

JANUSZ DATTA^{*)}, JÓZEF HAPONIUK, EWA GŁOWIŃSKA, ŁUKASZ DURCZAK

Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny
Katedra Technologii Polimerów
ul. Narutowicza 11/12, 81-293 Gdańsk

Badanie wytrzymałości warstwowych połączeń elementów poliuretanowo-stalowych

Streszczenie — Badano wytrzymałość na rozwarstwienie połączeń poliuretanowo-stalowych. Opracowano system poliuretanowy oraz warunki jego nanoszenia na elementy stalowe. Formowanie próbek warstwowych polegało na wylaniu systemu poliuretanowego na umieszczone w stalowej formie płaskowniki o różnej chropowatości powierzchni, z naniesioną na nią warstwą środków łączących. Oceniono wpływ na wytrzymałość mechaniczną połączeń poliuretanowo-stalowych: stopnia rozwinięcia powierzchni płaskownika, czasu odparowania rozpuszczalnika z łączącego materiały kleju oraz grubości naniesionej jego warstwy a także dodatku promotora adhezji i czasu sezonowania próbek.

Słowa kluczowe: poliuretany, elementy warstwowe, adhezja, wytrzymałość na rozwarstwianie.

STUDY ON THE STRENGTH OF LAMINATED POLYURETHANE-STEEL JOINTS

Summary — Tearing strength of laminated polyurethane-steel joints was examined. Polyurethane system and the conditions of its application on steel elements were developed. Laminate samples were formed by casting the polyurethane system onto the flats with different surface roughness, which were placed in a steel mould coated with a layer of bonding agents. The effects of: the degree of flat surface development, time of the solvent evaporation from the adhesive binding the materials, the adhesive layer thickness as well as the addition of adhesion promoter and the sample seasoning time on the mechanical strength of polyurethane-steel joint were evaluated.

Keywords: polyurethanes, laminated elements, adhesion, delamination strength.

W nowoczesnych, złożonych konstrukcjach, np. sandwiczowych lub hybrydowych coraz częściej wykorzystuje się rdzenie wytworzone z poliuretanów. Istotną zaletą tych polimerów jako materiałów konstrukcyjnych jest możliwość zaprojektowania ich budowy na etapie syntezy, co w konsekwencji pozwala na otrzymanie wyrobów o różnych, oczekiwanych właściwościach mechanicznych, chemicznych i użytkowych [1–3]. Częściowe zastąpienie stali lekkim tworzywem w konstrukcjach dwuwarstwowych poliuretanowo-stalowych wpływa na zmniejszenie masy elementów przy jednoczesnym zachowaniu ich dobrych właściwości mechanicznych. Poliuretanowe materiały tłumią vibracje, pochłaniają energię uderzeniową, a także zwiększają odporność na pękanie oraz zmęczenie konstrukcji. Dzięki licznym zaletom wspomnianych połączeń, rozwiązania poliuretanowo-stalowe znalazły zastosowanie w przemyśle okrętowym jako konstrukcje sandwiczowe, wykorzystywane do budowy kadłubów (*Sandwich plate systems SPS*), pokładów, stabilizatorów w morskich platformach wiertniczych lub zbiorników ładunkowych statków [4–6]. Poli-

uretany zastępują dużo cięższe i bardziej zawodne metalowe uźebrowanie [7]. W przypadku tankowców powłoka poliuretanowa, dzięki wprowadzeniu do systemu polimerowego, dodatkowo, związków barierowych zapewnia także ochronę przeciwogniową. Systemy poliuretanowo-stalowe są używane także w inżynierii lądowej jako elementy mostów, samodzielne kładki, tarasy bądź izolacje [2, 8–10].

Najistotniejszymi czynnikami warunkującymi powstanie trwałego połączenia pomiędzy dwoma klejonymi materiałami o różnej strukturze materii (np. stal i tworzywo polimerowe) są zjawiska adhezji i kohezji. Adhezja i kohezja — to efekty oddziaływań występujących pomiędzy poszczególnymi atomami, w wyniku których następuje wymiana ładunków [11–13, 15]. Do połączenia adhezyjnego dochodzi, gdy na granicy faz atomy jednego materiału chętnie oddają elektrony drugiemu. Sytuacja taka ma miejsce najczęściej wówczas, gdy zetkną się warstwy wierzchnie materiałów stałego i ciekłego, po pewnym czasie utwardzającego się. Z kolei połączenie kohezyjne jest możliwe w przypadku, gdy wymiana ładunków przebiega w obrębie jednego materiału. Podstawowymi wymaganiami, które należy spełnić aby uzys-

