



Analiza powierzchni kontaktu w połączeniu nitowym

ELŻBIETA SZYMCZYK, JERZY JACHIMOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Celem pracy jest analiza rozkładów naprężeń (w szczególności naprężeń kontaktu) w połączeniu nitowym w aspekcie niszczenia powierzchni nitu i blach wywołanego cyklicznym rozciąganiem zakładkowego połączenia nitowego. Badania przeprowadzono dla próbek konstrukcyjnych wykonanych z cienkich blach aluminiowych połączonych stalowymi nitami. Materiały oraz wymiary próbek zostały dobrane tak, aby podczas cyklicznego rozciągania połączenia wystąpił intensywny fretting oraz kontrolowane niszczenie próbki w wybranej strefie. Wykonano symulacje MES procesu nitowania na prasie oraz obliczenia numeryczne w celu wyznaczenia obciążeń powodujących zerwanie rozciąganego statycznie połączenia i określenia sposobu niszczenia próbki. Przeprowadzono badania statyczne i zmęczeniowe próbek nitowanych oraz analizę fraktograficzną stanu powierzchni połączenia.

Słowa kluczowe: naprężenia kontaktowe, MES, analiza fraktograficzna

Symbole UKD: 621.88

Wstęp

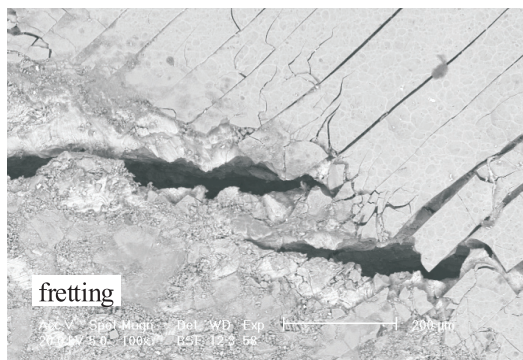
Połączenia nitowe należą do najstarszych, ale nadal są szeroko stosowane między innymi w przemyśle lotniczym [1, 2]. Cienkościenne struktury lotnicze wykonywane są z blach metalowych (na ogół ze stopów aluminiowych lub tytanowych) i pokryć kompozytowych. W Polsce struktury lotnicze budowane są przede wszystkim ze stopów aluminium (najczęściej są to stopy PA7 lub D-16). W pracy przyjęto stop D-16. W celu zabezpieczenia blachy przed niepożądaną dyfuzją składników stopowych w kierunku powierzchni oraz korozją w środowiskach kwaśnych przeprowadza się np. platerowanie i anodowanie. Z drugiej strony otrzymane w wyniku tych procesów warstwy wierzchnie są materiałem kruchym, co ujemnie wpływa na zmęczeniową

trwałość konstrukcji. Na podstawie obserwacji stanu zewnętrznych powierzchni blach oraz powierzchni kontaktu stwierdzono wyraźne promieniowe pęknięcia warstwy anodowej, które są jedną z przyczyn inicjacji pęknięcia blachy [3].

Bardzo istotnym problemem przedłużania resursu samolotów i śmigłowców po długich okresach eksploatacji jest zapewnienie odpowiedniej trwałości zmęczeniowej [1, 2, 4], w tym przede wszystkim zespołów nitowych, w przypadku których zmęczenie cierne (fretting) jest główną przyczyną zniszczenia. O negatywnej roli frettingu w trwałości sprzętu lotniczego mogą świadczyć dane dotyczące śmigłowców: 60% elementów konstrukcyjnych śmigłowców ulega zniszczeniu z powodu frettingu, z tego 20% elementów podlega wymianie, a 40% nadaje się do remontu [1].

