



Mikromechanizmy zmęczeniowego niszczenia połączeń nitowych w warunkach stałoamplitudowego obciążenia stopu aluminium 2024-T3

VOLODYMYR HUTSAYLYUK, JANUSZ MIERZYŃSKI,
VOLODYMYR HLADO¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

¹Uniwersytet Państwowy Techniczny w Tarnopolu, Katedra Mechaniki Budowlanej,
Ukraina, 46001 Tarnopol, ul. Ruska 56

Streszczenie. Zbadano mikromechanizmy niszczenia występujące na etapie inicjacji propagacji pęknięcia na poziomie mikrostrukturalnym oraz formowanie makropęknięcia na etapie przejścia w fazę ostatecznego zniszczenia w połączeniach nitowych ze stopu aluminium 2024-T351. Analiza tych procesów pozwoliła ustalić rzeczywisty stopień uszkodzenia połączenia oraz dostarczyła dodatkowych danych o rozwoju krótkich pęknięć zmęczeniowych. Na mechanizm niszczenia mają wpływ zarówno charakter zewnętrznego obciążenia, jak i stan odkształceń oraz naprężeń wynikający z procesu zakuwania nitu. Zaobserwowano, że przebieg mechanizmu niszczenia jest skomplikowanym procesem, w którym mikromechanizmy pęknięcia kruchego i plastycznego występują na różnych etapach propagacji pęknięć zmęczeniowych.

Słowa kluczowe: mechanika pęknięcia, krótkie pęknięcia zmęczeniowe, mikromechanizmy pęknięcia, uszkodzenie mikrostrukturalne, połączenie nitowe.

Symbole UKD: 539.431

Wprowadzenie

Połączenia nitowe znajdują szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu oraz konstrukcjach środków transportu. Pomimo coraz szerszego zastosowania połączeń spawanych wciąż istnieją konstrukcje, w których udział połączeń

nitowych wynosi ponad 80%. Do tej grupy zaliczyć należy konstrukcje lotnicze o przeznaczeniu zarówno cywilnym jak i militarnym [1].

Obciążenia eksploatacyjne takich konstrukcji wywołują naturalne procesy zmęczenia i starzenia materiału oraz uszkodzenia struktury poprzez akumulację defektów tak na mikro jak i na makropoziomach.

Szczególne wrażliwymi elementami są połączenia nitowe, które podlegają jednocześnie działającym obciążeniom zewnętrznym i obciążeniom wynikającym z procesu zakuwania [2].

Dlatego dla oceny możliwości bezpiecznej eksploatacji danej konstrukcji lub wybranego węzła konstrukcyjnego należy te połączenia rozpatrywać kompleksowo, zwracając szczególną uwagę na ich podstawowe elementy [3-5]. Nawet przy dotrzymaniu wymagań montażowych i eksploatacyjnych efekty zmęczenia ujawniają się z reguły w obrębie elementów złącza, w których wykonano stożkowe nacięcie pod łeb nitu (nakładki).

Powstałe mikropęknięcia zaczynają propagować pod łbem nitu w obszarze niewidocznym dla kontroli metodami optycznymi. Gdy pęknięcie jest już widoczne na powierzchni, wychodząc spod łba nitu, jego praktycznie niekontrolowana propagacja w głąb arkusza może już osiągnąć nawet do 70% grubości blachy. Dla złącza nitowego składającego się z wielu rzędów nitowych chwila pojawienia się pęknięć na powierzchni równocześnie obok kilku nitów może być krytyczna dla wytrzymałości całej konstrukcji, bo przekrój osłabia się przez propagację pęknięcia przede wszystkim w głąb blachy. Dlatego uwzględnienie momentu inicjacji i wstępnej propagacji pęknięć jest niezwykle ważnym elementem w procesie przewidywania pozostałego rezerwu połączenia lub całej konstrukcji.

Nie mniej ważnym zadaniem jest zdefiniowanie początkowego uszkodzenia zmęczeniowego w formie krótkiego pęknięcia, które inicjuje pod łbem nitu w materiale nakładki złącza nitowego. W tym przypadku problem leży w wyborze odpowiedniej metody nieniszczącej kontroli, która pozwala z dostateczną precyzją ustalić obecność uszkodzenia oraz skontrolować jego głębokość.

Zdefiniowanie początkowego uszkodzenia zmęczeniowego pozwoli zastosować koncepcję dopuszczalnego uszkodzenia, poszerzając jej stosowanie dla przewidywania procesów zmęczenia w poszczególnych elementach konstrukcji oraz dla prognozowania trwałości całej konstrukcji. Według tej koncepcji rozwój uszkodzenia zmęczeniowego może być opisany z użyciem parametrów opierających się na rozwoju pęknięć od istniejących defektów strukturalnych [6-8]. Propagacja pęknięć od tych uszkodzeń (ekwiwalentnych uszkodzeń początkowych), zwłaszcza w początkowym etapie, kiedy uszkodzenie ma niewielkie rozmiary, określana jest jako propagacja wewnątrz tzw. krytycznej strefy niepewności w analizie żywotności [9, 10]. Określenie tej strefy jest bardzo ważne w przypadku prognozowania trwałości elementów w obecności dużych początkowo wad materiałowych. W tym przypadku większa część trwałości zmęczeniowej elementu może zostać wyczerpana już w zakresie

rozwoju krótkich pęknięć. W ostatnich latach ustalono, że w niektórych warunkach obciążenia zmiennego krótkie pęknięcia zmęczeniowe mogą rozwijać się zarówno szybciej jak i wolniej w stosunku do długich pęknięć. W tym przypadku różne zachowanie krótkich i długich pęknięć powoduje spore trudności w jednolitym ilościowym podejściu do ich analizy. Z jednej strony propagację długich pęknięć opisuje się z wykorzystaniem ogólnej sprężysto-liniowej mechaniki pęknięcia, której zastosowanie może jednak prowadzić do błędnych wyników [11]. W odróżnieniu od nich krótkie pęknięcia, zwłaszcza o długości kilku ziaren, mogą propagować w elementarnych przyrostach zupełnie niezwiązanych z długością początkowego pęknięcia i obciążeniem elementu [12, 13]. W tym przypadku duży wpływ na rozwój pęknięć zmęczeniowych mają czynniki mikrostrukturalne, jak np. lokalna orientacja ziaren struktury materiału [8, 14]. W dodatku proces zamykania się wierzchołka pęknięcia może się częściowo różnić w zakresie krótkich pęknięć zmęczeniowych o podobnych rozmiarach i przy podobnych obciążeniach [15]. Właśnie te lokalne efekty powodują obserwowany rozrzut przyrostu pęknięć. Niepewność odnośnie propagacji krótkich pęknięć powoduje trudności w formułowaniu deterministycznego podejścia do przewidywania trwałości zmęczeniowej. Zaproponowano jednak podejścia, które dają dobre wyniki. Wybór odpowiedniego początkowego rozmiaru uszkodzenia oraz obliczenia związane z zamykaniem się pęknięcia przy różnych poziomach jego ograniczonego elementarnego przyrostu pozwalają wyznaczyć odpowiadający mu przyrost w funkcji współczynnika intensywności naprężenia w wierzchołku pęknięcia [16-18]. Rozwinięcie tego podejścia w oparciu o zakres rozmiarów początkowego defektu, określającego ostateczną trwałość zmęczeniową elementu, zostało przedstawione w modelu deterministycznym w publikacjach [19, 20].

Inne podejścia do modelowania propagacji pęknięć oraz trwałości zmęczeniowej rozpatrują przyrost pęknięć jako proces losowy [11, 21-23]. Zwykle ustala się zależność dla uśrednionej krzywej opisującej kinetykę propagacji pęknięć, a następnie dodaje się możliwe elementarne przyrosty długości tego pęknięcia. Te analizy dotyczą rozwoju krótkich pęknięć, co napotyka spore trudności, zarówno przy definiowaniu samej krzywej uśrednionej jak i odpowiednich elementarnych przyrostów pęknięcia. Takie analizy wymagają sporej ilości danych doświadczalnych dla otrzymania statystycznie zweryfikowanej zależności [11].

Jest zrozumiałe, że od momentu inicjacji krótkiego pęknięcia (akumulacja krytycznej ilości uszkodzeń) do chwili wyjścia pęknięcia spod łba nitu na powierzchnię próbki główne procesy zniszczenia przebiegają na poziomie mikrostrukturalnym. Realizacja tego lub innego typu niszczenia, ich ciągłość na etapie formowania makropęknięcia z wyraźnie zaznaczoną linią czoła pęknięcia oraz kierunkiem propagacji będzie maksymalnie oddziaływać na pozostały resurs złącza nitowego, a zatem i trwałość całej konstrukcji.

