

Anna RUDAWSKA<sup>1</sup>, Paulina NIEWIADOMSKA<sup>2</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> inż. Paulina Niewiadomska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: paulininianie@o2.pl

## Badanie wpływu czasu życia wybranych epoksydowych kompozycji klejowych na wytrzymałość i odkształcalność w połączeniu zakładkowym

**Streszczenie:** Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu czasu życia kompozycji klejowych na wytrzymałość połączeń klejowych. Badania eksperymentalne polegały na określeniu wytrzymałości połączeń klejowych, utworzonych za pomocą dwóch rodzajów klejów, po zastosowaniu 5 różnych czasów życia przygotowanych klejów epoksydowych dwuskładnikowych. Kleje te składały się z dwóch rodzajów żywic epoksydowych Epidian 57 i Epidian 53 oraz utwardzacza Z-1, przygotowanych w określonych, takich samych proporcjach wagowych: Epidian 57/Z-1/100:10 i Epidian 53/Z-1/100:10, wynikających ze stosunku stechiometrycznego żywicy i utwardzacza. Badaniom wytrzymałościowym poddano połączenia klejowe jednozakładkowe próbek polietylenu PE HD 500. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono zgodnie z normą DIN EN 1465. Na ich podstawie stwierdzono, że rodzaj kleju, w połączeniu z różnym czasem jego życia, po którym nastąpiło aplikowanie tego kleju na powierzchnie łączone, wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych polietylenu.

**Słowa kluczowe:** klej epoksydowy, czas życia kleju, połączenie klejowe, wytrzymałość

THE TEST OF INFLUENCE OF POT LIFE OF SELECTED EPOXY ADHESIVE COMPOSITIONS ON THE STRENGTH AND DEFORMABILITY IN LAP-JOINT

**Abstract:** The aim of this experimental research was to determine the effect of pot life adhesive compositions on the strength of the bonded joints. Experimental test consisted of determining the strength of adhesive bonded joints formed from the two adhesives, after application of 5 different lifetimes of two-component epoxy adhesives. These adhesives are composed of two types of epoxy resins: Epidian 57 and Epidian 53 and the curing agent Z-1, prepared as the same proportions by weight: Epidian 57 / Z-1/100: 10 and Epidian 53/Z-1/100: 10, resulting from the stoichiometric ratio of resin and hardener. The single-lap bonded joints of PE HD 500 polyethylene were tested. The shear strength tests were carried out in accordance with DIN EN 1465. On the basis of results it was found that the type of adhesive in combination with various the pot life affects the strength of the polyethylene bonded joints.

**Keywords:** epoxy adhesive, pot life of adhesive, bonded joint, strength

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach wykorzystanie klejenia, jako metody łączenia elementów, zyskało bardzo duże zainteresowanie. Technologię klejenia charakteryzuje wiele zalet [1–3], a podstawową jest możliwość nieniszczącego spajania elementów, co wykorzystuje się m.in. w łączeniu części układów elektronicznych, gdzie wymagana jest duża dokładność i precyzja. Klejenie, oprócz zastosowań konstrukcyjnych, stosowana jest również podczas złączania elementów pełniących

funkcję dekoracyjną, np. meble. Kolejną zaletą jest skrócenie czasu produkcji, ponieważ wykorzystując klejenie, eliminuje się wykonanie operacji wykończeniowych. Większa powierzchnia przylegania łączonych elementów, powoduje równomierny rozkład naprężeń wewnętrznych, co wpływa na zwiększenie wytrzymałości konstrukcji. Zastosowanie materiałów adhezyjnych pozwala także na zmniejszenie masy konstrukcji. Jednak najistotniejszą zaletą technologii klejenia, jest możliwość łączenia ze sobą różnego rodzaju materiałów np. o nietypowych kształtach i wy-

miarach oraz metalu z niemetalem. Oprócz podstawowej funkcji kleje spełniają również dodatkowe funkcje, takie jak: uszczelnianie i izolowanie przed agresywnymi czynnikami środowiska [2,3].