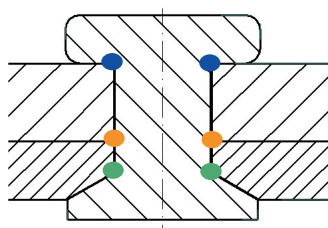
Obciążenia struktur lotniczych w locie i na ziemi powodują powstanie zmiennych w czasie obciążeń poszczególnych szwów nitowych. Złącza nitowe są miejscem powstawania znaczących koncentracji naprężeń. Już w procesie nitowania generowane są naprężenia własne, które lokalnie przekraczają granice plastyczności [5, 6]. Są to naprężenia ściskające i mają korzystny wpływ na trwałość połączenia. Natomiast w trakcie eksploatacji samolotów i śmigłowców, jak również w badaniach elementów innych struktur cienkościennych, obserwuje się wiele niekorzystnych zjawisk zachodzących w otoczeniu połączeń nitowych, potęgowanych dodatkowo przez wtórne zginanie. Należą do nich koncentracja naprężeń na powierzchniach kontaktu, odkształcenia plastyczne [4] oraz zmęczenie cierne [1, 7]. W pracy analizowano zjawiska związane z inicjacją zmęczenia ciernego.

Fretting to niszczenie stykających się powierzchni dwóch ciał stałych (w tym przypadku nitu i blachy), na które działają obciążenia skierowane prostopadle do powierzchni styku, przy czym powierzchnie te cyklicznie przemieszczają się względem siebie z małą amplitudą (mikropoślizgi). Zachodzą przy tym takie zjawiska, jak: zmęczenie cierne, zużycie cierne oraz korozja cierna [1, 3, 7]. Przykładowy obraz powierzchni uszkodzonej w wyniku kontaktu dwóch blach w połączeniu nitowym przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obraz powierzchni kontaktu blach aluminiowych w połączeniu nitowym

O intensywności zmęczenia ciernego decydują następujące czynniki: gładkość powierzchni, twardość materiałów współpracujących elementów, wielkość nacisku i amplituda oraz częstość wzajemnych przemieszczeń tych elementów. Niestety, całkowite wyeliminowanie frettingu w złączach mechanicznych jest niemożliwe, można go jedynie nieco zmniejszyć. Na rysunku 2 pokazano miejsca najczęstszego występowania zjawiska frettingu w otoczeniu nitu stożkowego [1, 3, 8].



Rys. 2. Miejsca występowania frettingu w połączeniu nitowym (nit stożkowy)

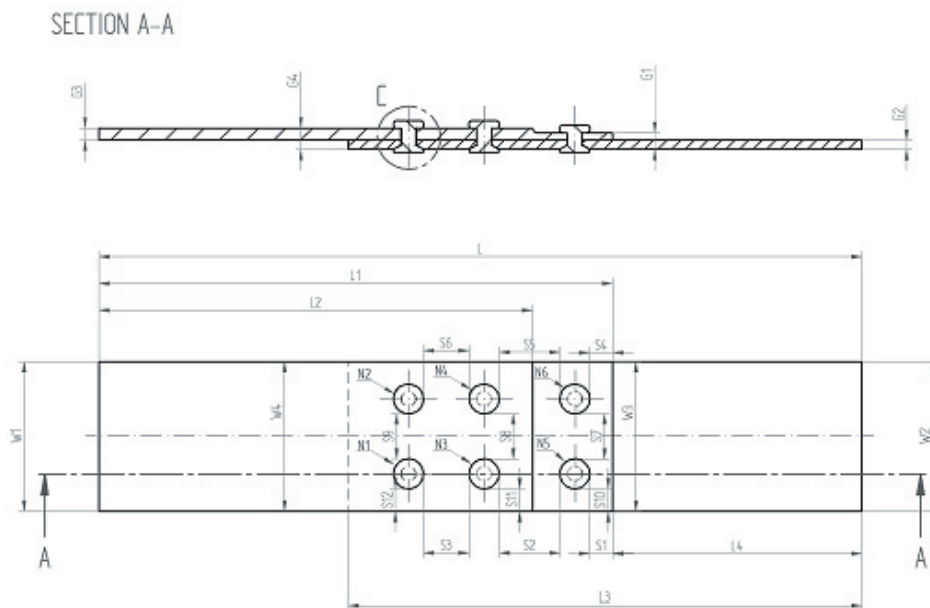
1. Projekt połączenia nitowego

Głównym celem pracy jest analiza naprężeń kontaktowych oraz obserwacja zjawiska frettingu wywołanego cyklicznym rozciąganiem zakładkowego połączenia nitowego.