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: datta@urethan.chem.pg.gda.pl

kać połączenie o dużej wytrzymałości są: wysoki stopień czystości i właściwa zwilżalność powierzchni przez środek adhezyjny, łatwe zestalanie się środka adhezyjnego oraz odpowiednie jego dobranie do konstrukcji spoiny. Wiele materiałów przed połączeniem klejowym, wymaga wstępnej obróbki warunkującej uzyskanie dobrej jakości połączeń, polegającej, m.in. na rozwinięciu powierzchni (zmiana chropowatości), zwiększeniu swobodnej energii powierzchniowej, a także na usunięciu zanieczyszczeń lub słabych warstw granicznych (dekohezji) bądź też na wzmocnieniu warstw granicznych [5, 8–14, 16–21].

Van Tijum i De Hosson, w pracach [22, 23], rozważali wpływ chropowatości powierzchni na właściwości przyłączeniowe wzdłuż powierzchni międzyfazowej metal – polimer. Autorzy przyjęli model teoretyczny strefy kohezji, reprezentujący granicę międzyfazową pomiędzy stalą i poli(tereftalanem etylenu) (PET). Z opracowanego przez nich modelu wynika, że nawet mały wzrost obszaru tej powierzchni jest liniowo skorelowany z wytrzymałością powierzchni międzyfazowej. Relacja taka nie ma miejsca, gdy obszar powierzchni ulegnie znacznemu zwiększeniu. Odchylenie od liniowej zależności wzrasta wraz ze zmniejszeniem się modułu Young'a polimeru. Autorzy cytowanej pracy tłumaczą to zjawisko „zredukowaniem elastycznym” energii w polimerze.

Przeprowadzono już wiele badań mających na celu dopracowanie warunków wytwarzania spoin o zadawalnej wytrzymałości połączeń różnych tworzyw polimerowych ze stalą. Przykładem może być połączenie metalu z polietylenem. Pesetskii, Jurkowski i Kuzavkov uzyskali efekt zwiększenia adhezji takiego łączenia po przeprowadzeniu szczepienia polietylenu małej gęstości (PE-LD) nienasyconymi kwasami dikarboksyłowymi [24]. Sfunkcjonalizowanie tego termoplastu nadało mu zdecydowanie większe powinowactwo do stali. Autorzy [24] stwierdzili, że zmiany sił adhezji, w zależności od warunków technologicznych, są powodowane głównie zmienną koncentracją małocząsteczkowych substancji w strefie zetknięcia łączonych materiałów, a także strukturalnymi i chemicznymi przemianami cząsteczek kleju w warstwach granicznych.

Goncalves i Martins zbadali wpływ rodzaju wybranych, komercyjnych środków klejowych na wytrzymałość spoin polimerowych pomiędzy płaskownikami stalowymi podczas ich eksploatacji w różnych warunkach, a w szczególności w obecności wody [19]. Próbkę do badań wytworzono przy użyciu kleju epoksydowego lub metakrylowego. Uzyskane wyniki wskazują, że połączenia oparte na klejach epoksydowych zachowują swoje właściwości jedynie w krótkich okresach eksploatacji, do 6 miesięcy, i z czasem ulegają hydrolizie na skutek kontaktu z wodą. Potwierdzają to także wyniki wytrzymałości na ścinanie próbek warstwowych, które wskazują, że próbki z klejem metakrylowym są bardziej odporne na działanie takiego środowiska, gdyż ich wytrzymałość zmniejsza się jedynie o ok. 10 %, wytrzymałość próbek

z klejem epoksydowym natomiast nawet o 20 % (w stosunku do wytrzymałości próbek niepoddanych działaniu wody).