Technologia klejenia składa się z kilku następujących po sobie etapów, warunkujących uzyskanie odpowiedniej wytrzymałość połączenia [4], wśród których wymienia się: przygotowanie powierzchni, przygotowanie klejów (dotyczy to przede wszystkim klejów wieloskładnikowych), nakładanie kleju, składanie i wywieranie nacisku na łączone elementy, utwardzanie, obróbka wykończeniowa oraz kontrola połączeń. Ważnym etapem jest przygotowanie klejów, które jest jednym z czynników technologicznych wpływającym na końcową wytrzymałość połączeń klejowych, a także, które jest ściśle związane z rodzajem i właściwościami kleju [1,3,5]. Kleje wieloskładnikowe (najczęściej kleje w postaci ciekłej lub półpłynnej) złożone są z wielu składników, m.in.: z żywicy (substancji klejącej), utwardzacza, aktywatora lub katalizatora procesu sieciowania, substancji modyfikujących i innych składników [2]. Przed naniesieniem na łączone powierzchnie wymienione składniki należy połączyć i wymieszać, aby uzyskać kompozycję (masę) klejową. Do tego celu stosuje się różne metody oraz oprzyrządowanie klejarskie [6,7]. Jednym z parametrów technologicznych związanych z przygotowaniem i nakładaniem kleju jest tzw. czas życia kleju, tj. czas od momentu zmieszania składników klejów do momentu, w którym traci on swoje właściwości i nie powinien być dalej wykorzystywany do łączenia elementów [1,2]. Ponadto podczas wykonywania połączeń klejowych istotna jest znajomość warunków utwardzania poszczególnych rodzajów

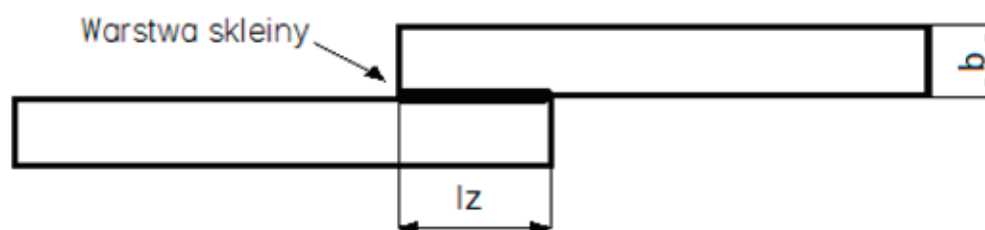
klejów [8–11]. W przypadku klejów epoksydowych, zawierających żywice epoksydowe, ważny jest dobór odpowiednich utwardzaczy, w celu uzyskania określonych właściwości [12–16], przy czym ważny jest również umiejętny dobór kleju do rodzaju łączonych materiałów [1,17–19].

W niniejszej pracy porównano wytrzymałość połączeń klejowych, w których zastosowano zmienny czas życia kompozycji klejowych. Takie czynniki, jak: przygotowanie powierzchni, obciążenie, rodzaj utwardzacza oraz proporcje składników klejów przyjęto takie same. Czynnikiem zmiennym był natomiast rodzaj żywicy epoksydowej – Epidian 53 i Epidian 57, dzięki czemu przygotowano dwa rodzaje klejów, oraz czas życia analizowanych kompozycji klejowych. Producent dla każdej z kompozycji klejowych określił inny czas użytkowania, po którym następuje pogorszenie właściwości użytkowych na skutek zmian lepkości, rozwarstwiania się itp. W badaniach podjęto celowe działania łączenia próbek klejem Epidian 53/Z-1/100:10 po godzinie. Dzięki temu było możliwe określenie wpływu dopuszczalnego czasu życia kleju na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych analizowanymi klejami.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. OPIS POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

W badaniach doświadczalnych zastosowano połączenia klejowe jednozakładkowe polietylenu PE HD 500. Schemat połączenia klejowego przedstawiono na rys. 1; przyjęto długość zakładki wynoszącą  $l_z = 14$  mm. Średnia szerokość łączonych elementów wynosiła 20 mm, a grubość 2,1 mm.



Rys. 1. Schemat zakładkowego połączenia klejowego

Fig. 1. Scheme of lap-bonded joint



Rys. 2. Przykładowe połączenia klejowe  
Fig. 2. The example of bonded joint

Na rys. 2 zamieszczono widok przykładowych połączeń klejowych.

## 2.2. CHARAKTERYSTYKA KLEJÓW EPOKSYDOWYCH

Do wykonania połączeń klejowych zastosowano dwa rodzaje klejów epoksydowych zawierających dwa rodzaje żywic epoksydowych: Epidian 53 oraz Epidian 57 oraz utwardzacz Z-1. Kompozycje klejowe zostały przygotowane w stosunku 100 części wagowych żywicy i 10 części wagowych utwardzacza. Oznaczenia klejów oraz wybrane ich właściwości zamieszczono w tabeli 1.

jest dłuższy i można tym klejem łączyć elementy do 60 minut od chwili zmieszania składników (żywicy i utwardzacza) [21].