W ramach pracy przeprowadzono badania typowych próbek konstrukcyjnych szwów nitowych, wykonanych z anodowanych i platerowanych blach cienkich ze stopu D-16, połączonych stalowymi nitami. W pierwszym etapie pracy, na podstawie przeglądu literatury, doświadczeń własnych [1, 4-6, 8-10] i obliczeń numerycznych, wytypowano próbki konstrukcyjne do badań [3]. Projekt próbki przedstawiono na rysunku 3. Połączenie celowo zostało tak zaprojektowane, aby przyspieszyć procesy niszczenia powierzchni i obniżyć trwałość zmęczeniową połączenia. Materiały, z których zostały wykonane próbki oraz ich wymiary zostały dobrane tak, aby podczas cyklicznego rozciągania połączenia wystąpiło intensywne zjawisko frettingu oraz kontrolowane niszczenie próbki w wybranej strefie. Zróżnicowane właściwości stali i aluminium, będące źródłem wielu niekorzystnych zjawisk fizykochemicznych, powodują obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej połączenia, m.in. z uwagi na korozję cierną. Dobór materiałów miał na celu również skrócenie czasu prób doświadczalnych.

Analizowano połączenie zakładkowe złożone z dwóch blach aluminiowych połączonych stożkowymi nitami (z łbem wpuszczonym). Przyjęto oś próbki zgodną z kierunkiem walcowania blach (próbka typu LT). Grubość blachy używanej na pokrycia lotnicze wynosi przeważnie od 0,6 mm do 4 mm. W badaniach rozważano

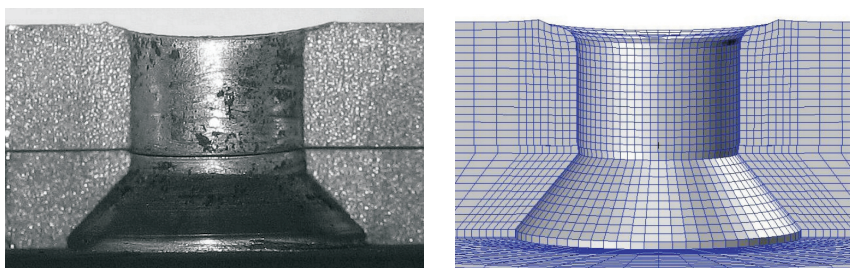
blachy 3 i 4 mm (grubszą blachę lokalnie sfrezowano do 2,5 mm) (rys. 3). Średnicę i rozstawienie nitów dostosowano odpowiednio do grubości blachy [11].



Rys. 3. Projekt próbki

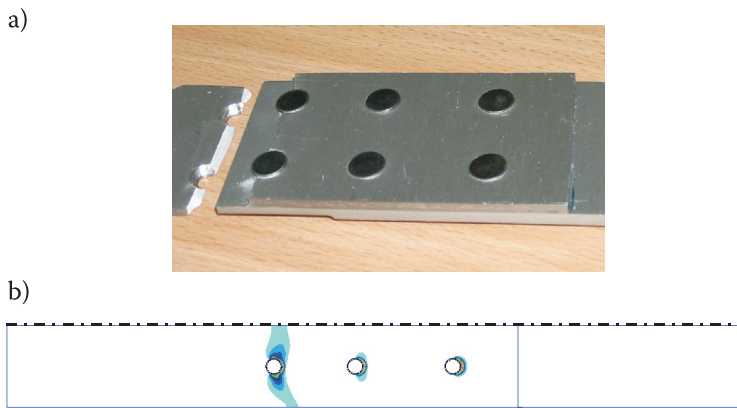
2. Analiza numeryczna

Analizy nieliniowe połączenia nitowego w zakresie sprężysto-plastycznym z uwzględnieniem kontaktu wykonano metodą elementów skończonych w programie Marc. W pierwszym etapie wykonano symulacje procesu nitowania [5, 6]. Deformacje blach wokół otworu uzyskane z obliczeń oraz w rzeczywistej próbce pokazano na rysunku 4.