W przypadku systemów poliuretanowych nanoszonych/natryskiwanych na powierzchnie stalowe, dobrą wytrzymałość złączy osiąga się po wygrzaniu wyrobów, zazwyczaj w temp. od 70 do 120 °C w ciągu kilkunastu do kilkudziesięciu godzin [15, 25]. W przypadku elementów o niewielkich gabarytach wymienione warunki nie stanowią problemu. Trudność lub nawet niemożność wykonania dobrej jakości detalu warstwowego bądź sandwichowego pojawia się wówczas, gdy są formowane konstrukcje wielkogabarytowe, w takim przypadku bowiem trudne lub nawet niemożliwe staje się zapewnienie podczas kształtowania wyrobów, podwyższonej i stałej w długim czasie temperatury. Jest to ważny ale skomplikowany problem technologiczny, dlatego też tego typu prace, realizowane bez dodatkowej obróbki cieplnej, nie są szeroko opisywane w literaturze. Celem prezentowanych badań było określenie wytrzymałości adhezyjnej połączeń poliuretanowo-stalowych, w układach dwuwarstwowych otrzymywanych bez dodatkowego wygrzewania próbek, i porównanie jej z właściwościami analogicznych, wygrzewanych próbek. Dokonałiśmy także oceny wpływu sezonowania próbek warstwowych na wytrzymałość mechaniczną połączenia stal–poliuretan.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materialy

– 4,4-Diizocyjanian difenylometanu (MDI) (Borsdochem, Węgry), temperatura topnienia 40,4 °C, zawartość niezwiązanych grup NCO 33,6 %; przed użyciem MDI umieszczano na 24 h w cieplarni, w temp. ok. 50 °C, po czym stopiony diizocyjanian filtrowano w celu usunięcia nierozpuszczalnych trimerów.

– Oligo(adypinian etylenowo-butylenowy) diol (Poles 55/20) (Zachem S.A.), $M = 2000$ g/mol, $LOH = 56,1$ mg KOH/g, $LK = 0,5$ mg KOH/g.

– Butano-1,4-diol (BDO) (BASF, Niemcy).

– Kwas ortofosforowy cz., (POCH, Gliwice), roztwór 75 %.

– Klej Cilbond 49 SF o następującym składzie chemicznym: but-2-en do 67,5 %, ksylen do 12,5 %, propionian-3-etoksyetylu do 10 %, octan 2-metoksy-1-metyloetylu do 10 %; produkt koloru czerwonego, temperatura wrzenia 78 °C, temperatura krzepnięcia poniżej -50 °C; gęstość 0,94 g/cm³;

– Promotor adhezji Cilcure B, w postaci polimerycznego MDI dodawanego w niewielkiej ilości do Cilbondu 49F w celu zwiększenia wytrzymałości łączonych elementów (Chemical Innovation Limited, W. Brytania) [25].

– Klej Epidian 100 (modyfikowana żywica epoksydowa o średnim ciężarze cząsteczkowym 700–1100, stosowana do klejenia na gorąco żeliwa, aluminium i jego

stopów, stali, ceramiki („Organika Sarzyna”), użyty jako 20-proc. roztwór żywicy w mieszaninie związków: butan-2-on 20 cz. mas., aceton 55 cz. mas., poli(octan winylu) 25 cz. mas.

Synteza poliuretanu i wytworzenie elementów warstwowych poliuretanowo-stalowych

Na pierwszym etapie przeprowadzono syntezę prepolimeru uretanowo-izocyjanianowego. Reakcję poliestru Poles 55/20 z MDI realizowano w płaskodennym reaktorze szklanym o pojemności 2 dm³, wyposażonym w pokrywą z uszczelnieniem, mieszadło mechaniczne, termometr i króciec do podłączenia pompy próżniowej, w temp. 70–80 °C i pod ciśnieniem $p = 300$ Pa, w ciągu ok. 1 h. Ilości reagentów dobrano tak, aby otrzymany prepolimer charakteryzował się ok. 7-proc. zawartością nieprzereagowanych grup NCO. Prepolimer uretanowo-izocyjanianowy stabilizowano odpowiednią ilością kwasu ortofosforowego. Na drugim etapie przygotowywano system poliuretanowy, dodając do określonej porcji prepolimeru butano-1,4-diol (BDO), pełniący rolę przedłużacza łańcucha. Skład systemu opracowano tak, aby w warunkach technicznych można było go łatwo rozprzecznić na powierzchniach metalowych, a po jego utwardzeniu otrzymać materiał elastyczny.

Z krzywych zależności twardość – stosunek $[NCO]/[OH]$ odczytano skład systemu poliuretanowego, z którego uzyskiwano elastomery o maksymalnej twardości. Wybrany i sporządzony system wylewano na przygotowane okładziny stalowe, umieszczone w stalowej formie, w której poliuretan żelował osiągając stabilność kształtu. Po kilku godzinach próbki stalowo-poliuretanowe wyjmowano z formy. Badania wytrzymałościowe wykonywano po 4 dobach od wylania systemu poliuretanowego na płaskowniki oraz, w celu szerszej charakterystyki połączeń, także po 7, 14 i 23 dobach.

