

WPLYW WARUNKÓW UTWARDZANIA I SEZONOWANIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH DOCZOŁOWYCH

The effect of curing and seasoning conditions on the strength of adhesive butt joints

Anna RUDAWSKA, Izabela MITURSKA

S t r e s z c z e n i e: W pracy przedstawiono wpływ warunków utwardzania i sezonowania na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych doczołowych. Łączone elementy, w postaci dwustopniowego wałka, wykonane zostały ze stali stopowej C45. Elementy te sklejono przy użyciu trzech rodzajów kompozycji klejowych epoksydowych na bazie różnych żywic epoksydowych i utwardzacza PAC: E5/PAC/100:80, E53/PAC/100:80, E57/PAC/100:80. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów okresu utwardzania i sezonowania: 7 dni utwardzania w warunkach otoczenia, 7 dni utwardzania oraz 7 dni sezonowania w komorze klimatycznej oraz 3 dni utwardzania i 7 dni sezonowania w komorze klimatycznej. Po upływie okresu utwardzania i sezonowania przeprowadzono badania wytrzymałościowe, podczas których określono wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-59/C-89301. Najwyższą wytrzymałość spośród zastosowanych kompozycji klejowych osiągnęły połączenia wykonane za pomocą kleju E5/PAC/100:80. Porównując pierwszy wariant czasu sezonowania z drugim zauważono, że sezonowanie próbek przez kolejne 7 dni w komorze wpłynęło negatywnie na ich wytrzymałość. Natomiast najlepsze rezultaty wytrzymałości na odrywanie osiągnięto dla trzeciego wariantu okresu sezonowania. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań, mających na celu określenie czynników technologicznych wpływających na osiągnięcie jak najlepszych założonych właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych.

S ł o w a k l u c z o w e: połączenia klejowe doczołowe, wytrzymałość na odrywanie, sezonowanie, stal C45

A b s t r a c t: The paper presents the influence of the curing and seasoning conditions on the strength properties of the butt joints. The joined elements in the form of a two-stage roller are made of C45 alloy steel. These elements were bonded using the three types of the epoxy adhesive based on three various epoxy resins and PAC hardener: E5/PAC/100:80, E53/PAC/100:80, E57/PAC/100:80. The tests were carried out for three variants of the curing and seasoning period: 7 days of curing under ambient conditions, 7 days of curing and 7 days of seasoning in a climatic chamber, 3 days of curing and 7 days of seasoning in a climatic chamber. After the curing and seasoning period, peel strength of adhesive joints was determined in accordance with PN-59/C-89301. The highest strength from among the applied adhesive compositions was achieved by used E5/PAC/100:80 epoxy adhesive. Comparing the first variant of the seasoning time with the second, it was noticed that the seasoning of the samples for the next 7 days in the chamber negatively influenced their strength. However, the best results of peel strength were achieved for the third variant of the seasoning period. The presented variants of seasoning and their results diversity encourage further research to determine the technological factors affecting the best achievement of the assumed strength properties of adhesive joints.

K e y w o r d s: adhesive butt joints, peel strength, curing, seasoning, C45 steel

Wpływ czynników technologicznych na wytrzymałość połączeń

Wśród technologicznych czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych można wymienić [1,3,6,9,10]:

- sposób przygotowania powierzchni łączonych materiałów,
- rodzaj kleju (właściwości i skład chemiczny kleju),
- metoda przygotowania oraz nakładania kleju,
- czas żywotności kleju,
- warunki tworzenia połączeń klejowych (wilgotność, temperatura, warunki sezonowania klejonych elementów),
- utwardzanie spoiny klejowej (temperatura, docisk, czas, katalizator procesu utwardzania)
- inne.

