

# Odporność połączeń klejowych na oddziaływanie wysokiej temperatury

## Resistance of adhesive joints to impact high temperature

### Streszczenie

Wytrzymałość cieplna i odporność na podwyższone i wysokie temperatury stanowią jedne z największych niedostatków klejów i połączeń klejowych. Połączenia klejowe wykonane konstrukcyjnymi klejami organicznymi są zwykle nieodporne na oddziaływanie wysokiej temperatury. W takich warunkach pracy klej mięknie i ulega degradacji a wytrzymałość mechaniczna połączeń klejowych wyraźnie spada.

W artykule przedstawiono wpływ nagrzewania na twardość Shore'a (HSD) klejów handlowych oraz zmodyfikowanych poprzez udział napełniaczy metalowych. Przeprowadzono badania wpływu napełniaczy stanowiących proszki miedzi i aluminium na wytrzymałość mechaniczną połączeń klejowych w temperaturze 100 i 200 °C w porównaniu z temperaturą pokojową.

**Słowa kluczowe:** klejenie, kleje o budowie kompozytowej, wysoka temperatura, twardość Shore'a (HSD), wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych

### Abstract

Heat resistance, and resistance at elevated and high temperatures are one of the biggest shortcomings of glue and adhesive joints. Structural adhesive joints made with organic adhesives are generally not resistant to the effects of high temperatures. In such work conditions, the adhesive softens and is degraded and the mechanical strength of the bond drops significantly.

Article presents the influence of heating on the Shore hardness (HSD) commercial adhesives and modified by participating metal fillers. Conducted study the effect of fillers provide powders of copper and aluminum on the mechanical strength of the adhesive joints at 100 and 200 °C in comparison to room temperature.

**Keywords:** bonding, adhesives of composite construction, high temperature, Shore hardness (HSD), shear strength adhesive bonds

## Wstęp

Klejenie jest najstarszą technologią spajania, która dzisiaj rozwija się dynamicznie i ma największą przyszłość przed sobą. Obecnie na rynku można mieć dostęp do kilkudziesięciu różnych odmian klejów do zróżnicowanych zastosowań, pochodzących zarówno od producentów rodzimych jak i zagranicznych. Pojawiły się również i są dostępne na rynku kleje ceramiczne, których odporność na oddziaływanie temperatury sięga nawet do 1200 °C [20]. Kleje znalazły zastosowanie w bardzo różnych dziedzinach życia i techniki [1÷7]. Połączenia klejowe spotyka w różnych gałęziach przemysłu, budownictwie, rzemiośle i w medycynie. Jednym ze szczytowych osiągnięć klejenia w kosmonautyce było zastosowanie klejów polimerowych do klejenia krzemowych płytek żaroodpornych do kadłuba promu kosmicznego „Columbia 7” [23,24]. Przewiduje się, że już niedługo połączenia klejowe będą stanowić ponad 30 % wszystkich rodzajów połączeń stosowanych w budowie maszyn. Fakt ten wynika w znaczącej mierze z gwałtownego postępu w dziedzinie

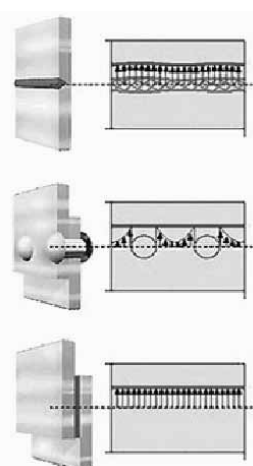
materiałów, a w szczególności kompozytów, w których to kleje na osnowie syntetycznych tworzyw znalazły szerokie zastosowanie. Wciąż rosnący udział klejenia wynika także z odmiennych właściwości połączeń w porównaniu z połączeniami wykonanymi klasycznymi metodami spajania. Do najbardziej znaczących zalet techniki klejenia można zaliczyć [3÷14]:

- możliwość łączenia materiałów o odmiennych właściwościach fizykochemicznych,
- równomierne rozłożenie obciążeń na całej klejonej powierzchni w porównaniu z innymi metodami spajania (rys. 1),
- możliwość łączenia elementów na dużej powierzchni i poprzez to zmniejszanie naprężeń działających na połączenie klejowe,
- zmniejszenie masy końcowego wyrobu, poprzez możliwość łączenia pocienionych elementów,
- brak strefy wpływu ciepła w połączeniach powstających w temperaturze otoczenia,

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, dr inż. Roman Wróblewski, mgr inż. Adam Gołembiewski – Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: zbigniew.mirski@pwr.edu.pl

- zwykle brak dodatkowej obróbki po wykonaniu połączeń klejowych,
- zmniejszenie niebezpieczeństwa wystąpienia korozji elektrochemicznej.



