

Anna RUDAWSKA\*, Katarzyna GŁOGOWSKA

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin tel. (81) 5384232, \* e-mail: a.rudawska@pollub.pl

## Analiza porównawcza wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wpływem rodzaju kompozycji klejowej (kleju) na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej. Kompozycje klejowe przygotowano z wykorzystaniem dwóch rodzajów żywic epoksydowych: Epidian 57 oraz Epidian 53 oraz trzech rodzajów utwardzaczy: PAC, Z-1 oraz PF. Zastosowano różne udziały masowe tych utwardzaczy, wybierając z zakresu proponowanych przez producentów. Zauważono, że rodzaj kompozycji klejowej wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych badanych materiałów. Zauważono także, że w zależności od rodzaju żywicy epoksydowej obserwowany jest różny wpływ rodzaju utwardzacza na siłę niszczącą połączenia klejowe oraz na wydłużenie spoiny klejowej. Na podstawie analizy wyników badań zauważono, że klej, który zawierał utwardzacz PAC był bardziej elastyczny niż ten przygotowany z utwardzaczem Z-1, natomiast klej wymieszany z utwardzaczem PF przyjmował pośrednie wartości.

**Słowa kluczowe:** żywica epoksydowa, utwardzacz, klej, wytrzymałość połączeń klejowych, wydłużenie

### THE COMPARISON ANALYSIS OF BONDED JOINTS STRENGTH MAKING BY EPOXY ADHESIVES

**Abstract:** This article presents the selected issues related to the influence of the type of adhesive composition (adhesive) for adhesive joints strength of stainless steel sheets. Adhesive compositions prepared using two types of epoxy resins: 57 Epidian, 53 Epidian and three types of hardeners: PAC, Z-1 and PF. Differing mass shares these hardeners, by selecting from the scope proposed by the producers were used. It was noted that the type of adhesive composition affects the adhesive joints strength of tested materials. It was noted also that depending on the type of epoxy resin is observed different effect of hardener on the failure force of adhesive joints and the adhesive layer elongation. On the basis of an analysis of the results, it was noted that the adhesive that contain PAC hardener was more flexible than the one prepared with Z-1 hardener, while the adhesive mixed with PF hardener receive indirect values.

**Key words:** epoxy resin, hardener, adhesive, adhesive joints strength, elongation

### 1. Wprowadzenie

Kleje epoksydowe są uważane za jedne z najbardziej uniwersalnych klejów [1-4]. Charakteryzuje je duża siła adhezji i oporność chemiczna oraz dobra przyczepność do większości metali, tworzyw polimerowych, drewna i ceramiki. Ich zaletą jest właściwie brak konieczności stosowania zwiększonego ciśnienia oraz możliwość wykorzystania podwyższonej tem-

peratury powodującej szybsze sieciowanie kleju. Kleje epoksydowe są to często kleje dwuskładnikowe, które mogą występować w opakowaniach ułatwiających dozowanie odpowiedniej proporcji żywicy i utwardzacza oraz aplikację kleju. W przypadku wielu klejów konieczne jest odmierzenie odpowiedniej ilości kleju i utwardzacza, a następnie wymieszanie [5]. Kleje epoksydowe mogą zawierać także wiele innych dodatków, które umożliwiają

otrzymanie kleju o odpowiednich właściwościach dostosowanego m.in. do łączonego materiału, czy też warunków eksploatacji [2,6,7,8,9].

Celem badań było określenie wpływu rodzaju żywicy i utwardzacza (rodzaju kleju) na wytrzymałość połączeń klejowych wybranych materiałów konstrukcyjnych.

## 2. Metodyka badań

### 2.1. Charakterystyka klejów epoksydowych

Do wykonania połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej wykorzystano kilka rodzajów klejów epoksydowych przygotowanych poprzez mieszanie żywicy epoksydowej z utwardzaczem. Kleje te zostały wykonane z żywic: Epidianu 53 i Epidianu 57 oraz przy użyciu utwardzaczy: PAC, Z-1 oraz PF. Dodanie do żywicy utwardzacza powoduje inicjację procesu utwardzania spoiny, prowadzącego do przemiany kleju ze stanu ciekłego w stan stały [1,2].

