

Jacek Domińczuk¹

WPŁYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW KONSTRUKCYJNYCH I TECHNOLOGICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Streszczenie. W artykule opisano wpływ czynników konstrukcyjnych tj. długości zakładki, grubości klejonych elementów, grubości spoiny klejowej, wielkości wypływkii, ukosowanie końców zakładki, sztywność kleju w stanie utwardzonym, sztywność materiałów łączonych, oraz czynników technologicznych: sposób przygotowania powierzchni, temperatura, ciśnienie utwardzania, na wytrzymałość połączeń klejowych. Podano znane zależności matematyczne. Przedstawiono wykresy uzyskane w wyniku prowadzonych badań.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, wytrzymałość, czynniki konstrukcyjne, czynniki technologiczne.

WPROWADZENIE

Bardzo dużą rolę w rozwoju nowoczesnych konstrukcji odgrywa technologia klejenia. W wielu przypadkach stanowi ona alternatywę dla dotychczas stosowanych metod łączenia, uszczelniania czy regeneracji części maszyn. Ponadto klejenie stwarza nowe możliwości w zakresie łączenia materiałów pozwalając na zmniejszenie wymiarów łączonych części dzięki uproszczeniu ich konstrukcji. Jest to bardzo istotne zwłaszcza w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Kleje znajdują również zastosowanie w naprawach pozwalając poprzez regenerację części obniżyć koszt ich realizacji. Tak szerokie możliwości zastosowania klejenia powodują konieczność poszukiwania optymalnych warunków prowadzenia tego procesu i określenia czynników w sposób istotny wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych. Do grupy tych czynników należą czynniki konstrukcyjne i technologiczne.

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

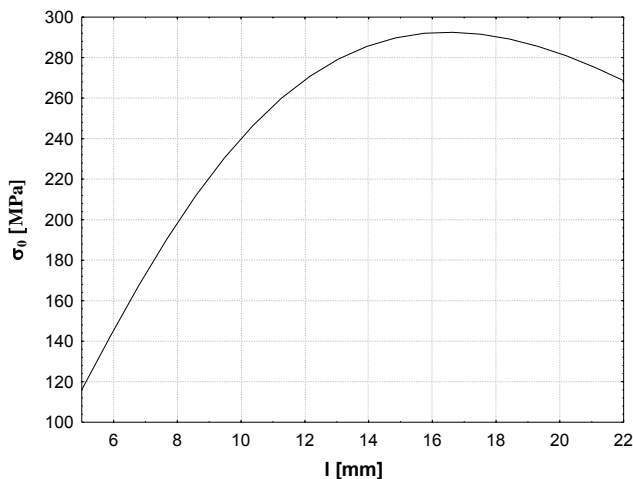
WPLYW CZYNNIKÓW KONSTRUKCYJNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Analiza literatury oraz własne doświadczenia pozwalają stwierdzić, że na wytrzymałość połączeń klejowych ma wpływ wiele czynników konstrukcyjnych.

Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: długość zakładki (l), grubość klejonych elementów (δ), grubość spoiny klejowej (δ_k), wielkość wypłytki, ukosowanie końców zakładki, sztywność kleju w stanie utwardzonym (G_k), sztywność materiałów łączonych (E_m).

Długość zakładki

Badania wykazały, że zwiększenie długości zakładki powyżej pewnej wartości granicznej jest niecelowe. Nie skutkuje to bowiem wzrostem wytrzymałości połączenia klejowego [5, 10]. Analizując wpływ długości zakładki na wytrzymałość połączenia stwierdzono, że cechą charakterystyczną zakładkowych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie jest to, że ich wytrzymałość nie jest proporcjonalna do długości zakładki (tym samym do pola powierzchni spoiny) [11]. Na rys. 1. przedstawiono przykładowy nomogram nośności zakładkowego połączenia klejowego.