**Rys. 1.** Rozkład naprężeń w złączach spawanych, nitowanych i klejowych [13]

**Fig. 1.** Stress distribution in welding, riveted and adhesive joints [13]

## Właściwości klejów przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze

Największą barierą dla zwiększonego zastosowania klejów jest wyraźne zmniejszenie parametrów wytrzymałości mechanicznej pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury, tj. temperatury powyżej 120 °C. Większość dostępnych klejów na rynku jest odporna na oddziaływanie temperatury do około 100 °C, tylko niewielka grupa może pracować w wyższej temperaturze. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych, podana w tablicach I-IV, odnosi się tylko do temperatury pokojowej. Dla połączeń wykonanych klejami ceramicznymi brakuje też danych dotyczących wytrzymałości mechanicznej w wysokiej temperaturze (tabl. VI).

Ze względu na budowę chemiczną i sposób utwardzania klejów odpornych na oddziaływanie wysokiej temperatury wyróżnić można kleje [1]:

- na osnowie żywicy metakrylowej (tabl. I),
- na osnowie żywicy epoksydowej (tabl. I),
- silikonowe (tabl. II),
- anaerobowe (tabl. III),
- utwardzane światłem UV (tabl. IV),
- termotopliwe (tabl. V),
- ceramiczne (tabl. VI).

**Tablica I.** Właściwości klejów na osnowie żywic akrylowych i epoksydowych [14÷16]

**Table I.** The properties of adhesives based on acrylic resins and epoxies [14÷16]

| Lp. | Oznaczenie              | Baza chemiczna     | Wytrzymałość na ścinanie [MPa]   | Zakres temperatury pracy [°C] | Zastosowanie                                   | Uwagi   |
|-----|-------------------------|--------------------|--|-------------------------------|--|---|
| 1   | Loctite F246 [14]       | żywica akrylowa    | 35   | do 120                        | produkt ogólnego zastosowania                  | klej jednoskładnikowy   |
| 2   | Maxweld M2 MC-2661 [15] | żywica metakrylowa | <30  | -55 – +180 (45 min w 220 °C)  | do metali, niektórych tworzyw sztucznych       | łączy ze sobą poliwęglany i metale, wiele wersji kolorystycznych                                  |
| 3   | Loctite Hysol 9514 [14] | epoksyd            | 46 - stal śrutowana, 32 - stal nierdzewna, 20 - stal ocynkowana          | -55 – +200                    | metale, ceramika, większość tworzyw sztucznych | klej jednoskładnikowy, utwardzanie ciepłem, wysoka odporność na działanie czynników mechanicznych |
| 4   | Araldite 2011 [16]      | epoksyd            | 26-aluminium, 25 - stal, 23 - stal nierdzewna, 22- miedź, 5- ABS, 3- PVC | -60 – +100                    | metal, kamień, ceramika, tworzywo sztuczne     | sprawdzona odporność starzeniowa w rzeczywistych warunkach pracy przez 5 lat                      |

**Tablica II.** Właściwości klejów na osnowie silikonów [14,17]

**Table II.** The properties of adhesives based on silicones [14,17]

| Lp. | Oznaczenie                | Baza chemiczna                | Wytrzymałość na rozciąganie (23 +/-2 °C) [MPa] | Zakres temperatury pracy [°C]        | Zastosowanie   | Uwagi   |
|-----|---------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|--|---|
| 1   | Loctite 5399 [14]         | silikon acetoksy              | 3,3  | +300                                 | do klejenia i uszczelniania szkła, metali i ceramiki   | klej jednoskładnikowy, wydłużenie przy rozciąganiu 500% |
| 2   | Kisling AG Ergo 3020 [17] | silikon oksymowy modyfikowany | 2  | -60 – +315 (krótkotrwale do +370 °C) | nasadki i kołnierze w silnikach spalinowych, kołnierze wentylatorów, pokrywy skrzyni biegów, miski olejowe | klej przeznaczony głównie do przemysłu motoryzacyjnego  |

Dodatkową grupą klejów, które mogą pracować w wysokiej temperaturze stanowią kleje o budowie kompozytywnej, jednak-

że ich właściwości w dużej mierze zależą zarówno od osnowy jak i rodzaju i właściwości fazy wzmacniającej (zbrojenia) [8].