Epidian 57 jest przezroczystą żywicą o charakterystycznym żółtym lub ciemnobrązowym zabarwieniu. Pełni funkcję bazy kleju uniwersalnego stosowanego na zimno w temperaturze  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ , do klejenia metali, szkła, ceramiki, termoutwardzalnych tworzyw polimerowych, skóry i tym podobnych. Dodanie do Epidianu 57 utwardzacza PAC, Z-1 lub PF spowoduje powstanie kleju dwuskładnikowego, przy czym konieczne jest uwzględnienie „czasu życia” kleju. Klej należy przygotowywać w niewielkich ilościach tuż przed użyciem, gdyż razem z upływającym czasem traci on

swoje właściwości. Żywotność kleju Epidian 57/Z-1 wynosi blisko półtorej godziny, a Epidianu 57/PAC oscyluje w granicy kilku godzin [10,11].

Epidian 53 jest żywicą stosowaną jako baza kleju przeznaczonego, tak jak Epidian 57, do klejenia na zimno różnych materiałów konstrukcyjnych. Dodatkowo, ze względu na to, że spoina taka jest mało odporna na odkształcenia, klej ten znajduje zastosowanie przy tworzeniu konstrukcji sztywnych. Spoina zawierająca Epidian 53 charakteryzuje się korzystnymi właściwościami elektroizolacyjnymi, wymaganymi między innymi w elektronice i radiotechnice.

Dodanie do żywicy utwardzacza PAC powoduje powstanie spoiny klejowej charakteryzującej się większą elastycznością niż w przypadku utwardzacza Z-1. Klej taki posiada wysoką wytrzymałość na ścinanie. Utwardzacz PAC jest składnikiem klejów stosowanych do łączenia elementów narażonych na powstawanie odkształceń, między innymi do łączenia cienkich blach, gumy z metalem.

Utwardzacz Z-1, w którego skład wchodzi trójetyloczteroamina, ma postać jasnożółtej cieczy o charakterystycznym ostrym i nieprzyjemnym zapachu. Zastosowanie utwardzacza Z-1 do utwardzania żywicy epoksydowej Epidian 57 pozwala na uzyskanie bardziej sztywnej spoiny niż stosując utwardzacz PAC [4,7].

Utwardzacz PF stosuje się w tych przypadkach, w których wymagana jest niższa lepkość i dość krótki czas żelowania. Dodanie utwardzacza PF do żywicy powoduje powstanie spoiny mniej elastycznej niż ta powstała z

Tabela 1. Opis klejów wykorzystanych w badaniach

Lp.	Żywica	Stosunek ilościowy	Utwardzacz	Oznaczenie kleju
1	Epidian 57	1:1	PAC	Epidian 57/PAC/1:1
2	Epidian 57	10:1	Z-1	Epidian 57/Z-1/10:1
3	Epidian 57	10:5	PF	Epidian 57/PF/10:5
4	Epidian 53	10:5	PAC	Epidian 53/PAC/10:5
5	Epidian 53	10:1	Z-1	Epidian 53/Z-1/10:1
6	Epidian 53	10:4	PF	Epidian 53/PF/10:4

utwardzaczem PAC, jednakże charakteryzującej się większą odpornością na ściskanie, wytrzymałością cieplną, a także chemoodpornością [1].

