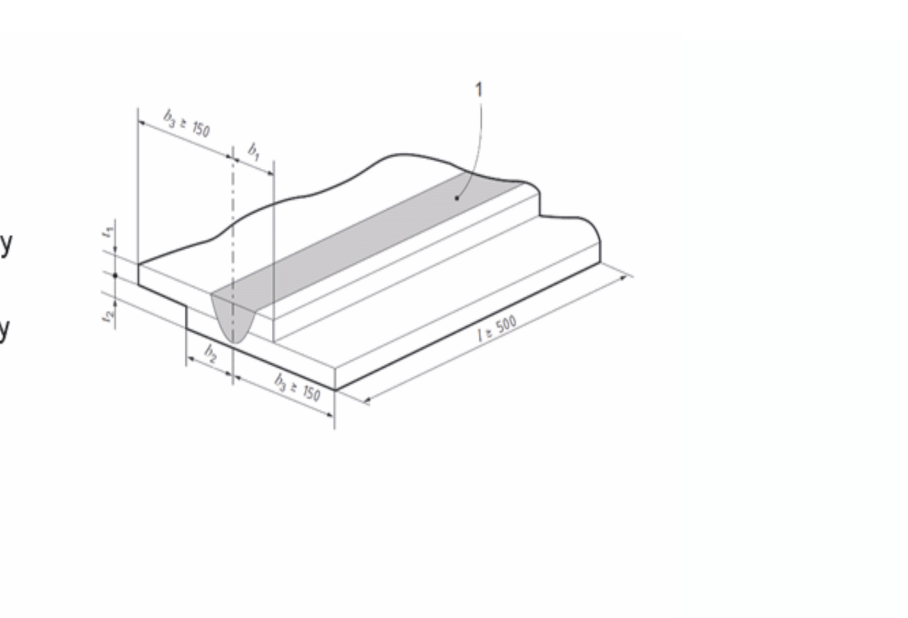
Lp.	Materiał	Grubość (mm)
1	2024 T3	2,5
2	2024 T351	1,6
3	2024 T3	0,4
4	6061 T6	0,4
5	7075 T6	0,4



Rys. 4 Wybrane materiały dla badań testowych nad opracowaniem technologii łączenia za pomocą metody FSW Fig. 4 Selected materials for testing to develop technology for joining by FSW method.

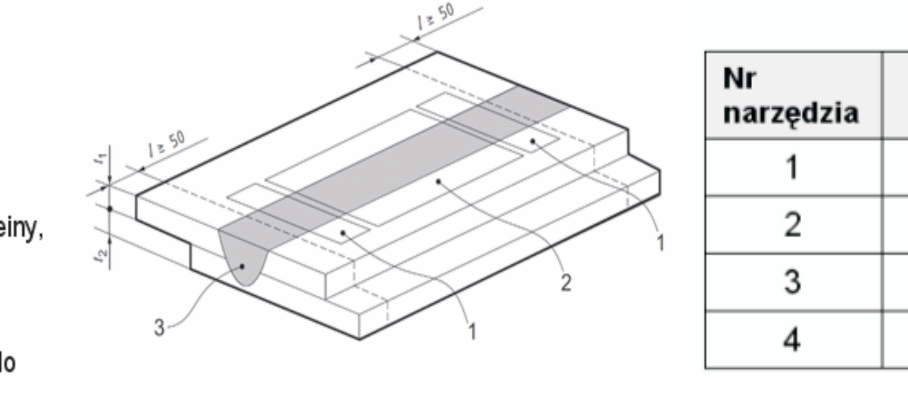
Geometria próbek testowych

- Głębokość:
1 - zgrzeina
2 - głębokość od krawędzi elementu górnego do osi zgrzeiny min 13 [mm]
3 - głębokość od krawędzi elementu dolnego do osi zgrzeiny min 13 [mm]
4 - głębokość między osi zgrzeiny a krawędzi elementu łączącego
1 - długość elementu
11 - grubość elementu górnego
12 - grubość elementu dolnego



