

ANALIZA PRZEŁOMÓW UDAROWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLOKOWYCH

Analysis of impact fracture in adhesive block joints

Andrzej KOMOREK, Krzysztof CHOJNACKI

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki analizy rodzaju zniszczenia oraz prawidłowości przełomów udarowych połączeń klejowych. W testach stosowano metodykę badania udarności z wykorzystaniem próbek blokowych, w których spoina klejowa jest niszczona przez udarowe obciążenia ścinające. Testy przeprowadzono za pomocą młota wahadłowego, dedykowanego do badań połączeń klejowych. Maksymalna energia wahadła stosowanego w badaniach wynosiła 15 J. Do określenia udarności badanych połączeń wykorzystano zależność wg której energia zużyta do oderwania górnego elementu próbki w takim teście, czyli energia wytracona przez wahadło jest miarą wytrzymałości udarowej połączenia klejowego. Elementy próbek zostały wykonane ze stali S235 lub stopu aluminium 2017A. Do klejenia próbek wykorzystano żywicę epoksydową Epidian 57 z utwardzaczem Z1 lub klej Loctite 3421.

Rezultaty badań wskazują, że spoiny klejowe wykonane obydwoma z badanych klejów cechują się zniszczeniem o charakterze kohezyjno-adhezyjnym. Wprowadzane elementy dystansowe w postaci nici nie wpływają na udarność badanych połączeń. Makroskopowa analiza spoin o małej grubości nie pozwala wnioskować jednoznacznie o charakterze zniszczenia spoin.

Słowa kluczowe: połączenie klejowe, udarność, młot wahadłowy, analiza wizualna

Abstract: The article presents the results of the analysis of the damage type and the regularity of adhesive joints impact fracture. The experimental testing was conducted with a pendulum hammer designed to examine adhesive joints. Tests of block samples were carried out according to the Standard ISO 9653. The maximum energy of the pendulum used in the investigation equalled 15 J. In order to determine the impact strength of the examined connections, we used a dependency according to which the energy used to detach the upper element of the sample in such a test, that is the energy lost by the pendulum, is the measure of impact strength of the adhesive joint. The adherends were made of steel S235 or an aluminum alloy 2017A. In order to bond the samples, we used Epidian 57 epoxide resin with Z1 hardener or Loctite 3421 adhesive. The results of the experimental investigation indicate that adhesive joints made of both of the tested adhesives are characterized by cohesive-adhesive damage. Placed in joints spacers of the sewing threads form do not affect the impact strength of the tested adhesive joints. Macroscopic analysis of low-thickness joints does not make it possible to conclude clearly about the nature of joint fracture.

Keywords: adhesive joint, impact loading, pendulum hammer, visual analysis

Wprowadzenie

Producenci samolotów od lat dążą do uzyskania jak najniższej masy statków powietrznych. Jednym ze sposobów redukcji masy jest łączenie elementów konstrukcyjnych za pomocą kleju, ponieważ w połączeniach mechanicznych masa elementów łączących jest kilka razy większa niż masa kleju tworzącego te same połączenia. Jednak, aby efektywnie wykorzystywać połączenia klejowe, należy znać ich właściwości. Jednym z istotnych parametrów wytrzymałościowych połączeń klejowych, stosowanych do łączenia elementów w konstrukcjach lotniczych jest udarność, której badaniom poświęcono prezentowany artykuł.

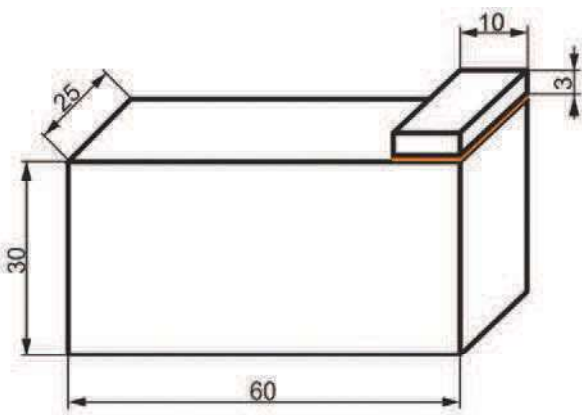
W artykule zaprezentowano wyniki analizy rodzaju zniszczenia oraz prawidłowości przełomów udarowych połączeń klejowych. W testach stosowano metodykę badania udarności z wykorzystaniem próbek blokowych, w których spoina klejowa jest niszczona przez udarowe obciążenia ścinające. Używając tej technologii, energię traconą podczas niszczenia próbki – czyli wytrzymałość udarową połączenia [6] można wyznaczyć na podstawie różnicy wysokości wahadła przed i po uderzeniu. Badania

tą metodą są trudne do powtórzenia ze względu na konieczność bardzo dokładnego zachowania parametrów próbek oraz warunków badań [1, 2, 3, 5]. W badaniach analizowano przełomy połączeń klejowych elementów stalowych oraz duraluminiowych łączonych klejami Epidian 57/Z1 lub Loctite 3421.

