

WPLYW GRUBOŚCI WARSTWY KLEJU NA SZTYWNOŚĆ SPOINY W POŁĄCZENIU DOCZOŁOWYM METAL-METAL

Influence of adhesive layer thickness on joint rigidity in metal-metal butt joint

Józef KUCZMASZEWSKI, Kamil ANASIEWICZ

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań, mające na celu określenie zmian sztywności kleju epoksydowego w zależności od grubości spoiny klejowej. W połączeniach klejowych metali, w strefie przyściennej klejonych elementów, występuje cienka warstwa o odmiennych właściwościach względem rdzenia spoiny. W spoinach o niewielkiej grubości istotny może być wpływ właściwości strefy przyściennej na uogólnioną wartość modułu Younga. Wraz ze wzrostem grubości spoiny znaczenie tej strefy i pozornego modułu Younga, kształtowanego w wyniku specyficznego porządkowania struktury po wpływie pola sił warstwy przyściennej metalu, powinno zanikać na rzecz wartości podstawowej modułu Younga, charakterystycznej dla materiału kleju. Przedstawiono wyniki badań wytrzymałości połączenia klejowego, wykazujące spadek wytrzymałości na rozciąganie połączenia doczołowego wraz ze wzrostem grubości spoiny. Spadek wytrzymałości połączenia częściowo jest związany z regresją wartości modułu Younga w spoinach o większej grubości. Ma to także związek z występowaniem wad struktury, takich jak pęcherze gazowe, rzadzizny, które mogą intensyfikować wpływ grubości skleiny na jej wytrzymałość.

Słowa kluczowe: pozorny moduł Younga, adhezja, kohezja, połączenie klejowe

Abstract: Article presents research aimed to determine changes in stiffness of epoxy adhesive depending on adhesive layer thickness. In metal-metal adhesive joints, in boundary zone of bonded elements occurs thin layer of adhesive with different properties compared to the core of the joint. In joints of small thickness contribution of properties of boundary zone in generalized value of Young's Modulus might be highly essential. With the increase of joint thickness influence of apparent Young's modulus, formed in the result of specific structure ordering caused by field force of metal boundary zone, should decline in favor for basic value of Young modulus, characteristic for the adhesive material. Results of tensile strength tests were shown, indicating decrease of tensile strength in reference to increase of joint thickness. Decrease of adhesive joint tensile strength is associated with reduction of Young's modulus value in joints of higher thickness. Change is related with occurrence of structural defects, such as gas bubbles, looseness, which might intensify influence on tensile strength with the increase of thickness of adhesive joint.

Key words: apparent Young's modulus, adhesion, cohesion, adhesive joint

Wstęp

Rodzaj i gatunek materiału klejonego w złączu klejowym, pomimo odpowiednio dobranego kleju, może mieć znaczący wpływ na charakterystykę zaprojektowanego złącza. Szczególnie w połączeniach klejowych metali, klejona powierzchnia silnie oddziałuje na cząsteczki kleju w trakcie utwardzania spoiny. Takie oddziaływanie sprawia, że w strefie przyściennej klej charakteryzuje się innymi właściwościami w stosunku do kleju pozbawionego kontaktu z metalem w trakcie utwardzania. Cienka warstwa charakteryzuje się właściwościami innymi niż rdzeń spoiny [2, 3]. W dotychczasowych badaniach zaobserwowano umocnienie się kleju, które skutkowało zwiększeniem wartości modułu Younga [3]. Zmiana wartości modułu Younga w strefie przyściennej, w stosunku do wartości określonej w badaniach samego kleju w stanie utwardzonym, nazywana jest pozornym modułem Younga. Określenie wartości pozornego modułu Younga oraz wyznaczenie głębokości zalegania umocnienia w spoinie może być ważnym elementem w procesie projektowania i przewidywania wytrzymałości połączeń klejowych [1].

Zjawisko specyficznego porządkowania struktury w obszarze granicy faz metal – klej ściśle związane jest ze zjawiskiem adhezji, zwłaszcza z oddziaływaniem pola

sił elektrostatycznych. Powierzchnie łączonych elementów i kleju przyciągają się do siebie dzięki działaniu sił elektrostatycznych. Przechodzenie elektronów z jednego materiału w drugi prowadzi do powstania podwójnej warstwy elektrycznej, a zjawisko to prowadzi do powstania połączenia adhezyjnego i odpowiada za jego odporność na rozdzielenie. Adsorpcyjna teoria adhezji związana jest z oddziaływaniami fizykochemicznymi na granicy faz. Adsorpcja fizyczna zachodzi w przypadku oddziaływania sił dipolowych, indukcyjnych oraz dyspersyjnych na granicy faz. Adsorpcja chemiczna zachodzi, gdy powstają wiązania chemiczne, najczęściej przez uwspólnianie pary elektronów. Zazwyczaj adsorpcja chemiczna i fizyczna występują jednocześnie [4, 5]. Zgodnie z przedstawionymi zjawiskami na granicy faz łączonych materiałów występuje szereg sił i oddziaływań silnie wpływających na właściwości połączenia. Pomimo mikroskali tych oddziaływań dla spoin o małej grubości, mogą one mieć istotny wpływ na wytrzymałość połączenia klejowego.