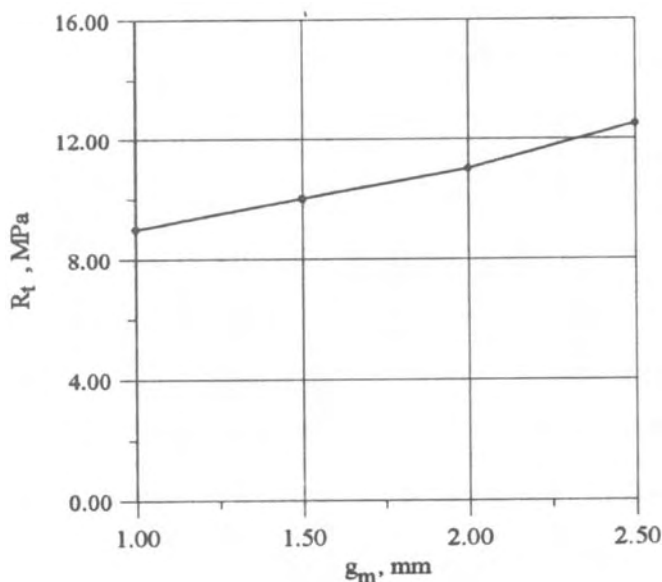


Rys. 1. Nomogram nośności jednozakładkowych połączeń blach stalowych o grubości $\delta=1$ [mm], grubości spoiny klejowej $\delta_k=0,1$ [mm], parametr $Rq=1,7$ [μm], klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80

Grubość klejonych elementów

Z wyników badań prezentowanych w pracach [4, 10, 11] wynika, że wraz ze wzrostem grubości klejonych elementów wzrasta wytrzymałość połączenia. Jest to związane ze zmianą rozkładu naprężeń w spoinie klejowej. Przykładowy

przebieg zmian wytrzymałości połączenia klejowego w funkcji grubości łączonych elementów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wpływ grubości łączonych elementów δ (g_m) na wytrzymałość na ścinanie R_t , połączenia wykonanego z PA6, klej E5/Z-1/ 10:1 [10]

Grubość spoiny klejowej

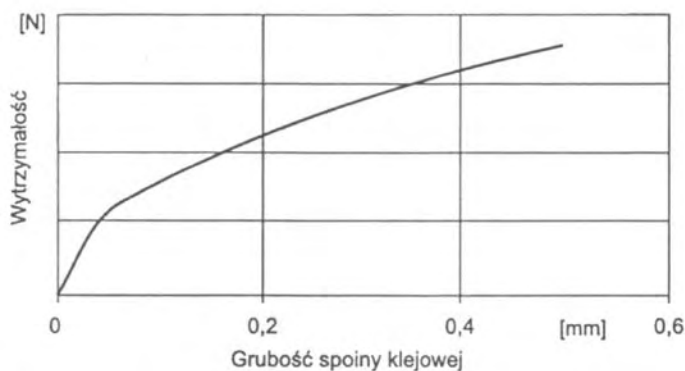
Wytrzymałość połączeń klejowych zależy od grubości ich spoin. W literaturze można odnaleźć teoretyczne zależności określające wytrzymałość połączeń klejowych na ścinanie [5]. Dla połączenia zakładkowego obciążonego siłami rozciągającymi elementy połączenia ma ona następującą postać:

$$P = \tau_n b \sqrt{\frac{2E\delta\delta_k}{G_k}} \quad (1)$$

gdzie: τ_n – niszczące naprężenie styczne spoiny klejowej, b – szerokość spoiny klejowej, E – moduł sprężystości wzdłużnej elementów klejonych, G_k – moduł sprężystości postaciowej kleju (spoiny klejowej), δ – grubość elementu klejonego, δ_k – grubość spoiny klejowej.

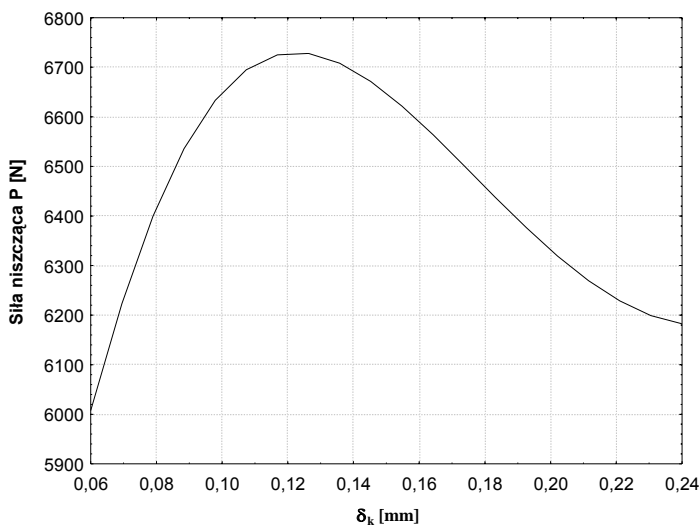
W zależności tej występuje grubość spoiny klejowej. Przy założeniu, że wartości naprężeń niszczących spoiny nie zależą od ich grubości, zależność wytrzymałości połączeń obciążonych na ścinanie byłaby następująca (rys. 3.):