Spore trudności napotyka się przy próbie uwzględnienia wpływu obciążenia eksploatacyjnego na inicjację i rozwój krótkich pęknięć zmęczeniowych. W bada-

niach w zakresie prognozowania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych dużą rolę odgrywają obciążenia stałoamplitudowe. Są one często częścią widma zmiennoamplitudowego albo obciążenia losowego lub nawet głównym obciążeniem konstrukcji. Niezależnie od tego, w jakiej roli to obciążenie występuje w konstrukcji, ma znaczący wpływ na inicjację oraz propagację pęknięć zmęczeniowych. Szczególnie zaznacza się to w połączeniach elementów konstrukcji lotniczych. Z tego względu poznanie wpływu stałoamplitudowego obciążenia na inicjację i rozwój krótkich pęknięć zmęczeniowych w połączeniu nitowym jest aktualnym problemem naukowym.

Przedstawione przesłanki pozwoliły na sformułowanie głównego celu pracy, którym było zbadanie mikromechanizmów niszczenia występujących na wszystkich etapach rozwoju pęknięć w złączu nitowym. Analiza tych procesów pozwoliła ustalić rzeczywisty stopień uszkodzenia połączenia oraz dostarczyła dodatkowych danych o rozwoju krótkich pęknięć zmęczeniowych.

1. Metodyka badań

Badania były realizowane na próbkach ze stopu aluminium 2024 T351 w postaci obustronnie platerowanych blach o grubości 3 mm.

Skład chemiczny stopu oraz podstawowe własności mechaniczne podano w tabeli 1 na podstawie informacji zawartej w certyfikacie produkcji oraz na podstawie badań własnych.

TABELA 1

Udział dodatków stopowych w składzie chemicznym stopu aluminium 2024 T351 [%]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,50	0,50	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15

Własności mechaniczne stopu 2024 T351 [MPa]

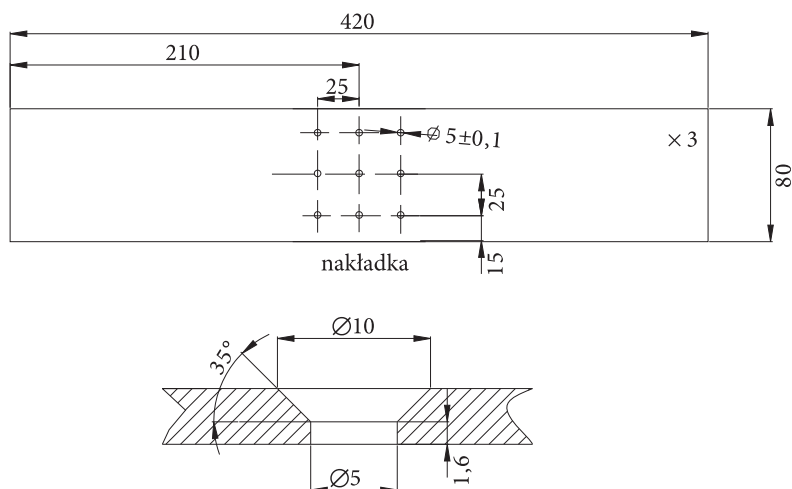
	R_m		$R_{0,2}$		$A_5, \%$	
W kierunku walcowania	453-454	456	371-376	378	15	13
W kierunku prostopadłym do walcowania	437-439		315-318		15	

Do realizacji zaplanowanych badań wykorzystano próbki wykonane z wyjściowego arkusza o wymiarach $3 \times 1200 \times 1500$ mm. Prostokątne próbki o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 1 wycięto w kierunku walcowania blach.

W środkowej części próbek wykonano otwory ze stożkowymi pogłębieniami pod łby nitów w sposób typowy dla blach nakładkowych złącza nitowego. Na potrzeby badań przygotowano próbki w dwóch odmianach wykonania:

- próbki w stanie „wyjściowym” (bez jakichkolwiek dodatkowych zabiegów technologicznych),
- próbki w stanie „umocnionym” (przed badaniami zmęczeniowymi próbki wstępnie zakuto w złącze nitowe, a później roznitowano, uzyskując strefę wstępnego odkształcenia w obrębie otworów pod nity).

Taki kształt próbek wynika z analiz literaturowych i wcześniejszych badań własnych, które dowiodły, że najsłabszym elementem każdego złącza nitowego są blachy nakładek.



Rys. 1. Próбка do badań zmęczeniowych

Próbki zanitowano, wykorzystując nity lotnicze ze stopu PA24 o średnicy $\varnothing 5$ mm. Zamykanie nitów wykonano przy pomocy zakucia na prasie z formowaniem półsferycznej zakuwki.

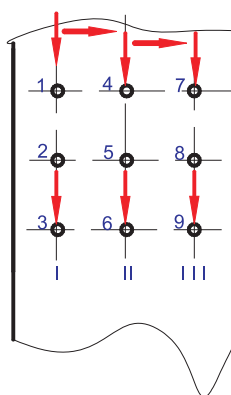
Badania główne zrealizowano w warunkach jednoosiowego cyklicznego rozciągania przy stałej amplitudzie naprężenia wywołanego przez pulsator hydrauliczny INSTRON 8802. Zastosowano obciążenie cykliczne przy stałym zakresie amplitudy naprężenia $\Delta\sigma = 100$ MPa, częstotliwości 15 Hz i współczynnikach asymetrii cyklu $R = 0,15; 0,3$ oraz $0,5$. Przy każdym współczynniku asymetrii cyklu badaniom poddano po trzy próbki.

W trakcie badań zmęczeniowych powierzchnię próbki oraz otworów nitowych obserwowano nieuzbrojonym okiem oraz za pomocą mikroskopu optycznego z powiększeniem do 25 razy. Dla kontroli uszkodzenia materiału w głąb wykorzy-

stywano wiroprowadowy defektoskop WD 3-71 produkcji ukraińskiej z czujnikiem transformatorowym typu PN-12 MDF 01 (rys. 2). Wstępnej kalibracji urządzenia dokonano przy zastosowaniu wzorcowej próbki z pęknięciami o znanej głębokości od 0,15 do 2 mm. Pomiaru realizowano od strony stożkowego nawiercenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach według schematu podanego na rysunku 3.



Rys. 2. Wiroprowadowy defektoskop WD 3-71



Rys. 3. Schemat prowadzenia pomiaru wiroprowadowym defektoskopem WD 3-71

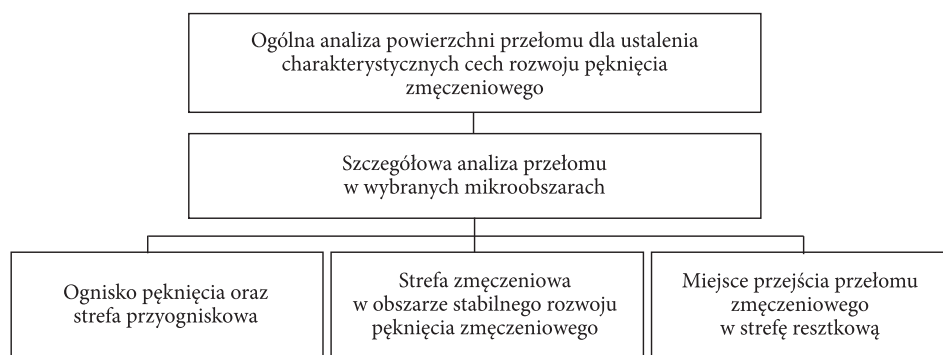
Wynik każdego pomiaru zapisywano w pamięci urządzenia i analizowano przy użyciu specjalistycznego programu WD371_1_11. Odpowiednio do możliwości defektoskopu oraz próbki wzorcowej za początkowe uszkodzenie przyjmowano pęknięcie o szerokości lub głębokości nie mniejszej niż 0,1 mm. Dla sprawdzenia poprawności przeprowadzonych pomiaru wybrane próbki dodatkowo obserwowano przy użyciu mikroskopu optycznego Neophot-2 wyposażonego w oprogramowanie do analizy obrazu.

Analizę mikrofraktograficzną wykonano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego SEM na uniwersytecie technicznym w Tarnopolu. Celem tych badań było ustalenie miejsca inicjacji pęknięć, jego zachowania w początkowej fazie rozwoju, a także ustalenie rozmiarów i kształtu czoła makropęknięcia. Drugim nie mniej ważnym zadaniem było odnalezienie charakterystycznych cech mechanizmu mikroniszczenia oraz powiązanie propagacji pęknięć z trwałością próbek.