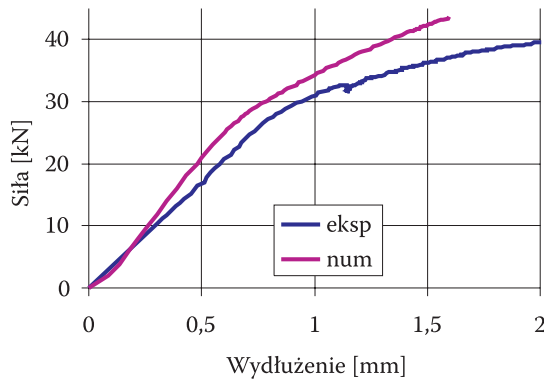


Rys. 4. Deformacje blach w procesie zakuwania na prasie

Kolejny etap obliczeń numerycznych przeprowadzono w celu wyznaczenia obciążeń powodujących zerwanie rozciąganego statycznie połączenia oraz określenia sposobu niszczenia próbki. Zgodnie ze wstępnymi przewidywaniami pełne uplastycznienie (a następnie zerwanie) przekroju blachy wystąpiło wzdłuż linii skrajnych nitów w poprzek próbki (rys. 5). W trakcie badań eksperymentalnych, zerwanie rozciąganej statycznie próbki nastąpiło dla obciążenia 39,6 kN. Z obliczeń numerycznych uzyskano siłę ok. 8% wyższą (rys. 6).



Rys. 5. Zerwanie próbki: a) eksperyment; b) obliczenia — mapa odkształceń plastycznych

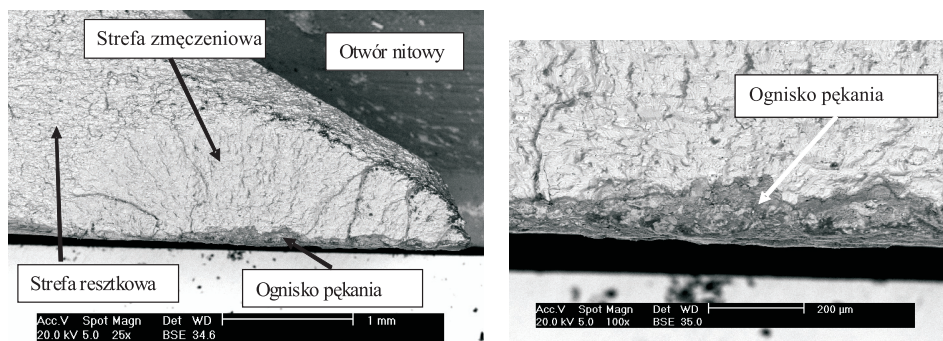


Rys. 6. Przebieg rozciągania próbki

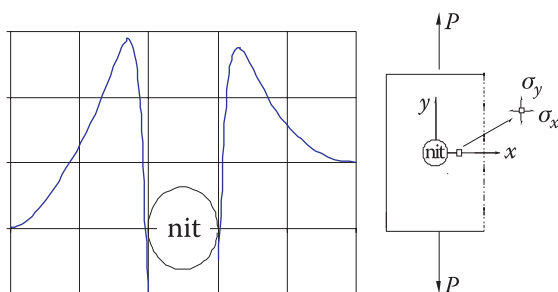
3. Analiza fraktograficzna

W ramach pracy przeprowadzono badania statyczne i zmęczeniowe wytypowanych próbek konstrukcyjnych połączenia zakładkowego, przy czym główny nacisk położono na analizę stanu współpracujących powierzchni. Próbki poddano

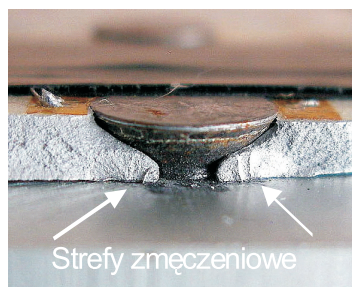
cyklicznie zmiennemu rozciąganiu (siła 16 kN, częstotliwość 25 Hz, współczynnik asymetrii cyklu $R = 0,1$). Po badaniach zmęczeniowych wykonano obserwacje przełomu zmęczeniowego z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego [3]. Zidentyfikowano położenie strefy zmęczeniowej (rys. 7 i 9) oraz ognisko pęknięcia na powierzchni kontaktu pomiędzy współpracującymi blachami (rys. 7). W wyniku analizy numerycznej stwierdzono, że naprężenia normalne w poprzek próbki (oznaczone przez σ_x na rys. 8) osiągają ekstremum w pewnej odległości od powierzchni otworu (nie bezpośrednio przy otworze). W tym samym obszarze następuje również inicjacja pęknięcia (rys. 7 i 9).