$$P = C\sqrt{\delta_k} \quad (2)$$



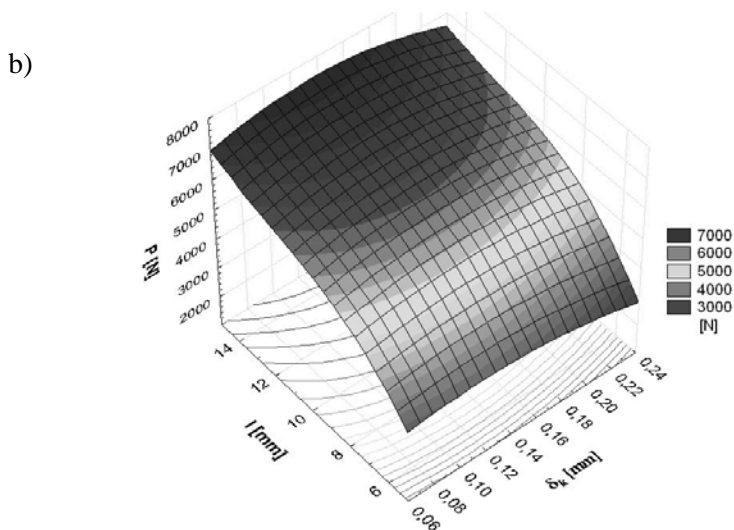
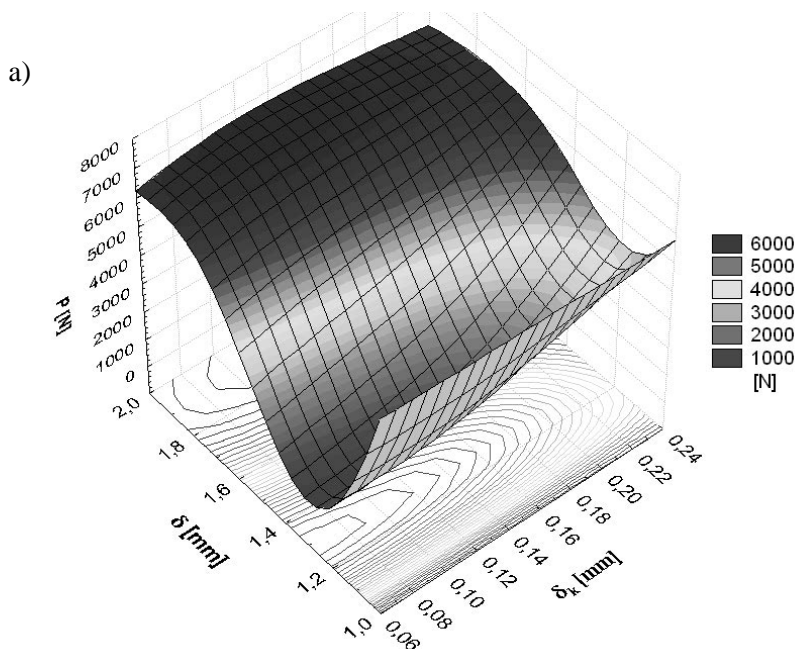
Rys. 3. Charakter zależności wytrzymałości na ścinanie lub oddzieranie połączenia klejowego od grubości spoiny, przy założeniu niezależności naprężeń niszczących od jej grubości ($\tau_n \neq f(\delta_k)$) [5]