Uzyskanie odpowiedniego połączenia klejowego, uwzględniając powtarzalność wymiarowo-kształową i uzyskaną wytrzymałość, wymaga rozpatrywania zarówno czynników materiałowych, konstrukcyjnych,

technologicznych, jak i warunków eksploatacyjnych analizowanych rodzajów połączeń. Czynniki materiałowymi badanymi podczas wykonywania połączeń klejowych są struktura powierzchni oraz właściwości fizyczne materiałów łączonych. Czynniki te wymuszają specjalistyczną metodę przygotowania powierzchni materiałów łączonych. Struktura powierzchni bardzo istotnie wpływa na uzyskanie połączenia o wymaganej wytrzymałości. Związane jest to przede wszystkim z wnikananiem kleju w mikropory powierzchni oraz powstawaniem zakotwieczeń adhezyjno-mechanicznych. Rozwinięcie struktury geometrycznej przygotowanej powierzchni do procesu klejenia, korzystnie wpływa na jej rozwinięcie.

Na właściwości połączenia klejowego, oprócz wymienionych czynników, wpływa również budowa chemiczna podstawowego składnika kleju (monomeru lub polimeru). Kohezja, adhezja, a także oddziaływanie czynników szkodliwych (np. promienie UV, ciepło), uzależnione są od składu chemicznego podstawowej bazy kleju. W zależności od budowy związku chemicznego, znajdującego się w składzie kleju, w trakcie utwardzania wytwarzają

się różne struktury klejów, które odznaczają się różnymi właściwościami chemicznymi i fizycznymi.

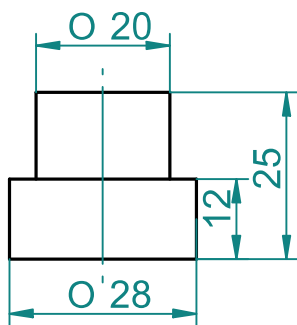
Temperatura utwardzania zależna jest od temperatury polimeryzacji oraz topnienia użytego kleju, pożądanych właściwości połączenia oraz temperatury mięknienia łączonych materiałów. Podczas klejenia „na zimno”, nie jest wymagane ogrzewanie, ponieważ proces utwardzania odbywa się w temperaturze otoczenia przez odparowanie rozpuszczalnika. W procesie klejenia „na gorąco” podczas czasu utwardzania wymaga podwyższonej temperatury w granicach 120°C–180°C. Jest to ograniczenie tej metody, jednak kleje termoutwardzalne mają wyższą odporność i wytrzymałość w czasie eksploatacji [7,11].

Czas utwardzania i sezonowania jest uzależniony od temperatury utwardzania podczas procesu klejenia. Gdy proces utwardzania realizowany jest na zimno, wytrzymałość połączeń klejowych wzrasta z czasem utwardzania. Proces utwardzania na ciepło oraz gorąco zawiera optymalny przedział czasu, w którym połączenia klejowe charakteryzują się największą wytrzymałością [12–14]. Kolejnym czynnikiem powiązaniem z utwardzaniem w przypadku klejów składających z rozpuszczalników jest czas schnięcia otwartego. W trakcie tego procesu rozpuszczalniki odparowują.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu warunków utwardzania i sezonowania na wytrzymałość połączeń klejowych doczołowych.

Badania doświadczalne

Przedmiotem badań były połączenia klejowe doczołowe elementów w postaci dwustopniowego wałka, wykonane ze stali C45. Wymiary elementów walcowych



Rys. 1. Element klejony – wałek dwustopniowy
Fig. 1. Joints element – a two-stage roller

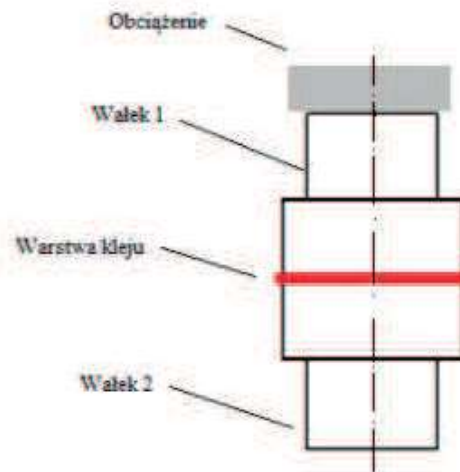
przedstawiono na rys. 1, a schemat wykonanych połączeń zaprezentowano na rys. 2.

Powierzchnie przeznaczone do klejenia, przed wykonaniem procesu zostały poddane obróbce mechanicznej za pomocą ścierniwa KL381 P320 oraz odtłuszczone z użyciem acetonu. Sposób odtłuszczenia opisano w pracy [11]. Połączenia klejowe wykonane w sposób doczołowy zostały obciążone obciążnikiem o masie 0,5 kg.

