

D. Kocańda, Prof.; J. Torzewski, Dr inż

BADANIA ZMĘCZENIOWE STOPU 2024-T3

*Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego,
Warszawa, Polska*

W pracy przedstawiono badania zmęczeniowego pęknięcia 3 mm blachy ze stopu aluminium 2024-T3 pod wpływem trzech zmiennoamplitudowych programów obciążeń. Zastosowane obciążenia były związane z widmem obciążeń dolnego pokrycia skrzydła samolotu. Badania miały na celu określenie wpływu widma obciążeń na kształtowanie się prążków zmęczeniowych na powierzchni przelomu oraz sprawdzenie możliwości odtwarzania historii obciążenia na podstawie analizy fraktograficznej. Wyniki badań prędkości pęknięcia dotyczyły długich pęknięć. Doświadczalnie wyznaczone prędkości zmęczeniowego pęknięcia były porównywane z prędkościami wyznaczonymi na podstawie odległości międzyprążkowych. Analiza fraktograficzna pozwala na określenie ilościowych relacji między odległościami międzyprążkowymi na powierzchni przelomu a prędkością zmęczeniowego pęknięcia w całym zakresie długości pęknięcia.

D. Kocańda, Prof.; J. Torzewski, PhD

FATIGUE RESEARCH 2024-T3 ALUMINIUM ALLOY

Military University of Technology, Warsaw, Poland

The subject of the paper is fatigue crack growth rate investigation for 2024-T3 3 mm thick Alclad aluminium alloy sheet under three variable amplitude load programs with multiple overloads-underloads. These programs correspond to a flight simulation spectrum of a lower skin wing structure. The research was undertaken in order to learn an interaction between applied load and formation of fatigue striations on the specimen fracture surfaces as well as to check the capability for load-time history reconstruction on the basis of microfracture analysis. All considerations in the terms of fatigue crack growth behaviour refer mainly to long cracks. Experimentally determined crack growth rates were compared with the growth rates that were evaluated from the striations spacing. Quantitative fractography allowed to deliver the relation between surface crack and crack depth growth rates for whole range of crack growth.

Д. Коцаньда, проф.; Я. Торжевські, канд. техн. наук

ВТОМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЛАВУ 2024-T3

*Військово-технічна академія ім. Ярослава Домбровського,
Варшава, Польща*

В роботі представлено дослідження втомного руйнування листів алюмінієвого сплаву 2024-T3 товщиною 3 мм при трьох видах блокового змінно амплітудного навантаження. Прикладене навантаження моделює реальний спектр навантажень нижньої частини крила літака. Метою дослідження було виявлення впливу спектру навантаження на формування втомних борозенок на поверхні руйнування та перевірка можливості відтворення історії навантаження на основі фрактографічного аналізу. Результати дослідження швидкості руйнування відносяться до довгих тріщин. Експериментально визначена швидкість руйнування була порівняна з швидкістю отриманою на основі аналізу відстані між втомними борозенками. Фрактографічний аналіз дозволяє отримати кількісний опис залежності між міжборозенковою відстанню на поверхні руйнування та швидкістю втомного руйнування в цілому діапазоні довжини тріщини.

WPROWADZENIE

Stopy aluminium najwcześniej objęto badaniami zmęczeniowymi w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Ze względu na ich mały ciężar, dobrą odporność na korozję, optymalną wytrzymałość (liczoną stosunkiem R_e/ρ , gdzie R_e jest granicą plastyczności, ρ gęstością materiału) stopy te stały się podstawowym materiałem na

konstrukcje lotnicze. Wysoką wytrzymałość zmęczeniową stopy te zawdzięczają mechanizmowi umocnienia struktury. Przeprowadzone liczne badania porównawcze stopów aluminium ze stalami konstrukcyjnymi i stopami tytanu dowodzą ich wysokiej trwałości i wysokiej tolerancji na uszkodzenia, co jest szczególnie ważne dla stosowanej koncepcji projektowania konstrukcji silnie wyęzonych na tolerowaną wielkość uszkodzenia.

Wśród stopów aluminium najczęściej badanym stopem był i jest amerykański stop 2024-T3. Symbol T3 wskazuje na przesycanie stopu, utwardzanie zgniotem na zimno i naturalne starzenie. Stop ten jest podobny pod względem składu chemicznego i właściwości mechanicznych do amerykańskiego stopu 2124 i do stopu rosyjskiego D16CzATW. Zgodnie z rosyjską specyfikacją GOST 4784-97 symbol Cz oznacza wysoką czystość materiału, A- platerowanie, T- stan przesycony i naturalnie starzony, W- materiał pokryciowy. Są to stopy na bazie Cu i Mg, a główne różnice w składzie chemicznym tych stopów dotyczą zawartości Fe i Si. Te pierwiastki tworzą wtrącenia intermetaliczne o rozmiarach kilkunastu lub kilkudziesięciu mikrometrów i wpływają na odporność materiału na pękanie. Zawartość tych pierwiastków w stopie D16 jest mniejsza, aniżeli w stopie 2024-T3, co oznacza większą czystość materiału D16. Rozmiar ziaren w stopie 2024-T3 mieści się w przedziale 20-30 μm w zależności od kierunku pomiaru średnic ziaren względem kierunku walcowania blachy. Dla stopu D16 średni rozmiar ziaren dla kierunków wzdłużnego i prostopadłego do kierunku walcowania blachy wynosi 20 μm . Blachy stopu D16 wykazują nieco niższe właściwości mechaniczne aniżeli stopu 2024-T3. Jednak stop D16 ma większą plastyczność ($A=22\%$) niż stop 2024 ($A=17\%$). Te różnice mogą wynikać z większej czystości stopu D16.