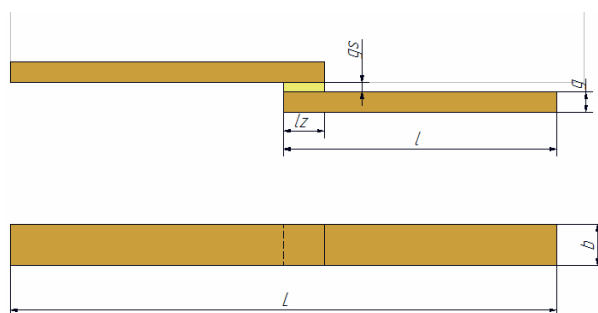
Informacje dotyczące rodzaju, stosunku ilościowego żywica/utwardzacz oraz oznaczenia zastosowanych w badaniach rodzajów klejów (kompozycji klejowych), przedstawiono w tabeli 1.

Mieszania żywicy i utwardzacza dokonano w odpowiednich stosunkach, pozwalających na otrzymanie kleju o oczekiwanych właściwościach. Zbyt duża lub zbyt mała ilość utwardzacza w stosunku do żywicy może niekorzystnie wpływać na właściwości spoiny klejowej, powodując zmniejszenie wytrzymałości cieplnej oraz mechanicznej, a także spadek odporności chemicznej. Dlatego konieczne jest uwzględnienie określonego stosunku stechiometrycznego żywica/utwardzacz, zależnego od rodzaju żywicy i rodzaju utwardzacza.

## 2.2. Wykonanie połączeń klejowych

Schemat próbek połączeń klejowych wykonanych z użyciem różnych klejów epoksydowych wraz z uwidocznionym kształtem przedstawiono na rys. 1. Wartości wielkości charakteryzujących poniższy rysunek zamieszczono w tabeli 2.

Przygotowanie powierzchni próbek polegało na obróbce mechanicznej za pomocą ściernych narzędzi nasypowych. Zastosowano papier ścierny P320, wykonując ruchy kołowe, powtarzane trzydziestokrotnie na każdej powierzchni łączonych elementów, przy czym po obróbce uzyskano strukturę powierzchni nieukierunkowaną. Następnie, powierzchnie próbek blach zostały oczyszczone trzykrotnie środkiem odtłuszczającym Loctite 7061. Na tak przygotowaną próbkę został nałożony klej.



Rys. 1. Schemat badanych połączeń klejowych

Połączenia klejowe wykonano w temperaturze otoczenia  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , przy wilgotności powietrza wynoszącej  $30 \pm 32\%$ . Natomiast nacisk wywierany na połączenie podczas utwardzania wynosił  $0,03 \text{ MPa}$ , a czas sezonowania – 168 godzin.

## 2.3. Badania wytrzymałościowe

Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [12]. W celu wykonania badań wytrzymałości, przygotowane próbki połączeń klejowych zamocowano w uchwytych śrubowo-klinowych maszyny. Tak zamocowane połączenia następnie poddano próbie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu, aż do momentu zniszczenia kleju.

## 3. Wyniki badań i ich analiza

### 3.1. Wytrzymałość połączeń klejowych

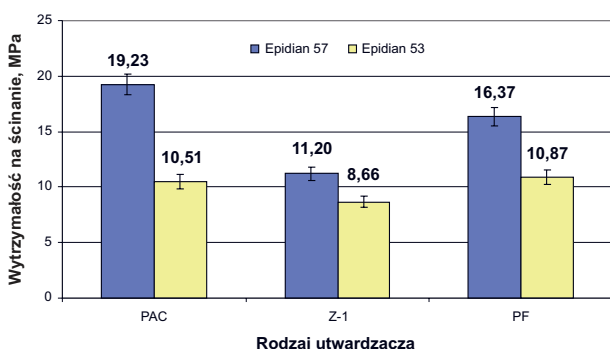
Porównanie wytrzymałości połączeń klejowych na ścinanie przy rozciąganiu dla badanych rodzajów kleju zamieszczono na rys. 2.