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano trzy rodzaje kompozycji klejowych. Skład tych kompozycji przedstawiono w tab. 1.

Kompozycje klejowe przygotowywano bezpośrednio przed procesem klejenia i наносono w jednakowych ilościach na jedną z łączonych powierzchni. Wykonano po 10 połączeń dla każdej kompozycji klejowej w każdym wariantcie sezonowania. Tak przygotowane próbki pozostawiono do utwardzenia, następnie część z nich została poddana procesowi sezonowania w komorze klimatycznej SH661, gdzie temperatura wyniosła 80°C, zaś wilgotność – 80%. Zastosowane warunki utwardzania i sezonowania w trzech wariantach przedstawiono w tab. 2.

Podczas utwardzania, monitorowano temperaturę oraz wilgotność powietrza w pomieszczeniu, gdzie przechowywano próbki. Po upływie okresu utwardzania i sezonowania, połączenia klejowe poddano badaniom wytrzymałościowym, gdzie zmierzono siłę niszczącą oraz wytrzymałość na odrywanie. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-59/C-89301 [8].



Rys. 2. Połączenia klejowe doczołowe
Fig. 2. Adhesive butt joint

Tabela 1. Rodzaje kompozycji klejowych wykorzystanych w badaniach
Table 1. Types of epoxy adhesive compositions used in the research

Nr kompozycji	Skład		Stosunek stechiometrycznych	Oznaczenie kompozycji
	Żywica	Utwardzacz		
1.	Epidian 5	PAC	100:80	E5/PAC/100:80
2.	Epidian 53	PAC	100:80	E53/PAC/100:80
3.	Epidian 57	PAC	100:80	E57/PAC/100:80

Tabela 2. Zastosowane warianty utwardzania i sezonowania połączeń klejowych

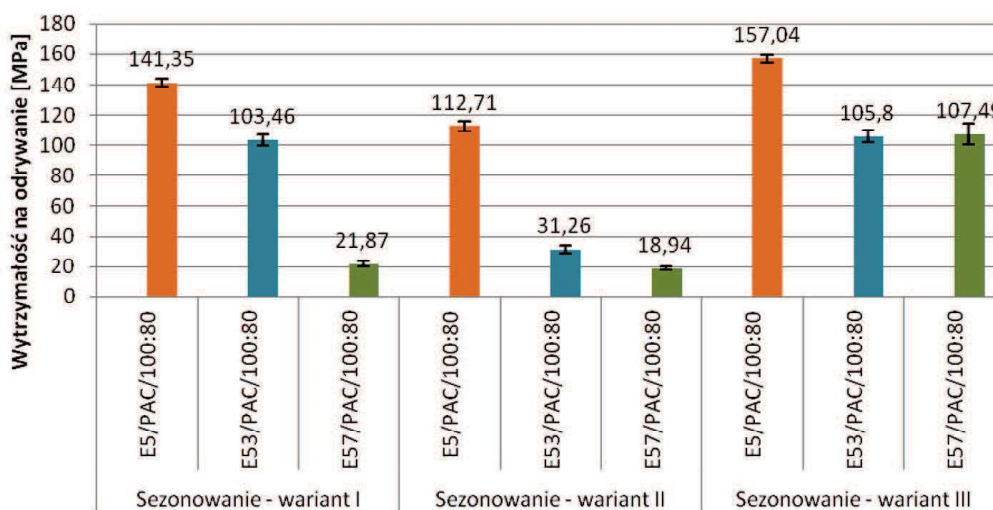
Table 2. The used variants of curing and seasoning adhesive joints

Wariant utwardzania i sezonowania	Czas utwardzania: – temperatura: 23 ± 1°C – wilgotność: 23 ± 2%	Okres sezonowania w komorze klimatycznej: – temperatura: 80°C – wilgotność: 80%
Wariant I	7 dni	-
Wariant II	7 dni	7 dni
Wariant III	3 dni	7 dni

Wyniki badań doświadczalnych

Uzyskane wyniki badań zebrano w tab. 3. Przedstawiono średnie wyniki wytrzymałości na odrywanie połączeń klejowych dla poszczególnych wariantów sezonowania.