Podział próbki na strefy do badań

- Głębokość:
1 - strefa dla dwóch badań makroskopowych
2 - strefa dla próby odrywania zgrzeiny, próby ścinania zgrzeiny, testu zgrzeiny i cała proba metalowa
3 - zgrzeina
1 - długość odcinka do odrywania na każdym końcu próbki do badań



Nr narzędzia	φ d	φ D	L	Nr rodzaju połączenia
1	6	18	0,6-0,7	1.3; 1.4; 1.5
2	6	18	4,6	1.1
3	6	18	3,0	1.2
4	6	18	2,7	2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5; 2.6

Rys. 5 Geometria próbek testowych oraz ich podział na strefy do badań do badań testowych nad opracowaniem technologii łączenia za pomocą metody FSW

Fig. 5 The geometry of the test specimens and location of test specimens for testing research for development of technology for joining by FSW method

Rys. 6 Geometria narzędzi do badań testowych nad opracowaniem technologii łączenia za pomocą metody FSW Fig. 6 Tools geometry for testing research for development of technology for joining by FSW method.

Wnioski Conclusions

Analiza zjawiska plastycznego płynięcia w zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem posłużyła do wykazania możliwości łączenia elementów wykonanych z wybranych gatunków stopów aluminium do budowy cienkościennych półkorupowych struktur lotniczych. Zainteresowanie tą metodą łączenia metali przez przemysł lotniczy spowodowane jest potrzebą opracowania technologii które mają posłużyć do produkcji zaawansowanych struktur lotniczych. Metoda FSW pozwala na:

- Zapewnienie dostatecznej lub wyższej wytrzymałości połączenia,
- Zmniejszenie masy konstrukcji,
- Obniżenia pracochołonności.,
- Obniżenia kosztów.

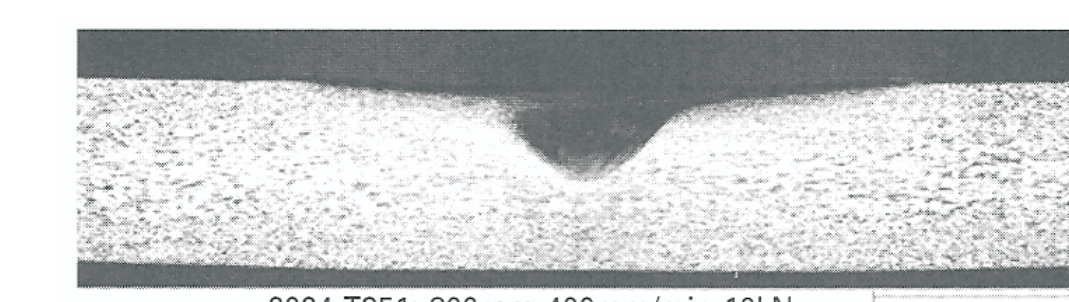
Połączenie elementów struktur tą metodą stanowi alternatywę do obecnie stosowanych technologii wykorzystujących metody łączenia za pomocą elementów złącznych (nity, śruby) i skutkować może wzrostem konkurencyjności na rynku producentów samolotów i śmigłowców średniej wielkości o ciężarze startowym do 10 ton. Jednakże istnieje potrzeba opracowania indywidualnych zestawów parametrów procesu dla łączonych elementów z różnych gatunków stopów aluminium (tych samych jak również różnoimennych) oraz ich grubości, gdyż nie tylko parametry procesu wpływają na wielkość obszaru strefy połączenia, ale również gatunek stopu i sposób jego przerobu plastycznego.

Analysis of the phenomenon of plastic flow in FSW was used to demonstrate the possibility of joining components made from selected aluminium alloys for the joining of thin aerostructures. The interest in this method of joining metal by the aerospace industry due to the need to develop technologies that are to be used for the production of advanced aerostructures. FSW method allows you to:

- Ensuring sufficient or higher strength connection
- Reduce weight of construction
- Workload reductions.,
- Cost reductions.