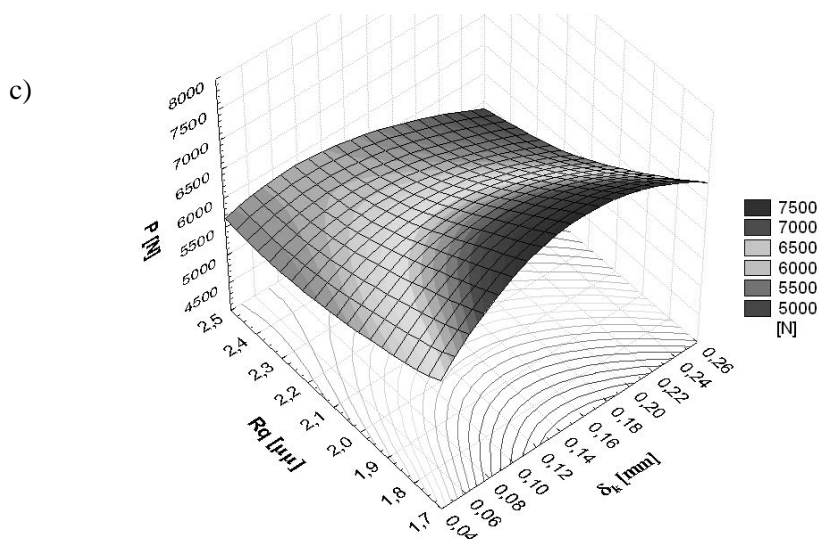
Podanej zależności nie potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych. Przeprowadzone badania własne wykazują, że w połączeniach obciążonych na ścinanie występuje optymalna – z punktu widzenia wytrzymałości połączenia, grubość spoiny klejowej. Na rys. 4. przedstawiono wykres wpływu grubości spoiny klejowej na siłę niszczącą połączenie dla zakładkowego połączenia klejowego.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80 od grubości spoiny klejowej dla $l=12$ [mm], $\delta=2$ [mm], $Rq=2$ [μm]

Na rys. 5. zaprezentowano prognozowane przy wykorzystaniu sieci neuronowej przebiegi zmian wytrzymałości połączenia w funkcji kolejnych wielkości zadanych dla omawianego przypadku chwilowego.



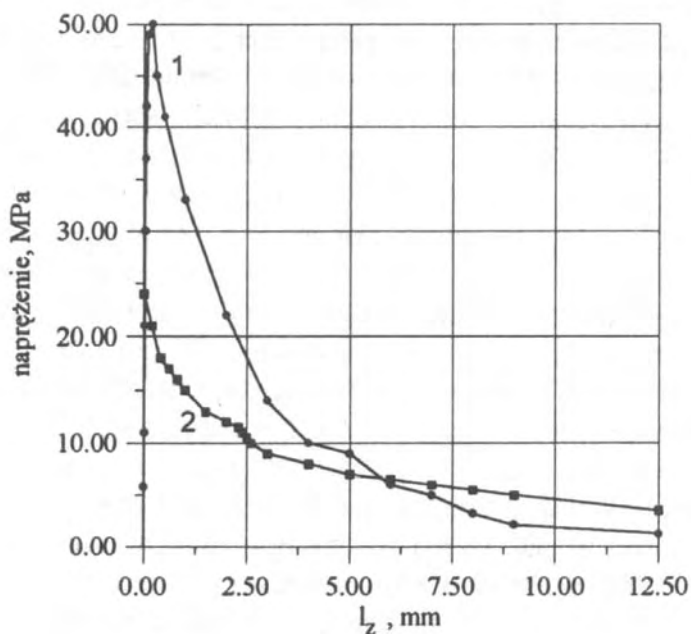


Rys. 5. Prognozowany przebieg zmian wartości siły niszczącej połączenia klejowego w funkcji: a) $\delta_k - \delta$, b) $\delta_k - l$, c) $\delta_k - Rq$

Jak wynika z prezentowanych wyników badań zmiana wytrzymałości połączenia klejowego w funkcji grubości spoiny klejowej zależy od grubości łączonych materiałów, rozwinięcia geometrycznego powierzchni i w małym stopniu od długości zakładki.

Wielkość wypłytki

Przeprowadzone przez autora pracy [7] badania wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych w funkcji długości linii brzegowej skleiny wykazały wzrost wytrzymałości połączenia wraz ze wzrostem długości linii brzegowej. Efekt ten należy wiązać z istnieniem wypłytki na brzegu skleiny, która zwiększa powierzchnię sklejenia. Badania zamieszczone w pracach [1, 10] wykazują, że wpływ ten jest nieco większy niż wynikający z analizy geometrycznej. Badania numeryczne wykazały, że na efekt zwiększenia naprężenia niszczącego wraz ze wzrostem długości linii brzegu skleiny wpływa także zmniejszenie się naprężenia na końcach zakładki. Przykładowy rozkład naprężenia stycznego wzdłuż długości zakładki przedstawiono na rys. 6.



