

Anna RUDAWSKA<sup>1</sup>, Monika CHMIEL<sup>2</sup>, Tomasz WARDA<sup>3</sup>, Izabela MITURSKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: a.rudawska@pollub.pl

<sup>2</sup> mgr inż. Monika Chmiel, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: monikaa.chmiel@wp.pl

<sup>3</sup> mgr inż. Tomasz Warda, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: t.warda@pollub.pl

<sup>4</sup> mgr inż. Izabela Miturska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: i.miturska@pollub.pl

## Wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z określeniem wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej wykonanych za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych. Do wykonania klejów zastosowano dwa rodzaje żywic epoksydowych Epidian 53 oraz Epidian 57 oraz jeden rodzaj utwardzacza PAC. Przygotowano po trzy warianty każdej kompozycji klejowej, różniące się ilością utwardzacza w kompozycji. Stosunek ilościowy żywicy do utwardzacza wynosił: 100:50, 100:80 oraz 100:100. Podczas badań doświadczalnych przeprowadzono badania wytrzymałościowe zgodnie z normą DIN EN 1465. Porównując wyniki badań wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przygotowanych za pomocą analizowanych klejów zauważono, że lepsze efekty uzyskano przy wykorzystaniu kleju zawierającego żywicę epoksydową Epidian 57.

**Słowa kluczowe:** kompozycja klejowa, żywica epoksydowa, utwardzacz, połączenie klejowe, wytrzymałość

### INFLUENCE OF THE TYPE OF ADHESIVE ON THE STAINLESS STEEL SHEETS BONDED JOINTS STRENGTH

**Abstract:** The article presents issues related to the determination the strength of adhesive joints of stainless steel sheets which was made using two types of epoxy adhesives. Epidian 53 and 57 Epidian two types of epoxy resins and one type of PAC hardener were used to prepare epoxy adhesives. Three variants each adhesive composition with different amount of hardener in the composition were used. The quantitative ratio of resin to hardener was: 100:50, 100:80 and 100:100. The strength test was conducted in accordance with DIN EN 1465. The comparison analysis of the shear strength test results of adhesive joints of stainless steel sheets prepared using adhesives was noted that better results are achieved by using adhesive containing Epidian 57 epoxy resin.

**Keywords:** adhesive compounds, epoxy resin, hardener, bonded joint, strength

## 1. WPROWADZENIE

Technologia klejenia jest to jedna z najstarszych technik łączenia [1,2]. Dzięki wprowadzeniu klejów na rynek otrzymano wiele korzyści wynikających z ich stosowania. Kleje nie powodują niszczenia powierzchni łączonych

materiałów [3]. Zastosowanie klejenia pozwala na uniknięcie wielu kosztownych operacji wykańczających powierzchni wyrobów, np. piaskowania, czy malowania. Eliminacja wymienionych czynności wspomaga także oszczędność czasu produkcji. Kolejną zaletą stosowania klejów jest otrzymywanie wytrzy-

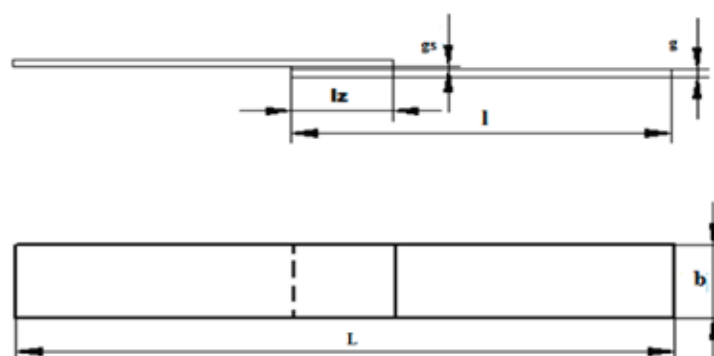
malszej konstrukcji poprzez wyeliminowanie czynności dodatkowych, niezbędnych przy (wierceniu) otworów na śruby, kołki, nity. Istnieje także możliwość otrzymania lekkich konstrukcji, łączenia różnego rodzaju materiałów [4,5]. Ponadto jest ułatwiona produkcja wyrobów o nietypowych kształtach albo o bardzo małych wymiarach, przy czym stwarzane są dogodne warunki równoczesnego klejenia oraz uszczelniania. Istotną zaletą jest możliwość stosowania unikalnych własności klejów [3,6,7]. Różnorodność ta umożliwia bardziej właściwy wybór rodzaju kleju, technologii klejenia (warunki utwardzania), właściwości spoiny (odporność cieplna, odporność chemiczna, odporność zmęczeniowa, elastyczność) [1,8,9]. Znane są kleje, u których utwardzanie następuje zarówno pod wpływem wilgoci, jak i jej braku, pod wpływem tlenu, jak i w środowisku beztlenowym oraz pod wodą, a także w ujemnych temperaturach [1].