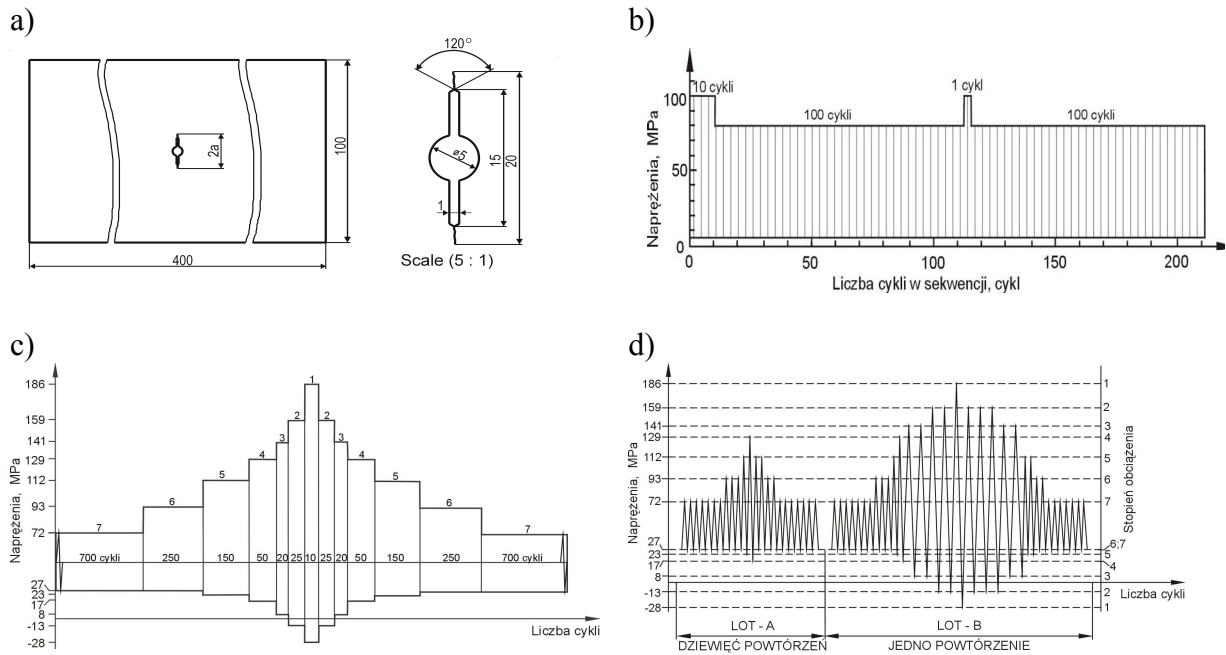
Celem pracy jest przedstawienie wyników badań prędkości zmęczeniowego pęknięcia elementów wyciętych z 3 mm grubości obustronnie platerowanych blach stopu 2024-T3 przeprowadzonych w warunkach zmiennie amplitudowych naprężeń z wielokrotnymi cyklami przeciążeniowo-odciążającymi (*OverLoads-UnderLoads*). W celu wyjaśnienia wpływu charakteru widma na prędkość pęknięcia blachy przeprowadzono analizę mikrofraktograficzną powierzchni pęknięcia elementów. Badania te prowadzono dla stopu 2024-T3, jako zamiennika stopu D16, aby sprawdzić możliwość rekonstrukcji widma obciążenia uszkodzonych elementów konstrukcji na podstawie analizy mikrofraktograficznej.

W literaturze spotyka się zarówno pozytywne, jak i negatywne opinie o możliwości takiej rekonstrukcji. Możliwość prowadzenia takich analiz mikrofraktograficznych i wykorzystania ich w celach praktycznych po raz pierwszy w Polsce wykazał S. Kocańda [1] na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych. O znaczeniu fraktografii w badaniach wpływu widma obciążenia na rozwój pęknięć w elementach konstrukcji pisał w wielu swych pracach J. Schijve [2] uznany specjalista od badań zmęczeniowych konstrukcji lotniczych. Wśród autorów rosyjskich szczególnie zaznaczają się prace V.C. Ivanovej i A. Shaniavsky'ego [3]. Problem ten był rozważany też przez autorów tej pracy we wcześniejszych opracowaniach [4-6], w których wykazano, że w przypadku niezłożonych widm obciążeń o zmiennej amplitudzie rekonstrukcja tego widma na podstawie analizy mikrofraktograficznej jest w pełni możliwa. Takie możliwości są jednak ograniczone w przypadku widm krótkich i bardziej złożonych, którymi zajmowano się w obecnej pracy.