Przygotowanie stalowych płaskowników

Przygotowanie powierzchni okładzin stalowych obejmowało kilka operacji:

– Obróbkę strumieniowo-ścierną, do której zastosowano śrut staliwny 0,3 mm, łamany, firmy Whaeelabrador [postępowano wg ISO 8501-1:1998 (E)];

– Odtłuszczenie za pomocą tetrachloroetyleny (postępowano wg ISO 8503:1992);

– Suszenie w suszarce w temp. 60 °C przez 10 min.

Do badań przygotowano dwa rodzaje próbek stalowych, różniących się czasem, jaki upłynął od chwili rozwinięcia powierzchni do naniesienia systemu poliuretanowego. Wyniki są średnią uzyskaną z pomiarów wykonanych w przypadku trzech próbek rodzaju A oraz B.

– A: płytki pokryte systemem PUR po upływie dwóch miesięcy od obróbki strumieniowo-ścierniej. Płaskowniki w tym czasie nie były narażone na działanie czynników atmosferycznych;

– B: płytki pokryte systemem PUR po upływie tygodnia od obróbki strumieniowo-ścierniej.

Oznaczone parametry chropowatości próbek A i B wynosiły $R_a = 10–11,5$ μm, $R_z = 40–46$ μm.

Zastosowanie samego prepolimeru poliuretanowego jako warstwy adhezyjnej nie pozwoliło na uzyskanie zadowalającej wytrzymałości złącza polimer-stal, dlatego też zdecydowaliśmy się na użycie, poleconego nam przez producenta, kleju poliuretanowego Cilbond 49SF z dodatkiem promotora adhezji Cilcure B (stosunek masowy składników 100:7,5).

Temperatura systemu poliuretanowego wylewanego na płytki stalowe wynosiła ok. 70 °C. Grubość kleju naniesionego mechanicznie na płaskowniki była różna. Pomiar warstwy kleju wykonano przy użyciu śruby mikrometrycznej, po upływie 24 h od chwili naniesienia kleju na płaskowniki, po całkowitym związaniu masy polimerowej.

Dla porównania wytrzymałości połączeń wykonano także próbki warstwowe z udziałem kleju Cilbond 49SF bez promotora adhezji lub roztworu żywicy Epidian 100 w mieszaninie związków chemicznych.

Metody badań

– Wytrzymałość na rozwarstwienie (wytrzymałość adhezyjną) wg ASTM D420 oznaczano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej FPZ-100/1, firmy VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, Niemcy. Badano próbki warstwowe o szerokości $1\pm 0,2$ cm i długości $11\pm 0,5$ cm. Grubość wykonanego ze stali St3 płaskownika wynosiła 1,9–2,4 mm, próbki warstwowej natomiast 4–6 mm. Próbki w kształcie litery T mocowano w uchwytach mechanicznych maszyny. Oznaczanie wytrzymałości adhezyjnej (N/mm) polegało na pomiarze średniej siły (z trzech pomiarów) powodującej zniszczenie połączenia, odniesionej do szerokości próbki. Prędkość przesuwu trawersy wynosiła 10 mm/min.

– Stopień rozwinięcia powierzchni płaskowników stalowych określano za pomocą profilometru Surtronic 10, firmy Taylor Hobson, USA. Pomiar polegał na skanowaniu powierzchni i odczycie parametru chropowatości R_a . Na podstawie parametru podstawowego R_a wyznaczano parametr uzupełniający R_z .

$$R_a = \frac{1}{L_e} \int_A^B |y| dx_1 \quad (1)$$

gdzie: R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej; średnia wartość odległości punktów (y_1, y_2, \dots, y_n) profilu na długości odcinka elementarnego (L_e), R_z – wysokość chropowatości określona wg 10 punktów profilu jako średnia odległość 5 najwyższych położonych wierzchołków od 5 najniższych położonych punktów wgłębień analizowanego profilu na długości odcinka elementarnego (L_e), mierzona od linii równoległej do linii średniej;