Metodyka badań

W pracy podjęto analizę wytrzymałości połączeń klejowych na odrywanie w zakresie niskich wartości grubości skleiny. Przy takich wartościach grubości wyraźnie

może uwidocznic się wpływ porządkowania się struktury na wartość wytrzymałości. Można przypuszczać, że zwłaszcza w badaniach na odrywanie zjawisko to może wystąpić w zauważalny sposób. Po przekroczeniu pewnej wartości grubości skleiny o wytrzymałości zacząć decydować także właściwości rdzenia skleiny, odmienne od tych z bezpośredniej strefy przylegającej do metalu, a także ewentualne nieciągłości struktury z tej strefy.



Rys. 1. Badane próbki stalowe łączone klejowymi spoinami doczołowymi

Fig. 1. Tested steel samples bonded with adhesive butt-joints

Próbki prostopadłościennne, z materiału C45, o przekroju poprzecznym 16×10 mm, klejono doczołowo klejem Epidian 57/Z1 (żywica epoksydowa utwardzana trietylenotetraaminą – Z1), w stosunku masowym 100:10. Masę klejową po wymieszaniu odgazowano w komorze próżniowej, a rys. 1. przedstawia badane próbki.

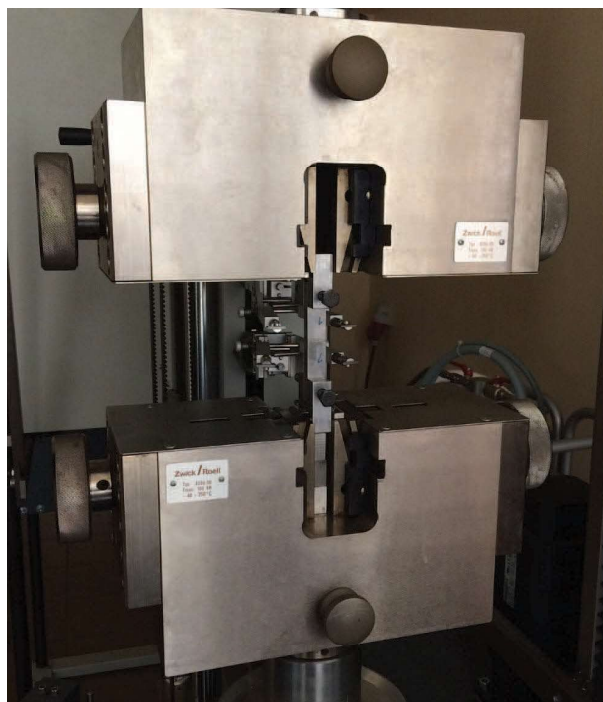
Powierzchnię próbek przed klejeniem przygotowano przez szlifowanie płótnem ściernym o ziarnistości 320. Szlifowanie prowadzono w sposób nieukierunkowany przez 2 minuty, zapewniając płaskość powierzchni czołowej próbki oraz jej prostopadłość względem kierunku rozciągania. Przygotowaną powierzchnię płaskowników odtłuszczone środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Połączenie wykonano w temperaturze otoczenia 18–20°C, przy wilgotności względnej 38–40%. Żywicę epoksydową utwardzano jednostopniowo w temperaturze pokojowej przez 7 dni, przy zastosowaniu jednorodnego nacisku ok. 0,1 MPa na wszystkich próbkach. Badania wytrzymałościowe na rozciąganie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 15870:2009 [6]. Przygotowano 4 typy próbek o zróżnicowanych grubościach spoin. Uśrednione wartości grubości spoin przedstawiono w tab. 1.

Dla każdej grubości spoiny przygotowano 5 próbek. Próbę wytrzymałościową przeprowadzono przy użyciu makroekstensometru, co miało na celu badanie

Tabela. 1. Zestawienie średnich grubości badanych spoin klejowych

Table. 1. Summary of average thickness of tested adhesive joints

Nr próbki	Grubość spoiny [mm]
1	0,01
2	0,05
3	0,08
4	0,12



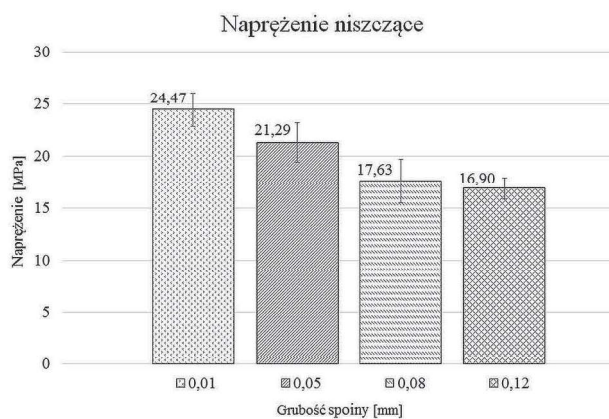
Rys. 2. Stanowisko badawcze z próbką zamontowaną w szczękach