Metodyka badań

W celu przeprowadzenia badań udarowych wykonano 130 klejonych próbek blokowych (rys. 1) ze stopu aluminium 2017A lub stali zwykłej jakości S235.

Jako tworzywa adhezyjne zastosowano Epidian 57 z utwardzaczem Z1 oraz klej konstrukcyjny Loctite 3421, które wytypowano jako dwa kleje o istotnej różnicy modułu Younga (dla Epidian 57/Z1 – $E = 1800$ MPa, dla Loctite 3421 – $E = 965$ MPa). Do badań przygotowano 5 serii próbek duraluminiowych i 5 serii próbek stalowych o liczności 10, łączonych kompozycją Epidian 57/Z1 oraz 2 serie próbek duraluminiowych i 1 serię próbek stalowych, łączonych klejem Loctite 3421. Próbkę w seriach różniły się grubością spoin. Różne grubości spoin uzyskano przez zastosowanie elementów



Rys. 1. Próbką stosowana w badaniach udarności
Fig. 1. The sample used in impact strength tests

dystansowych w postaci nici krawieckich, które umieszczono pomiędzy elementami klejonymi.

Przed klejeniem elementy metalowe oczyszczono oraz nadano ich powierzchniom odpowiednią strukturę i chropowatość metodą obróbki strumieniowo-ściernej, stosując jako medium ściernie żużel pomiedziowy. Następnie powierzchnie próbek przemyto benzyną ekstrakcyjną, celem usunięcia pyłów pozostałych po obróbce strumieniowo-ściernej oraz tłuszczu znajdującego się na próbkach. W celu odparowania benzyny z powierzchni próbek, umyte próbki umieszczono w komorze suszarki laboratoryjnej w temperaturze 90°C. Tak przygotowane elementy jak najszybciej klejono, aby uniknąć przypadkowego zabrudzenia powierzchni klejonych bądź osadzenia się kurzu, tlenków lub wilgoci. Podczas składania elementów do klejenia zwracano uwagę na właściwe położenie elementów względem siebie, gdyż nawet niewielkie nieprawidłowości geometrii próbek skutkują istotnymi zmianami charakteru obciążenia i w efekcie uzyskiwanych wyników. Sklejone serie próbek o jednakowej grubości spoiny umieszczano na płycie podstawy i dociskano ciśnieniem 40 kPa na czas utwardzania, który wynosił 7 dób w temperaturze otoczenia (21°C).

Po utwardzeniu spoin, przeprowadzono ocenę jakości uzyskanych połączeń oraz usunięto wypływki kleju i nitki znajdujące się poza klejonymi powierzchniami. Usunięcie nasączonych klejem nitki jest szczególnie istotne, ponieważ mogą one zostać zahaczone podczas próby udarowej przez oderwany górny element i wyhamować wahadło, co przełoży się na zawyżoną wartość udarności połączenia. Wylewki natomiast mogą skutkować wzrostem wytrzymałości spoiny (w praktyce nie usuwa się ich, jeśli nie jest to konieczne).

W trakcie przygotowania próbek zauważono, że konsystencja kleju Loctite 3421, powoduje trudności w uzyskaniu spoiny o dużej grubości, a wypływki boczne są dużo większe niż w przypadku kleju Epidian 57/Z1.