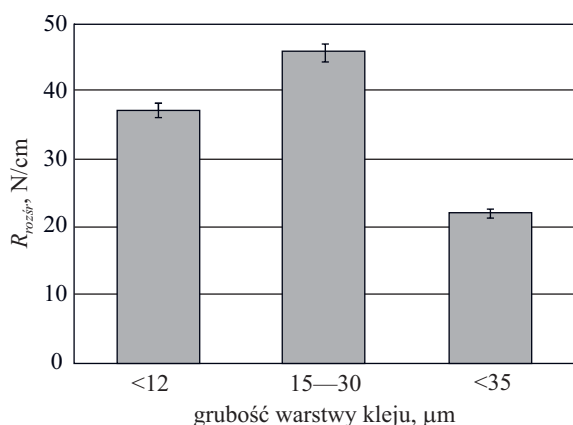
$$R_z = 1/5 [(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})] \quad (2)$$

Pomiary chropowatości wykonano w Katedrze Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej Politechniki Gdańskiej.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

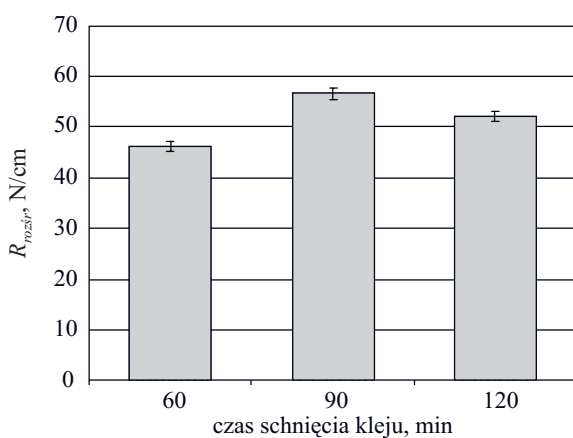
Na rys. 1 zaprezentowano wyniki badań wytrzymałości na rozwarstwienie próbek poliuretanowo-stalowych, wytworzonych przy użyciu kleju Cilbond 49SF z dodatkiem Cilcure B, charakteryzujących się różną grubością warstwy łączącej oba materiały.

Największą wytrzymałość połączenia pomiędzy poliuretanem a stalą wykazują próbki o grubości spoiwa



Rys. 1. Zależność średniej wytrzymałości na rozwarstwianie (R_{rozsr}) wytworzonych próbek warstwowych poliuretanowo-stalowych od grubości warstwy kleju Cilbond 49SF z Cilcure B

Fig. 1. Dependence of the average delamination strength (R_{rozsr}) of the prepared polyurethane-steel laminated samples on the thickness of the adhesive layer (Cilbond 49SF with Cilcure B)



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na rozwarstwianie (R_{rozsr}) wytworzonych próbek warstwowych poliuretanowo-stalowych od czasu odparowywania rozpuszczalnika z kleju Cilbond 49SF

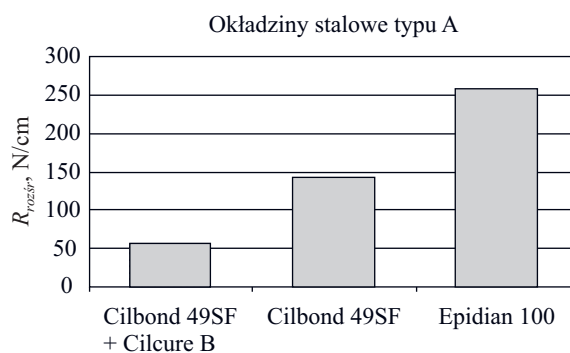
Fig. 2. Dependence of the delamination strength (R_{rozsr}) of the prepared polyurethane-steel laminated samples on the time of solvent evaporation from Cilbond 49SF adhesive

wynoszącej od 15 do 30 μm . Oddziaływania adhezyjno-kohezyjne przy tej grubości kleju są więc największe. Zastosowany w badaniach środek adhezyjny najprawdopodobniej dobrze zwilżył stalową powierzchnię, co skutkowało większym obszarem kontaktu pomiędzy materiałem klejonym i środkiem adhezyjnym. Zwiększenie grubości warstwy kleju powyżej 35 μm nie było korzystne, gdyż wówczas wytrzymałość na rozwarstwienie zmniejszała się dwukrotnie. Przyczyną tego mógł być nadmiar wprowadzonej do kleju substancji wiążącej. W niektórych obszarach stalowego płaskownika dochodziło do dobrego zwilżenia i wypełnienia zagłębień jego rozwiniętej powierzchni, co wpłynęło w istotnym stopniu na lokalne zwiększenie wytrzymałości połączenia, w innych zaś doszło do osłabienia złącza, prawdopodobnie wskutek skupienia się zbyt dużej ilości środka wiążącego, który migrował tworząc lokalne niejednorodności.