Ponadto utwardzenie kleju Epidian 57 sprawia, że staje się on nieprzezroczysty i przyjmuje kolor kości słoniowej, co w niektórych zastosowaniach może być istotną informacją. Zastosowanie utwardzacza Z-1 umożliwia wykorzystanie tego kleju do łączenia konstrukcji wymagających pewnego stopnia elastyczności (choć do uzyskania większej elastyczności zaleca się stosowanie innych utwardzaczy), odporności na siły oddzierające oraz odkształcenia [20,21].

Tabela 1. Oznaczenia oraz wybrane właściwości klejów epoksydowych [20]

Table 1. Designation and selected properties of epoxy adhesives [20]

Nazwa kleju	Epidian 53/Z-1/100:10	Epidian 57/Z-1/100:10
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	80 – 110	65 – 75
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	65 – 75	70 – 80
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Min. 25	45–55
Czas żelowania, próbka 100g, temp. 20°C [min]	60	40

Epidian 53 i 57 są to modyfikowane żywice epoksydowe żywicy podstawowej Epidian 5 [20]. Zastosowany do przygotowania klejów utwardzacz Z-1 jest substancją szybko wchodzącą w reakcje z innymi środkami, a stosowany jest głównie do utwardzania żywic epoksydowych w temperaturze pokojowej. Wykazuje zdolność pochłaniania wody oraz dwutlenku węgla z powietrza [16,20,21].

Kompozycje klejowe składające się z żywicy epoksydowej Epidian 53 i utwardzacz Z-1 oraz

żywicy epoksydowej Epidian 57 oraz utwardzacz Z-1, zostały przygotowane w pojemniku, z wykorzystaniem wagi elektronicznej i zachowaniem proporcji 100 g żywicy i 10 g utwardzacza. Do przygotowania kleju wykorzystuje się najczęściej utwardzacz Z-1 w stosunku 100 części żywicy Epidian 53 do 10 części utwardzacza Z-1 i należy klej ten zużyć w ciągu 30 – 45 minut. Podobny stosunek stechiometryczny zalecany jest w odniesieniu do żywicy epoksydowej Epidian 57, choć czas życia tej kompozycji klejowej

### 2.3. WARUNKI WYKONYWANIA POŁĄCZEŃ

Pierwszym etapem wykonania połączeń klejowych było przygotowanie próbek polietylenu PE HD 500. Próbki o wymiarach 100 x 20 mm wycięto z płyty (1000 x 2000 mm) za pomocą przecinarki tarczowej. Krawędzie łączonych elementów zostały oczyszczone z zadziorów pilnikiem. Następnie powierzchnie próbek polietylenowych zostały poddane obróbce mechanicznej przy użyciu ściernego narzędzia nasypowego P320, a na każdej powierzchni wykonano 30 – 40 ruchów okrężnych. Przed nałożeniem kleju powierzchnie łączonych elementów odłuszczone środkiem odłuszczającym Loctite SF 7061 na bazie acetonu, zgodnie z procedurą przedstawioną w pracy [4].

W tabeli 2 zestawiono warunki wykonywania połączeń klejowych, a dotyczą one temperatury, wilgotności powietrza oraz analizowanego czasu życia kompozycji klejowej, czyli czasu, jaki upłynął od zmieszania żywicy i utwardzacza, do momentu jego aplikacji na łączone powierzchnie.

Proces utwardzania był realizowany jednostopniowo na zimno w temperaturze otoczenia (Tabela 2), a czas utwardzania spoiny klejowej w każdym wariantcie wynosił 7 dni. Po tym okresie przeprowadzono badania wytrzymałościowe, umożliwiające określenie wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych polietylenu. Próba wytrzymałościowa została przeprowadzona na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [22]. Dla każdego wariantu czasu życia kleju wykonano po 10 połączeń klejowych, co oznacza, że dla jednego rodzaju kleju wykonano 50 połączeń klejowych.

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Zestawienie otrzymanych wyników wytrzymałościowych połączeń klejowych polietylenu, wykonanych dwoma rodzajami klejów epoksydowych, uwzględniając zmienny czas życia kompozycji klejowej, po którym nakładano klej na łączone powierzchnie, przedstawiono na rys. 3.