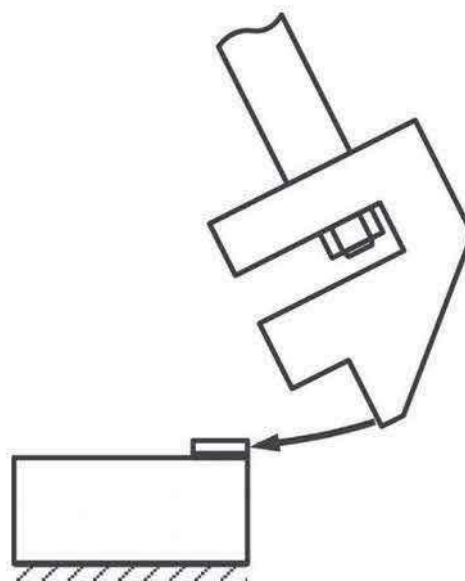
Pomiar grubości wykonano metodą pośrednią – grubość warstwy kleju została wyliczona na podstawie pomiarów innych wymiarów próbki. W połączeniach

elementów stalowych lub duraluminiowych wykonanych klejem Epidian 57/Z1 uzyskano średnie grubości spoin w seriach od 0,02 do 0,65 mm. Natomiast w połączeniach łączonych klejem Loctite 3421 uzyskano spoiny o średnich grubościach w seriach od 0,03 do 0,53 mm.

Grubości spoin próbek stalowych i próbek ze stopu aluminium 2017A z takimi samymi elementami dystansowymi, łączonych klejem Epidian 57/Z1 są niemal identyczne. Jedynie w seriach najcieńszych spoin otrzymano mniejsze grubości dla S235 niż dla 2017A.

Podobną zależność dostrzeżono w próbkach łączonych klejem Loctite 3421. Ponadto, w serii w której elementy duraluminiowe łączono klejem Loctite 3421 z użyciem nitki, uzyskano bardzo zróżnicowane grubości spoin.

Badania przeprowadzono na dedykowanej maszynie do badania udarności połączeń klejowych blokowych i zakładkowych. Maksymalna energia stosowanego w badaniach wahadła wynosiła 15 J, a prędkość w najniższym położeniu – 2,96 m/s. Badania prowadzono przykładając obciążenie udarowe wg schematu przedstawionego na rys. 2 [4]. W czasie badań zwracano szczególną uwagę na utrzymywanie stałej odległości impaktora od spoiny klejowej, ze względu na istotny wpływ tego parametru na uzyskiwane wyniki.

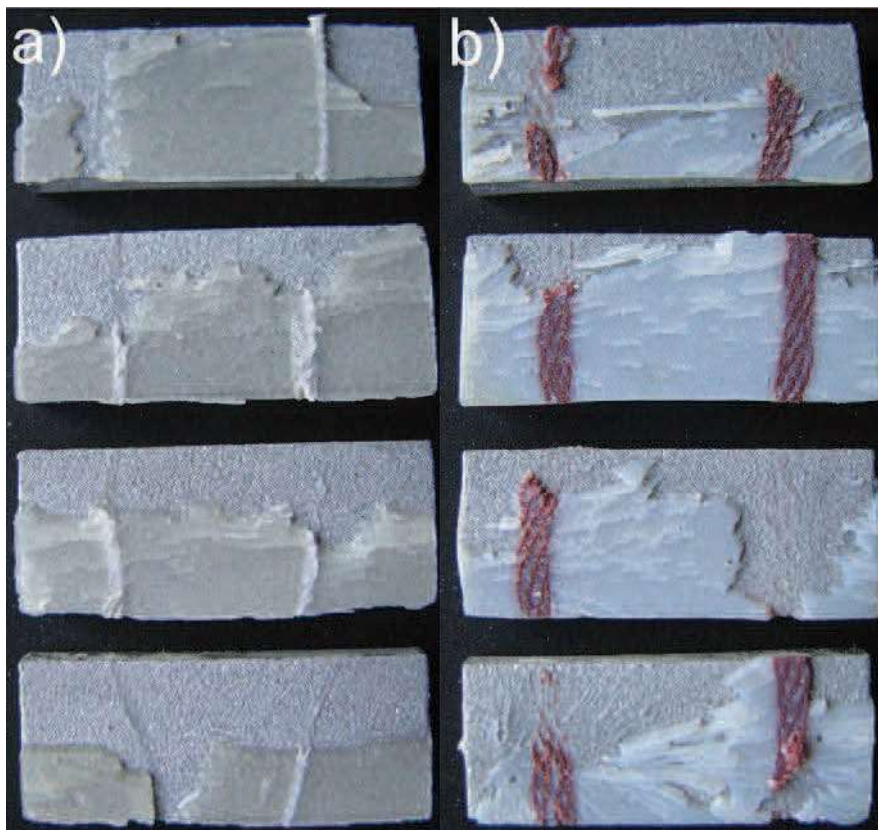


Rys. 2. Schemat przyłożenia obciążenia do próbki
Fig. 2. Scheme of the block impact test

Analiza zniszczeń

Analizy przelomów złączy klejowych dokonano w celu zbadania charakteru zniszczeń, prawidłowości i podobieństw między badanymi grubościami spoin klejowych. Analizę przeprowadzono dwiema metodami: makroskopową oraz mikroskopową.