METODYKA BADAŃ

Badania prowadzono na próbkach wyciętych z obustronnie platerowanej blachy stopu 2024-T3 o grubości 3 mm, wyprodukowanej przez francuskie zakłady Pechiney-Rhenalu. Podstawowy skład stopu według danych wytwórcy wynosił (w %): 4,23 Cu, 1,37 Mg, 0,50 Mn, 0,18 Fe, 0,16 Zn. Na podstawie testów statycznego rozciągania wyznaczono średnią wytrzymałość na rozciąganie $R_m=453$ MPa i granicę plastyczności $R_e = 342$ MPa. Grubość warstwy plateru wynosiła 120 μm . W próbkach o długości 400 mm i szerokości 100 mm wykonano środkowe otwory o średnicy 5 mm z bocznymi szczelinami o długości 5 mm i z przedpęknięciami o długości około 2.5 mm (rys. 1a). Geometria próbek była zgodna z normą ASTM E647/95. Badania realizowano dla dwóch serii próbek wyciętych z blachy tego stopu

wzdłuż (LT) i prostopadle (TL) do kierunku walcowania blachy. Rozwój pęknięć rejestrowano optycznie z obu stron otworu bez przerywania badań z dokładnością do 0.2 mm.



Rys. 1 – Geometria próbek stosowanych w badaniach zmęczenia (a) i schematy obciążenia próbek: PR1 (b), SRM-100 (c), LPL (d)

Prędkość pęknięcia wyznaczano konwencjonalnymi metodami. Badania mikrofaktograficzne powierzchni pęknięcia próbek przeprowadzono za pomocą mikroskopów transmisyjnego (TEM) i skaningowego (SEM). Do obserwacji w mikroskopie TEM stosowano repliki, które cieniowano platyną. Próbkę poddawano trzem programowanym obciążeniom typu PR1 (rys. 1b), SRM-100 (rys. 1c) i LPL (rys. 1d). Programy te są stosowane w badaniach rozwoju pęknięć zmęczeniowych w skrzydle samolotu. Układ naprężeń w programie PR1 został zaproponowany w Narodowym Laboratorium Przestrzeni Powietrznej i Kosmonautyki (National Luchten Ruimtevaart Laboratorium) w Delft w Holandii do najprostszych badań samolotów pasażerskich. Maksymalne naprężenie bazowe w tym programie wynosi $\sigma_{bas,max} = 80$ MPa a minimalne $\sigma_{bas,min} = 5$ MPa ($R=0.0625$). Częstotliwość zmian cykli obciążenia była $f=2$ Hz. W przebiegu cykli podstawowych co 100 cykli włączano cykle przeciążające o naprężeniu maksymalnym $\sigma_{OL,max} = 100$ MPa zgodnie ze schematem i współczynnikiem przeciążenia $k_{OL} = 1.266$. Łączna liczba cykli naprężenia w programie PR1 wynosiła 211. Program SRM-100 (rys. 1c) ma kształt przebiegu naprężeń zgodny z widmem blokowym zaproponowanym przez E. Gassnera w 1954 r. Ta sekwencja programowa składa się z 13 bloków o łącznej liczbie 2400 cykli. W badaniach częstotliwość obciążenia wynosiła 5 Hz przy 7 stopniu obciążenia, a w pozostałych stopniach 2 Hz. Programy SRM-100 i LPL są pokrewnymi programami obciążeń pod względem takiej samej liczby stopni obciążeń i zakresu zmian naprężeń w poszczególnych stopniach. Różnice zaznaczają się w kolejności i liczbie cykli występujących w sekwencji programu SRM-100 i LPL. W przebiegu naprężeń w programie LPL wyróżniono dwa bloki cykli - Lot A i Lot B. W sekwencji 10 lotów występuje 9 powtórzeń Lotu A i jedno powtórzenie Lotu B. Częstotliwość występowania cykli obciążenia była taka sama jak w programie SRM-100. Łączna liczba cykli w programie LPL wynosi 240 co odpowiada jednej dziesiątej długości programu SRM-100.