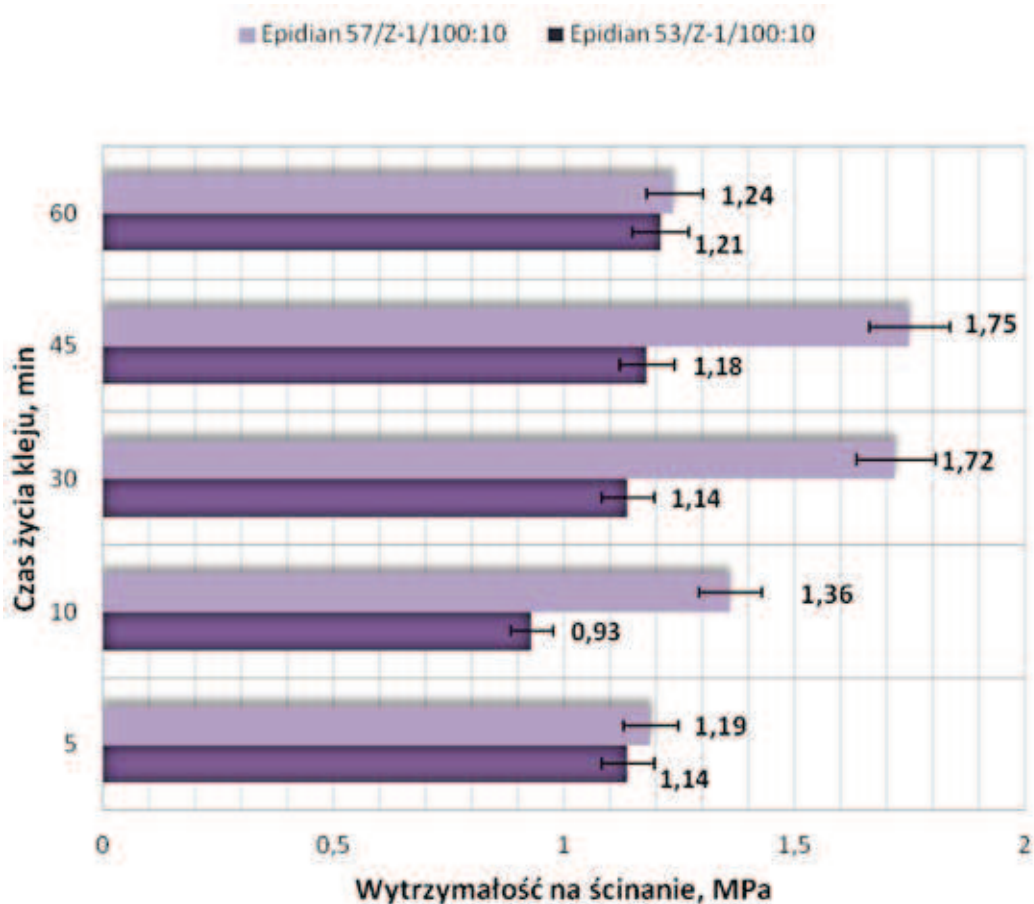
Z analizy wyników, zamieszczonych na rys. 3 wynika, że w każdym analizowanym wariantcie czasu życia kleju połączenia klejowe polietylenu przygotowane z użyciem kleju Epidian 57/Z-1/100:10 osiągnęły większą wytrzymałość niż połączenia wykonane za pomocą kleju Epidian 53/Z-1/100:10.

Dokonując analizy czasu życia klejów dla poszczególnych rodzajów klejów zauważa się, że:

- wytrzymałość połączeń klejowych polietylenu wykonanych za pomocą kleju Epidian 57/Z-1/100:10, po 5 minutach od zmieszania żywicy i utwardzacza, wynosi 1,19 MPa i wzrasta wraz ze wzrostem czasu życia kleju, poza ostatnim czasem, wynoszącym 60 minut,
- połączenia klejowe polietylenu, które powstały przy wykorzystaniu kleju Epidian 53/Z-1/100:10, uzyskały zbliżoną wartość wytrzymałości w analizowanych wariantach, a największą wytrzymałość na ścinanie osiągnęły po użyciu kleju po 60 minutach od momentu jego przygotowania do chwili jego nałożenia na łączone powierzchnie, zaś niekorzystnym czasem życia kleju jest czas 10 minut.