Badanie metodą makroskopową jest trudne do zastosowania przy analizie zniszczeń spoin o najmniejszych grubościach, ponieważ skala zniszczonego kleju



Rys. 3. Przelomy spoin klejowych po badaniach udarowych: a) klej Loctite 3421, b) Epidian 57/Z1
 Fig. 3. Cracking of adhesive joints after impact loading tests a) Loctite 3421 adhesive, b) Epidian 57/Z1 adhesive

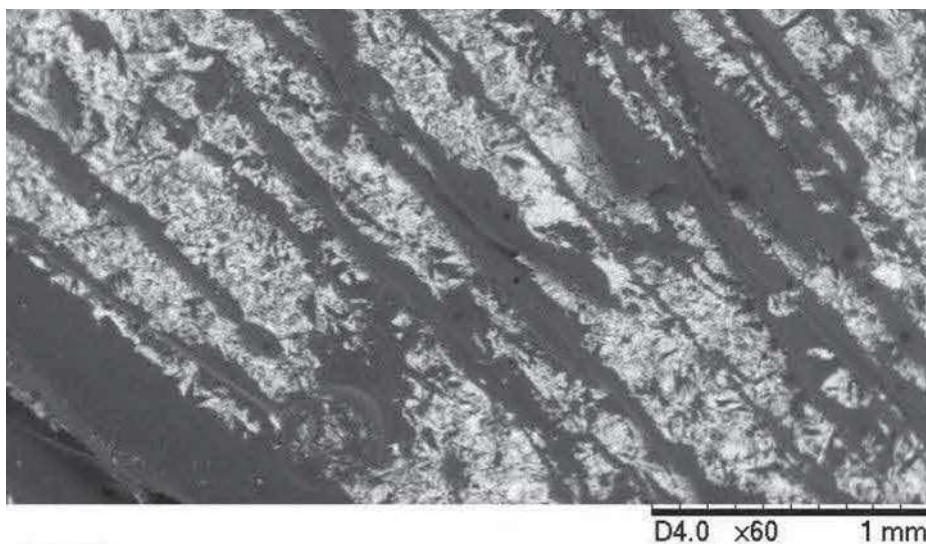
nie pozwala dostrzec szczegółów oraz wyciągnąć wniosków. Spoiny o grubości poniżej 0,1 mm badano głównie drugą z metod, korzystając z mikroskopu elektronowego. Najczęściej spotykany charakter pęknięć próbek o większych grubościach spoin przedstawiono na rys. 3.

Podczas badań makroskopowych zauważono, że większość próbek pęka, podobnie jak na rys. 3 w ten sposób, że na górnym elemencie pozostaje ok. 25–50% objętości kleju, podobnie na górnym elemencie próbki, natomiast pozostała część kleju zostaje rozrzucona wewnątrz komory maszyny udarnościowej. Kolejną dostrzeżoną regułą jest sposób rozdzielania się spoiny klejowej. Na górnym elemencie więcej kleju pozostaje przy krawędzi, w której pobliżu następuje uderzenie młota wahadłowego, natomiast na dolnych częściach próbek więcej pozostałości kleju znajduje się dalej od krawędzi uderzenia. Niemożliwe jest potwierdzenie tych obserwacji w przypadku próbek z najcieńszą spoiną. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji stwierdzono, iż zniszczenie połączeń jest również oprócz ścinania efektem wystąpienia momentu powstałego wskutek przyłożenia siły w odległości ok. 0,8 mm od górnej powierzchni spoiny. Moment ten jest tym większy im większa jest grubość spoiny.