**Tablica III.** Właściwości klejów anaerobowych [14,18]

**Table III.** Properties of anaerobic adhesives [14,18]

| Lp. | Oznaczenie        | Baza chemiczna | Wytrzymałość na ścinanie przy rozciąganiu [MPa] | Zakres temperatury pracy [°C] | Zastosowanie   | Uwagi   |
|-----|-------------------|----------------|---|-------------------------------|--|---|
| 1   | Loctite 620 [14]  | metakrylan     | >24,1   | -55 – +230                    | do klejenia i uszczelniania szkła, metali i ceramiki                             | klej jednoskładnikowy, wydłużenie przy rozciąganiu 500% |
| 2   | Loxéal 24÷18 [18] | metakrylan     | 2÷4   | -55 – +150                    | zabezpieczanie gwintów przed luzowaniem się i odkręcaniem, przeciekami i korozją | maksymalna średnica gwintu M24                          |

**Tablica IV.** Właściwości klejów utwardzanych światłem UV [14,19]

**Table IV.** Properties of UV light curable adhesives [14,19]

| Lp. | Oznaczenie        | Baza chemiczna    | Wytrzymałość na ścinanie [MPa] | Zakres temperatury pracy [°C] | Zastosowanie   | Uwagi   |
|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|---|
| 1   | Loctite 3926 [14] | klej akrylowy     | 7                              | -40 – +150                    | do klejenia i uszczelniania szkła, metali i ceramiki | klej jednoskładnikowy, wydłużenie przy rozciąganiu 500%       |
| 2   | Loxéal 83÷61 [18] | ester metakrylowy | -                              | -55 – +175                    | przeznaczony do klejenia szkła z innymi materiałami  | maksymalna szczelina 0,01-0,12 mm, mała lepkość 400-600 mPa·s |

**Tablica V.** Właściwości klejów termotopliwych [14]

**Table V.** Properties of hot melt adhesives [14]

| Lp. | Oznaczenie               | Baza chemiczna           | Temperatura mięknięcia [°C] | Zakres temperatury pracy [°C] | Zastosowanie                                 | Uwagi  |
|-----|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| 1   | Macromelt 6238 [14]      | poliamid                 | +133 – +145                 | +180 – +220                   | dobra adhezja do metali i tworzyw sztucznych | odporny na olej, nie zawiera rozpuszczalnika |
| 2   | Technomelt PS-M8783 [14] | kauczuk termo-plastyczny | +132 – +142                 | +160 – +180                   | dobra adhezja do metali i tworzyw sztucznych | kontaktowy („wiecznie żywy”)                 |

**Tablica VI.** Właściwości klejów ceramicznych [20,21]

**Table VI.** Ceramic adhesive properties [20,21]

| Lp. | Oznaczenie                    | Baza chemiczna | Wytrzymałość na ścinanie [MPa] | Zakres temperatury pracy [°C] | Zastosowanie  | Uwagi   |
|-----|-------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|---|---|
| 1   | Technicoll Silicate 1200 [20] | krzemiany      | -                              | -40 – +1200                   | montaż, naprawa oraz uszczelnianie układów wydechowych, wykładzin szamotowych oraz metalowych odprowadzających spaliny i ciecze | -   |
| 2   | Resbond 919 [21]              | tlenek magnezu | -                              | +1500                         | -   | podwyższone parametry dielektryczne, stałe w czasie zarówno na zimno, jak i w podwyższonej temperaturze, dobre parametry wytrzymałościowe |

## Kleje stosowane w badaniach

Do badań własnych wybrano dwa rodzaje klejów. Pierwszym był klej ceramiczny Silicate 1200 z napełniaczem stanowiącym krzemiany [20] drugim natomiast Agomet F330 na bazie żywicy metakrylowej [22]. Dodatkowo do kleju Agomet F330 dodano napełniacze, w postaci proszku miedzanego oraz proszku glinu.

Klej Silicate 1200 jest ogniotrwałym klejem ceramicznym, nadającym się do klejenia materiałów pracujących w temperaturze powyżej 1000 °C. Jest on odporny na oddziaływanie spalin, rozcieńczonych kwasów, wody, chemikaliów oraz ujemnej temperatury [20]. Właściwości kleju Silicate 1200 zamieszczono w tablicy VII.