Celem pracy jest określenie wpływu rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej, stosując wybrane warianty kompozycji klejowej, zawierające różne ilości utwardzacza.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. CHARAKTERYSTYKA POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Do klejenia wykorzystano próbki wykonane ze stali nierdzewnej. Badaniom wytrzymałościowym poddano próbki ze stali nierdzewnej o wymiarach 100 x 20 x 1,50 mm. Wykonano 36 połączeń zakładkowych. Kształt oraz wymiary badanych próbek przedstawiono na rys. 1. Wartości wielkości zobrazowanych rys. 1, wykonanych połączeń klejowych po dokonaniu pomiarów suwmiarką elektroniczną, zamieszczono w tab. 1.



Rys. 1. Badane połączenia klejowe blach ze stali nierdzewnej  
Fig. 1. The test adhesive joints of stainless steel sheets

Tab. 1. Wymiary rzeczywiste badanych połączeń klejowych

Tab. 1. The dimensions of the real tested adhesive joints

Grubość próbki g, mm	Szerokość próbki b, mm	Długość spoiny klejowej lz, mm	Grubość spoiny gs, mm	Długość próbki L, mm
1,50±0,10	20±0,17	20±1,13	0,1±0,03	100±2,18

W celu określenia wartości długości zakładki połączenia klejowego, dokonano obliczenia granicznej długości zakładki. W tym celu wykorzystano wzór (1), na podstawie którego długość zakładki przyjmuje się poprzez zaokrąglenie wartości otrzymanej w wyniku obliczeń [3]:

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{E \cdot g \cdot \theta_s}{2G_k}} \quad (1)$$

gdzie:  $l_{gr}$  - długość graniczna zakładki, E - współczynnik sprężystości wzdłużnej łączonych materiałów,

$g$  – grubość klejonych blach,  $g_s$  – grubość spoiny klejowej,  $G_k$  – współczynnik sprężystości poprzecznej kleju.

W wyniku przeprowadzenia obliczeń przyjęto długość zakładki spoiny klejowej wynoszącą  $l_z = 20$  mm.

## 2.2. PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI DO KLEJENIA

Jako pierwszy etap przygotowania powierzchni do klejenia wykonano usunięcie zadziorów i nierówności na powierzchni próbek za pomocą pilnika. Powierzchnie łączonych próbek przed procesem klejenia poddano obróbce mechanicznej papierem ściernym P320, a następnie odtłuszczono preparatem Loctite 7063. Obróbkę papierem ściernym P320, wykonano według następujących etapów:

- umieszczenie papieru ściernego w przyrządzie ułatwiającym ręczną obróbkę próbek,
- wykonywanie okrężnych ruchów przyrządu na powierzchniach próbek,
- powtarzanie czynności, aż do uzyskania pożądanego efektu (około 40 okrężnych ruchów).

Do ostatniego etapu przygotowania powierzchni zaliczono odtłuszczanie próbek za pomocą preparatu Loctite 7063. Do głównych etapów takiego zabiegu należy:

- spryskanie odtłuszczaczem Loctite 7063 powierzchni próbek,

- wytarcie wilgotnych powierzchni czystym papierem w celu usunięcia zanieczyszczeń,
- ponowne spryskanie w pozycji pionowej powierzchni w celu umożliwienia łatwiejszego spłynięcia środka odtłuszczającego,
- kolejne spryskanie oraz oczekiwanie na wyparowanie rozpuszczalnika.