Joining structural elements using this method is an alternative to the currently used methods of joining technology to connect with fasteners (rivets, screws) and may result in increased competition in the market for manufacturers of aircraft and helicopters, medium-sized take-off weight up to 10 tons.

However, there is a need to develop a specific set of process parameters for the combined elements of various types of aluminium alloy (the similar as the dissimilar) and their thickness, since not only the process parameters affect the size of the area of the connection zone, as well as species of the alloy and the method of plastic working



Rys. 7 Porównanie kształtowania strefy zmieszania w stopach 4mm 2024-T351, 6013-T6 i 8042 (AlMgSc). Narzędzie: średnica spiralnej opory 15mm; średnica nie gwintowanego trzpienia stożkowego 5mm; wysokość trzpienia 1,75mm. Parametry procesu: prędkość obrotowa narzędzia 800 obr/min, prędkość zgrzewania liniowa 400mm/min, siła osiowa 10kN

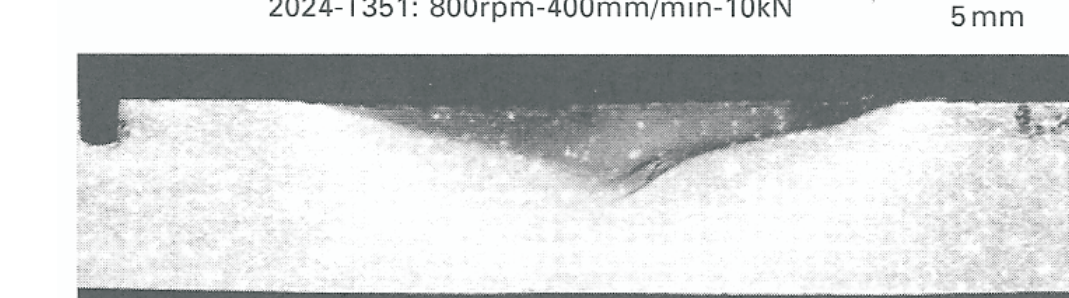


Fig. 7 Comparison of the formation of stir zone in the 4mm alloy plates 2024-T351, 6013-T6 and 8042 (AlMgSc). Tool: 15mm diameter scroll shoulder; 5mm diameter of non-threaded and conical pin, pin height 1.75 mm. Process parameters: tool speed 800 rpm, weld travel speed 400mm/min, axial force 10kN

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

- Śliwa R.E., Gałaczyński T.: **Zjawisko plastycznego płynięcia w zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem w łączeniu metalowych struktur lotniczych**. VIII Seminarium Naukowe, Zintegrowane Studia Podstaw Deformacji Plastycznej Metali PLASTMET 2012, Łańcut 20-23.XI.2012
- Lacki P., Kucharczyk Z., Śliwa R.E., Gałaczyński T.: **Wpływ kształtu narzędzia na pole temperatury w procesie punktowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem**. VIII Seminarium Naukowe, Zintegrowane Studia Podstaw Deformacji Plastycznej Metali PLASTMET 2012, Łańcut 20-23.XI.2012

Publikacje

- Lacki P., Kucharczyk Z., Śliwa R.E., Gałaczyński T.: **Wpływ wybranych parametrów zgrzewania tarciovego z przemieszaniem na pole temperatury**. Rudy i metale nieżelazne, R-57 nr 8/2012, Wydawnictwo SIGMA NOT, W-wa 2012, str.524-531

Prace mgr, dr, hab..

Prace doktorskie

Tytuł: **Analiza możliwości łączenia cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium zgrzewaniem tarciovym z przemieszaniem (FSW)**

Autor: Tomasz Gałaczyński
Promotor: dr hab. Inż. prof. PRz Romana Ewa Śliwa
Status: w trakcie realizacji