Z analizy uzyskanych wyników badań wynika, że dla pierwszego wariantu okresu sezonowania najwyższą wytrzymałością na odrywanie charakteryzowały się połączenia klejowe wykonane za pomocą kompozycji klejowej E5/PAC/100:80. Średnia wytrzymałość tych połączeń wyniosła 9,11 MPa. Połączenia klejowe wykonane przy użyciu kompozycji E53/PAC/100:80 osiągnęły wytrzymałość na odrywanie na poziomie 6,66 MPa, czyli 73% wytrzymałości połączeń wykonanych kompozycją E5/PAC/100:80. Najmniejszą wytrzymałość wykazały połączenia przygotowane z użyciem kleju E57/PAC/100:80



Rys. 3. Zestawienie wyników wytrzymałości na odrywanie dla wszystkich wariantów utwardzania i sezonowania połączeń klejowych doczołowych

Fig. 3. Comparison of the peel strength results for all curing and seasoning variants of butt adhesive joints

Tabela 3. Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych połączeń klejowych

Table 3. Comparison of the results of strength tests of adhesive bonds

Kompozycja klejowa użyta w badaniach	Wielkość mierzona	Utwardzanie i sezonowanie		
		Wariant I	Wariant II	Wariant III
E5/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	141,35 ± 2,27	112,71 ± 3,43	157,04 ± 2,67
	Nośność [N]	5 605,06 ± 128,60	4 611,75 ± 350,05	5 945,06 ± 101,63
E53/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	103,46 ± 3,78	31,26 ± 2,55	105,80 ± 4,15
	Nośność [N]	4 102,82 ± 249,88	1 183,45 ± 245,28	4 258,46 ± 256,12
E57/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	21,87 ± 1,69	18,94 ± 1,24	107,49 ± 6,84
	Nośność [N]	1 059,37 ± 113,56	860,09 ± 106,71	4 279,71 ± 378,57

– 1,72 MPa, co stanowi jedynie 15% największego uzyskanego wyniku wytrzymałości.

Na rys. 3 przedstawiono zestawienie wyników nośności dla wszystkich wariantów analizowanych połączeń klejowych.

Z analizy otrzymanych wyników zaobserwować można, że każda grupa połączeń klejowych uzyskała najlepsze rezultaty w przypadku, gdy czas utwardzania wyniósł 3 dni, a następnie połączenia sezonowano przez 7 dni w komorze klimatycznej (wariant III), natomiast najniższa wartość wytrzymałości została uzyskana dla wariantu II (7 dni utwardzania + 7 dni w komorze klimatycznej). Uzyskane wyniki charakteryzowały się wysoką powtarzalnością – wartości odchyień standardowych mieszczą się w przedziale od 1,6% (dla I wariantu – kompozycja E5/PAC/100:80) do 8,15% (dla II wariantu – kompozycja E53/PAC/100:80).

Przeprowadzone badania oraz ich analiza udowodniły, jak ważnym czynnikiem jest aspekt utwardzania i sezonowania próbek oraz warunki, w jakich ono się odbywa. W pierwszym wariacie czas utwardzania wynosił 7 dni. Najwyższą wytrzymałość spośród zastosowanych kompozycji klejowych osiągnęły połączenia wykonane za pomocą kleju E5/PAC/100:80. Średnia wytrzymałość na odrywanie wyniosła 9,11 MPa. W drugim wariacie sezonowania (utwardzanie przez 7 dni oraz sezonowanie przez 7 dni w komorze klimatycznej), jak i w trzecim wariacie (utwardzanie przez 3 dni oraz sezonowanie przez 7 dni w komorze klimatycznej), również połączenia wykonane z użyciem kompozycji E5/PAC/100:80 osiągnęły najlepsze wyniki wytrzymałościowe wynoszące odpowiednio 7,49 MPa oraz 9,66 MPa. Ponadto, porównując pierwszy wariant czasu sezonowania z drugim wariantem, można zauważyć, że sezonowanie połączeń klejowych przez kolejne 7 dni w komorze wpłynęło negatywnie na ich wytrzymałość (wariant II).