Po wykonaniu operacji przygotowania powierzchni (obróbki mechanicznej oraz odtłuszczania) przystąpiono do przygotowania oraz nanoszenia kleju na łączone blachy.

## 2.3. CHARAKTERYSTYKA KLEJÓW

Do wykonania połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej wykorzystano dwa rodzaje klejów epoksydowych Epidian 53/PAC oraz Epidian 57/PAC. Do przygotowania klejów użyto dwa rodzaje żywic epoksydowych Epidian 53 oraz Epidian 57 oraz jeden rodzaj utwardzacza PAC. Przygotowano po trzy warianty dla każdej kompozycji klejowej, różniące się ilością utwardzacza w kompozycji. Stosunek ilościowy żywicy do utwardzacza wynosił: 100:50, 100:80 oraz 100:100. Stechiometryczna ilość utwardzacza PAC w przeliczeniu na 100 cz. wag. żywicy wynosi w obu przypadkach żywic od 50 do 80 [10,11]. Wykorzystane w badaniach kleje zaprezentowano w tabeli 2 oraz na rys. 2.

Tab. 2. Kompozycje klejowe wykorzystane podczas badań

Tab. 2. The adhesive compounds used during the test

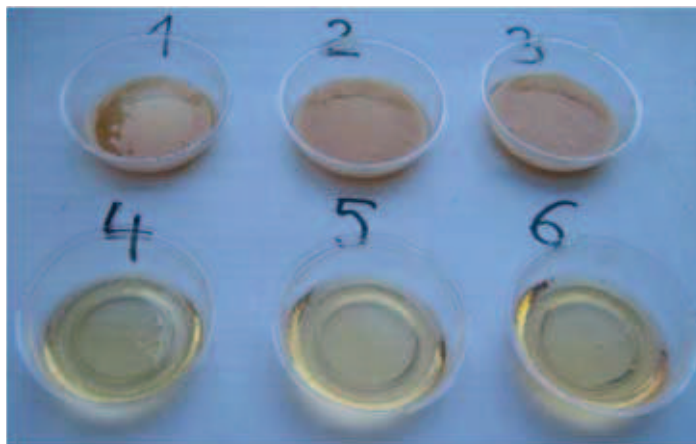
Oznaczenia próby	Rodzaj żywicy	Rodzaj utwardzacza	Ilość utwardzacza na 100 części wagowych żywicy	Oznaczenie kompozycji klejowej
1-6	Epidian 57	PAC	100:50	Epidian 57/PAC/100:50
7-12			100:80	Epidian 57/PAC/100:80
13-18			100:100	Epidian 57/PAC/100:100
19-24	Epidian 53	PAC	100:50	Epidian 53/PAC/100:50
25-30			100:80	Epidian 53/PAC/100:80
31-36			100:100	Epidian 53/PAC/100:100

Żywica Epidian 57 oraz Epidian 53 są kompozycjami epoksydowymi, które otrzymuje się poprzez zmodyfikowanie żywicy Epidian

5 [11]. Ponadto żywica epoksydowa Epidian 57 zawiera także specjalnie dobraną nasyconą żywicę poliestrową. Utwardzacz PAC otrzy-

muje się w wyniku polikondensacji poliamidów z dimerami estrów metylowych nienasyconych kwasów tłuszczowych. Utwardzanie z wykorzystaniem utwardzacza PAC powinno się przeprowadzać w pomieszczeniach, w których wilgotność nie przekracza 70%. Podczas stosowania utwardzacza PAC, ważne jest do-

kładne odważenie go i dozowanie, ponieważ niewielki nadmiar utwardzacza skraca czas żelowania, a duży nadmiar powoduje powstanie procesów, które doprowadzają do bezużyteczności kompozycji a w skrajnych przypadkach w wyniku osiągnięcia znacznej temperatury do samozapłonu.