WYNIKI BADAŃ

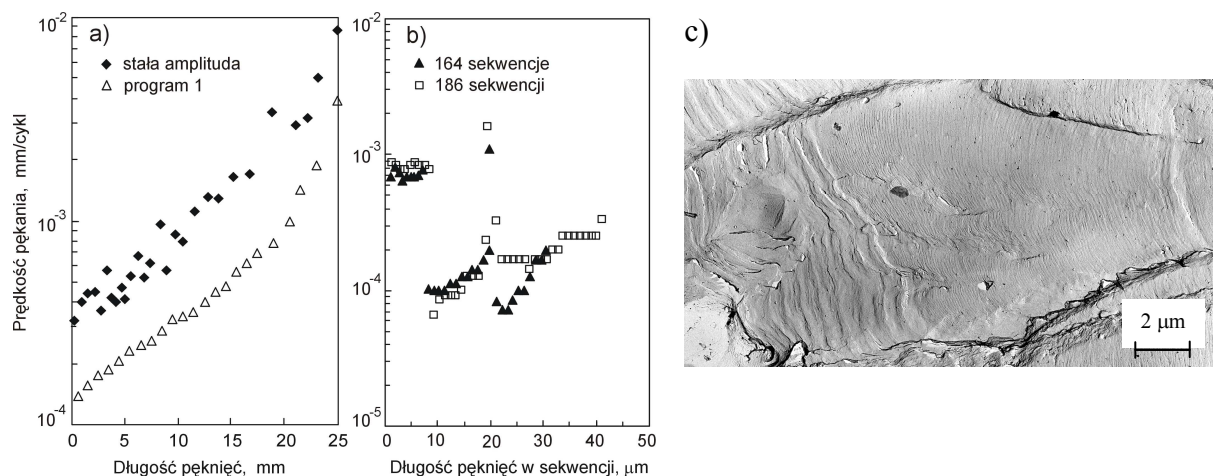
Wpływ widma obciążenia, a w szczególności wpływ wielokrotnych cykli przeciążeniowo-odciążających (OL-UL) w widmie, na prędkość pęknięcia próbek i na formowanie się obrazów prążków zmęczeniowych na powierzchni pęknięcia blach aluminiowych ze stopu 2024-T3 zostanie omówiony na podstawie wyników badań

zmęczeniowych i mikrofraktograficznych dla poszczególnych programów obciążeń. Dla wielu materiałów i rodzajów widm obciążenia elementów, szczególnie dla stopów aluminiowych, efekt wielokrotnych przeciążeń w widmie eksploatacyjnym nie ujawnia się na klasycznych wykresach da/dN w funkcji zakresu zmian efektywnego współczynnika intensywności naprężeń ΔK_{ef} . Wówczas, jedynie analiza zdjęć mikrofraktograficznych i pomiar odległości pomiędzy prążkami na przelomach pozwalają na jakościową i ilościową ocenę wpływu kształtu widma obciążenia na prędkość pęknięcia.

Program obciążeń PR1

Wykres prędkości pęknięcia w warunkach obciążenia zgodnym z programem PR1 (rys. 1b) w zależności od długości pęknięć ujęto na rys. 2a. Wykres obowiązuje dla próbek wyciętych z blachy stopu 2024 wzdłuż kierunku walcowania (LT). Przebieg tej prędkości ilustrują punkty niezaczernione. Punkty zaczernione odpowiadają prędkości pęknięcia przy stałej amplitudzie naprężeń $\sigma_a = 87.5$ MPa równej amplitudzie cykli bazowych w programie PR1.

Jak można się przekonać z regularnego przebiegu punktów na rys. 2a przeciążenia nie zaznaczyły się z uwagi na ich małą wartość. Wpłynęły one jednak na istotne obniżenie się prędkości pęknięcia w porównaniu z prędkością przy stałej amplitudzie naprężenia. Z kolei obserwacje za pomocą mikroskopu TEM bardzo dobrze oddały zmiany prędkości pęknięcia w zakresie pełnej sekwencji obciążenia (rys. 2b). Są to przykładowe przebiegi prędkości pęknięcia pod wpływem 164 i 186 sekwencji cykli. Zdjęcie z TEM na rys. 2c dotyczy połowy tej sekwencji cykli. W lewej części zdjęcia widoczne jest pasmo z 10 „grubszymi” prążkami, które odpowiadają 10 cyklom przeciążającym w pełnej sekwencji. W prawej części zdjęcia zaznaczył się jeden „gruby” prążek właściwy jednemu cyklowi przeciążającemu. Pomiedzy tymi prążkami i pasmem 10 prążków znajduje się 100 „drobnych” prążków wywołanych 100 cyklami naprężenia bazowego. Odległości międzyprążkowe, począwszy od pasma z 10 prążkami, stopniowo powiększają się aż do prążka pojedynczego cyklu przeciążającego, a następnie po tym prążku – maleją. Zatem obrazy prążków dowodzą o pewnym opóźnieniu pęknięcia w skali mikroskopowej. Wykres na rys. 2b sporządzono z zakresu długości pęknięć 5-8 mm po 164 i 186 sekwencjach obciążenia. Podobne wykresy sporządzono dla innych zakresów długości pęknięcia (D. Kocańda i inni, 2003b). Zdjęcia z mikroskopu TEM wycinków powierzchni pęknięcia blachy (rys. 2c) dowodzą możliwości pełnego odwzorowania programu PR1 na podstawie analizy mikrofraktograficznej.