Tablica VII. Właściwości kleju Silicate 1200 [20]  
Table VII. Adhesive properties Silicate 1200 [20]

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| Gęstość, g/ml                | 1,01        |
| Konsystencja                 | pasta       |
| Czas utwardzania, h          | 24          |
| Odporność na temperaturę, °C | -40 - +1200 |

Klej Agomet F330 jest klejem dwuskładnikowym, do żywicy metakrylowej dodawano utwardzacz w postaci proszku. Agomet F330 charakteryzuje się dużą szybkością utwardzania – około kilku do kilkunastu min (prędkość utwardzania zależy od ilości dodanego utwardzacza, zwykle dodaje się 3÷5 % wag.), dobrą wytrzymałością na ścinanie oraz oddzielenie. Nadaje się do spajania stali, metali nieżelaznych oraz tworzywo sztucznych, takich jak: twarde PVC, ABS, polistyren, poliwęglan, szkło akrylowe, poliestry utwardzalne. Inne właściwości kleju Agomet F330 zamieszczono w tablicy VIII.

Tablica VIII. Właściwości kleju Agomet F330 [22]  
Table VIII. Adhesive properties Agomet F330 [22]

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Gęstość, g/ml                                    | 1,01                              |
| Konsystencja                                     | gęsty płyn                        |
| Czas uzyskania końcowej wytrzymałości, h         | 24                                |
| Odporność na temperaturę, °C                     | od -40 do 130 (krótkotrwale 200)  |
| Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych, MPa | 33 – Al, stal<br>29 – Cu, mosiądz |

Wyrzwanie połączenia w temperaturze 200 °C przez 4 godziny, a następnie ochłodzenie do temperatury pokojowej nie zmniejsza wytrzymałości połączenia klejowego. W tablicy IX przedstawiono wpływ długotrwałego 7 dniowego wygrzewania a następnie ochłodzenia próbki do temperatury pokojowej na wytrzymałość stalowego połączenia klejowego.

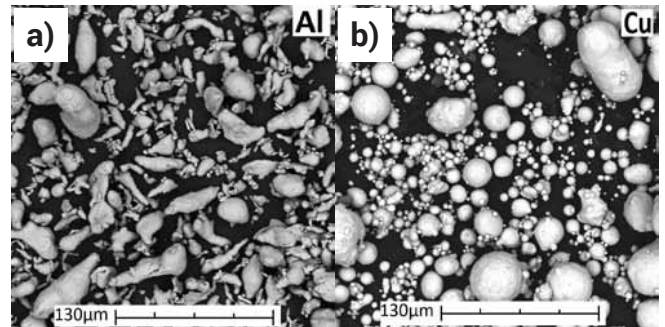
Tablica IX. Wpływ wygrzewania na wytrzymałość na ścinanie połączeń wykonanych klejem Agomet F330 w MPa [22]  
Table IX. Effect of soaking on the shear strength of the adhesive joints made with Agomet F330 in MPa [22]

| Sposób przygotowania powierzchni | Temperatura wygrzewania, °C |      |      |
|----------------------------------|-----------------------------|------|------|
|                                  | 20                          | 120  | 175  |
| Odtłuszczenie                    | 31                          | 31,6 | 31,7 |
| Schropowacenie i odtłuszczenie   | 35,8                        | 35,8 | 35,3 |

## Badania własne

Kleje o budowie kompozytowej, przygotowano na bazie kleju Agomet F330, dodając po 60% wag. napełniaczy. Stanowiły je:

nieregularny proszek glinu o granulacji od 0 do 100 µm (rys. 2 a) oraz kulisty proszek miedzi o granulacji od 0 do 106 µm (rys. 2 b). Zastosowane napełniacze wykazują dużą przewodność cieplną, zaliczaną do największych wśród metali, których ceny są stosunkowo niskie. Przewodność cieplna miedzi wynosi około 390-400 W/(m·K), natomiast glinu 237 W/(m·K).

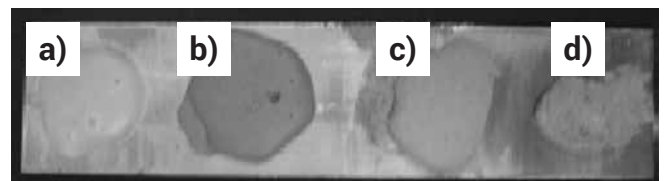


Rys. 2. Proszek aluminium (a), proszek miedzi (b) [1]

Fig. 2. Aluminium powder (a), copper powder (b) [1]

## Próby wytrzymałości klejów w wysokiej temperaturze

W próbie tej sprawdzono oddziaływanie wysokiej temperatury na poszczególne kleje oraz określono wpływ wygrzewania na ich twardość zmierzoną durometrem Shore'a typu D (°Sh D). Na odtłuszczone alkoholem izopropylowym blaszki ze stali S235JR naniesiono badane próbki klejów, na jednej próbce umieszczono po cztery porcje klejów o grubości warstwy ok. 3,0 mm. Wymiary podłoża stalowego wynosiły 26,5x122,5x2 mm (rys. 3) [1].