Rys. 2. Kompozycje klejowe: 1 – 57/PAC/100:50, 2 – 57/PAC/100:80, 3 – 57/PAC/100:100, 4 – 53/PAC/100:50, 5 – 53/PAC/100:80, 6 – 53/PAC/100:100

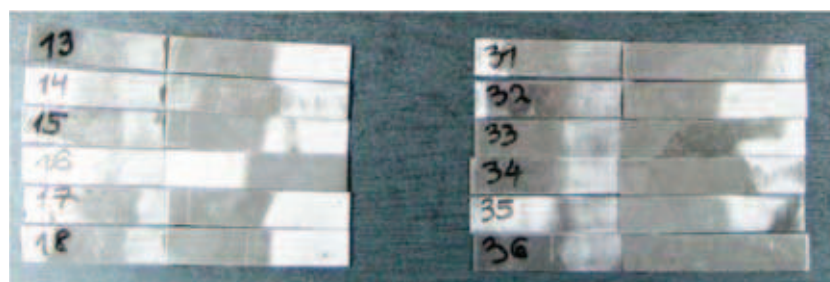
Fig. 2. Adhesive compounds: 1 – 57/PAC/100:50, 2 – 57/PAC/100:80, 3 – 57/PAC/100:100, 4 – 53/PAC/100:50, 5 – 53/PAC/100:80, 6 – 53/PAC/100:100

Utwardzacz PAC należy do grupy wolno reagujących utwardzaczy [10]. W temperaturze pokojowej czas żelowania wynosi ok. 180 minut. Czas żelowania w temperaturze otoczenia 20°C wynosi ok. 35 minut. Etap pierwszy to wstępne utwardzenie, uzyskuje się je po upływie około 3–4 godzin, w drugim etapie po upływie 48 godzin stopień utwardzenia wynosi ok. 80–90%. Całkowite utwardzenie trwa 7–14 dni. Można ten proces przyspieszyć stosując wyższą temperaturę po pierwszym etapie.

Sporządzenie klejów wykonano bezpośrednio przed użyciem w temperaturze pokojowej  $22\pm 1^\circ\text{C}$  i w niewielkich ilościach ze względu na czas życia kleju oraz inne właściwości.

#### 2.4. WARUNKI WYKONYWANIA I BADANIA POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Po przygotowaniu powierzchni do klejenia oraz po przygotowaniu kleju przystąpiono do wykonania połączeń klejowych (rys. 3), zgodnie z poniższymi etapami:



Rys. 3. Badane połączenia klejowe po 5 dniach utwardzania

Fig. 3. The test adhesive joints after 5 days curing

- nałożenie kleju na jedną z łączonych powierzchni za pomocą pędzelka,
- ustalenie złączonych elementów i wywarcie nacisku odważnikiem o masie 1kg,
- utwardzanie połączeń klejowych w temperaturze pokojowej  $22\pm 1^{\circ}\text{C}$  oraz wilgotności powietrza  $32\pm 2\%$  w czasie 5 dni.

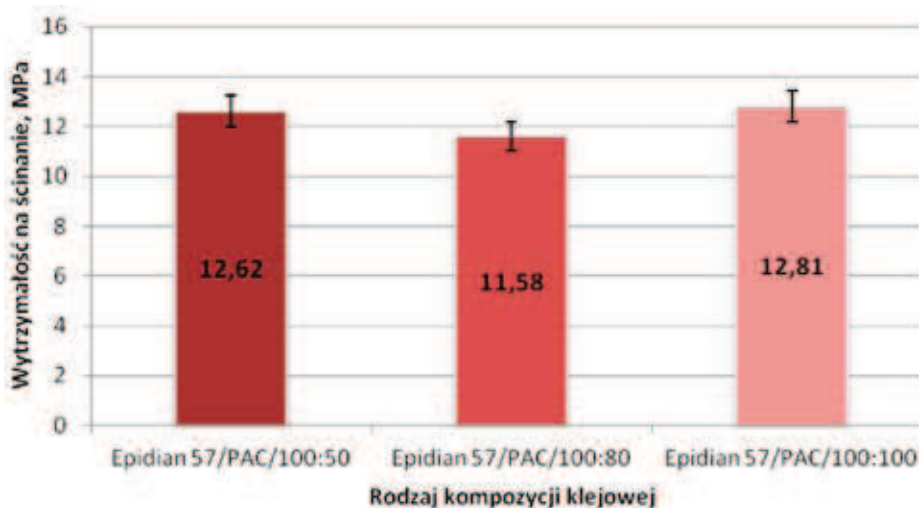
Badania wytrzymałościowe zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą EN DIN 1465 [12], z prędkością badania wynoszącą 5mm/min. W celu określenia wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej, przygotowane próbki zamocowano w uchwytach maszyny i poddawano stopniowemu rozciąganiu, aż do momentu ich zniszczenia.