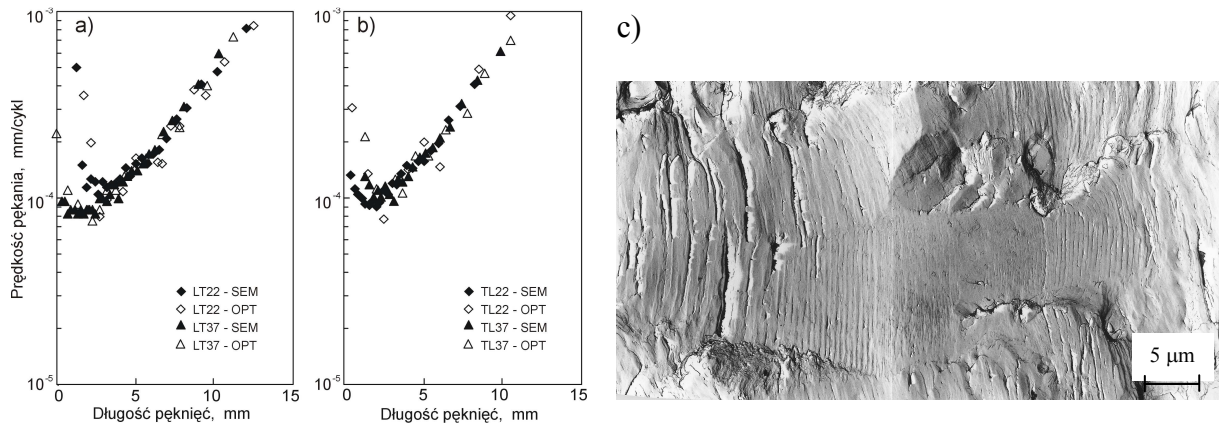


Rys. 2 – Prędkość pęknięcia w stopie aluminium 2024-T3 przy obciążeniu według programu PR1 i przy amplitudzie obciążenia $\sigma_a = \text{const}$ (a), przebieg prędkości pęknięcia w skali mikroskopowej w obrębie jednej sekwencji programowej (b) wyznaczony z odległości między prążkami na przelomie (c)

Program obciążeń SRM-100

Wyniki badań prędkości pęknięcia dla dwóch serii próbek LT i TL, które dotyczą programu obciążeń SRM-100, przedstawiono na rys.3. Podano przykładowe wykresy dla

dwóch różnych próbek z obu serii o skrajnych punktach pomiarowych. Na rys. 3a i 3b przebiegi tej prędkości przedstawiono w zależności od długości pęknięcia rozwijającego się w próbkach. Punkty niezaczernione na wykresach dotyczą długości pęknięć zmierzonych na powierzchni próbek (OPT), a punktami zaczernionymi oznaczono długości pęknięć określone z odległości pomiędzy liniami zmęczeniowymi na przełomach próbek. Długości te wyznaczono przy użyciu mikroskopu SEM. Różnice w prędkościach pęknięcia próbek LT i TL są nieznaczne i jak przypuszczano, prędkość pęknięcia próbek TL była nieco większa. Fakt ten znalazł odbicie w mniejszej trwałości próbek TL. Obserwowane na wykresach duże spadki



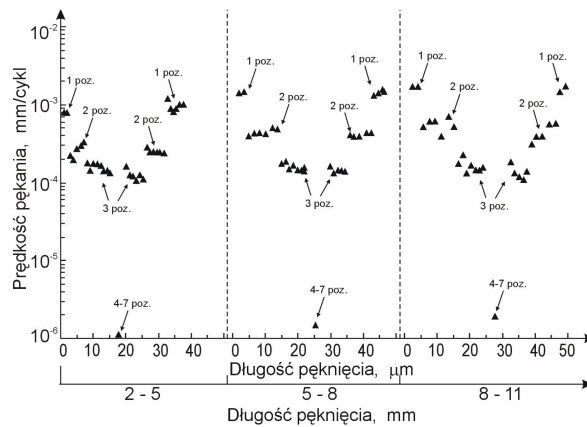
Rys. 3 – Zmiany prędkości pęknięcia w zależności od długości pęknięcia dla próbek typu LT (a) i TL (b) charakterystyczne dla programu obciążeń SRM-100, obraz prążków zmęczeniowych w zakresie odległości 5-8 mm od czoła przepęknięcia widoczny w TEM (c)

prędkości pęknięcia dla dwóch pierwszych sekwencji obciążeń lub niezmiennosc tej prędkości w zakresie długości pęknięć do 3 mm (do 15 sekwencji obciążeń) wskazują na silny wpływ stref plastycznych wywołanych przez bloki cykli o największych naprężeniach w widmie. Naprężenia ściskające w tych strefach doprowadziły do okresowego zatrzymania pęknięcia lub jego wzrostu z bardzo małą prędkością. Zjawiska te nie zaznaczyły się na tradycyjnych wykresach prędkości pęknięcia. W początkowej fazie rozwoju pęknięcia pewien udział w tych zjawiskach miała również strefa plastyczna na czole przedpęknięcia zmęczeniowego. Przy pęknięciach powyżej 5 mm wzrost prędkości pęknięcia związany jest ze zmianą mechanizmu pęknięcia blach od płaskiego stanu odkształcenia do płaskiego stanu naprężenia i mniejszym wpływem stref plastycznych na opóźnienie rozwoju pęknięć.