Na podstawie uzyskanych wyników, do dalszych badań formowano próbki o grubości warstwy klejącej w zakresie 15–30 μm .

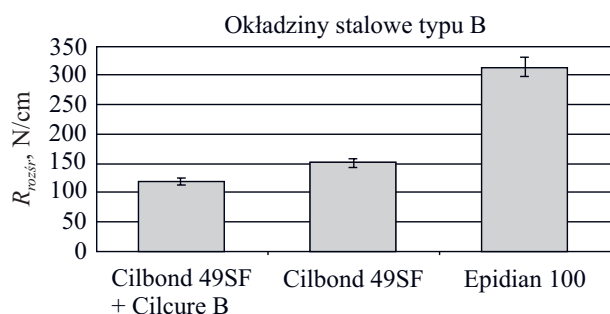
Na rys. 2 przedstawiono wyznaczone wartości wytrzymałości na rozwarstwienie próbek warstwowych różniących się czasem odparowywania rozpuszczalnika, po naniesieniu systemu poliuretanowego na stalowe płaskowniki.

W próbkach poddanych 60 min odparowywaniu rozpuszczalnika z kleju nie zaobserwowano maksymalnej penetracji nieregularnej powierzchni stali, a wartości parametru R_{roz} były mniejsze niż w przypadku próbek, w których odparowywanie rozpuszczalnika trwało dłużej niż 1 h. W próbkach tych prawdopodobnie doszło do głębszej penetracji rozwiniętej powierzchni płaskowników, o czym świadczą widoczne po badaniu liczne pozostałości spoiwa na okładzinach, wcześniej pozostające jedynie na poliuretanie. Przyjęto zatem, że najkorzystniejsze, ze względu na optymalną wytrzymałość połączenia, jest odparowywanie rozpuszczalnika z kleju w warunkach temperatury otoczenia, w czasie od 90 do 120 min.



Rys. 3. Wytrzymałość na rozwarstwianie (R_{rozsr}), wytworzonych przy udziale różnych klejów, próbek warstwowych poliuretanowo-stalowych (okładziny rodzaju A), uformowanych w różnych warunkach

Fig. 3. Delamination strength (R_{rozsr}) of the polyurethane-steel laminated samples (steel lining sheets of type A) prepared using different adhesives and formed under different conditions



Rys. 4. Wytrzymałość na rozwarstwianie (R_{rozsr}), wytworzonych przy udziale różnych klejów, próbek warstwowych poliuretanowo-stalowych (okładziny rodzaju B), uformowanych w różnych warunkach

Fig. 4. Delamination strength (R_{rozsr}) of the polyurethane-steel laminated samples (steel lining sheets of type B) prepared using different adhesives and formed under different conditions

Nieznaczne tylko różnice wytrzymałości złącza tych dwóch serii próbek świadczą również o tym, że jakość samego kleju nie zmienia się w istotnym stopniu po upływie dwóch godzin od jego nałożenia, nawet wówczas gdy nastąpi maksymalna penetracja powierzchni okładzin.

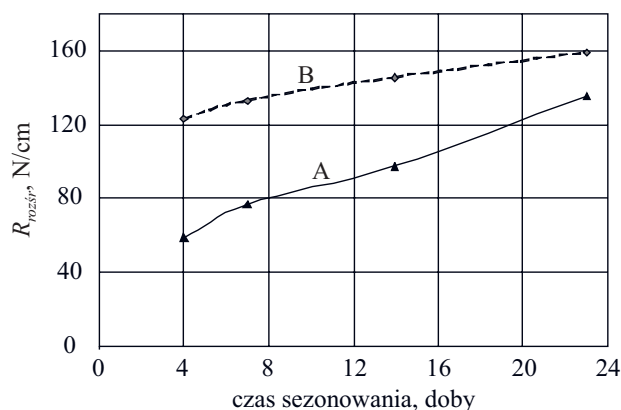
Na rys. 3 i 4 przedstawiono wartości wytrzymałości na rozwarstwienie próbek warstwowych, niewygrzewanych, wytworzonych przy użyciu kleju Cilbond 49SF z dodatkiem Cilcure B oraz próbek wygrzewanych, wytworzonych przy użyciu kleju Cilbond 49SF lub żywicy Epidian 100.