Tabela 2. Warunki wykonywania połączeń klejowych  
Table 2. The conditions of bonded joints preparation

Rodzaj kleju	Temperatura [°C]	Wilgotność powietrza [%]	Czas życia kleju [min]
Epidian 53/Z-1/100:10	21±2	22 – 23	5, 10, 30, 45, 60
Epidian 57/Z-1/100:10			



Rys. 3. Średnia wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych polietylenu wykonanych klejami: Epidian 53/Z-1/100:10 i Epidian 57/Z-1/100:10

Fig. 3. Shear strength mean of polyethylene bonded joints made of Epidian 53/Z-1/100:10 and Epidian 57/Z-1/100:10 adhesives

Różnica wytrzymałości połączeń klejowych polietylenu wykonanych dwoma rodzajami klejów, przy zastosowaniu czasu życia 5 minut jest niewielka i wynosi około 5%, przy czym czas ten jest niekorzystny dla połączeń klejowych polietylenu wykonanych za pomocą kleju Epidian 57/Z-1/100:10, gdyż osiągnęły one najmniejszą wytrzymałość.

Porównując wytrzymałość połączeń klejowych utworzonych z zastosowaniem 10 minutowego czasu życia obu rodzajów kleju, można stwierdzić, że jest zauważalna znaczna różnica wyników wytrzymałości tych połączeń i wynosi ona blisko 40%. Wytrzymałość połączeń, które powstały z użyciem kleju Epidian 53/Z-1/100:10, dla tego czasu życia kleju jest najmniejsza spośród wszystkich badanych wariantów czasu życia kleju. Wytrzymałość połączeń, które powsta-

ły z użyciem kleju Epidian 57/Z-1/100:10, dla tego wariantu czasu życia kleju, wzrosła o 12,5%, a z wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych za pomocą kompozycji klejowej Epidian 53/Z-1/100:10 zmniejszyła się o 18,4%.

Rozpatrując wytrzymałość połączeń klejowych utworzonych za pomocą kleju aplikowanego po 30 minutach od chwili zmieszania żywicy i utwardzacza do momentu jego aplikacji, w przypadku kleju Epidian 57/Z-1/100:10 osiąga się wzrost wytrzymałości o 21% w stosunku do poprzedniej serii (czasu życia kleju wynoszącego 10 minut). W oparciu o wyniki badań wytrzymałościowych próbek sklejonnych przy użyciu kleju Epidian 53/Z-1/100:10, zaobserwowano zwiększenie wytrzymałości do takiej samej wartości, jaką uzyskano po zastosowaniu czasu życia kleju wynoszącego 5 minut.

Z ekonomicznego punktu widzenia, lepszym rozwiązaniem jest aplikacja kleju po 5 minutach od chwili jego przygotowania, ponieważ pozwala to ograniczyć czas realizacji danej operacji montażowej.

Próbki sklezione po 45 minutach również uzyskały większą wytrzymałość na ścinanie, w porównaniu do poprzedniego wariantu czasu życia kleju (30 minut), jednak w obu wariantach klejów wzrost ten był niewielki. Połączenia klejowe utworzone za pomocą kompozycji klejowej Epidian 57/Z-1/100:10, uzyskały wzrost wytrzymałości w stosunku do poprzedniego czasu życia kleju o 1,8%, a odnosząc się do wyników wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych z użyciem kleju Epidian 53/Z-1/100:10, odnotowano wzrost wytrzymałości na ścinanie o 3,4% w stosunku do poprzedniego czasu życia kleju.

Zgodnie z informacjami przedstawianym w literaturze, klej Epidian 57/Z-1/100:10 po przekroczeniu 45 minut od połączenia składników, traci swoje właściwości i dlatego nie zaleca się jego wykorzystania podczas wykonywania połączeń klejowych. Wyniki badań połączeń klejowych sklejonnych po 60 minutach od przygotowania kleju potwierdzają te zalecenia, ponieważ w porównaniu do poprzedniego czasu, wytrzymałość na ścinanie zmniejszyła się o 29%. Natomiast połączenia klejowe utworzone za pomocą kleju Epidian 53/Z-1/100:10 wraz z wydłużeniem czasu życia kleju, charakteryzują się większą wytrzymałością na ścinanie; po 60 minutach czasu życia kleju, odnotowano jej wzrost o 2,5 %.