### 3. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów przygotowanych z żywicy epoksydowej Epidian 57 oraz utwardzacza PAC w określonych stosunkach wagowych. Analizując wyniki badań wytrzymałości na ści-

nanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej (rys. 4), zauważono, że połączenia klejowe otrzymane przy użyciu kleju Epidian 57/PAC/100:50 charakteryzują się zarówno największą wytrzymałością na ścinanie, jak i największą powtarzalnością wyników wytrzymałościowych. Najmniejszą wytrzymałość na ścinanie, a jednocześnie największą wartością odchylenia standardowego odznacza się klej Epidian 57/PAC/100:100. Zauważa się, że wytrzymałość na ścinanie klejów zawierających żywicę epoksydową Epidian 57 z utwardzaczem PAC w określonych stosunkach wagowych są na zbliżonym poziomie.

Na rys. 5 zaprezentowano wyniki badań wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanych przy użyciu klejów epoksydowych zawierających żywicę epoksydową Epidian 53 oraz utwardzacz PAC w określonych stosunkach wagowych (tab. 2). Analizując wyniki badań wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej (rys. 5), zauważono, że największą wytrzymałością cechują się połączenia klejowe otrzymane przy użyciu kleju Epidian 53/PAC/100:10 i wynosi ona 6,98 MPa. Ma ona także największe odchylenie standardowe o war-

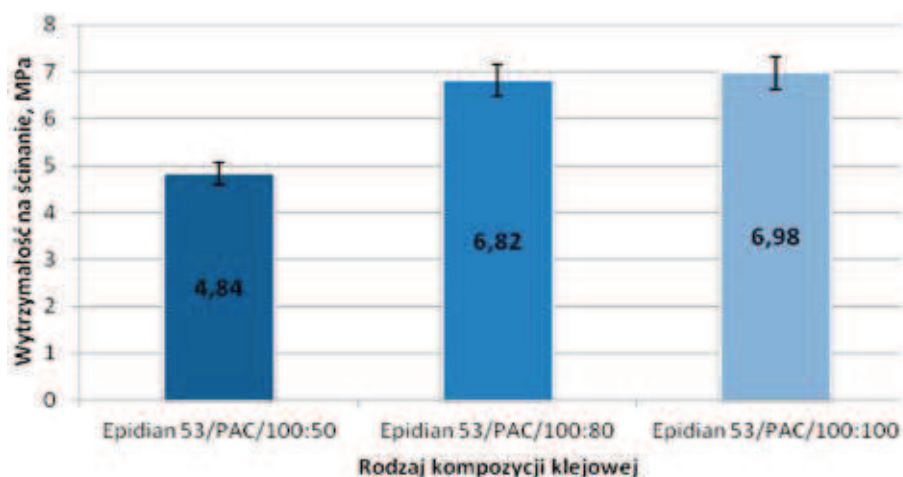


Rys. 4. Wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przy użyciu kompozycji klejowych zawierających żywicę epoksydową Epidian 57 oraz utwardzacza PAC

Fig. 4. The lap shear strength of adhesive joints of stainless steel sheets using the adhesive compounds comprising Epidian 57 epoxy resin and PAC hardener