Rys. 3. Próbkki klejów do wygrzewania w wysokiej temperaturze oraz pomiarów twardości: Agomet F330 (a), Agomet F330 + Cu (b), Agomet F330 + Al (c), Silicate 1200 (d) [1]

Fig. 3. Samples for soaking at high temperature and hardness research: Agomet F330 (a), Agomet F330 + Cu (b), Agomet F330 + Al (c), Silicate 1200 (d) [1]

Próby te polegały na wygrzewaniu klejów w suszarce laboratoryjnej Wamed typu SUP-65M w stałej temperaturze 200 oraz 250 °C. Czasy wygrzewania wynosiły: 5, 10, 15, 22 oraz 40 min. Po wygrzewaniu próbki poddano ocenie wizualnej oraz pomiarom twardości durometrem Shore'a - skala D.

Ocena wizualna polegała na określeniu zmiany barwy na powierzchni i pod powierzchnią kleju, co pozwoliło stwierdzić czy klej dobrze zniósł próbę cieplną czy już rozpoczął się w nim procesy destrukcji.

## Wyrzwanie w temperaturze 200 °C

Ceramiczny klej Silicate 1200 nie zmienił zasadniczo swojej barwy. Warstwa kleju Silicate 1200 odpadła jednak od każdej próbki. Może to wynikać z niedostatecznych właściwości adhezyjnych samego kleju. Klej Agomet F330 już po 5 min przebywania w temperaturze 200 °C lekko zmienił barwę, po 40 min przebywania w suszarce przybrał kolor ciemno brązowy, co może wnioskować o znaczącej powierzchniowej zmianie struktury. Klej Agomet F330, do którego dodano proszek aluminiowy zaczął zmieniać

swoją barwę dopiero po 40 min przebywania w temperaturze 200 °C. Barwa kleju z miedzianym napelniaczem już po 10 min przebywania w temperaturze 200 °C uległa zmianie, natomiast po 40 min klej był już koloru ciemnoczekoladowego brązu. Po usunięciu cienkiej utlenionej warstwy klejów ich barwa pod powierzchnią nie uległa większym zmianom w porównaniu ze stanem wyjściowym [1].

## Wyrzwanie w temperaturze 250 °C

Klejem, który najszybciej zmienił barwę na kolor ciemno brunatny był klej z dodatkiem proszku miedzianego, co może świadczyć o jego utlenieniu powierzchniowym. Klej Silicate 1200 podobnie jak w poprzedniej próbie odpadł od każdej próbki. Można wnioskować, że klej mimo dobrej odporności na temperaturę sięgającą nawet do 1200 °C, nie nadaje się do ogólnego klejenia połączeń pracujących pod obciążeniem mechanicznym wymaga też wyraźnego zwiększenia sił adhezji do łączonych powierzchni [1]. Jego zastosowanie dotyczy przede wszystkim połączeń o charakterze uszczelniającym, ze szczeliną i gniazdem półotwartym.

## Pomiar twardości durometrem Shore'a - skala D w temperaturze pokojowej

Pomiary twardości klejów przeprowadzono durometrem Shore'a - skala D, firmy Sauter, z penetratorem w kształcie ostrej iglicy (rys. 4). Wartości twardości, stanowiących średnie z 5 pomiarów, zamieszczono w tablicy X.

Na podstawie wyników pomiarów twardości można stwierdzić, że wygrzewanie w temperaturze 250 °C niezależnie od czasu wygrzewania nie wpływa znacząco na twardość kleju. W warstwie kleju Silicate 1200 pojawiły się pęknięcia i rozwarstwienia, co istotnie wpłynęło na wartości pomiarów próbek wygrzewanych zwłaszcza w ciągu 15 oraz 40 min [1].



Rys. 4. Durometr Shore'a typu D umieszczony na statywie [1]

Fig. 4. Shore durometer type D mounted on a tripod [1]

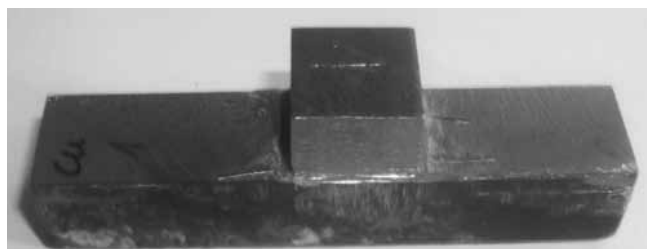
Tablica X. Zestawienie twardości klejów Shore'a – D (°Sh), przed i po wygrzewaniu w temperaturze 250 °C [1]