2. Wyniki badań

Analizę przeprowadzono na podstawie badań próbek, które stanowią nakładki w złączu nitowym, o czym wspomniano w metodyce badań.

Badania mikrofraktograficzne realizowano według następującego schematu:

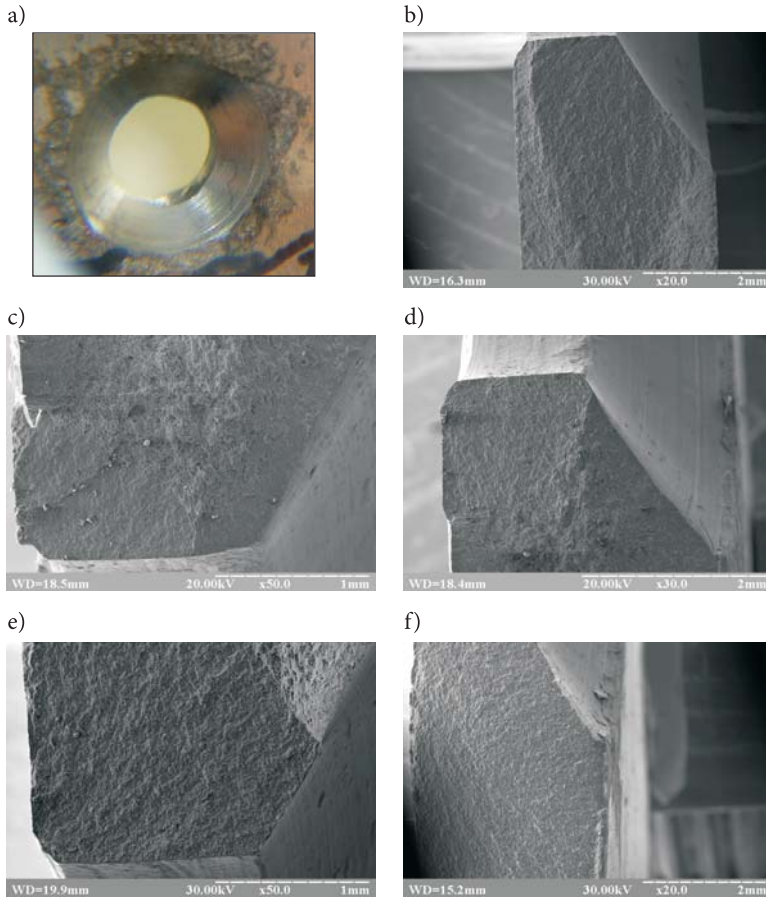


Badaniom mikroskopowym poddano próbki, których przełomy zmęczeniowe przedstawiały najbardziej charakterystyczne cechy procesów niszczenia.

2.1. Ogólna analiza powierzchni przełomów

Na zdjęciach na rysunku 4 przedstawiono obraz powierzchni stożkowego pogłębienia pod łeb nitu z widocznym krótkim pęknięciem (rys. 4a) oraz charakterystyczne kształty czoła pęknięcia, obserwowane podczas badań (rys. 4b-f). Pęknięcie na rysunku 4a było zorientowane pod kątem 45° do kierunku przyłożenia obciążenia. Obserwacja powierzchni stożkowego nacięcia wykonana przy użyciu mikroskopu optycznego nie pozwoliła jednak ustalić miejsca inicjacji pęknięcia.

Dopiero pomiary z wykorzystaniem defektoskopu pozwoliły zauważyć, że nierozwijające się na powierzchni pęknięcie propaguje w głąb próbki. Dlatego analizę inicjacji i rozwoju pęknięć w złączu nitowym należy prowadzić w oparciu o badania powierzchni przełomu. Przy analizie zdjęcia na rysunku 4b widoczne są ukie-



Rys. 4. Krótkie pęknięcia na powierzchni stożkowej otworu pod łeb nitu przy powiększeniu $\times 20$ (a) oraz powierzchnie przełomów w wybranych próbkach przy różnych powiększeniach (b-f) (objaśnienia w tekście)

runkowane grzbiety od powierzchni stożkowego nacięcia, świadczące o rozwoju makropęknięcia od tej powierzchni w głąb próbki. Kształt tego pęknięcia zmienia się do prawie półeliptycznego tuż przed zerwaniem próbki. Na zdjęciu na rysunku 4d wykonanym przy większym powiększeniu można z kolei zauważyć dwa ćwierćeliptyczne pęknięcia propagujące od powierzchni stożka oraz od krawędzi walcowego otworu i spodu próbki.

Płaszczyzny tych pęknięć są lekko przesunięte i łączą się wyraźnym grzbietem widocznym w środkowej części zdjęcia. Dokładna analiza zdjęcia na rysunku 4f przedstawiającego powierzchnię przełomu próbki w górnej części stożkowego pogłębienia pozwala zauważyć pęknięcie w przypowierzchniowej warstwie plateru zachowujące się w sposób typowy dla pęknięć powierzchniowych.

Mamy zatem przypadek wieloogniskowej inicjacji pęknięć, które w początkowej fazie rozwijają się, jako pęknięcia krótkie. Następnie jedno z nich, odgrywające dominującą rolę, wchłania pozostałe w momencie przejścia w makropęknięcie. Ten proces nie zawsze odbywa się w jednej płaszczyźnie. Czasem pęknięcia rozwijają się w płaszczyznach równoległych i dopiero po osiągnięciu jakiejś granicznej długości łączą w jedno dominujące. Taki proces pęknięcia związany jest z krystalograficzną strukturą stopu oraz z warunkami, a raczej z miejscami przyłożenia obciążenia. Nie wolno także zapomnieć o wpływie wewnętrznych uszkodzeń wskutek wcześniejszego zniszczenia wtrąceń intermetalicznych. Dlatego dodatkowo obserwowano krótkie pęknięcia, które powstawały od strony przeciwnej do powierzchni stożka (rys. 4c-d). Na zdjęciu na rysunku 4c wyraźnie widać dwa ćwierćeliptyczne pęknięcia rozwijające się z różnych ognisk i połączone grzbietem.

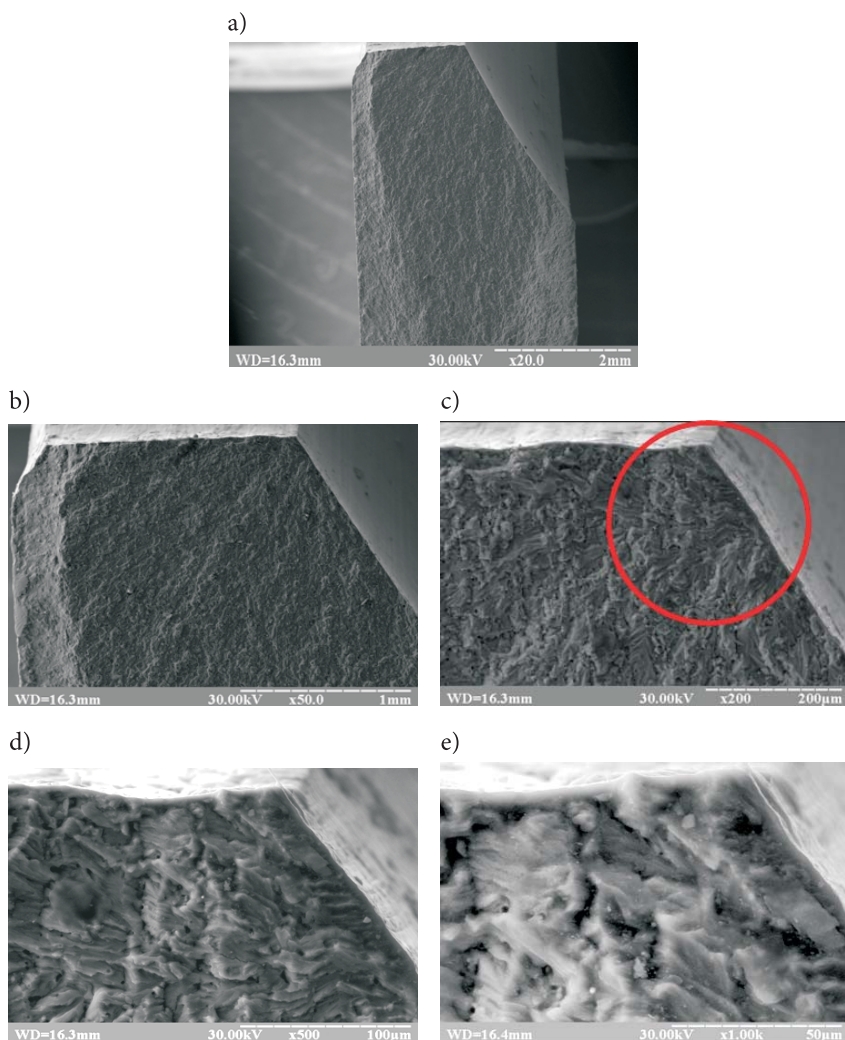
Natomiast na rysunku 4d powierzchnia przełomu jest prawie jednakowa. Wyróżnia się tylko warstwa plateru widoczna w lewym dolnym narożu zdjęcia. Jednak po szczegółowej analizie, zwłaszcza układu prążków i ogólnego obrazu grzbietów, można wywnioskować, że pęknięcie propagowało przynajmniej z dwóch punktów ulokowanych na krawędzi stożka oraz krawędzi walca i spodu próbki. Ten niezbyt wyraźny obraz dwóch pęknięć wyjaśnić można tylko tym, że badano próbkę w stanie wyjściowym bez wcześniejszego nitowania. W przeciwieństwie do niej, próbkę na rysunku 4c badano po zakuciu i usunięciu nitów. Proces wcześniejszego nitowania spowodował powstanie wyraźnej strefy plastycznego odkształcenia widocznej bez żadnego powiększenia przy obserwacji nieuzbrojonym okiem.