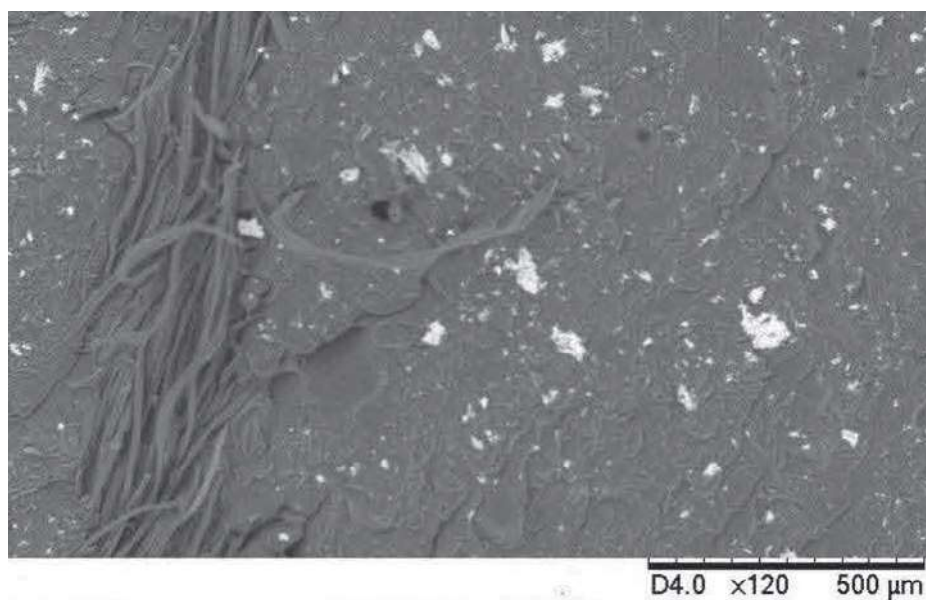
Następnym analizowanym aspektem jest wpływ nici wprowadzonej do spoiny na wytrzymałość połączenia. Na podstawie wyników badań nie stwierdzono

czy nić polepsza lub pogarsza wytrzymałość udarową połączenia klejowego. W wyniku obserwacji wzrokowej stwierdzono, iż nie występują żadne cechy, wskazujące na powtarzalność charakteru zniszczeń, wywołaną obecnością nici w spoinie. Oceniając przelomy, zauważono próbki, w których nastąpiło rozerwanie nici w poprzek, jak również próbki, w których nastąpiło wzdłużne rozerwanie nici. Nici w większości próbek pozostały w całości przy jednej z klejonych powierzchni i były to powierzchnie z większą pozostałością kleju. W pobliżu nici nie zaobserwowano pęknięć, które wynikałyby ze zmniejszonej wytrzymałości spoiny w jej sąsiedztwie. Nie zaobserwowano również pęcherzyków powietrza w obszarze nici, chociaż były one liczne w strukturze nakładanej masy klejowej. Wybrana metoda nanoszenia kleju oraz zastosowany docisk zagwarantowały równomierny rozkład masy klejowej, pozbawiając ją pęcherzyków, co przełożyło się na wysoką wytrzymałość kohezyjną kleju.

Ostatnim punktem analizy była ocena charakteru zniszczenia połączenia, a więc ocena czy rozerwanie nastąpiło przez oderwanie spoiny od jednej z powierzchni klejonych, czy też na obydwu powierzchniach klejonych znajduje się cienka warstwa kleju. Metodą wzrokową można zauważyć większe skupiska kleju, jednak w przypadkach cienkich spoin takie szacunki są bardzo trudne i niejednoznaczne.



Rys. 4. Obraz przekroju spoiny połączenia duraluminium klejem Epidian 57/Z1 (mikroskop elektronowy, powiększenie 60×)
 Fig. 4. Image of breaking the joint connecting the elements of the alloy 2017A, Epidian 57/Z1 (electron microscope, magnification 60×)



Rys. 5. Obszar w sąsiedztwie nici po zniszczeniu połączenia elementów duraluminiowych połączonych klejem Epidian 57/Z1 (mikroskop elektronowy, powiększenie 120×)
 Fig. 5. Image of area adjacent to the thread after joint fracture of Epidian 57/Z1 adhesive (electron microscope, magnification 120×)