Na podstawie wyników wytrzymałości badanych połączeń klejowych (rys. 2), zauważo-

Tabela 2. Charakterystyczne wymiary połączenia klejowego

Długość zakładki $l_z$ , mm	Grubość próbki $g$ , mm	Szerokość próbki $b$ , mm	Długość sklejoną próbek $L$ , mm	Grubość spoiny $g_s$ , mm	Długość próbki $l$ , mm
$16 \pm 1,96$	$0,98 \pm 0,01$	$20 \pm 0,09$	$183,37 \pm 2,54$	$0,07 \pm 0,04$	$100 \pm 0,98$

no, że największą wytrzymałość na ścinanie przy rozciąganiu osiągnęły próbki klejone klejem Epidian 57/PAC/1:1. Wytrzymałość ta przekroczyła 19 MPa, przewyższając wyniki otrzymane przez pozostałe kleje. Podczas porównania zauważono także, że kleje przygotowane na bazie żywicy Epidian 57, charakteryzują się wyższą wytrzymałością niż kleje za-



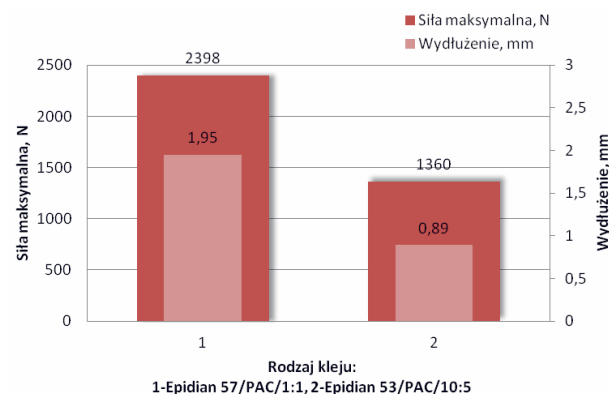
Rys. 2. Porównanie wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych wykonanych za pomocą badanych rodzajów klejów epoksydowych

wierające żywicę Epidian 53. Przykładowo dla kleju Epidian 53/PAC/10:5, wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych za jego pomocą stanowi 55% wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych przy wykorzystaniu Epidianu 57/PAC/1:1.

Największe różnice obserwuje się w przypadku zastosowania utwardzacza PAC. Wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kleju Epidian 53/PAC/10:5 stanowi 55% wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanego za pomocą kleju Epidian 57/PAC/1:1. Natomiast najmniejsze różnice wykazują połączenia wykonane przy użyciu utwardzacza Z-1. Potwierdzeniem tego może być wytrzymałość osiągana przez połączenie klejone klejem Epidian 53/Z-1/10:1 stanowiąca 77% wytrzymałości połączenia klejonego Epidianem 57/Z-1/1:1. Można stwierdzić, że oprócz rodzaju żywicy, to także rodzaj utwardzacza wykazuje istotny wpływ na wytrzymałość połączenia klejowego.

### 3.2. Siła maksymalna i wydłużenie

Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu kompozycji zawierających utwardzacz PAC i różne żywice, zamieszczono na rys. 3.

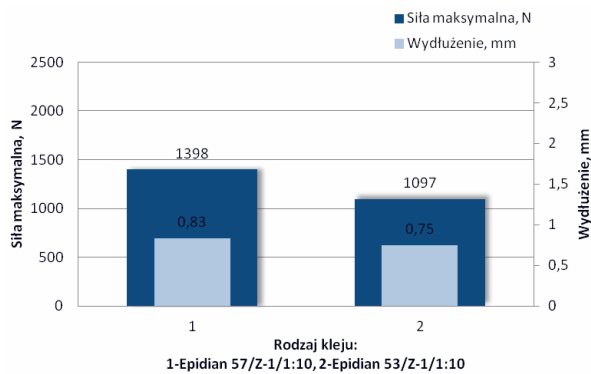


Rys. 3. Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych, zawierających utwardzacz PAC: Epidian 57/PAC/1:1 i Epidian 53/PAC/10:5

Na podstawie rezultatów zamieszczonych na rys. 3 zauważono, że większym wydłużeniem spoiny klejowej, podczas zastosowania kleju epoksydowego z utwardzaczem PAC, charakteryzuje się połączenie wykonane na bazie żywicy Epidian 57. Wynosi ono 1,95 mm i tym samym przewyższa wydłużenie spoiny kleju Epidianu 53/PAC/10:5 ponad dwukrotnie, ponieważ wydłużenie opisujące klej Epidian 53/PAC/10:5 stanowi 46% wydłużenia kleju Epidian 57/PAC/1:1.