Zdjęcia na rysunku 4 ilustrują zatem najbardziej charakterystyczne cechy pęknięcia, które zaobserwowano na powierzchni przełomów w skali makro. W następnej części publikacji zostanie przedstawiona bardziej szczegółowa analiza każdej z prezentowanych próbek według podanego wcześniej schematu badań. Analizę rozpoczęto od identyfikacji źródła pęknięcia dla każdego rodzaju przygotowania próbek, badając jednocześnie przebiegi mechanizmu niszczenia na poziomach mikro- i makrostrukturalnych.

2.2. Ognisko pęknięcia i strefa przyogniskowa w próbkach w stanie wyjściowym

Na rysunku 5 przedstawiono obrazy przełomów w przypowierzchniowej strefie w miejscu przejścia otworu nitowego w stożkowe pogłębienie. Zgodnie z wcześniejszą analizą dotyczącą zdjęć na rysunku 4 zauważono, że strefa inicjacji pęknięć jest zlokalizowana przy powierzchni stożka.

To stwierdzenie znajduje potwierdzenie na zdjęciu na rysunku 5b. Wyraźnie widać kierunki grzbietów, które promieniowo rozchodzą się od ogniska do powierzchni próbki, czyli do warstwy plateru. Na granicy tej warstwy pęknięcie zmienia kierunek propagacji i biegnie dalej prostopadle do osi otworu. Zdjęcie wykonane



Rys. 5. Strefa inicjacji pęknięcia w próbce w stanie wyjściowym (nakładka); objaśnienia w tekście

przy większym powiększeniu (rys. 5c) dostarcza więcej szczegółów odnośnie ogniska pęknięcia zmęczeniowego. Okręgiem zaznaczono najbardziej prawdopodobne miejsce jego lokalizacji. W środku okręgu widoczne jest zagłębienie, od którego promieniowo rozchodzą się grzbiety tworzące charakterystyczny obraz przełomu. Jednocześnie przy powierzchni walcowego otworu zauważono zakłócenie w tym uporządkowanym obrazie grzbietów. Ogólny widok powierzchni przełomu składa się jakby z dwóch stref. Jednej, bardziej wyeksponowanej i usytuowanej przy powierzchni stożka oraz drugiej przy powierzchni walcowego otworu. Porównanie

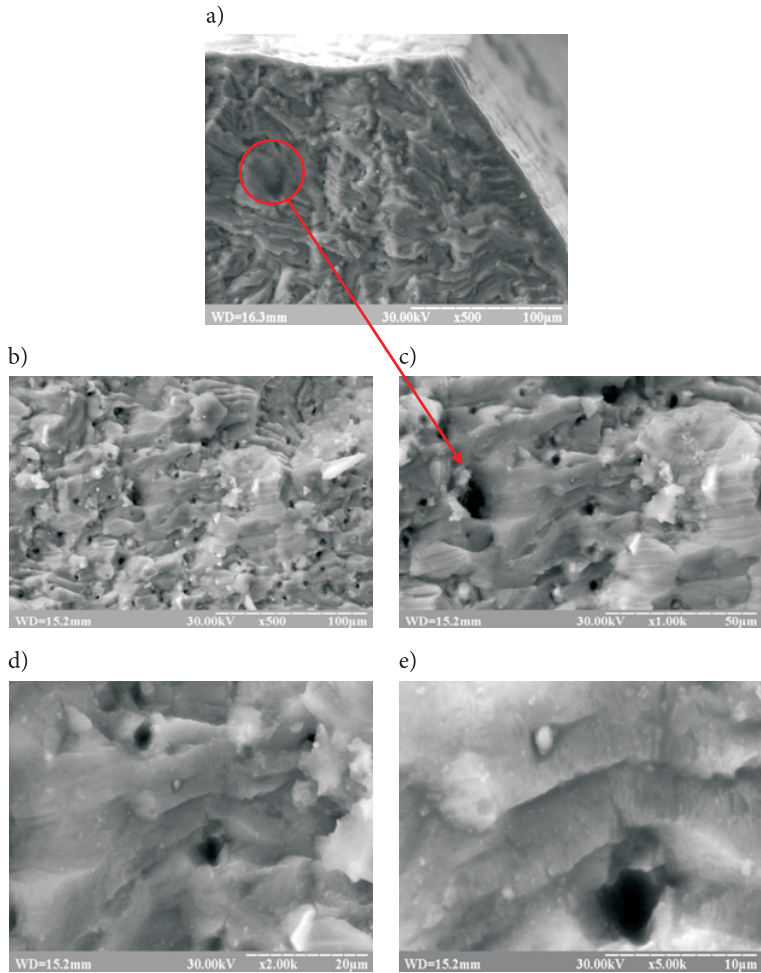
zdjęć na rysunkach 5b-c pozwala wnioskować, że ognisko pęknięcia w drugiej strefie leży gdzieś w pobliżu granicy warstwy plateru i materiału rodzimego w spodniej części próbki. Prezentowane zdjęcia nie pozwoliły na bardziej precyzyjną lokalizację ognisk zmęczeniowych. Możemy się tylko domyślać ewentualnego przebiegu procesów niszczenia, które mogły wyglądać następująco: inicjacja pęknięć odbyła się przynajmniej z dwóch ognisk, samodzielny rozwój każdego pęknięcia odbywał się do momentu ich połączenia wzdłuż grzbietu widocznego nawet na rysunku 5a, od tego momentu jedno duże makropęknięcie postępuje w kierunku krawędzi próbki, prostopadle do kierunku obciążenia. Na podstawie zdjęć określono, że połączenie nastąpiło w momencie, gdy pęknięcie w strefie stożkowego pogłębienia osiągnęło długość około 1/3 długości tego pogłębienia. Pozostałe dwa zdjęcia przedstawiają powierzchnię przełomu w strefie ogniska. Charakterystycznymi cechami są układy fasetek (rozumianych jako mikroobszary o podobnym odwzorowaniu powierzchni przełomu) w postaci wzniesień z zaokrąglonymi grzbietami oraz prążkami zmęczeniowymi ułożonymi w kierunku od punktu przejścia stożka w wałek do środka próbki. Powierzchnia fasetek, raczej gładka, nosi ślady wypadania wtrąceń intermetalicznych w formie prawie idealnie okrągłych jamek. Jamki w większości są ulokowane we wgłębieniach. Widoczne jest pęknięcie w kierunku zgodnym z układem prążków zmęczeniowych na powierzchni fasetki (rys. 5d). Na rysunku 5e widzimy z kolei odkształconą warstwę przypowierzchniową otworu z układem pustek.

Taki stan powierzchni przełomu pozwala wyciągnąć wniosek, że w analizowanej strefie dominuje generalnie mechanizm kruchego pęknięcia, uwarunkowanego bliskością odkształconych plastycznie w procesie wiercenia powierzchni otworu pod nit. Takie warunki sprzyjają inicjacji pęknięć.