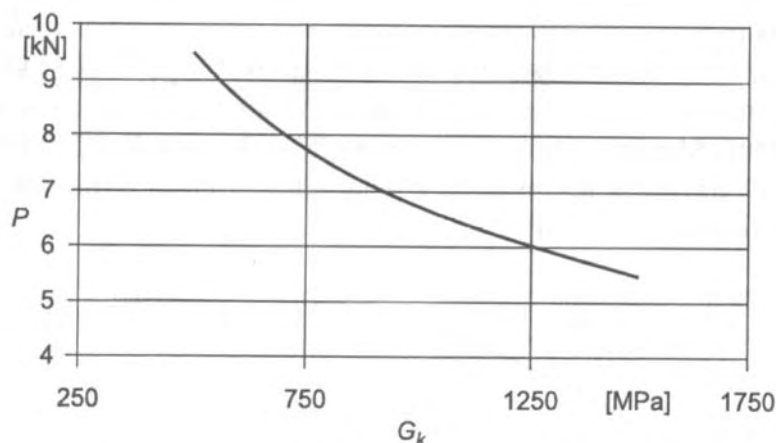
Rys. 6. Rozkład naprężenia stycznego wzdłuż długości zakładki: $E_k=3500$ [MPa], $E=2,1 \times 10^5$ [MPa], $\delta=2$ [mm], $l=25$ [mm], $P=2700$ [N], $\tau_{sr}=5,4$ [MPa], 1-połączenie bez wypływką, 2-połączenie z wypływką [10]

Ukosowanie końców zakładki

Zmniejszenie maksymalnych naprężeń na końcach spoin klejowych, a tym samym zwiększenie wytrzymałości połączeń, można uzyskać przez ukosowanie krawędzi łączonych elementów. Jak podaje autor pracy [10], obserwuje się pozytywny wpływ ukosowania końców zakładki niezależnie od grubości łączonych materiałów, jak również niezależnie od zastosowanego kleju. Autor tej pracy zauważa również, że zmniejszenie kąta ukosowania powoduje wzrost wytrzymałości połączenia.

Sztywność kleju w stanie utwardzonym

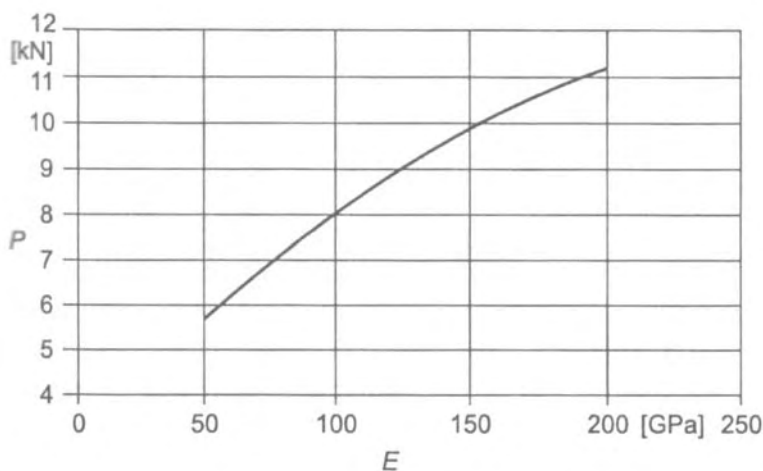
Współczynnik sprężystości poprzecznej G_k charakteryzuje sztywność kleju w stanie utwardzonym. Na podstawie informacji zawartych w pracach [16, 10, 13] oraz zależności (1) można stwierdzić, że wytrzymałość jest funkcją dwóch charakterystycznych dla kleju wielkości: naprężeń niszczących (stycznych lub normalnych) i współczynnika sprężystości (poprzecznej G_k lub wzdłużnej E_k). Z prezentowanych wyników badań można wnioskować, że wraz ze zwiększaniem się naprężeń niszczących kleju i zmniejszaniem się jego współczynnika sprężystości wzrasta wytrzymałość połączeń klejowych (rys. 7.).



Rys. 7. Zależność wytrzymałości połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości postaciowej kleju [13]

Sztywność materiałów łączonych

Wyniki badań eksperymentalnych prezentowanych w pracy [13] wskazują, że połączenia klejowe blach posiadających większy moduł sprężystości przenoszą większe obciążenia w porównaniu z połączeniami blach o mniejszym module (rys. 8.).