Rys. 7. Mikroskopowy obraz strefy zmęczeniowej

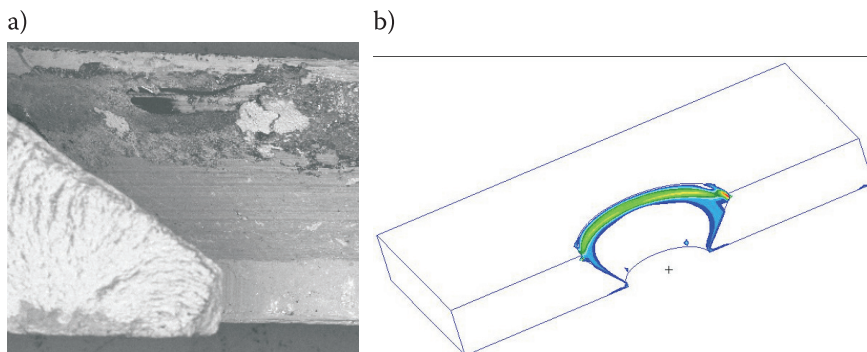


Rys. 8. Przykładowy wykres naprężeń normalnych σ_x

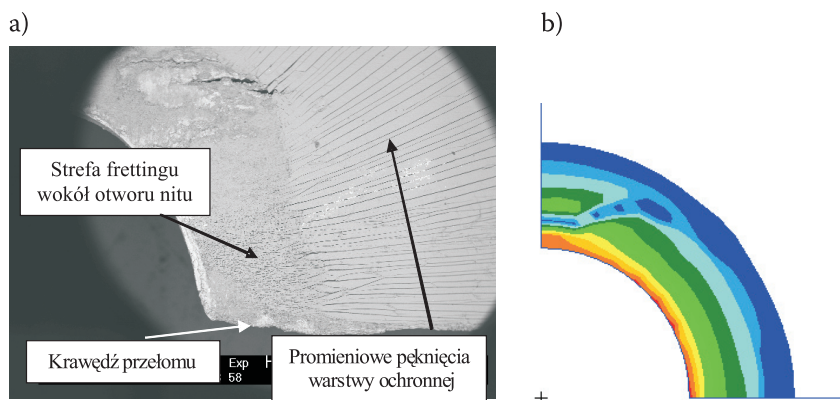


Rys. 9. Przełom zmęczeniowy

Zlokalizowano również ślady korozji kontaktowej wokół otworu pod łbem nitu (rys. 10a) i strefy frettingu pomiędzy blachami oraz obszar pęknięcia warstwy anodowej (rys. 11a). Na rysunkach 10b i 11b przedstawiono przykładowe rozkłady naprężeń kontaktowych podczas rozciągania połączenia odpowiednio na powierzchni stożkowej otworu nitowego oraz pomiędzy blachami. Naprężenia kontaktowe na powierzchni stożkowej otworu w analizowanym zakresie obciążenia utrzymują się



Rys. 10. Ślady korozji kontaktowej pod łbem nitu (a); pole naprężeń kontaktowych wyznaczone numerycznie (b)



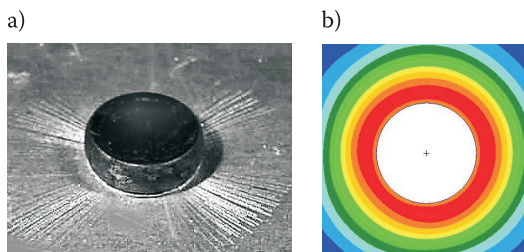
Rys. 11. Strefy frettingu pomiędzy blachami (a); rozkłady naprężeń kontaktowych na powierzchni blachy (b)

na poziomie 440-480 MPa. Natomiast naprężenia kontaktowe pomiędzy blachami zmieniają się od 270 MPa do 485 MPa.