2.3. Strefa zmęczeniowa w obszarze stabilnego rozwoju pęknięcia zmęczeniowego

Dla rozszerzenia analizy mechanizmu pęknięcia w omawianych próbkach wybrano do obserwacji kolejne miejsce usytuowane głębiej i zaznaczone na rysunku 6a. To miejsce znajduje się poza strefą wpływu warstw przypowierzchniowych i pozwala uchwycić przebieg mechanizmu pęknięcia w kierunku przyłożenia obciążenia. Wybrany obszar przełomu przedstawiony na rysunku 6b charakteryzuje się fasetkami średniej wielkości. Granice tych fasetek są nieostre, raczej zgładzone. Na ich powierzchniach widoczne są ślady pełzania płaszczyzn krystalograficznych w kształcie zbliżonym do schodkowego. We wgłębieniu znajdują się jamki, które pozostały po wypadnięciu wtrąceń (rys. 6c). Przy większym powiększeniu w okolicy dużego otworu można zaobserwować krótkie pęknięcia wtórne, które zostały zainicjowane przez jamki od wtrąceń i przebiegają przez podstawę fasetki. W pobliżu, na przedniej ścianie fasetki, są widoczne wyrwania, które nie spowodowały

dalszych pęknięć. Następne dwa zdjęcia na rysunku 6 przedstawiają otwór otoczony fasetkami z wyraźnymi grzbietami płaszczyzn krystalograficznych. W poprzek tych grzbietów widoczne są zarysy pęknięć, raczej lokalnych uszkodzeń, ponieważ ich rozmiar, jak wynika ze zdjęcia, wynosi około $2\ \mu\text{m}$.



Rys. 6. Środkowa część przełomu próbki w stanie wyjściowym (objaśnienia w tekście)

Taki ogólny obraz niszczenia, widoczny na zdjęciach, pozwala przypuszczać, że mamy do czynienia z quasi-kruchością mechanizm pęknięcia. Świadczy o tym stan powierzchni fasetek widoczny przy dużym powiększeniu. Nie można jednak pominąć wpływu składowej plastycznej widocznej na poziomie makro, choć nie jest ona mocno wyekspozowana. Obraz przełomu tworzony grzbietami, a własz-

cza fasetkami, które są widoczne w postaci prawie jednakowych zaokrąglonych obszarów, jest charakterystyczny dla plastycznego mechanizmu niszczenia. Widać to szczególnie przy dużym powiększeniu, kiedy daje się zauważyć krawędzie na granicach fasetek, które przypominają płaty. Są to jednoznacznie dowody wskazujące na plastyczną składową mechanizmu pęknięcia.

Ta sytuacja zmusza do przyjęcia założenia o podwójnej naturze zjawiska niszczenia, czyli o złożonym mechanizmie, który zawiera elementy zarówno kruchego jak i plastycznego pęknięcia.

2.4. Analiza rozwoju pęknięcia zmęczeniowego od wstępnie odkształconego otworu

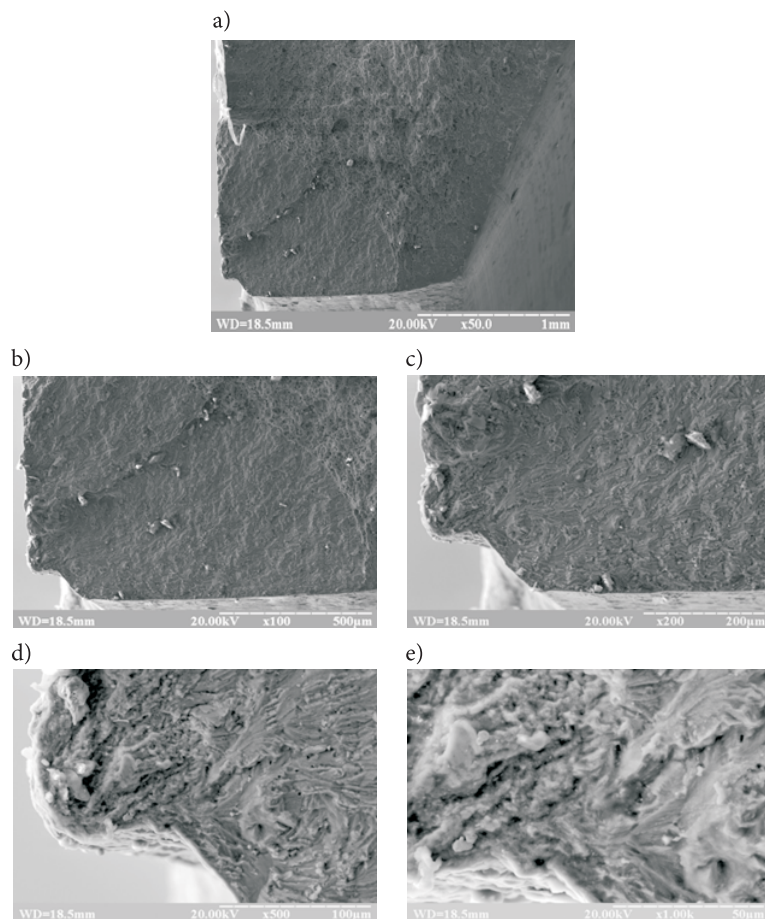
W przypadku próbek poddanych wcześniejszemu zakuciu i usunięciu nitów zauważono, że pęknięcia rozwijają się od strony walcowego otworu, czyli od strony ukrytej dla bezpośredniej obserwacji metodami optycznymi w czasie eksploatacji. Zdjęcia takiego pęknięcia przedstawiono na rysunku 7.

Analizie poddano zarówno strefę ogniska, jak i powierzchnię przelomu w kierunku propagacji pęknięcia. Zauważmy jednak, że podczas zakuwania nitu przy krawędzi otworu wytwarza się strefa zgniotu o walcowym kształcie odpowiadającym rozmiarom zakuwki nitu (rys. 7b). Oprócz tego dość poważnie uszkodzono warstwę plateru, w której tworzą się lokalne mikropęknięcia usytuowane pod kątem około 45° do powierzchni otworu (rys. 7c-d).

Na rysunku 7d łatwo zauważyć granicę między warstwą plateru i materiału rodzimego. Plater jest rozdrobniony na małe nieukształtowane fasetki oraz głęboko poprzecinany siatką pęknięć. Na powierzchni fasetek zauważamy małe, prawie idealnie okrągłe jamki. Powierzchnia materiału rodzimego odróżnia się dużymi fasetkami pokrytymi prążkami zmęczeniowymi. Te fasetki układają się promieniowo, odchodząc od krawędzi otworu pod kątem 45° w głąb próbki. Na powierzchni fasetek, przeważnie we wgłębieniach, znajdujemy ślady wypadania wtrąceń w postaci małych okrągłych jamek.

Obserwacja miejsca, w którym plater przechodzi w materiał rodzimy, wykazała ciekawe zachowanie materiału (rys. 7e). Warstwa plateru została całkowicie zniszczona przez odkształcenie zewnętrzne, w wyniku czego powstały pęknięcia wtórne skierowane do środka próbki. Materiał rodzimy wyróżnia się dużymi fasetkami pokrytymi prążkami zmęczeniowymi. Ilość jamek na tych fasetkach wydaje się mniejsza niż w strefie plateru. Może to być związane z tym, że struktura plateru została naruszona i pod wpływem odkształcenia fasetki w platerze zostały ściśnięte siłami powodującymi zwiększone wypadanie wtrąceń intermetalicznych. Dlatego ilość jamek w platerze wydaje się większa.

Na zdjęciach zaobserwowano pęknięcia wtórne, które według rysunku 7e zachodzą się na granicy plateru i propagują we wgłębieniach równoległe do grzbietów



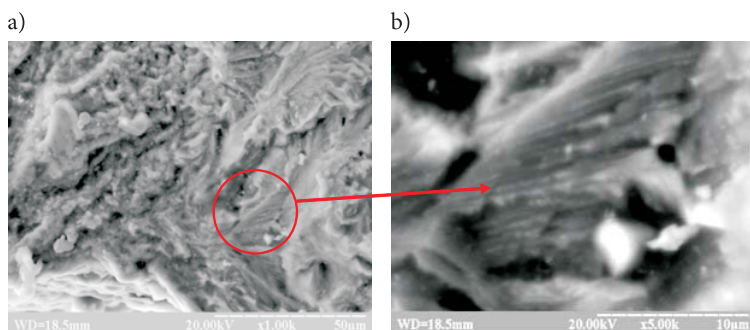
Rys. 7. Rozwój ćwierćeliptycznego pęknięcia na powierzchni przełomu próbki po wcześniejszym usunięciu nitów (objaśnienia w tekście)

na powierzchni pęknięcia. W szczególności pęknięcie rozwija się, łącząc wyrwania utworzone na bazie jamek. Kierunek rozwoju pęknięcia odpowiada orientacji pęknięć wtórnych w platerze i tworzy z nimi jedną całość wyraźnie widoczną na zdjęciach wykonanych przy mniejszym powiększeniu.