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione wyniki badań odnoszą się do badanych połączeń klejowych doczołowych elementów walcowych wykonanych ze stali C45, wykonanych za pomocą trzech rodzajów klejów, uwzględniając czas utwardzania na zimno (w temperaturze otoczenia) oraz warianty sezonowania. Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono następujące spostrzeżenia:

- połączenia klejowe wykonane za pomocą kompozycji klejowej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5 oraz utwardzacza PAC (E5/PAC/100:80) uzyskały największą wytrzymałość na odrywanie spośród wszystkich badanych wariantów połączeń,
- dla danych serii połączeń klejowych w badanych wariantach sezonowania stwierdzono, że skrócenie czasu utwardzania przed sezonowaniem w komorze klimatycznej w temperaturze 80°C i wilgotności 80% z 7 do 3 dni korzystnie wpływa na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie wytrzymałości nawet

pięciokrotnie w przypadku połączeń wykonanych za pomocą kompozycji E57/PAC/100:80,

- czas utwardzania w temperaturze otoczenia wynoszący 7 dni jest wystarczającym do uzyskania odpowiednio wysokiej wytrzymałości dla kompozycji klejowych wykonanych na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5 (E5/PAC/100:80) oraz Epidian 53 (E53/PAC/100:80). Inaczej jest natomiast w przypadku kompozycji bazującej na żywicy epoksydowej Epidian 57 (E57/PAC/100:80),
- Epidian 57 jest lepką kompozycją klejową modyfikowaną żywicą poliestrową, co wyróżnia ją od pozostałych żywic [2,4,5]. Wnioskować więc można, że skład chemiczny tej żywicy, wymusza na użytkowniku stosowania odpowiednich parametrów w zakresie utwardzania i sezonowania spoin klejowych, w celu uzyskania korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych.

Czas utwardzania i sezonowania jest jednym z parametrów wpływającym na wytrzymałość połączeń klejowych, jednak jest on ściśle powiązany zarówno z rodzajem kleju, jak i warunkami utwardzania. Zaprezentowane warianty sezonowania oraz różnorodność ich wyników zachęcają do dalszych badań, mających na celu określenie czynników technologicznych, wpływających na jak najlepsze osiągnięcie założonych właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych.

LITERATURA

- [1] Brockmann W. et. al. 2009. "Adhesive Bonding". Materials, Applications and Technology. Wiley-VCH, Weinheim.
- [2] Fink J.K. 2005. "Epoxy resin. Chapter 3 in: Reactive Polymers Fundamentals and Applications". A volume in Plastics Design Library.
- [3] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] Godzimirski J., A. Komorek, M. Rośkowicz. 2008. „Trwałość zmęczeniowa tworzywa Epidian 57”. *Polimery* (10): 737–742.
- [5] Godzimirski J., M. Rośkowicz. 2002. „Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju Epidian 57”. *Polimery* (10): 721–726.
- [6] Kuczmaszewski J. 1990. „Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [7] Lapique F., K. Redford. 2013. "Curing effects on viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (27): 1933–1950.
- [8] PN-59/C-89301 Kleje do metali. Oznaczanie wytrzymałości na odrywanie.
- [9] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [10] Rudawska A. i in. 2016. „Wytrzymałość połączeń klejowych po różnym czasie sezonowania”. *Przetwórstwo Tworzyw* (3): 126–131.

- [11] Rudawska A. 2016. „Wpływ wybranych czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych blach tytanowych”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (3): 45–48.
- [12] Murakami S. et. al. 2016. “Strength of cylindrical butt joints bonded with epoxy adhesives under combined static or high-rate loading”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (67): 86–93.
- [13] Pethrick R. A. 2015. “Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding—a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L”. *Journal of Materials: design and applications* (5): 349–379.
- [14] Spaggiari A., D. Castagnetti., E. Dragoni. 2012. “Experimental tests on tubular bonded butt specimens: effect of relief grooves on tensile strength of the adhesive”. *The Journal of Adhesion* (88): 499–512.

dr hab. inż. Anna Rudawska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.rudawska@pollub.pl

mgr inż. Izabela Miturska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: i.miturska@pollub.pl