Potwierdzeniem tych spostrzeżeń są układy prążków zmęczeniowych obserwowane na przełomach za pomocą mikroskopu TEM. Na zdjęciu na rys. 3c podano przykładowy obraz tych prążków obserwowany w zakresie długości pęknięć 5-8 mm, liczonych od czoła przedpęknięcia. W próbkach obciążonych zgodnie z programem SRM-100 są to powtarzalne układy prążków do odległości 12 mm od karbu mechanicznego. Analiza układów prążków na przełomach zmęczeniowych pozwoliła na ustalenie korelacji pomiędzy grupami tych prążków a blokami cykli obciążeń, które je uformowały. Układy prążków wyraźnie zaznaczyły się dla poziomów obciążeń 3-2-1 w rosnącej części widma i w części malejącej dla poziomów 1-2-3 (rys. 1c). Dla pozostałych bloków obciążeń 7-6-5-4 i 4-5-6-7 prążki ujawniły się tylko śladowo, co oznacza zatrzymanie się pęknięcia lub jego rozwój z bardzo małą prędkością. Prążki zmęczeniowe widoczne na zdjęciach mają powiązanie ze 100 cyklami o poziomach naprężeń 3-2-1-2-3, a wycinki ze śladowymi prążkami z 2300 cyklami właściwymi pozostałym poziomom naprężeń w analizowanym widmie obciążeń.

Pomiar odległości między prążkami na powierzchni przełomów próbek z użyciem mikroskopu TEM, w obrębie malejącej i wzrastającej części widma, pozwolił na sporządzenie wykresu i prześledzenie zmian prędkości pęknięcia w skali mikroskopowej. Zmiany tej prędkości w zależności od długości pęknięcia ujęto na wykresie na rys. 4. Zastosowano dwie skale dla długości pęknięcia: górną - właściwą dla odległości międzyprążkowych w obrębie jednej lub dwóch kolejnych sekwencji cykli i dolną - dla zaznaczenia miejsca pobrania do

badan repliki względem karbu mechanicznego z wycinka powierzchni pęknięcia próbki. Na wykresie tym przypisano poziomy naprężen widma SRM-100 punktom prędkości pękania, zgodnie z omówioną wcześniej identyfikacją prążków zmęczeniowych. Wysoka początkowa prędkość pękania, wykazywana przez „grube” prążki właściwe poziomowi 1, silnie obniża się z 10^{-3} mm/cykl do 10^{-4} mm/cykl w czasie działania bloków 2-3, a następnie gwałtownie spada do 10^{-6} mm/cykl pod wpływem bloków cykli o poziomach naprężen 4-5-6-7-6-5-4. Okres wzrostu pęknięcia stanowi 4.2% czasu trwania całego programu obciążenia. Przez pozostałą część działania obciążenia typu SRM-100 pęknięcie nie wzrasta lub przyrasta bardzo powoli.



Rys. 4 – Prędkości pęknięcia w skali mikroskopowej w obrębie dwóch sekwencji cykli w części malejącej i rosnącej programu obciążeń SRM-100 dla trzech przedziałów długości pęknięcia

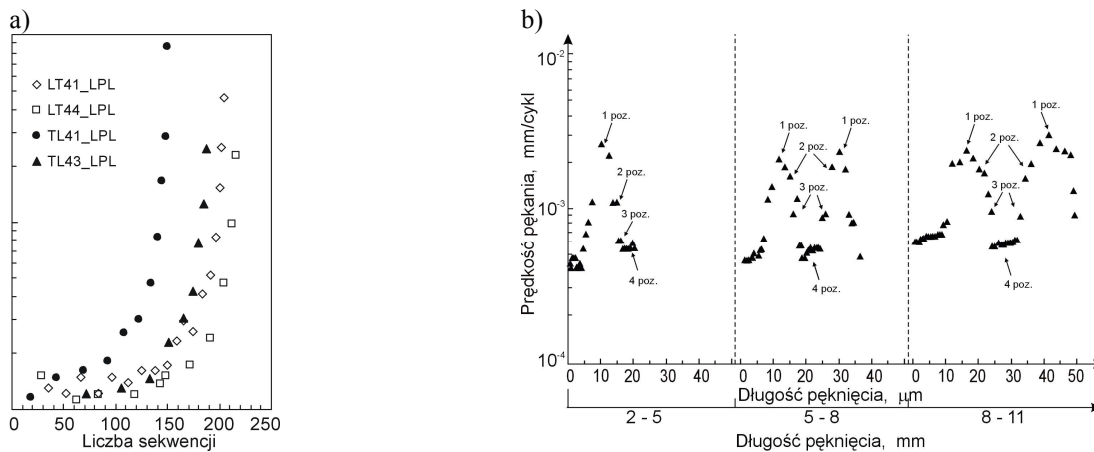
Podsumowując wyniki badań zmęczeniowych i mikrofraktograficznych otrzymane dla widma SRM-100 należy stwierdzić, że krótkie pod względem liczby cykli sekwencje programowe i następujące stosunkowo szybko po sobie kolejne bloki obciążeń istotnie ograniczają możliwość pełnej rekonstrukcji widma obciążenia elementu na podstawie analizy mikrofraktograficznej. Analiza powierzchni przelomów próbek prowadzona za pomocą TEM dowiodła, że korelacja pomiędzy grupami prążków zmęczeniowych a blokami cykli, które je formują, jest możliwa do ustalenia jedynie dla bloków cykli o wysokich poziomach naprężen.