Powyższa analiza pozwoliła wysunąć wniosek, że procesy odbywające się w warstwie plateru powodują inicjowanie krótkich pęknięć, które przekraczają granice plateru i tworzą ognisko pęknięcia ćwierćeliptycznego.

Dalszy rozwój pęknięcia analizowano w materiale rodzimym w miejscu tuż za granicą plateru. Wybrane miejsce pokazano na zdjęciach na rysunku 8. Wybór tego miejsca jest związany z faktem, że propagacja pęknięcia odbywa się nie tylko w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przyłożenia obciążenia, ale prawdopo-

dobnie i w kierunku obciążenia. Jeżeli te przypuszczenia okażą się prawidłowe, na powierzchni fasetek powinny być widoczne prążki zmęczeniowe w kierunku od wgłębienia do grzbietu albo odwrotnie. Obserwację skupiono na fasetkach obok pęknięcia wtórnego w materiale rodzimym, na których zauważono prążki (rys. 8a).



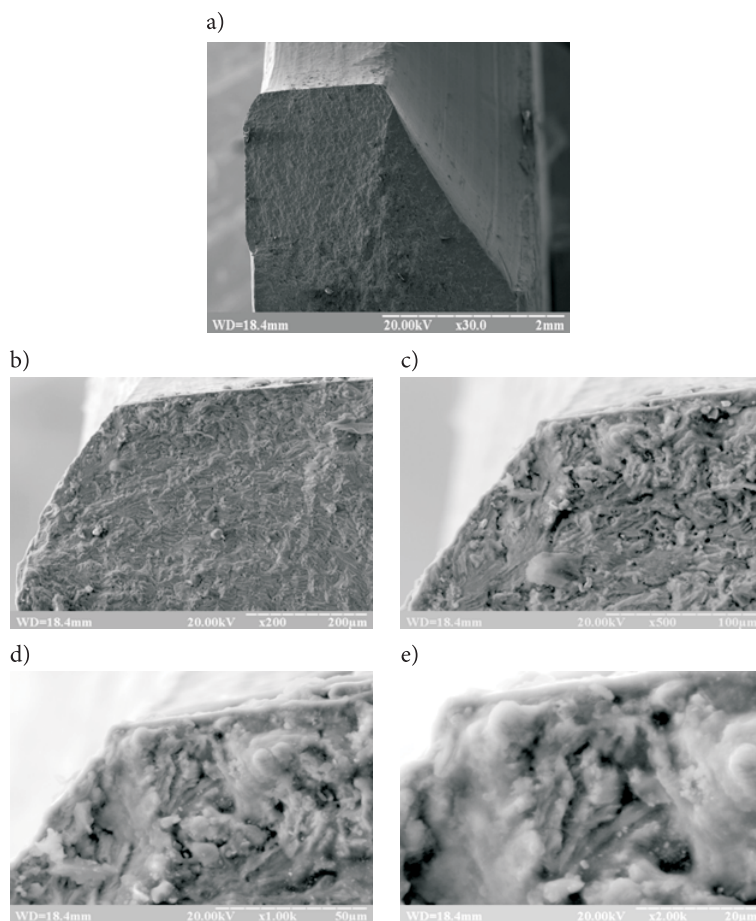
Rys. 8. Rozwój pęknięcia ćwierćeliptycznego na powierzchni przełomu próbki po usunięciu nitów (objaśnienia w tekście)

Pięciokrotne powiększenie tego obszaru przedstawione na rysunku 8b pozwala zauważyć prążki, które można zakwalifikować jako zmęczeniowe. Te prążki układają się równomiernie, wychodząc z jamki po wypadnięciu wtrącenia. Wyraźnie widać zarodki krótkich pęknięć, które są skutkiem łupliwości fasetek.

Taki obraz rozwoju pęknięcia wskazuje, że rzeczywisty mechanizm zniszczenia jest skomplikowany i odbywa się w dwóch kierunkach:

- inicjacja i rozwój pęknięcia w kierunku prostopadłym do kierunku przyłożenia obciążenia (w kierunku szerokości próbki);
- równocześnie przebiegająca propagacja pęknięcia w kierunku przyłożenia obciążenia na poziomie mikro (rozwój pęknięcia w kierunku długości próbki).

Takie wnioski powinny być uzasadnione oraz potwierdzone badaniami na innych próbkach. Dlatego przeanalizowano jeszcze jedną próbkę. Dla sprawdzenia wniosku o propagacji pęknięcia w kierunku przyłożenia obciążenia obserwowano miejsce w środku próbki poza strefą wpływu warstwy plateru i powierzchni próbki. Analizę przeprowadzono na podstawie zdjęć powierzchni przełomu przedstawionych na rysunku 9. Do analizy wybrano próbkę przygotowaną podobnie do poprzedniej, czyli po usunięciu zakutych wcześniej nitów. W przypadku tej próbki proces zakucia nitu nie spowodował wyraźnego odkształcenia materiału przy krawędzi otworu. Zdjęcie makro na rysunku 9a pozwala ustalić, że makropęknięcie rozwijało się z dwóch źródeł. Pierwsze zlokalizowano przy krawędzi otworu i powierzchni próbki od strony podkładki, a drugie przy powierzchni stożka pogłębienia. Dolne



Rys. 9. Rozwój pęknięcia ćwierćeliptycznego na powierzchni przelomu próbki po usunięciu nitów (objaśnienia w tekście)

pęknięcie zgodnie z wcześniejszymi analizami powinno mieć ognisko inicjacji w pobliżu krawędzi otworu na granicy plateru i materiału rodzimego. Jednak brak wyraźnych odkształceń plastycznych od zakucia nitu z pewnością wpłynął na inny stan warstwy plateru.

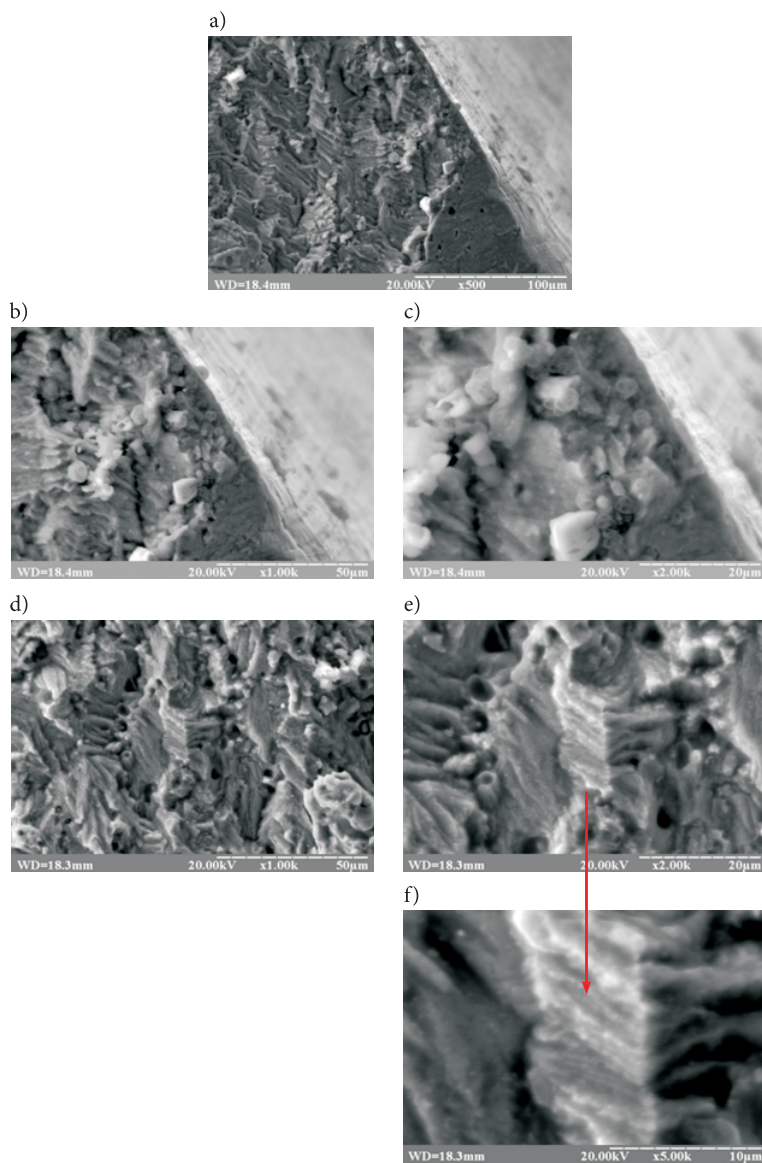
Na zdjęciu na rysunku 9b, wykonanym na krawędzi otworu, zauważono cienką plastycznie odkształconą warstwę wzdłuż powierzchni otworu oraz pod zakuwką. Lokalizacja ognisk pęknięcia jest trudna. Przy takim powiększeniu można jedynie zauważyć, że układ fasetek wskazuje na rozwój pęknięcia od powierzchni zakuwki nitu. Przełom przy krawędzi otworu przedstawia dużą fasetkę, w pobliżu której wystąpiła kumulacja uszkodzeń powodująca inicjację pęknięcia. Więcej szczegółów w tej strefie dostarcza nam zdjęcie na rysunku 9c wykonane przy większym powięk-