Próbki warstwowe wytworzone z udziałem kleju Cilbond wykazywały znacznie mniejszą wytrzymałość na rozwarstwienie (R_{rozsr}) niż analogiczne, otrzymane przy użyciu kleju Epidian 100.

Porównując wartości R_{rozsr} próbek rodzaju A i rodzaju B stwierdzono, że przygotowanie płaskowników wg sposobu B umożliwia uzyskanie lepszego połączenia pomiędzy poliuretanem a stalą. Skrócenie czasu upływającego od obróbki strumieniowo-ściernej stali, do chwili naniesienia systemu polimerowego jest korzystne, gdyż mniejsza jest wówczas ilość powstałych, słabo związanych z podłożem tlenków żelaza ograniczających zwilżalność powierzchni stali i tym samym osłabiających wytrzymałość połączenia z poliuretanem.

Zbadano także wpływ sezonowania próbek na wytrzymałość połączenia utworzonego w warunkach temperatury otoczenia przy użyciu kleju Cilbond 49SF z dodatkiem Cilcure B. Sezonowanie określano jako czas, który upłynął od chwili wylania systemu poliuretanowego na powierzchnię stalową, do chwili wykonania pomiarów. Analizowano wytrzymałość na rozwarstwianie próbek uformowanych na płaskownikach rodzaju A lub B, mierzoną po upływie 4, 7, 14 i 23 dób od chwili wytworzenia połączeń poliuretanowo-stalowych.

W przypadku obu rodzajów próbek warstwowych (A i B) obserwuje się wzrost R_{rozsr} wraz z wydłużeniem czasu ich sezonowania. Najistotniejszym czynnikiem wpły-



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na rozwarstwianie (R_{rozsr}) wytworzonych próbek warstwowych poliuretanowo-stalowych z warstwą kleju Cilbond 49SF z Cilcure B, od czasu sezonowania próbek

Fig. 5. Dependence of the delamination strength (R_{rozsr}) of the prepared polyurethane-steel laminated samples with Cilbond 49SF and Cilcure B adhesive layer on the sample seasoning times

wającym na poprawę wytrzymałości układów warstwowych było prawdopodobnie pełne utwardzenie warstwy kleju i tym samym utworzenie większej ilości aktywnych miejsc wiązania stali z poliuretanem. Tłumaczymy to także zwiększeniem obszaru oddziaływań międzycząsteczkowych, wynikających z sił Van der Waalsa (orientacyjnych, multipolowych).

Wytrzymałość na rozwarstwienie próbek warstwowych rodzaju B, uformowanych na zimno przy użyciu środka klejącego Cilbondu 49SF i sezonowanych przez 23 doby była nieznacznie większa niż wytrzymałość na rozwarstwianie próbki klejonej klejem Cilbond 49SF i dotwardzanej termicznie. Próbki klejone Epidianem 100 i dotwardzane termicznie wykazują większą wartość R_{roz} niż analogiczne próbki klejone i sezonowane w temperaturze otoczenia.

WNIOSKI

Wśród niewygrzewanych próbek warstwowych, poliuretanowo-stalowych, otrzymanych przy użyciu kleju Cilbond 49SF z dodatkiem Cilcure B, największą wytrzymałość na rozwarstwienie wykazują próbki z naniesioną warstwą kleju grubości 15–30 μm , poddane wstępnemu odparowaniu rozpuszczalnika w warunkach otoczenia, w ciągu co najmniej 90 min. Stwierdzono również, że niewygrzewane próbki warstwowe, z warstwą poliuretanu naniesioną po upływie siedmiu dni (rodzaj B) od chwili strumieniowo-ściernej obróbki stali, charakteryzują się większą o ok. 50 % wytrzymałością na rozwarstwienie niż próbki z warstwą poliuretanu naniesioną po upływie ośmiu tygodni (rodzaju A) od obróbki płaskowników. Największą wartością R_{rozsr} charakteryzowała się wygrzewana próbka łączona klejem Epidian 100 (250 N/cm próbka rodzaju A i 315 N/cm próbka rodzaju B). Niewy-