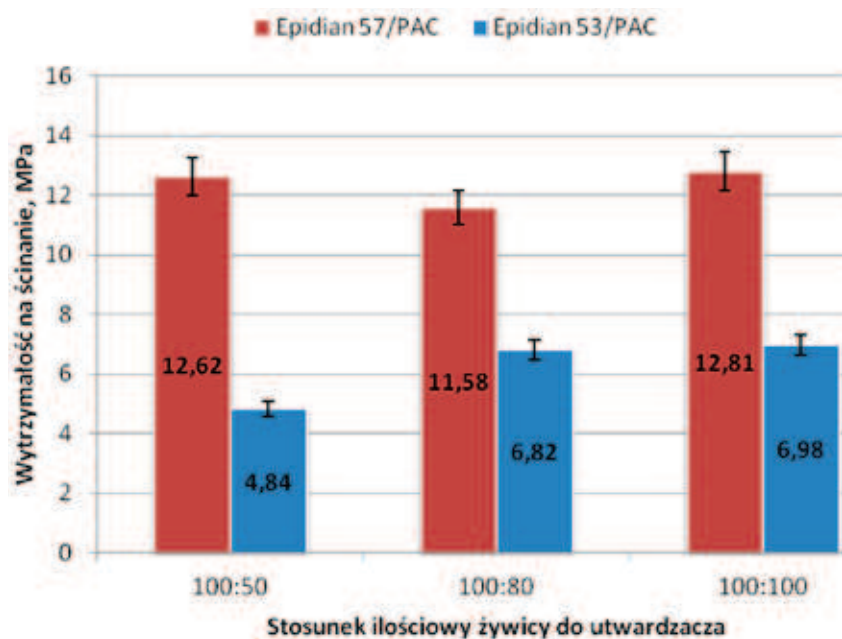
tości 2,05 MPa. Pozwala to stwierdzić, że powtarzalność będzie mniejsza niż w przypadku kompozycji klejowej o najmniejszym odchyleniu standardowym, którą jest klej Epidian 53/PAC/100:50, gdzie wynosi 1,17 MPa. Porównywalną wartość wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych wykonanych za pomocą

kompozycji klejowej Epidian 53/PAC/100:100, ma połączenie klejowe przy użyciu Epidian 53/PAC/100:80. Najniższą wartość wytrzymałości na ścinanie charakteryzują się połączenia klejowe przygotowane za pomocą kleju Epidian 53/PAC/100:50, co stanowi 70% wartości największej wytrzymałości.



Rys. 5. Wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przy użyciu kompozycji klejowych zawierających żywicę epoksydową Epidian 53 oraz utwardzacz PAC

Fig. 5. The lap shear strength of adhesive joints of stainless steel sheets using the adhesive compounds comprising Epidian 53 epoxy resin and PAC hardener



Rys. 6. Wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przy wykorzystaniu kleju Epidian 57/PAC oraz Epidian 53/PAC, zawierających różną ilość utwardzacza

Fig. 6. The lap shear strength of adhesive joints of stainless steel sheets using the Epidian 57/PAC and Epidian 53/PAC adhesives comprising a different amount of hardener

Na rys. 6 zestawiono wyniki badań wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych przy użyciu dwóch klejów epoksydowych zawierających żywicę epoksydową Epidian 57 i żywicę epoksydową Epidian 57 oraz utwardzacz PAC w różnych stosunkach ilościowych.

Analizując wyniki badań wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przygotowanych z użyciem klejów Epidian 57/PAC oraz Epidian 53/PAC o różnych stosunkach ilościowych żywicy do utwardzacza stwierdzono, że większą wytrzymałością odznaczają się połączenia klejowe otrzymane przy użyciu kleju zawierającego żywicę epoksydową Epidian 57, niezależnie od ilości w kompozycji utwardzacza. Przy zastosowaniu kleju Epidian 53/PAC/100:50 stwierdza się, że wytrzymałość połączeń wykonanych za pomocą tego kleju stanowi 38 % wytrzymałości na ścinanie połączeń, które zostały przygotowane za pomocą kleju Epidian 57/PAC/100:50. Przy zastosowaniu Epidian 53/PAC/100:80 stwierdza się, że stanowi ona 55 % wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych, które zostały przygotowane za pomocą kleju Epidian 57/PAC/100:80. Wykorzystując kompozycję klejową Epidian 53/PAC/100:100 zauważono, że stanowi ona 55 % wytrzymałości na ścinanie, które zostały przygotowane za pomocą kleju Epidian 57/PAC/100:100.

Uwzględniając wytrzymałość połączeń klejowych, na podstawie przedstawionych wyników, zaleca się zastosowanie kleju zawierającego żywicę epoksydową Epidian 57 do wykonania połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej, niezależnie od zwartej w kompozycji ilości utwardzacza PAC.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy analizowano wpływ rodzaju kompozycji klejowej na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej. W tym celu wykorzystano następujące kompozycje klejowe:

- Epidian 57/PAC w stosunkach ilościowych: 100:50, 100:80 oraz 100:100;

- Epidian 53/PAC w stosunkach ilościowych: 100:50, 100:80 oraz 100:100.