Rys. 8. Zależność wytrzymałości połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości elementów klejonych [13]

Jak należy się spodziewać również zmiana kształtu połączenia może korzystnie wpłynąć na wytrzymałość.

WPLYW CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Spośród czynników technologicznych wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych największe znaczenie odgrywa sposób przygotowania powierzchni, temperatura i ciśnienie utwardzania.

Sposób przygotowania powierzchni

Duży wpływ na wytrzymałość połączeń adhezyjnych ma sposób przygotowania powierzchni łączonych elementów [5, 8, 9, 10]. Od stanu fizyczno-chemicznego warstwy wierzchniej klejonych powierzchni zależy bowiem wytrzymałość adhezyjna (rys. 9.).

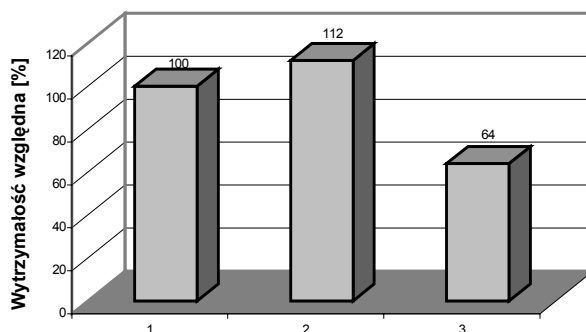
Wytrzymałość względna jest definiowana jako:

$$W_0 = \frac{W_i}{W_1} \cdot 100[\%]$$

gdzie:

W_1 – wytrzymałość dla pierwszego przypadku,

W_i – wytrzymałość dla i-tego przypadku.



Rys. 9. Wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych ze stali St3, klej Araldit 2012 Rapid: 1-po obróbce narzędziem ściernym P320, 2-po obróbce narzędziem ściernym P320 i odtłuszczeniu preparatem Loctite 7061, 3-po obróbce narzędziem ściernym P320 i płukaniu wodą wodociągową [9]

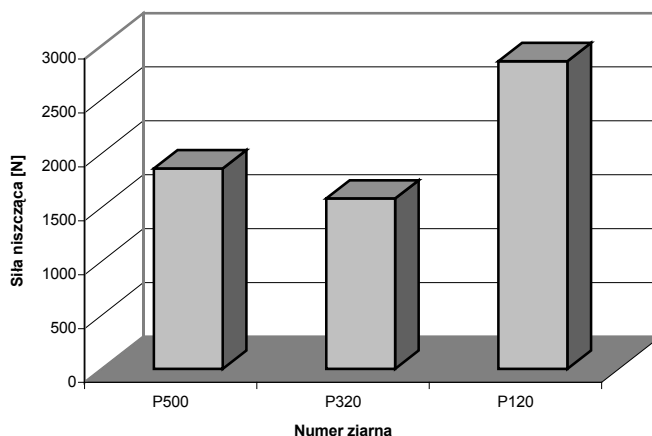
Przeprowadzone badania własne wykazały, że powierzchnie do klejenia powinny być czyste, pozbawione tłuszczów i w przypadku większości materiałów również tlenków. W przypadku stopów aluminium nie zaleca się usuwania warstwy tlenków, które są mocno związane z podłożem.

Powierzchnię materiałów przeznaczonych do klejenia można również poddawać obróbce chemicznej i elektrochemicznej [8]. Obróbkę tę należy

przewodź zgodnie z zaleceniami będącymi wynikiem prowadzonych doświadczeń.

W przypadku zastosowania obróbki mechanicznej powierzchni (schropowacenie płótnami ściernymi, piaskowanie), następuje rozwinięcie geometryczne powierzchni, które istotnie wpływa na adhezję mechaniczną. Wzrasta czynna powierzchnia styku kleju z materiałem łączonym. Należy się spodziewać, że istnieje pewien optymalny dla danego materiału i stosowanego kleju stan rozwinięcia geometrycznego powierzchni. Nadmierne rozwinięcie może powodować obniżenie wytrzymałości, jeśli masa klejowa nie jest w stanie zwilżyć wgłębień nierówności.