Dokonana analiza pozwala stwierdzić, że najkorzystniejszym czasem do łączenia polietylenu klejem Epidian 57/Z-1/100:10 jest jego zastosowanie po 45 minutach od chwili wymieszania składników. Wtedy osiąga on najlepszą wytrzymałość na ścinanie oraz może przenosić największą siłę, dzięki temu można uzyskać połączenie o najbardziej optymalnych parametrach wytrzymałościowych. Przy czym należy zauważyć, że równie wysoką wytrzymałość, różniącą się tylko nieznacznie, uzyskano

po zastosowaniu czasu życia kleju wynoszącego 30 minut. W tym przypadku korzystniejsze, ze względu na aspekty ekonomiczne, byłoby użycie kleju po 30 minutach, ponieważ kompozycja klejowa poprawia swoje właściwości o mniej niż 2%, a skrócenie operacji montażu o 15 minut pozwoli ograniczyć koszt jej wykonania oraz czas przygotowania określonej partii połączeń klejowych. Wytrzymałość połączeń klejowych utworzonych za pomocą kompozycji klejowej Epidian 53/Z-1/100:10, wzrasta wraz z wydłużeniem czasu określonego od chwili zmieszania składników kleju do jego aplikacji na łączone powierzchnie. Jedynie należy unikać klejenia po 10 minutach od momentu przygotowania kleju, gdyż wiąże się to z pogorszeniem wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych.

### 3.2. WYDŁUŻALNOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Uzyskane wyniki wydłużalności połączeń klejowych wykonanych dwoma rodzajami klejów, stosując jako zmienny czynnik czas życia kleju, zaprezentowano na rys. 4.

W przypadku wydłużalności połączeń klejowych zaobserwowano, że:

- dla najkrótszego oraz najdłuższego badanego czasu życia kleju, większą wydłużalność uzyskano dla połączeń wykonanych za pomocą kleju Epidian 53/Z-1/100:10 niż z użyciem kleju Epidian 57/Z-1/100:10; w przypadku czasu życia kleju wynoszącego 5 minut różnica wydłużalności wynosi około 35%, natomiast dla czasu życia kleju wynoszącego 60 minut – 46%,
- największą wydłużalność osiągnęły połączenia wykonane za pomocą kleju Epidian 53/Z-1/100:10, przy najdłuższym czasie życia wynoszącym 60 minut,
- w przypadku połączeń wykonanych klejem Epidian 57/Z-1/100:10, wraz ze wzrostem czasu życia kleju wzrasta wydłużalności połączeń, poza ostatnim przypadkiem – najdłuższym czasem życia kleju (60 minut),

choć wydłużalność połączeń klejowych dla tego rodzaju kleju jest porównywalna z czasem 10 minut i jest większa od wydłużalności uzyskanej przy najkrótszym czasie życia kleju (5 minut); można sądzić, że wraz ze wzrostem czasu życia kleju wzrasta jego elastyczność jako spoiny klejowej po procesie utwardzania,