Table X. Selection of the hardness Shore – D (°Sh) of the adhesive before and after annealing at 250 °C [1]

| Klej             | Czas wygrzewania [min] |    |    |    |    |    |
|------------------|------------------------|----|----|----|----|----|
|                  | 0                      | 5  | 10 | 15 | 22 | 40 |
| Agomet F330      | 85                     | 83 | 82 | 85 | 82 | 87 |
| Agomet F330 + Cu | 87                     | 81 | 86 | 86 | 84 | 86 |
| Agomet F330 + Al | 92                     | 90 | 85 | 86 | 82 | 89 |
| Silicate 1200    | 88                     | 92 | 86 | 77 | 90 | 75 |

## Statyczna próba ścinania połączeń klejowych

Statyczną próbę ścinania połączeń klejowych przeprowadzono zarówno w temperaturze pokojowej (23 °C), jak i w temperaturze 100 i 200 °C. Powierzchnie próbek ze stali C45 obrabiono poprzez frezowanie i następnie odtuszczone. Połączenie klejowe miało powierzchnię 217,5 mm<sup>2</sup> (15x14,5 mm). Szczelina klejowa wynosiła 0,2 mm, ustalono ją za pomocą dwóch drucików stalowych o średnicy 0,2 mm. Przykładowe połączenie klejowe pokazano na rysunku 5 [1].



Rys. 5. Połączenie klejowe ze stali C45 przeznaczone do statycznej próby ścinania [1]

Fig. 5. Adhesive joint of steel C45 for static test of shear [1]

Próbki klejowe ścinano w przyrządzie na maszynie wytrzymałościowej o zakresie obciążeń do 1 T, z komorą nagrzewaną do temperatury 300 °C (rys. 6). Stosowano prędkość przesuwu belki poprzecznej maszyny równą 0,1 cm/min. Do badań pobierano po 5 próbek z każdej grupy połączeń klejowych.



Rys. 6. Maszyna wytrzymałościowa H25KT firmy Tinius Olsen z komorą grzewczą do temperatury 300 °C [1]

Fig. 6. The testing machine Tinius Olsen ,s H25KT with heating chamber to a temperature 300 °C [1]

Wyniki statycznej próby ścinania połączeń klejowych zamieszczono w tablicy XI i przedstawiono na rysunku 7. Największe różnice w wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych są zauważalne w temperaturze pokojowej (23 °C). Wpływ napełniaczy jest tu najbardziej znaczący. W przypadku dodatku proszku glinu wzrost wytrzymałości na ścinanie wyniósł 10 MPa (41 %), natomiast dla dodatku sferycznego proszku miedzanego - 11,6 MPa (47 %) w porównaniu z klejem Agomet F330 bez napełniaczy. Przełomy po próbie ścinania miały najczęściej charakter adhezyjno-kohezyjny. Rozrzut wartości w poszczególnych próbkach jest stosunkowo duży. Odchylenie standardowe jest najmniejsze w przypadku wytrzymałości na ścinanie próbek klejonych przy użyciu czystego kleju Agomet F330 [1].

W temperaturze 100 °C dodane proszki aluminium oraz miedzi do kleju Agomet F330 podniosły również wytrzymałość mechaniczną połączeń klejowych. W przypadku kleju z dodatkiem proszku aluminiowego wzrost ten wyniósł prawie 20% w porównaniu z klejem bez napełniacza. Natomiast w przypadku dodatku proszku miedzi wzrost ten był jeszcze większy i wyniósł 28%. We wszystkich przeprowadzonych próbach w temperaturze 100 °C przełomy połączeń klejowych miały zróżnicowany charakter w zależności od rodzaju kleju. W przypadku kleju kompozytowego z napełniaczem Cu dominujący był przełom adhezyjny, dla kleju z proszkiem aluminiowym występował przełom o charakterze kohezyjnym a dla kleju Agomet F330 przełom miał charakter mieszany adhezyjno - kohezyjny.

Właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych w temperaturze 200 °C są już niewielkie, wynoszą poniżej 1 MPa. Charakter przełomu połączeń klejowych był najczęściej adhezyjno - kohezyjny. Klej Agomet F330 jest oparty na żywicy metakrylowej stanowiącej związek organiczny, który w temperaturze 200 °C ulega zmiękczeniu, mimo ograniczenia jego udziału przez dodatek napełniaczy metalowych [1]. Wpływ napełniaczy na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jest już w tej temperaturze niezauważalny [1].