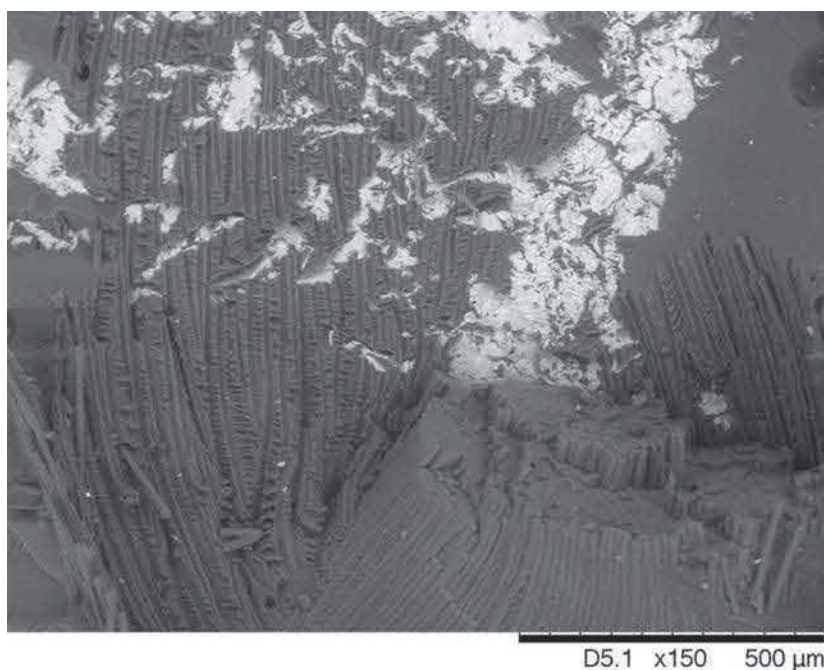
Charakter zniszczenia spoiny oceniono metodą mikroskopową korzystając z mikroskopu elektronowego HITACHI TM3030. Obserwacje powierzchni przekrojów spoin próbek przedstawiono na rys. 4-7.

Na rys. 4 przedstawiono powierzchnię przekroju spoiny połączenia duraluminium z użyciem kleju Epidian 57/Z1. Jasne obszary pola to metalowej powierzchnia próbki, w tym przypadku duraluminium, natomiast ciemniejsze obszary to pozostałości kleju.

Bazując na tej obserwacji można dostrzec regularne pasy kleju o grubości ok. 0,1 mm oraz dużą liczbą małych skupisk kleju. Stwierdzono adhezyjno-kohezyjny

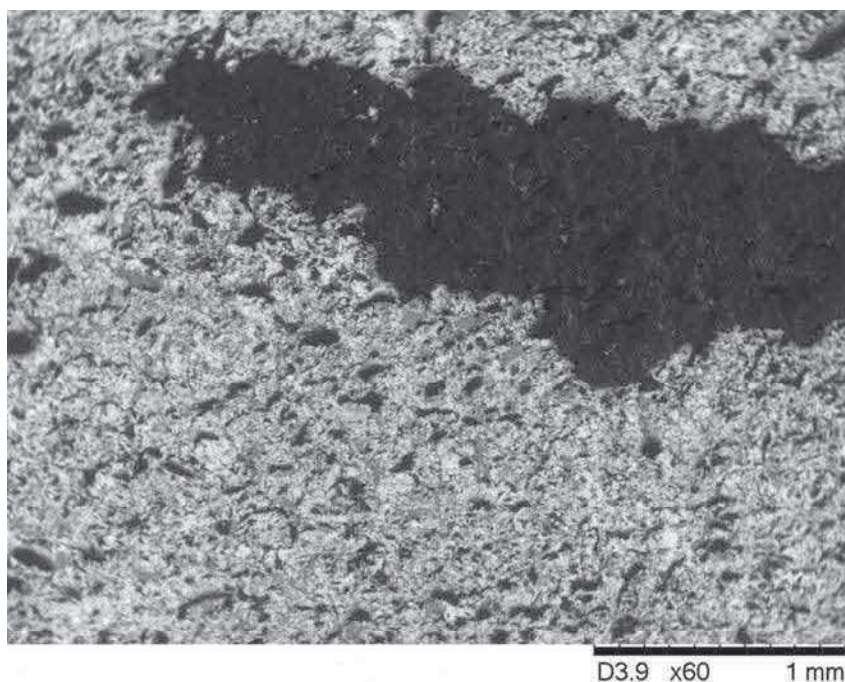
charakter zniszczenia połączenia klejowego, co oznacza bardzo dobrą zwilżalność powierzchni klejowej przez klej oraz wysoką wytrzymałość adhezyjną kleju Epidian 57/Z1 w próbce duraluminiowej.