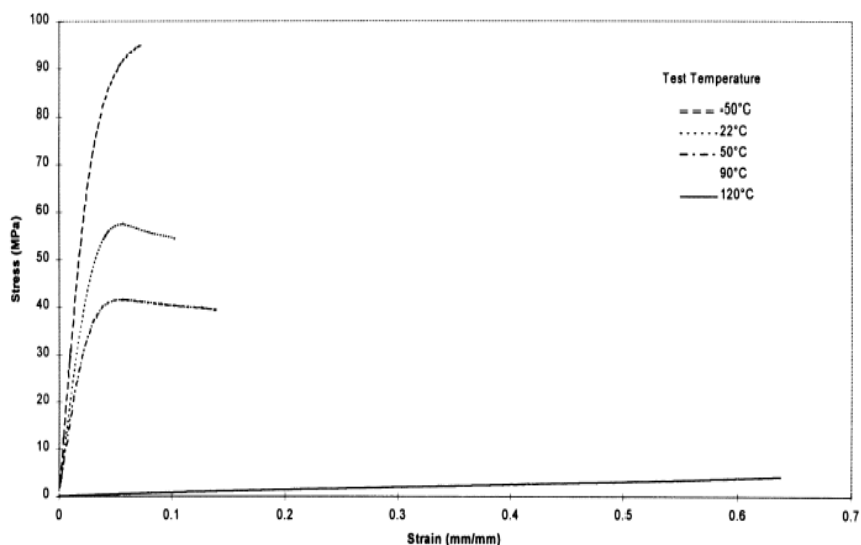
Z wyników badań własnych (rys. 10.) przeprowadzonych dla stali St3 można stwierdzić, że najwyższą wytrzymałość połączenia uzyskuje się po obróbce narzędziem nasypowym o numerze P120 – dotyczy to przypadku badania wytrzymałości połączeń, dla których w fazie ich przygotowania nie stosowano odtłuszczania.



Rys.10. Zależność wytrzymałości połączenia klejowego od stanu warstwy wierzchniej [2]

Temperatura

Na wytrzymałość połączeń klejowych ma wpływ temperatura gdyż jej zmiana rzędu kilkudziesięciu stopni powoduje zmiany właściwości tworzyw polimerowych. Wraz ze wzrostem temperatury maleje moduł sprężystości klejów, spada ich wytrzymałości kohezyjna i adhezyjna [1, 3], czego skutkiem jest obniżenie wartości naprężeń niszczących spoiny (rys. 11.). Prowadząc badania należy ustalić warunki temperaturowe prowadzenia doświadczeń.

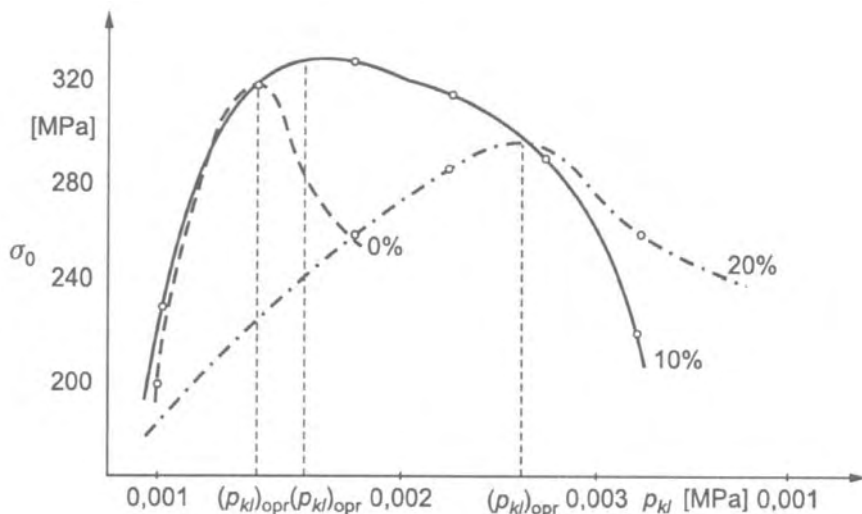


Rys. 11. Wpływ temperatury na naprężenia dla połączeń adhezyjnych [1]

Z analizy badań prezentowanych w pracach [5, 10] wynika, że wytrzymałość niektórych typów połączeń klejowych zależy od wartości modułu sprężystości i od wartości naprężeń niszczących spoiny klejowej, a innych tylko od wartości naprężeń niszczących (połączenia obciążone na odrywanie).