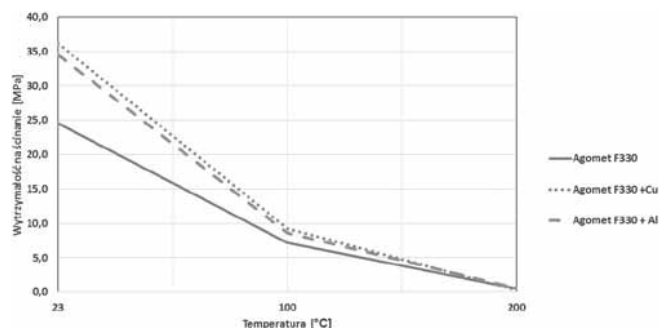
Przy niewielkich obciążeniach mechanicznych i przy zachowaniu ewentualnie wymaganej szczelności połączenia,

nawet tak niewielka wytrzymałość na ścinanie, poniżej 1 MPa może okazać się wystarczająca. Świadczą o tym dane z karty technicznej środka uszczelniającego Terostat - 930 z rodziny MS-polimerów, o właściwościach klejących, którego wytrzymałość na ścinanie wynosi 0,85 MPa [25].

**Tablica XI.** Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych w temperaturze pokojowej, 100 i 200 °C (w nawiasach podano odchylenie standardowe) [1]

**Table XI.** A comparison of average values from shear strength of samples carried out at room temperature, 100 and 200 °C (in parentheses are the standard deviation of the sample) [1]

| Lp. | Klej             | Wytrzymałość na ścinanie, MPa |           |           |
|-----|------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
|     |                  | 23 °C                         | 100 °C    | 200 °C    |
| 1   | Agomet F330      | 24,5 (5,8)                    | 7,2 (1,8) | 0,5 (0,1) |
| 2   | Agomet F330 + Cu | 36,1 (10,2)                   | 9,2 (1,7) | 0,3 (0,1) |
| 3   | Agomet F330 + Al | 34,5 (8,5)                    | 8,6 (1,4) | 0,6 (0,1) |



**Rys. 7.** Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych w funkcji temperatury [1]

**Fig. 7.** Shear strength of the bond as a function of temperature [1]

## Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

Klej ceramiczny Silicate 1200 był trudny do dozowania z uwagi na swoją konsystencję. Jego właściwości adhezyjne w podwyższonej temperaturze pracy są niezadowalające. Nadaje się do klejenia materiałów z półzamkniętym gniazdem (szczeliną) przy niewielkich obciążeniach mechanicznych. Połączenia wykonane klejem ceramicznym okazały się kruche. Klej nie ulega zmiękczeniu oraz zauważalnemu powierzchniowemu utlenieniu pod wpływem długotrwałego (40 min) wygrzewania w temperaturze 250 °C.

Wygrzewanie badanych klejów w temperaturze sięgającej do 250 °C nie wpływa znacząco na wartość twardości Shore'a typu D, mierzoną w temperaturze pokojowej.

Wpływ napełniaczy dodanych do osnowy kleju Agomet F330, stanowiącej żywicę metakrylową, jest istotny w temperaturze pokojowej i w temperaturze 100 °C. Sferyczny proszek miedzi podniósł wytrzymałość na ścinanie połączenia klejowego w temperaturze 23 i 100 °C odpowiednio o 47 i 28% w porównaniu z połączeniami bez napełniacza. Proszek aluminium wykazał mniejszy wpływ na wzrost wytrzymałości na ścinanie połączenia klejowego. Wzrost ten wyniósł 40% w przypadku temperatury pokojowej i 21% w temperaturze 100 °C.

Połączenia wykonane klejem syntetycznym Agomet F330 na bazie organicznej tracą swoje właściwości wytrzymałościowe w temperaturze 200 °C w wyniku zmiękczenia ich osnowy. Napełniacze metalowe nie mają wtedy wpływu na wytrzymałość mechaniczną kompozytu klejowego. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych o budowie kompozytowej w temperaturze 200 °C jest niewielka i wynosi w granicach 0,3-0,6 MPa. To jednak może być wystarczające w warunkach małej obciążalności mechanicznej.

## Literatura

[1] GOŁEMBIEWSKI A. Badania połączeń wykonanych klejami konstrukcyjnymi w podwyższonej temperaturze, Praca magisterska pod kier. prof. Z. Mirskiego, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.

[2] PIWOWARCZYK T.: Zwiększanie oddziaływań adhezyjnych i kohezyjnych w połączeniach klejowych węglików spiekanych ze stalią C45, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2008.