grzewane układy poliuretanowo-stalowe pokryte klejem Cilbond 49SF z dodatkiem Cilcure B wykazywały największe wartości $R_{roz\acute{s}r}$ od 3 do 5 razy mniejsze niż $R_{roz\acute{s}r}$ próbek wytworzonych z udziałem kleju Epidian 100. Większe wartości $R_{roz\acute{s}r}$ uzyskano w przypadku wygrzewanych próbek warstwowych łączonych klejem Cilbond 49SF niż w przypadku próbek niewygrzewanych, łączonych takim samym klejem z promotorem adhezji Cilcure B, niezależnie od rodzaju przygotowania powierzchni płaskownika. Wydłużenie czasu sezonowania, z 4 do 23 dób, próbek warstwowych PUR-stal rodzaju B, klejonych, niewygrzewanych, zwiększyło wartość parametru $R_{roz\acute{s}r}$ o ok. 33 %.

LITERATURA

1. Sharpe L. H.: „Adhesives and sealants” w „Overview: Adhesives Technology” (red. Sharpe L. H., Wentworth S. E.), ASM International, Materials Park, OH, 1990.
2. Wegman R. F.: „Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding”, Noyes Publication 1989.
3. Feldmann M., Sedlacek G., Gebler A.: *Mech. Compos. Mater.* 2007, **43**, 1234.
4. Welch D.: „An Introduction to the Sandwich Plate System for Ship Structures”, The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, Glasgow 2005.
5. Kennedy D. J. L., Dorton R. A., Alexander S. D. B.: „The Sandwich Plate System for Bridge Decks”, International Bridge Conference, Pittsburg USA, 1–12 czerwca 2002.
6. *Pat. USA* 4 859 735 (1989).
7. Datta J., Łaski M., Witkiewicz W., Balas A., Kucińska-Lipka J.: *Inż. Mater.* 2006, **2**, 34.
8. Rzymiski W. M., Włóka M., Grzeżółkowska-Rosiak T.: *Polimery* 2005, **50**, 530.
9. Petrie E. M.: „Handbook of Adhesives and Sealants”, McGraw Hill, New York 2006.
10. Lenkiewicz M.: „Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”, WNT, Warszawa 2000.
11. Pocius A. V.: „Adhesion and Adhesives Technology”, Carl Hanser Gardener Verlag, Munchen 2002.
12. Packham D. E.: „The mechanical theory of adhesion — a seventy year perspective and its current status”, First International Congress on Adhesion Science & Technology, 1998.
13. Pizzi A., Mittal K. L.: „Handbook of Adhesive Technology”, Marcel Dekker Inc., New York 1994.
14. Petrie E. M.: „Plastics and elastomers as adhesives”, ABB Power T & D Company, Inc. Raleigh, North Carolina.
15. Datta J., Kania E., Krajewski G., Haponiuk J. T.: „Analiza wytrzymałości poliuretanowo-stalowych układów warstwowych”, XLIX Zjazd PTChem i SITPChem, Gdańsk, 10–22 września 2006 r.
16. Righettini R., Durso S.: *Reinforc. Plast.* 1999, **43**, 34.
17. Suarez J. C., Diez de Ulzurrun I., Biezma M. V., Ruiz Roman J. M., Martinez M. A., del Real J. C., Lopez F.: *J. Mater. Proc. Technol.* 2003, **143-144**, 219.
18. Baldan A.: *J. Mater. Sci.* 2004, **39**, 1.
19. Goncalves V. M., Martins P.: *Int. J. Mech. Mater. Des.* 2006, **3**, 91.
20. Broughton W. R., Gower M.: „Preparation and Testing of Adhesive Joints, NPL Measurement Good Practice Guide No 47 (2001).
21. Lennon P., Espuche E., Sautereau H., Sage D.: *Int. J. Adhes. Adhes.* 1999, **19**, 273.
22. Van Tijum R., De Hosson J. M.: *J. Mater. Sci.* 2005, **40**, 3503.
23. Van Tijum R., Vellinga W. P., De Hosson J. Th. M.: *J. Mater. Sci.* 2007, **42**, 3529.
24. Pesetskii S. S., Jurkowski B., Kuzavkov A. I.: *Int. J. Adhes. Adhes.* 1998, **18**, 351.
25. Karta techniczna systemu CILBOND 49SF firmy CIL.

Otrzymano 24 I 2012 r.