Siła maksymalna otrzymana podczas badań wytrzymałościowych w przypadku połączeń klejowych wykonanych za pomocą kleju Epidian 57/PAC/1:1 wynosi 2398 N. Siła maksymalna uzyskana dla kleju Epidian 53/PAC/10:5 stanowi 57% wartości siły maksymalnej (niszczącej) połączenie wykonane przy wykorzystaniu kleju Epidian 57/PAC/1:1.

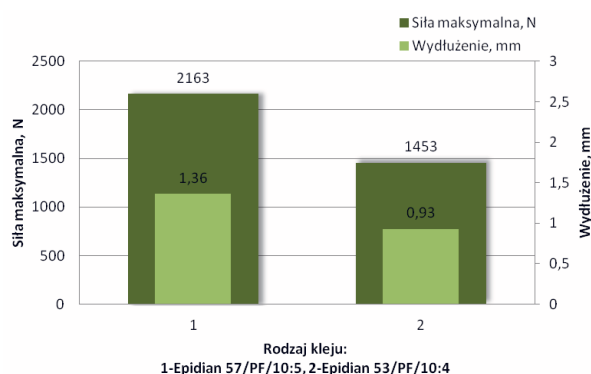
Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu utwardzacza Z-1 i różnych żywic, zaprezen-



Rys. 4. Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych, zawierających utwardzacz Z-1: Epidian 57/Z-1/10:1 i Epidian 53/Z-1/10:1

wano na rys. 4. Zestawienie to obejmuje klej Epidian 57/Z-1/10:1 oraz klej Epidian 53/Z-1/10:1.

Zestawiając dane otrzymane dla utwardzacza Z-1 i różnych żywic (rys. 4) zaobserwowano, że większe wydłużenie dotyczy kleju Epidian 57/Z-1/10:1 i wynosi ono 0,83 mm, a siła maksymalna wynosi 1398 N. Zauważono niewielką różnicę w otrzymanych wartościach wydłużenia w zależności od rodzaju zastosowanej żywicy epoksydowej. Potwierdzeniem może być procentowe porównanie, według którego wydłużenie oraz siła maksymalna w przypadku połączeń klejowych wykonanych za pomocą kleju Epidianu 53/Z-1/10:1 stano-



Rys. 5. Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych, zawierających PF: Epidian 57/PF/10:5 i Epidian 53/PF/10:4

wią odpowiednio 90% oraz 78% wartości otrzymanych w przypadku połączeń klejowych wykonanych za pomocą kleju Epidianu 57/Z-1/10:1.

Porównanie siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu klejów, zawierających utwardzacz PF i różne żywicy, zamieszczono na rys. 5.

W wyniku porównania siły maksymalnej i wydłużenia połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych zawierających utwardzacz PF (rys. 5) zauważono, że wyższymi wartościami cechują się połączenia wykonane z wykorzystaniem kleju na bazie żywicy Epidian 57. Wydłużenie tych spoin klejowych wyniosło 1,36 mm, a siła maksymalna przekroczyła 2100 N. Wartość wydłużenia kleju Epidian 53/PF/10:4 stanowi 68% wydłużenia kleju Epidian 57/PF/10:5, przy czym podobne wyniki otrzymano porównując siłę maksymalną (niszczącą połączenia).