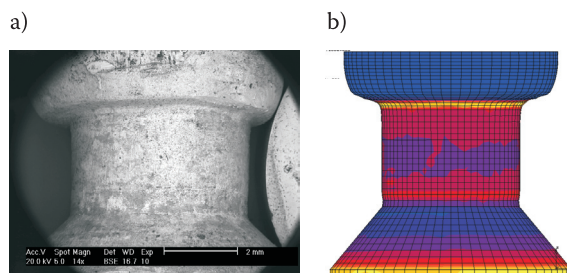
Promieniowe pęknięcie kruchej warstwy anodowej jest szczególnie widoczne na zewnętrznej powierzchni blachy wokół zakuwki (rys. 12a) i wynika z osiowej symetrii pola naprężeń po zakuciu nitu (rys. 12b). Maksymalne naprężenia promieniowe w blachach po zakuciu nitu pozostają na poziomie 440 MPa (rys. 12b).

Skaningowe badania mikroskopowe zostały wykonane również w celu potwierdzenia frettingowej migracji produktów zużycia z wierzchnich warstw nitowanych blach aluminiowych do zidentyfikowanych mikroskopowo (rys. 13) obszarów nitów stalowych [3]. Zaobserwowano zróżnicowany charakter rozmieszczenia i składu stopu aluminium na powierzchni nitu. Warstwa ta nie jest ciągła, cechuje ją wyspowy charakter. Podobną prawidłowość wykazują rozkłady naprężeń kontaktowych na powierzchni nitu w procesie rozciągania. Przykładową mapę naprężeń pokazano

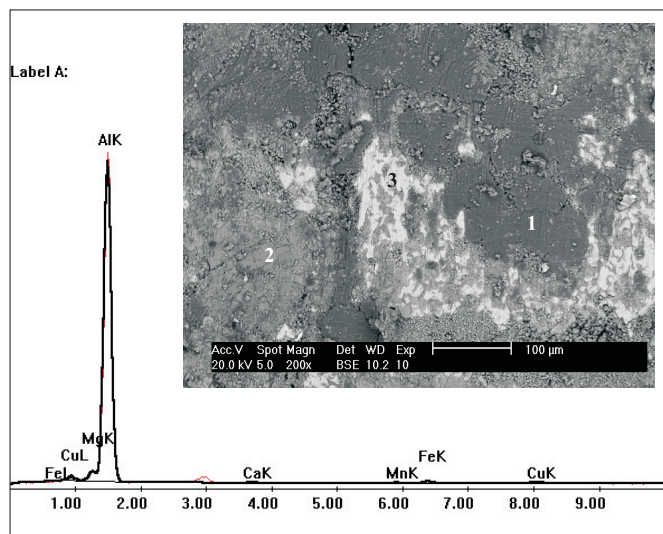
na rysunku 13b. Wyniki analizy wykazały również, iż w wybranych punktach frettingowo przemieszczał się przede wszystkim plater, stąd duża zawartość aluminium i mniejsze ilości składników stopowych (rys. 14). W innych punktach przemiesz-



Rys. 12. Promieniowe pękanie warstwy ochronnej (a) i odpowiednie pole naprężeń wokół otworu (b)



Rys. 13. Obraz powierzchni nitu i rozkład naprężeń kontaktowych



Rys. 14. Spektrogram zawartości pierwiastków fazy międzymetalicznej typu CuAl_2

czały się minimalne ilości aluminium [3]. Duża zawartość żelaza w tych miejscach jest uzasadniona tym, że analizie poddawane były produkty zużycia frettingowego osadzone na stalowym podłożu nitu.

3. Podsumowanie

W ramach pracy wytypowano połączenie nitowe do badań zmęczeniowych. Materiały, z których wykonane zostały próbki oraz ich wymiary zostały dobrane tak, aby podczas cyklicznego rozciągania połączenia wystąpiło dobrze widoczne zjawisko frettingu oraz kontrolowane niszczenie próbki w wybranej strefie.

Przeprowadzono symulacje numeryczne procesu nitowania oraz rozciągania połączenia nitowego [5, 8]. Stwierdzono zadawalającą zgodność wyników symulacji i badań wytrzymałościowych.

Dla serii próbek wykonano badania statyczne i zmęczeniowe. Po badaniach przeprowadzono fraktograficzną analizę (SEM) stanu powierzchni nitu i blach. Obrazy stanu powierzchni porównano z rozkładami naprężeń na powierzchniach kontaktu, uzyskując dużą kompatybilność wyników.