Program obciążeń LPL

Podobnie jak w przypadku poprzednich programów obciążeń, dla przeprowadzenia analizy wpływu widma LPL na prędkość zmęczeniowego pęknięcia próbek serii LT i TL sporządzono wykresy prędkości wzrostu pęknięć w funkcji ich długości (rys. 5). Uśredniona prędkość pęknięcia badanych elementów mieściła się w przedziale 10^{-4} ÷ 10^{-2} mm/cykl. Początkowo pęknięcia wzrastały szybciej w próbkach LT. Jednak prędkość pęknięcia tych próbek była niższa niż próbek typu TL. Jest to powtarzalne zachowanie się próbek ze stopu 2024-T3 przy obu analizowanych widmach obciążeń z przeciążeniami. Jest to szczególnie widoczne, jeśli porówna się trwałości próbek N_f wyrażone liczbą zastosowanych pełnych sekwencji cykli aż do ich zniszczenia. Porównując ze sobą makroskopowe wykresy prędkości pęknięcia próbek pod wpływem widma typu SRM-100 (rys. 3a i 3b) i widma LPL (rys. 5a) można ogólnie stwierdzić, że prędkość narastania pęknięć wzdłuż powierzchni elementów była większa przy widmie SRM-100, jednak trwałość zmęczeniowa próbek była niższa przy widmie typu LPL. Tę pozorną sprzeczność można wyjaśnić analizując zmiany prędkości pęknięcia w skali mikroskopowej (rys. 4 i 5b) odtworzone na podstawie pomiarów odległości między prążkami na powierzchni pęknięcia blach aluminiowych. Otóż, pojedyncze cykle o najwyższych naprężeniami w programie LPL, wytworzyły mniejsze strefy plastyczne aniżeli blok dziesięciu tych cykli w programie SRM-100. W konsekwencji efekt zatrzymania pęknięcia próbek był silniejszy i trwał dłużej pod wpływem programu SRM-100 (95.8% czasu działania obciążenia), co skutkowało też większą trwałością próbek. Dla programu LPL ten okres trwał przez 91.7%. Okresy te ustalono analizując zdjęcia wycinków przelomów z użyciem TEM.

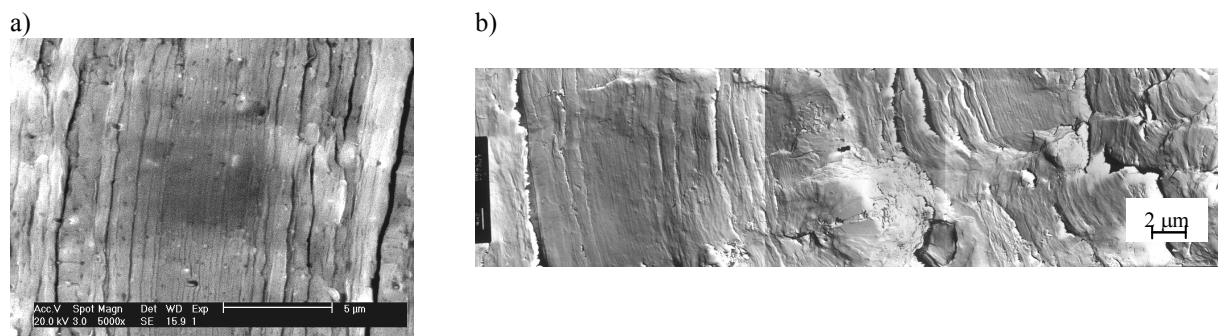
Badania mikrofraktograficzne z użyciem mikroskopów SEM i TEM dostarczyły zdjęć wycinków przelomów próbek z układami prążków charakterystycznych dla programu LPL.

Przykładowe obrazy tych wycinków powierzchni w próbce typu LT przedstawiają zdjęcia z mikroskopu SEM na rys. 6a, a na rys. 6b – z mikroskopu TEM.



Rys. 5 – Wykresy prędkości pęknięcia próbek typu LT i TL w skali makroskopowej (a) i w skali mikroskopowej (b) w zależności od długości pęknięcia, właściwe dla programu LPL