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- połączenia klejowe wykonane przy użyciu żywicy epoksydowej Epidian 57 z utwardzaczem PAC wykazały, że największą wytrzymałością charakteryzują się połączenia wykonane za pomocą kleju Epidianu 57/PAC/100:100, przy czym zbliżoną wartość uzyskano w przypadku połączeń przygotowanych z użyciem kleju 57/PAC/100:50,

- najmniejszą wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych przy użyciu żywicy epoksydowej Epidian 53 i utwardzacza PAC obserwuje się w przypadku połączeń klejowych wykonanych za pomocą kleju Epidian 53/PAC/100:50. Największą wytrzymałością charakteryzują się połączenia wykonane przy stosunku ilościowym żywicy i utwardzacza 100:80;

- uwzględniając wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej stwierdza się, że lepsze efekty uzyskano przy wykorzystaniu żywicy epoksydowej Epidian 57 z utwardzaczem PAC,

- w zależności od rodzaju żywicy epoksydowej wykazano różny wpływ stosunku ilościowego żywicy i utwardzacza. Uwzględniając żywicę epoksydową Epidian 57, nie występują znaczące różnice w wytrzymałości połączeń klejowych. Można sądzić, że w przypadku tej żywicy istnieje znacznie większy zakres ilościowy dotyczący korzystnej ilości dodatku utwardzacza do żywicy w porównaniu z żywicą epoksydową Epidian 53. Należy podkreślić, że stechiometryczne ilości utwardzacza PAC do żywicy epoksydowej Epidian 57 oraz Epidian 53 wynoszą od 50 do 80, a dla obu przypadków żywic, zastosowanie większej ilości utwardzacza niż określona stechiometryczna ilość pozwoliło na uzyskanie największej wytrzymałości badanych połączeń klejowych.

Podsumowując wyniki badań wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej przygotowanych na bazie żywicy epoksydowej Epidian 53 oraz Epidian 57 z utwardzaczem PAC stwier-

dzono, lepsze efekty uzyskano przy wykorzystaniu żywicy epoksydowej Epidian 57. Ponadto wykorzystując różne stechiometryczne ilości utwardzacza do żywic można uzyskać różną wytrzymałość, przy czym w przypadku kompozycji klejowej zawierającej żywicę Epidian 53 różnice te są większe.

## LITERATURA

1. Cagle Ch. V.: *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
2. Brockmann W., Geiß P.L., Klingen J., Schröder B.: *Adhesive bonding. Materials, Applications and Technology*. Wiley-Vch Press, Weinheim, Niemcy 2009, 5–10, 58–65,
3. Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P.: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987, 86–93, 155–156, 258–262.
4. da Silva L.F.M., Adams R.D.: *Adhesive joint at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 216–226.
5. Rudawska A., Kowalska B., Kubicki P.: *Wytrzymałość połączeń klejowych polimerów, wykonanych za pomocą wybranych klejów sztywnych i elastycznych*. Przetwórstwo Tworzyw 4/2015, 343–348.
6. Fitton M.D., Broughton J.G.: *Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25, 329–336.
7. Jialanella G.L., Shaffer II E.O.: *The effect of adhesive modulus on the performance of SMC lap shear joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 1171–1181.
8. Rudawska A. Cimek E.: *Wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych poliamidu PA6*. Przetwórstwo Tworzyw nr 3 (141)/17 2011 r., s.198–202.
9. Rudawska A., *Dobór rodzaju kleju w aspekcie wytrzymałości połączeń klejowych blach ocynkowanych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2005, s. 28–29.
10. Czub P. Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pieli-chowski J.: *Chemia i technologia żywic epoksydowych*. WNT, Warszawa 2002 r., 331–332, 335–351.
11. <http://www.zch.sarzynia.pl/epoksydy/utwardzacze.html>, (16.07.2015)
12. DIN EN 1465. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joints.

Publikację przyjęto do druku: 28.06.16