- [3] PILARCZYK J. (red.): Poradnik inżyniera – Spawalnictwo, tom 2, WNT Warszawa 2014.
- [4] CHESTER R.J., WALKER K.F., CHALKLEY P.D.: Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, nr 19/1999.
- [5] GODZIMIRSKI J.: Analiza wytrzymałości połączeń klejowych elementów metalowych obciążonych statycznie, Rozprawa habilitacyjna, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1988.
- [6] GODZIMIRSKI J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych, WNT, Warszawa 2002.
- [7] PETRIE E., M.: *Handbook of adhesives and sealants*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [8] Mirski Z., Granat K., Piwowarczyk T.: Zastosowanie ciepłoprzewodzących mas klejowych w odlewnictwie, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 8, nr 1/2008, s. 215-218.
- [9] Mirski Z., Piwowarczyk T., Zych B.: Przewodność cieplna połączeń klejowych o budowie kompozytowej, *Energetyka*, zeszyt tematyczny nr 14/2007, s. 72-75.
- [10] Mirski Z., Piwowarczyk T.: Composite adhesive joints of hardmetals with steel, *Adhesives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. IX. No. 2/2009, s. 93-104.
- [11] MIRSKI Z., PIWOWARCZYK T.: Klejenie węglików spiekanych i stali w aspekcie zastosowań w przemyśle narzędziowym. VIII Konferencja Naukowo - Techniczna, Problemy i innowacje w remontach energetycznych PIRE 2005, Szklarska Poręba, 16-18 listopada 2005, Wyd. OBR Gospodarki Remontowej Energetyki, Wrocław 2005, s. 199-210.
- [12] MIRSKI Z., PIWOWARCZYK T.: Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości – Przegląd Spawalnictwa, nr 8/2008, s.12-21.
- [13] LOCTITE WORLDWIDE DESIGN HANDBOOK, katalog danych technicznych, HENKEL, 2005.
- [14] Henkel, Loctite, Bonderite, Teroson, Tabela doboru produktów, Kleje przemysłowe, uszczelniacze i produkty do przygotowania powierzchni, wydanie 3.
- [15] [http://www.dlautrzymaniaruchu.pl/?id=208&idk=49&id\\_lang=1&pro=pro](http://www.dlautrzymaniaruchu.pl/?id=208&idk=49&id_lang=1&pro=pro)
- [16] <http://edostawca.pl/pl/c/Kleje-epoksydowe-Araldite/79>
- [17] [http://www.kisling.ch/datenblaetter/en/3000/tis\\_3020\\_e.pdf](http://www.kisling.ch/datenblaetter/en/3000/tis_3020_e.pdf)
- [18] [http://www.klejeszu.pl/produccenci/LOXEAL/KLEJE\\_ANAEROBOWE\\_DO\\_ZABEZPIECZANIA/adt-24-18.pdf](http://www.klejeszu.pl/produccenci/LOXEAL/KLEJE_ANAEROBOWE_DO_ZABEZPIECZANIA/adt-24-18.pdf)
- [19] [http://www.klejeszu.pl/produccenci/LOXEAL/KLEJE\\_AKRYLOWE/LOXEAL\\_DANE\\_TECHNICZNE.pdf](http://www.klejeszu.pl/produccenci/LOXEAL/KLEJE_AKRYLOWE/LOXEAL_DANE_TECHNICZNE.pdf)
- [20] [http://www.technicqll.pl/images/TDS/specjalne/TDS\\_R457\\_KLEJ\\_TERMICZNY.pdf](http://www.technicqll.pl/images/TDS/specjalne/TDS_R457_KLEJ_TERMICZNY.pdf)
- [21] [http://sklep.artom.com.pl/Klej-ceramiczny-RESBOND-919-do-1500-st-C-opakowa\(3,2260,2523\).aspx](http://sklep.artom.com.pl/Klej-ceramiczny-RESBOND-919-do-1500-st-C-opakowa(3,2260,2523).aspx)
- [22] [http://www.kleje.milar.pl/pdf/Agomet\\_F\\_330.pdf](http://www.kleje.milar.pl/pdf/Agomet_F_330.pdf)
- [23] [http://riad.usk.pk.edu.pl/~naszapol/np55/str30\\_32.shtml](http://riad.usk.pk.edu.pl/~naszapol/np55/str30_32.shtml) (Wnuk M. P.).
- [24] [http://dozowanie.org/e107\\_plugins/content/content.php?content.44](http://dozowanie.org/e107_plugins/content/content.php?content.44) (Bernaciak M.).
- [25] TEROSON – Produkte für Industrie und Handwerk, Henkel Teroson GmbH, Heidelberg.