Fig. 2. Test rig with specimen mounted in clamps

odkształcenia spoiny. Przyjęto odcinek początkowy pomiędzy szczękami makroekstensometru równy 30 mm. Aby wyeliminować wydłużenie płaskowników stalowych, przeprowadzono próbę rozciągania próbek stalowych bez spoin w analizowanym zakresie obciążeń. Przeprowadzenie próby rozciągania dla materiału łączonych elementów pozwoliło również na wyeliminowanie niekorzystnego wpływu układu mocowania próbek w maszynie wytrzymałościowej. Układ napięto siłą wstępną wynoszącą 200 N, a następnie obciążono z prędkością 1 mm/min, aż do zniszczenia spoiny klejowej. Na rys. 2 pokazano stanowisko badawcze z zamontowaną próbką.

Wyniki badań

Rezultaty przeprowadzonych badań rozciągania próbek przedstawiono na wykresie zbiorczym, rys. 3 przedstawia uśrednione wartości z pięciu prób rozciągania dla czterech typów próbek o różnych grubościach spoin.



Rys. 3. Zestawienie średnich wartości naprężeń niszczących w zależności od grubości klejowej spoiny doczołowej
Fig. 3. Summary of average values of maximum stresses in dependence of adhesive butt joint thickness

Należy zauważyć, że dla grubości skleiny $g_k = 0,08$ mm i $0,12$ mm, wartość wytrzymałości wyraźnie maleje, ale także stabilizuje się w stosunku do $g_k = 0,01$ mm i $0,05$ mm. Może to świadczyć o znajdowaniu się granicy wpływu porządkowania struktury w strefie przyściennej w przedziale $0,05$ mm– $0,08$ mm.



Rys. 4. Powierzchnie zniszczenia spoin klejowych przedstawione zależnie od ich grubości
Fig. 4. Fracture surface of adhesive joints shown depending on their thickness

Na rys. 4 przedstawiono przykładowe powierzchnie zniszczenia klejowych spoin doczołowych o zróżnicowanej grubości. Spoiny o najmniejszej grubości $g_k = 0,01$ mm zniszczono w pełni kohezyjnie. Wraz ze zwiększaniem grubości spoiny od $g_k = 0,05$ i powyżej zmienia się typ zniszczenia połączenia. W grubszych spoinach można zauważyć zniszczenie adhezyjno – kohezyjne oraz zniszczenie adhezyjne z oderwaniem warstwy kleju.

Charakterystyka powierzchni przelomów może także potwierdzać sformułowaną wcześniej hipotezę o zauważalnym wpływie porządkowania struktury w strefie przyściennej na wytrzymałość na odrywanie połączeń

klejowych. Zwiększenie sztywności materiału w tej strefie jest wynikiem specyficznej orientacji segmentów makrocząsteczek lub całych cząsteczek w kierunku silnie oddziałującej powierzchni metalu.

Wnioski

Analiza wyników eksperymentu pozwala na sformułowanie następujących wniosków i uwag o charakterze ogólnym:

- 1) Wyższa wartość wytrzymałości na rozciąganie spoiny klejowej o grubości $g_k = 0,01$ mm i $0,05$ mm w stosunku do grubości $g_k = 0,08$ mm i $g_k = 0,12$ mm może być ściśle związana z umocnieniem się spoiny w obszarze strefy przyściennej.
- 2) Połączenia klejowe z przedziału $g_k < 0,05$ mm przede wszystkim miały charakter kohezyjny, co świadczy o dobrej adhezji metal-klej, a także o umocnieniu warstwy kleju, nieobejmującej całej grubości skleiny. Nieuporządkowany strukturalnie rdzeń skleiny jest w tym przypadku słabym ogniwem w połączeniu.
- 3) Uwzględnienie zwiększonej wartości modułu Younga cienkich spoin wpłynie na poprawę dokładności projektowania połączeń klejowych.
- 4) Głębokość zalegania umocnienia w spoinie o małej grubości musi być określona w dalszych badaniach, a problem jest istotny zwłaszcza w aspekcie prognozowania wartości wytrzymałości takich połączeń.

LITERATURA

- [1] Adams R.D. 1984. "Structural Adhesive Joints In Engineering". Elsevier Applied Science Publishers. London and New York.
- [2] Afendi M., T. Teramoto, H. Bin Bakri. 2011. "Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends". *International Journal of Adhesion & Adhesives* (31): 402–411.
- [3] Anasiewicz K., J. Kuczmaszewski. 2016. „Pozorny moduł Younga klejów epoksydowych w połączeniu klejowym metali”. *Przegląd Spawalnictwa* (9): 131–134.
- [4] Ebnasajjad S. 2008. "Adhesives Technology Handbook". Wyd. II. Norwich, William Andrew.
- [5] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [6] PN-EN 15870:2009 Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń czołowych.

prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski – Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl

mgr inż. Kamil Anasiewicz – Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: k.anasiewicz@pollub.pl