Po dokonaniu analiz poszczególnych wykresów, ustalono, że wraz ze wzrostem siły niezbędnej do określenia wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych, zwiększa się wydłużenie spoiny klejowej. Jego największą wartość osiągnęły próbki klejone za pomocą kleju Epidian 57/PAC/1:1. Klej ten, uzyskując wydłużenie na poziomie 1,95 mm, znacznie przewyższył wielkości wydłużenia osiągane przez pozostałe kleje. Natomiast najmniejszą wartość wydłużenia charakteryzują się połączenia wykonane przy użyciu kleju Epidian 53/Z-1/10:1. Wyniosło ono zaledwie 0,75 mm, co było skutkiem zniszczenia połączenia klejowego przy sile 1097 N. Różnica pomiędzy największym, a najmniejszym wydłużeniem wyniosła ponad 1 mm. Wśród badanych klejów wyróżnił się także klej Epidian 57/PF/10:5, o wartości wydłużenia równej 1,36 mm. Pozostałe kleje uzyskały pośrednie wyniki.

Otrzymane wyniki badań stanowią potwierdzenie rezultatów przedstawionych w literaturze dotyczących właściwości klejów. Kleje epoksydowe zawierające utwardzacz PAC są bardziej elastyczne niż kleje przygotowane z utwardzaczem Z-1, natomiast klej zawiera-

jący utwardzacz PF przyjmuje wartości pośrednie.

#### 4. Podsumowanie

Dokonując analizy wyników badań, otrzymanych podczas badań wytrzymałościowych połączeń klejowych, zauważono istotny wpływ rodzaju kleju na jakość i wytrzymałość połączeń klejowych. Wytrzymałość połączeń jest ściśle związana z siłą niszczącą połączenia (siłą maksymalną) oraz z wydłużeniem spoiny. Najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi wykazał się klej wykonany na bazie żywicy Epidian 57 oraz utwardzacz PAC. Otrzymano wyniki o wartościach znacznie przewyższających wytrzymałość uzyskaną przez pozostałe kleje. Wydłużenie spoiny wykonanej przy pomocy Epidianu 57/PAC/1:1 wyniosło 1,95 mm. Maksymalna siła niszcząca połączeń klejowych dla tego kleju wynosiła 2398 N, a wytrzymałość na ścinanie – 19,23 MPa. Połączenia wykonane z zastosowaniem kleju Epidianu 53/Z1-1/10:1 uzyskały najmniejszą wytrzymałość. Badane wielkości klasyfikowały się na poziomie: wydłużenie spoiny klejowej 0,75 mm, siła niszcząca 1097 N oraz wytrzymałość 8,66 MPa. Otrzymane wyniki mogą wskazywać na możliwość zastosowania badanych klejów w zależności od potrzeb ich wykorzystania, jako bardziej elastycznych lub bardziej sztywnych.

#### Literatura

1. Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Piełuchowski J.: *Chemia i technologia żywic epoksydowych*. WNT, Warszawa 2002 r.
2. Fink J.K.: *Epoxy resin*. Chapter 3 in: *Reactive Polymers Fundamentals and Applications*. A volume in *Plastics Design Library*, 2005, 139-240.
3. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
4. Cagle Ch. V.: *Kleje i klejenie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
5. Kuczmaszewski J.: *Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia*. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1990.
6. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Badania porównawcze efektów modyfikacji żywic epoksydowych napelniaczami o dużym stopniu rozdrobnienia dla wybranych utwardzaczy*. *Przetwórstwo Tworzyw*, nr 5/2012, s. 500-504.
7. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Klejenie blach ocynkowanych*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
8. Jintao W., Zhi-Yang B, Cun-Jin X., Bo-Geng L., Hong F.: *Preparation, curing kinetics, and properties of a novel low-volatile starlike aliphatic-polyamine curing agent for epoxy resins*. *Chemical Engineering Journal* 171, 2011, 357–367.
9. Morancho J.M., Cadenato A., Ramis X., Fernández-Francos X., Salla J.M.: *Thermal curing and photocuring of an epoxy resin modified with a hyperbranched polymer*. *Thermochimica Acta* 510, 2010, 1–8.
10. <http://epidian.pl/index.html> (10.2013)
11. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Określenie właściwości mechanicznych spoin klejowych*. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3 – 4/2004 r., s. 95-97.
12. DIN EN 1465 Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.