Ciśnienie utwardzania

Nacisk jednostkowy jest jednym z parametrów technologicznych utwardzania spoiny klejowej. Dobierając nacisk jednostkowy należy brać pod uwagę rodzaj kleju (jego gęstość, lepkość, skurcz utwardzania) oraz rodzaj sklepanych materiałów i sposób przygotowania ich powierzchni do klejenia [4, 5, 12]. Należy również dążyć do uzyskania optymalnej ze względu na wytrzymałość grubości spoiny klejowej (rys. 12).



Rys. 12. Wpływ nacisków klejenia (p_{kl}) na wytrzymałość połączeń klejowych obciążonych na ścinanie, wykonanych przy użyciu prepolimerów kompozycji Epidian 57 utwardzanej TECZA, 0%, 10%, 20% – określona procentowo część stechiometrycznej ilości utwardzacza dodawana do żywicy w celu uzyskania prepolimeru [5]

PODSUMOWANIE

Jak wynika z prezentowanej analizy wpływu poszczególnych czynników na wytrzymałość połączeń klejowych, określenie końcowej wytrzymałości połączenia jest rzeczą trudną. W przypadku procesów adhezyjnych należy szczególną uwagę zwracać na czystość powierzchni i jej rozwinięcie. Właściwie należy dobierać grubość warstwy kleju stosowanego w połączeniu. Zaś sam proces łączenia powinien przebiegać w zdefiniowanych warunkach środowiskowych. Złożoność parametrów wpływających na jakość połączenia sprawia, że dla określonego typu połączenia charakteryzującego się specyficznymi cechami geometrycznymi jak i materiału przyłączy należy indywidualnie dobierać technologię łączenia. Dotychczas nie zdefiniowano algorytmu pozwalającego w sposób prosty prognozować wytrzymałość połączeń w oparciu o czynniki konstrukcyjne i technologiczne.

LITERATURA

1. Ashcroft I.A., Abdel Wahab M.M., Crocombe A.D., Hughes D.J., Shaw S.J.: The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints. Part 1: testing and fractography. *Composites: Part A* 32 (2001) 45–58.
2. Domińczuk J.: Technologia klejenia w montażu i regeneracji. *Technologia i Automatykacja Montażu*. Numer: 3/2003, s. 3-9.

3. Fumito Nakagawa, Toshiyukisawa: Photoelastic thermal stress measurements in scarf adhesive joints under uniform temperature changes. *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 15, No. 1, pp. 119–135 (2001).
4. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997 r.
5. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT, Warszawa 2002.
6. He X., Oyadiji S.O.: Influence of adhesive characteristics on the transverse free vibration of single lap-jointed cantilevered beams. *Journal of Materials Processing Technology* 119 (2001) 366-373.
7. Joseph D. Melogran, Joachim L. Grenestedt, William J. Maroun: Adhesive tongue-and-groove joints between thin carbon fiber laminates and steel. *Composites: Part A* 34 (2003), pp. 119–124.
8. Kuczmaszewski J. i in.: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego, nr 7 T08 E 03415, Lublin, 1999 r.
9. Kuczmaszewski J., Domińczuk J.: Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej stali konstrukcyjnych. „Przegląd Mechaniczny”, 3’01, s. 5-8.
10. Kuczmaszewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. WU Politechnika Lubelska, 1995.
11. Shih-Chuan Her: Stress analysis of adhesively-bonded lap joints *Composite Structures* 47 (1999), pp. 673-678.
12. Sikora R.: Technologiczne aspekty kierowania jakością klejenia. Nowe technologie i zastosowania żywic epoksydowych i poliestrowych, Konferencja Naukowo-Techniczna, Lublin, 1979 r., s. 357–369.
13. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

THE INFLUENCE OF SELECTED CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE ADHESIVE JOINTS STRENGTH

Summary

The paper presents the influence of constructional factors (the lengths of lap, thickness of joined elements, the thickness of adhesive layer, size of flash, bevelling off lap ends, the stiffness of cured adhesive, the stiffness of glued elements) and technological factors (surface treatment, temperature, the pressure of curing) on the strength of adhesive joints. Mathematical dependences were shown. Graphs received as a result of research were introduced.

Keywords: adhesive joints, strength, constructional factors, technological factors.