szeniu. Przy powierzchni próbki widoczna jest duża fasetka pokryta wyraźnymi prążkami. Zauważono ponadto, że pod odkształconą warstwą od zakuwania nitu ulokowane jest pęknięcie, które rozwija się w kierunku grubości próbki. Od strony powierzchni otworu widać zniekształcone fasetki w kształcie kłębow, wtórne pęknięcia oraz wgłębienia z jamkami.

Zachowanie pęknięcia oraz mechanizm procesu zniszczenia jest zbliżony do quasi-kruchości, z oznakami pęknięcia plastycznego (rys. 9c-d). Zniekształcona forma fasetek wynika najprawdopodobniej z warunków przygotowania próbki do badań (odkształcenie plastyczne po usunięciu nitów) oraz widma obciążenia próbki powodującego dodatkowe zniekształcanie fasetek w momencie zamykania pęknięcia w początkowej fazie jego propagacji.

Drugie miejsce w analizowanym przełomie wybrano w środkowej części w strefie przy powierzchni próbki na granicy plateru oraz materiału rodzimego (rys. 10). Ogólny widok powierzchni przełomu na rysunku 10a charakteryzuje się wyraźnymi, stosunkowo dużymi fasetkami pokrytymi prążkami zmęczeniowymi. W strefie plateru przedstawionego na rysunkach 10b i 10c ogólny obraz niszczenia jest podobny do opisanych wcześniej podobnych obszarów w innych próbkach. Fasetki charakteryzują zniekształcone krawędzie, kłębowy kształt oraz obecność pęknięć wtórnych. Pęknięcie rozwijało się wzdłuż warstwy plateru, prawie po granicy materiału rodzimego w głąb próbki. Miejsce w okolicy początku tego mikropęknięcia charakteryzuje się fasetkami w postaci prawie gładkich i niewysokich grzbietów z zaokrąglonymi krawędziami. Na ich powierzchni obecne są jamki. Jednak nie mają one większego wpływu na rozwój pęknięcia, ponieważ na zdjęciu nie zauważono w ich pobliżu czarnych stref, które mogłyby być traktowane jako zgromadzenia dyslokacji inicjujących pęknięcia.

Obrazy na rysunkach 10d i 10e przedstawiają powierzchnię przełomu w strefie materiału rodzimego, która różni się znacznie od poprzedniego obszaru. Dotyczy to wyraźnego kształtu fasetek, które układają się w grzbiety, tworząc obraz strumieniowy na powierzchni przełomu. Wszystkie wgłębienia mają jamki, przy czym jamki obecne na fasetkach są mniejsze od tych na dnie wgłębień. Tylko w niektórych miejscach można zauważyć krótkie pęknięcia. Charakterystyczną cechą tych pęknięć jest praktycznie brak rozwarcia brzegów. Można wnioskować, że propagacja pęknięcia głównego w tej strefie odbywa się przeważnie w kierunku prostopadłym do przyłożenia obciążenia. Rozwój pęknięcia w kierunku przyłożenia obciążenia ogranicza się prawdopodobnie tylko do propagacji na głębokość równą rozmiarom fasetek. Na rysunku 10e będącym powiększeniem strefy z rysunku 10d na powierzchni fasetki zauważamy prążki zorientowane pod pewnym kątem do jej podstawy. Na tym samym zdjęciu można zauważyć, że na innych fasetkach występują różne układy prążków oraz kąty ich pochylenia. To świadczy o tym, że propagacja pęknięcia odbywa się najprawdopodobniej jednocześnie w różnych płaszczyznach i przy różnej prędkości, tworząc skomplikowaną strukturę przestrzenną.

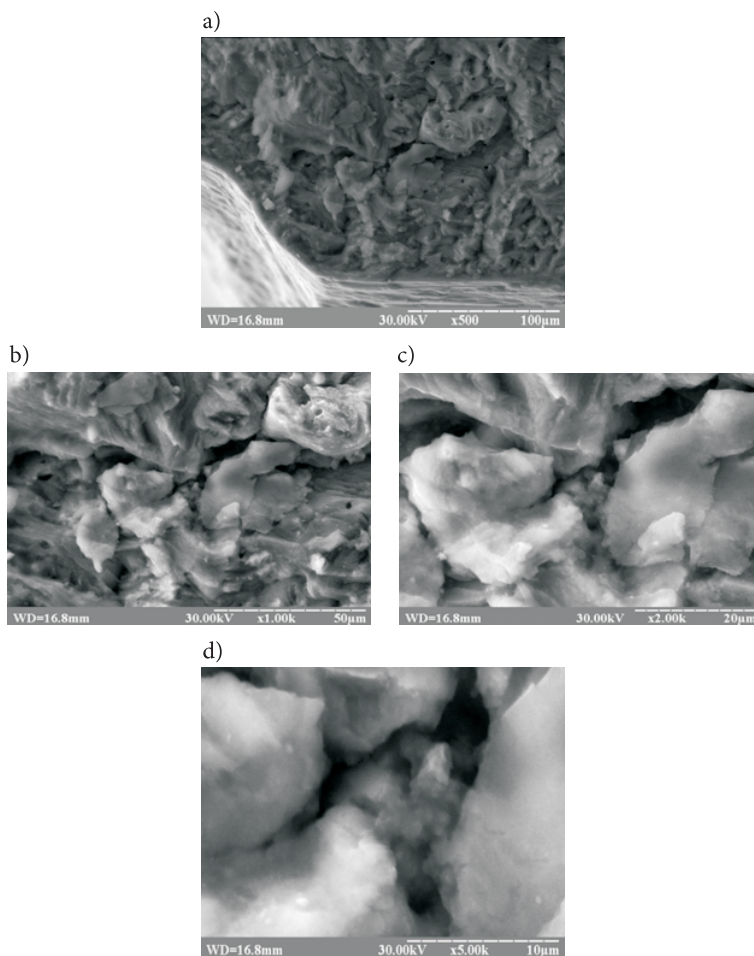


Rys. 10. Rozwój ćwierćeliptycznego pęknięcia na powierzchni przełomu próbki po usunięciu nitów w środkowej strefie propagacji pęknięcia (objaśnienia w tekście)

Mechanizm pęknięcia jest wyraźnie quasi-kruchy, choć pęknięcie, które przebiega we wgłębieniach, można zakwalifikować jako plastyczne. Nie mamy co prawda wyraźnych śladów poślizgu, jednak obecność dużych jamek nie pozwala wyeliminować plastycznego charakteru pęknięcia.