Na zdjęciu na rys. 6a, odpowiadającym jednej sekwencji programu, można zidentyfikować dwa najgrubsze prążki – z lewej i z prawej strony zdjęcia, przynależne do dwóch kolejnych sekwencji cykli typu LPL. Każdy z nich odpowiada cyklowi o najwyższym naprężeniu w bloku lot-B (poziom 1 obciążenia). Cykl ten o najwyższej wartości naprężenia w widmie spowodował szybki wzrost prędkości pęknięcia i przyrost pęknięcia widoczny w postaci szerokiego, płaskiego pasma pomiędzy nim i kolejnymi trzema prążkami, które powstały po przejściu trzech cykli poziomu 2 (blok lot-B). Zbiór prążków o jednakowej szerokości, widoczny w środkowej części zdjęcia na rys. 6a składa się z 10 prążków wytworzonych przez 10 cykli z poziomów 3-2-1-2-3 oraz z 10 prążków poziomu 4 (zarówno w bloku lot-A jak i lot-B) w pełnym programie LPL. Strefa plastyczna wytworzona przez cykl poziomu 1 w widmie objęła 220 prążków. Ta liczba prążków odpowiada dziewięciokrotnemu powtórzeniu bloku lot-A i 23 prążkom właściwym cyklom z poziomów 4-7 z bloku lot-B. Oznacza to, że przez 220 cykli prędkość pęknięcia była bardzo niska. Prążki związane z poziomami 5-6-7 nie były widoczne na przelomie. Analiza obrazów prążków zmęczeniowych na powierzchni pęknięcia blach również w tym przypadku widma potwierdziła ograniczoną możliwość odtworzenia historii obciążenia elementu na podstawie analizy mikrofraktograficznej.



Rys. 6 – Układy prążków zmęczeniowych na powierzchni przelomu w próbce LT obserwowane w mikroskopie SEM (a) i w mikroskopie TEM (b) przy widmie naprężeń typu LPL

Dzięki analizie mikrofraktograficznej ustalono zależności (1a) i (1b), które ujmują relację pomiędzy prędkością pęknięcia wzdłuż powierzchni i wewnątrz elementu, wyliczoną z odległości wzajemnej między prążkami zmęczeniowymi. Relacje (1) obejmują cały zakres długości pęknięć, od małych do długich pęknięć. Dla małych pęknięć, które w 3 mm grubości blachy stopu 2024-T3 obejmują przedział do 3 mm długości, wartość stałej A we wzorze (1a) zmienia się w przedziale $0.7 \div 0.45$.

$$\delta = \frac{da}{dN} = A \cdot \frac{\Delta K^2}{R_e \cdot E}, \quad (1a) \quad \delta = \frac{da}{dN} = B \cdot \left(\frac{\Delta K}{E} \right)^c. \quad (1b)$$

Wartość $A=0.7$ dotyczy mniejszych długości pęknięć, a wartość $A=0.45$ większych długości. Stała A ma związek z cyklicznym umacnianiem się (bądź osłabianiem) materiału sprężysto-plastycznego. Dla długich pęknięć w stopach aluminium, w środkowym zakresie krzywej pęknięcia, ważna jest relacja opisana wzorem (1b) i podana przez Bates'a i Clark'a [10]. W oryginalnym wzorze B jest równe około 6, a $c=2$. Należy zaznaczyć, że te stałe podano dla nieplaterowanych blach aluminiowych. Z naszych badań prędkości pęknięcia w obustronnie platerowanych blachach stopu 2024-T3 wynika, że dla $c=2$ stała $B=11$.

PODSUMOWANIE

Prześlędzono zmiany prędkości pęknięcia blach aluminiowych ze stopu 2024-T3 oraz obrazów prążków zmęczeniowych na przelomach zmęczeniowych pod wpływem trzech programów obciążeń o zmiennej amplitudzie naprężeń. Programy te różniły się liczbą i kolejnością występowania cykli przeciążeniowo-odciążeniowych w widmach. Ustalono, że prędkość pęknięcia blach aluminiowych zależy od kształtu widma obciążeń. Potwierdzono też ograniczone możliwości odtwarzania historii obciążenia elementów na podstawie analizy mikrofraktograficznej w przypadku złożonych i krótkich widm obciążeń. Fraktografia ilościowa dostarczyła relacji między prędkością pęknięcia wzdłuż powierzchni i w głębi blachy.

Literatura

1. Kocańda S., *Zmęczeniowe pęknięcie metali*. wyd. 3, Warszawa WNT 1985.
2. Schijve J., *Fatigue of structures and materials*. Kluwer Academic Publishers 2001.
3. Ivanova C.V., Shaniavskij A.A.: *Quantitative fractography*, wyd. Metallurgija, 1988 (in Russian).
4. Kocańda D., Kocańda S., Torzewski J.: *Reconstruction of fatigue crack growth rate for 2024-T3 aluminium alloy sheet on the basis of fractographic analysis*. The Archive of Mechanical Engineering, Nr 3, 2004, s. 361-375.
5. Kocańda D., Kocańda S., Torzewski J.: *Porównawcze badania prędkości zmęczeniowego pęknięcia w lotniczych stopach aluminium przy programowanych przebiegach obciążeń*. Materiały Konf. III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji. Politechnika Białostocka, Augustów 2005, s. 153-158.
6. Torzewski J.: *Prędkość zmęczeniowego pęknięcia i możliwość jej odtwarzania w lotniczym stopie aluminium 2024-T3 na podstawie analizy fraktograficznej w warunkach programowanych widm obciążeń*. Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, 2007.

Одержано 02.07.2008 р.