W wyniku tarcia pomiędzy blachami, inicjacja pęknięcia następuje na powierzchni kontaktu blach w pewnej odległości od otworu nitowego (nie bezpośrednio przy otworze). W tym samym obszarze składowa naprężeń normalnych (w poprzek próbki) osiąga ekstremum.

Analiza rozkładów naprężeń dostarcza zatem wielu danych, które mogą być pomocne w prognozowaniu potencjalnych miejsc inicjacji pęknięcia oraz w ocenie stanu połączenia.

W połączeniach nitowych, w przypadku blach wykonanych ze stopu aluminium łączonych nitami stalowymi, następuje nawarstwianie aluminium na powierzchni nitów. Powoduje to zmianę warunków współpracy obu elementów złącza, prowadzących do przyspieszonego zniszczenia. Podobny charakter i skala zjawisk zachodzi również w przypadku nitów wykonanych ze stopu tytanu.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.10.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2007 r.

LITERATURA

- [1] J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, J. KANIOWSKI, W. KARLIŃSKI, *Fretting w konstrukcjach lotniczych*, Tribologia, 3 (201), rok 36, SIMPRESS Oficyna Wydawnicza SIMP, 2005.
- [2] R. P. G. MÜLLER, *An Experimental Investigation on the Fatigue Behavior of Fuselage Riveted Lap Joints; The Significance of the Rivet Squeeze Force, and a Comparison of 2024-T3 and Glare 3*, Doctor thesis, Delft University of Technology, October 1995.

- [3] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, Z. BOGDANOWICZ, *Badanie inicjacji pęknięć zmęczeniowych w połączeniach nitowych*, XI Konferencja „Mechanika Pękania”, Cedzyna, 9-12.09.2007.
- [4] M. CIESIELSKI, J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, J. KRYSZTOFIK, W. SZACHNOWSKI, *Analytical and experimental stress field image in a rivet joint*, Transaction of the Institute of Aviation, 1, Warsaw, 2005, 14-19.
- [5] A. DEREWOŃKO, E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, *Numeryczne szacowanie poziomu naprężeń resztkowych w zakuwanym połączeniu nitowym*, monografia pt. „Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki”, rozdział 17, Warszawa, 2007, 329-350.
- [6] A. DEREWOŃKO, E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, *Numerical simulation of riveting process*, 6th European Solid Mechanics Conference ESMC, Budapest, Hungary, 28.08-1.09.2006.
- [7] D. NOWELL, *Recent developments in the understanding of fretting fatigue*, Engineering Fracture Mechanics 73, 2006, 207-222.
- [8] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, A. DEREWOŃKO, *Analysis of displacement and stress distributions in riveted joints*, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 5-8 June 2006.
- [9] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, A. DEREWOŃKO, *Analysis of residual stress fields in riveted joint*, KONES 2007, 9-12.09.2007.
- [10] J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, W. SZACHNOWSKI, E. SZYMCZYK, *Analizy MES oraz badania odkształceń i naprężeń w otoczeniu nitu w cienkościennej strukturze lotniczej*, monografia pt. „Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki”, rozdział 21, Warszawa, 2007, 399-424.
- [11] A. KRUKOWSKI, K. SZEWCZYK, *Podstawy Konstrukcji Maszyn, Połączenia*, WAT, Warszawa, 1987.

E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ

Analysis of contact surface in riveted joints

Abstract. The paper deals with the analysis of contact stress fields and inspection of fretting phenomena in the neighbourhood of mating surfaces of the lap riveted joint subjected to cyclic load.

The specimens are made of thin aluminium sheets connected by steel rivets. Chosen shape and dimensions of the sample ensures predictable and repetitive failure behaviour. Many undesirable phenomena, like electro-chemical corrosion, occur in a riveted joint due to different material properties of steel and aluminium alloy. This situation causes reduction in fatigue life and it is suitable for observing surface damage. Simulation of a riveting process is performed to obtain post riveting residual stress fields and deformation. Numerical FEM calculations are also carried out to estimate tearing (ultimate) force and to observe the mechanism of the specimen failure. Static and fatigue tests of tensile loaded lap riveted specimens and fractographic (SEM) analysis are performed.

Keywords: contact stress, FEM, fractography

Universal Decimal Classification: 621.88