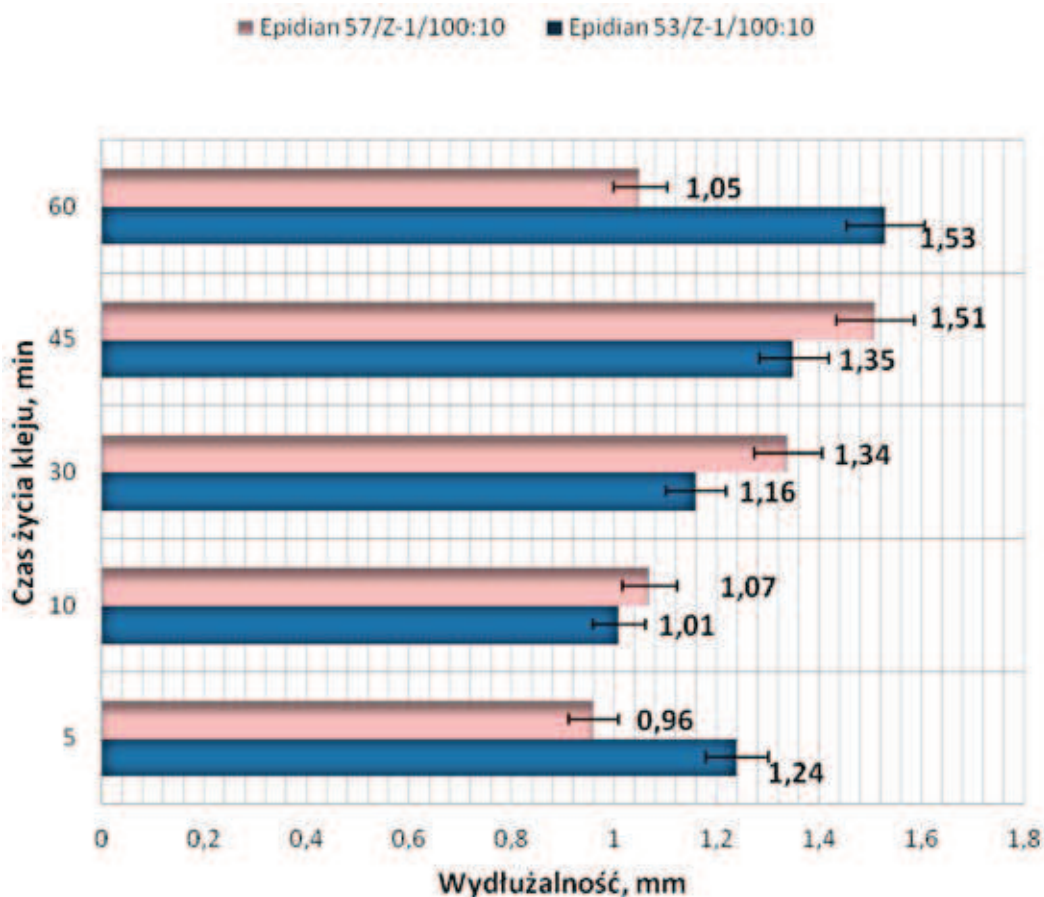
- podobną zależność uzyskano w przypadku połączeń klejowych przygotowanych z użyciem kleju Epidian 53/Z-1/100:10, wyłączając najkrótszy czas życia kleju wynoszący 5 minut, dla którego wydłużalność jest większa od wariantów czasu życia kleju: 10 i 30 minut.

Porównując uzyskane wyniki badań zauważono, że czasu życia kleju wpływa na wydłużal-

ność połączeń klejowych, przy czym zwiększenie czasu życia kleju powoduje wzrost elastyczności kleju (określoną poprzez wydłużenie odniesione do długości spoiny klejowej), choć zależne jest to od rodzaju kleju.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz przeprowadzonej analizy porównawczej stwierdzono, że rodzaj użytej żywicy epoksydowej oraz utwardzacz, w połączeniu z różnym czasem aplikowania kleju na powierzchnie łączone, wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych. Największą wytrzymałością cechowały się połączenia utworzone za pomocą kleju Epidian 57/Z-1/100:10, który



Rys. 4. Wydłużalność połączeń klejowych polietylenu wykonanych klejami: Epidian 53/Z-1/100:10 i Epidian 57/Z-1/100:10

Fig. 4. Elongation of polyethylene bonded joints made of Epidian 53/Z-1/100:10 and Epidian 57/Z-1/100:10 adhesives

został naniesiony na łączone powierzchnie polietylenowych próbek po czasie życia kleju 30 minut i 45 minut, liczonym od momentu zmieszania obu składników kleju. W oparciu o wyniki wytrzymałościowe stwierdzono, że czas życia kleju wynoszący 30 minut i 45 minut jest optymalny dla łączenia polietylenu PE HD 500 oraz kleju Epidian 57/Z-1/100:10, ponieważ uzyskuje się wtedy najwyższą wytrzymałość połączeń, przy czym podczas opracowywania technologii klejenia należy uwzględnić względy ekonomiczne, bowiem krótszy czas stosowania kleju zmniejsza czas i koszty wykonania połączeń. Natomiast nie zaleca się stosowania kleju w krótkim czasie po jego przygotowaniu (5 minut) oraz nadmiernie wydłużonym (60 minut). Należy także uwzględnić aspekt możliwości montażowych, gdyż dłuższy czas pozwala na większe możliwości ustalania elementów bez naruszenia więzi adhezyjnych kleju pomiędzy łączoną powierzchnią i klejem oraz więzi kohezyny kleju. Czasami w przypadku elementów o dużych wymiarach gabarytowych lub skomplikowanych kształtach wymagany jest dłuższy czas związany z prawidłowym ustaleniem tych elementów po nałożeniu kleju. Z tego względu konieczne jest zastosowanie kleju, charakteryzującego się dłuższym czasem życia.