Na rys. 5 przedstawiono obszar skupiska masy klejowej w obrębie nici, w próbce duraluminiowej łączonej klejem Epidian 57/Z1. Nie zaobserwowano pęknięć ani odstających płatów kleju w pobliżu nici, co wskazuje, że nić nie ma znaczącego wpływu na wytrzymałość udarową połączenia klejowego. Widoczne jasne pola to prawdopodobnie warstwa metalowa od której oderwał się klej spoiny połączenia.



Rys. 6. Obraz przełomu spoiny połączenia duraluminium klejem Epidian 57/Z1 w miejscu przerwania nici dystansowej (mikroskop elektronowy, powiększenie 150×)

Fig. 6. Image of the joint fracture of Epidian 57/Z1 adhesive joint at the place of a thread damage (electron microscope, magnification 150×)



Rys. 7. Obraz przełomu spoiny połączenia stali klejem Epidian 57/Z1 (mikroskop elektronowy powiększenie 60×)

Fig. 7. The image of breaking the joint connecting the steel elements (electron microscope, magnification 60×)

Na rys. 6 przedstawiono powierzchnię przełomu spoiny próbki, w której obrębie nastąpiło przerwanie nici. W prawej dolnej części zdjęcia znajdują się włókna nici, w pozostałej części zdjęcia można dostrzec obszar „pod nicią”, z charakterystycznymi śladami, którymi wcześniej przebiegała nić. Obraz zaprezentowany na

rys. 6 wskazuje iż między nicią a klejoną powierzchnią znajduje się przejściowa warstwa kleju, a nić nie przylega bezpośrednio do metalu. Ponadto zaobserwowano, iż „pod nicią” występuje zniszczenie adhezyjno-kohezyjne, a tak równe przerwanie nici wskazuje, że klej bardzo dobrze przesycił nić. Wytrzymałość nici nie ma

znaczącego wpływu na ogólną wytrzymałość złącza klejowego. Wpływ nici na wytrzymałość połączenia może objawić się wyłącznie w postaci obniżenia wytrzymałości kohezynnej spoiny klejowej, natomiast nie ma wpływu na przyczepność kleju do elementów próbki, czyli na wytrzymałość adhezyjną.

Przełom spoiny próbki stalowej klejonej klejem Epi-dian 57/Z1 bez użycia nici przedstawiono na rys. 7. Metodą wzrokową oceniono, że dla tej próbki nastąpiło w większej części rozerwanie adhezyjne z kilkoma skupiskami kleju, które przedstawia na rysunku kolor ciemnoszary. Metoda mikroskopowa ukazała, iż w obszarach, które metodą wzrokową oceniono na pozbawione pozostałości kleju, znajdują się jednak małe jego resztki.

Wnioski

1. Makroskopowa analiza zniszczeń wykazała regularny charakter zniszczeń badanych połączeń.
2. Metoda obserwacji mikroskopowej potwierdziła adhezyjno-kohezynny charakter rozerwania połączeń klejowych o różnych grubościach spoin.
3. Makroskopowa analiza przełomów połączeń klejowych nie jest odpowiednia dla spoin o grubościach poniżej 0,1 mm.
4. Na podstawie pomiarów grubości spoin stwierdzono, iż wybrana metoda dystansowania elementów próbek jest w pełni skuteczna dla obydwu klejów, natomiast dla większych grubości spoin,

konsystencja kleju Loctite 3421 stanowi utrudnienie ze względu na wypływanie kleju ze spoiny przed utwardzeniem.

LITERATURA

- [1] Adams R. D., J. A. Harris. 1996. "A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (16): 61–71.
- [2] Adams R. D., J. Comyn, W. C. Wake. 1997. "Structural Adhesive Joints in Engineering". Springer.
- [3] Da Silva, Da Dillard, B. Blackman. 2012. "Testing Adhesive Joints: Best Practices". Wiley & Sons.
- [4] Komorek A., J. Godzimirski. 2016. "The selected aspects of the research into impact loading of adhesive joints in block samples – comparison of different ways of applying the load". *Problemy Eksploatacji* (4): 77–91.
- [5] Komorek A., P. Przybyłek. 2015. "Initial research of impact strength in adhesive joints". *Solid State Phenomena* Vol. 237: 160–165.
- [6] Taylor A. 1996. "Impact Testing of Adhesive Joints". MTS Adhesive Project 2 AEA Technology, 5 (2).

dr inż. Andrzej Komorek – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-520 Dęblin, e-mail: komman@op.pl

inż. Krzysztof Chojnacki – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-520 Dęblin, e-mail: k.chojnacki845@wsosp.edu.pl