Stosując do łączenia elementów z polietylenu klej Epidian 53/Z-1/100:10, należy unikać nakładania substancji po upływie 10 minut od chwili zmieszania składników kleju, ze względu na mniejszą wytrzymałość połączeń klejowych polietylenu w porównaniu do spoin utworzonych w pozostałych wariantach czasu życia kleju. Zauważono także, że oprócz wspomnianego czasu 10 minut, wytrzymałość połączeń klejowych, w których aplikowano klej po 5 minutach i 30 minutach od chwili jego przygotowania, osiągnęła taką samą wartość, a zwiększanie czasu życia kleju, powoduje wzrost wytrzymałości połączeń klejowych do maksymalnej wartości 1,21 MPa.

Ponadto, podczas projektowania technologii klejenia należy uwzględnić wymagania związa-

ne z właściwościami spoiny klejowej i samego połączenia. Elastyczność połączeń klejowych wykonanych za pomocą klejów epoksydowych dwuskładnikowych można osiągnąć nie tylko poprzez dobór odpowiedniego rodzaju utwardzacza, ale także poprzez dobór jednego z parametrów technologicznych przygotowania kleju, jakim jest czas życia kleju.

Podsumowując zauważono, że większą wytrzymałość osiągnęły połączenia klejowe polietylenu utworzone przy pomocy kleju Epidian 57/Z-1/100:10 niż te, które zostały wykonane klejem zawierającym żywicę epoksydową Epidian 53 i utwardzacz Z-1, niezależnie od badanego wariantu czasu życia kleju. Ponadto można wykorzystać ten rodzaj kleju w przypadkach, gdy wymagany jest dłuższy czas ustalania łączonych połączeń, gdyż nie wpłynie to negatywnie na wytrzymałość uzyskanych połączeń.

## LITERATURA

1. Cagle Ch. V.: *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
2. Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P.: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
3. Brockmann W., Geiß P.L., Klingens J., Schröder B.: *Adhesive bonding. Materials, Applications and Technology*. Wiley-Vch Press, Weinheim, Germany 2009.
4. Rudawska A.: *Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2013.
5. Hulinka J., Kałuża M.: Preliminary tests of steel-to-steel adhesive joints. *Procedia Engineering* 2017, 172, 385–392.
6. Rudawska A.: *Oprzysiężowanie w technologii klejenia*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
7. Rudawska A.: *Mieszanie, dozowanie i nakładanie kleju w montażu automatycznym*. Materiały konferencyjne, 11<sup>th</sup> International Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing, 03–05.May, 2010, Žilina-Turcianskie Teplice, Slovak Republic, s. 36–39.
8. Mimura K., Ito H.: *Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing agent*. *Polymer*, 2002, 43, 7559–7556.



9. Penn L.S, H. Wang H.: *Epoxy Resins, in: Handbook of Composites*, Chapter 3, S.T. Peters (Ed.), Chapman and Hall, London, 1988.
  10. Rudawska A., Czarnota M.: *Selected aspects of epoxy adhesive compositions curing process*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27, 1933–1950.
  11. Preu H., Mengel M.: *Experimental and theoretical study of a fast curing adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 330–337.
  12. Prolongo S.G., del Rosario G., Ureña A.: *Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 125–132.
  13. Pertie E.M.: *Epoxy adhesive formulation*. The McGraw-Hill, New York, 2006.
  14. May C.A.: *Epoxy Resins, Chemistry and Technology*. Marcel Dekker, New York, 1988.
  15. Gladkikh S., Kolobova V., Kuznetsova L.: *Fast-curing adhesive compositions based on modified epoxy resins*. Polymer Science Series C, 2007, 49, 193–194.
  16. Czub P. Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pieli-chowski J.: *Chemia i technologia żywic epoksydowych*. Warszawa, WNT, 2002.
  17. Rudawska A., Kowalska B., Kubicki P.: *Wytrzymałość połączeń klejowych polimerów, wykonanych za pomocą wybranych klejów sztywnych i elastycznych*. Przetwórstwo Tworzyw, 2015, 4, 343–348.
  18. Rudawska A. Cimek E.: *Wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych poliamidu PA6*. Przetwórstwo Tworzyw, 2011, 3, 198–202.
  19. Rudawska A., *Dobór rodzaju kleju w aspekcie wytrzymałości połączeń klejowych blach ocynkowanych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 2005, 1, 28–29.
  20. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.: *Żyvice epoksydowe*. Warszawa, WNT, 1982.
  21. <http://www.zch.sarzyna.pl/epoksydy/utwardzacze.html>, (16.07.2015)
  22. DIN EN 1465 Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
- Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 03–03–2017  
Data akceptacji publikacji do druku: 27–03–2017