2.5. Mechanizmy pęknięcia w badanych próbkach

Powyższa analiza zmusza do ponownego spojrzenia na procesy i mechanizmy pęknięcia przebiegające w strefie plateru w okolicy ogniska na poziomie mikro. Niewątpliwie mechanizm zniszczenia będzie kruchy lub quasi-kruchy. Próbowano ustalić przebieg tego mechanizmu. W tym celu poddano analizie zdjęcia przedstawione na rysunku 11, wykonane w tym samym obszarze co zdjęcia na rysunku 10. Wybrano obszar w pobliżu ogniska pęknięcia. Pęknięcie okrąża fasetki o stosunkowo dużych wymiarach. Powierzchnie fasetek są czyste, bez żadnych prążków, a krawędzie rwane. Na zdjęciu obecne są jamki (rys. 11b), jednak ich ilość jest



Rys. 11. Strefa inicjacji pęknięcia ćwierćeliptycznego w warstwie plateru na powierzchni przełomu próbki po usunięciu nitów (objaśnienia w tekście)

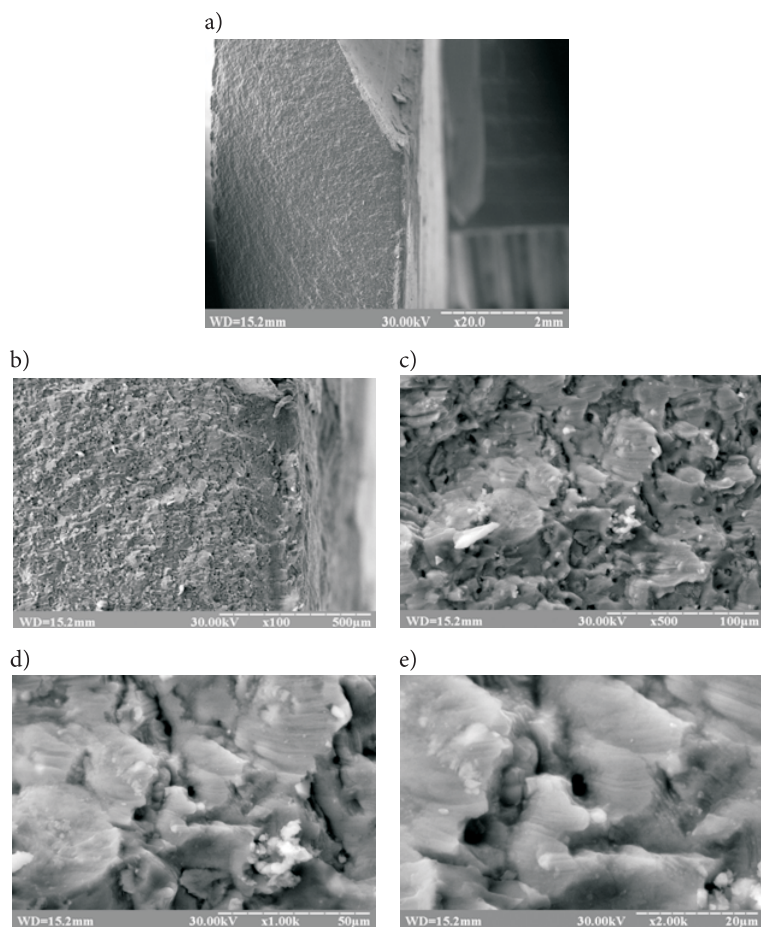
niewielka, a lokalizacja niesprecyzowana. Spotykamy je zarówno na powierzchni fasetek jak i w strefie ich podstaw. Nie zauważono żadnych kształtów kłębowych czy też śladów produktów powstałych w procesie pęknięcia. Zdjęcia na rysunkach 11c i 11d pozwalają wnioskować, że pęknięcie powstało wskutek pęknięcia łupliwego. Na rysunku 11d wyraźnie widać pęknięcie, które ma charakterystyczny ostry kształt oraz obramowanie z fasetek zachowujących praktycznie gładkie i ostre krawędzie nawet przy dużym powiększeniu.

Należy zaznaczyć, że analiza dotyczy bardzo lokalnego obszaru powierzchni przełomu, ulokowanego w warstwie plateru. Na podstawie przeprowadzonych badań założono, że na etapie inicjacji pęknięcia w warstwie plateru odbywa się gromadzenie uszkodzeń, wynikające ze zbiegu dyslokacji do jakichś barier, które osłabia lokalny obszar materiału na tyle, że w kolejnych cyklach obciążenia ten obszar ulega pęknięciu. W trakcie propagacji pęknięcia następuje zmiana mechanizmu niszczenia z pierwotnie łupliwego w momencie inicjacji w złożony z elementami pęknięcia zarówno kruchego jak i plastycznego. Na tym etapie analiz nie możemy zapomnieć o stanie wyjściowym próbki. Dotychczasowe próbki miały plastyczne odkształcenia wynikające z procesu zakuwania nitu, które są bliskie odkształceniom rzeczywistym w złączu i dość dobrze oddają stan pracy takiego złącza. Można przypuszczać, że opisane powyżej mechanizmy niszczenia pozostaną aktualne dla rzeczywistego złącza nitowego. Natomiast obciążenia elementów wywołane równoczesnym oddziaływaniem sił zewnętrznych w obecności nitów spowodują zdominowanie pęknięcia przez ten lub inny mechanizm niszczenia. Podobne zachowanie powinna wykazać próbka w stanie wyjściowym. Różnica będzie wynikać z braku oddziaływania od strefy plastycznej po zakuciu nitu.

Dla porównania przeanalizowano przebieg pęknięcia oraz mechanizmy niszczenia w próbce w stanie wyjściowym (rys. 12). Ponieważ ognisko pęknięcia dla próbek tego typu opisano już wcześniej, teraz skupiono się głównie na środkowej strefie propagacji pęknięcia oraz na przejściu pęknięcia do strefy resztkowej.

2.6. Mechanizmy pęknięcia w strefie stabilnego rozwoju pęknięcia oraz na przejściu do strefy resztkowej

Zdjęcie na rysunku 12a wykonane przy niewielkim powiększeniu przedstawia prawie równy relief powierzchni przełomu, która jest ograniczona warstwą plateru z obu stron. Innych charakterystycznych cech przełomu nie zauważono. Dlatego w pierwszej kolejności przeanalizowano strefę w okolicy warstwy plateru (rys. 12b-e), lecz z wyraźnym przesunięciem w głąb materiału rodzimego. Warstwa plateru zaznacza się dość wyraźnie na rysunku 12b. Wyróżnia się obecnością fasetek z gładkimi powierzchniami, pomiędzy którymi widoczne są pęknięcia. Ogólny widok jest dość typowy i prawie w całości podobny do opisanego wcześniej. Zupełnie inaczej prezentuje się środkowa część strefy pęknięcia. Na rysunku 12b

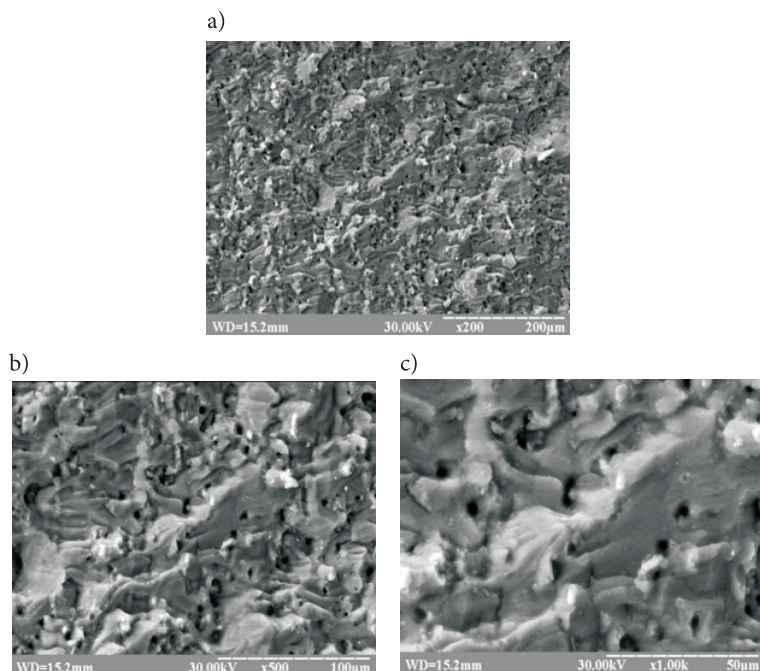


Rys. 12. Środkowa strefa pęknięcia na powierzchni przełomu próbki w stanie wyjściowym (objaśnienia w tekście)

zauważyć można dużą ilość jamek na tle małych, prawie jednakowych w sensie rozmiaru okrągłych fasetek tworzących jednolite obszary. Odzworowanie powierzchni przełomu odpowiada wizerunkowi falistemu. W niektórych miejscach jamki tworzą łańcuchy, przechodzące prawdopodobnie w pęknięcia. Dopiero przy większym powiększeniu na rysunku 12c można zobaczyć więcej szczegółów. Obraz zniszczenia różni się zasadniczo od poprzednich. Fasetki widoczne na zdjęciu mają niewielkie rozmiary, występują w kształcie kłębow i mają powierzchnię pokrytą prążkami zmęczeniowymi. Kształt fasetek przypomina wzgórze z łagodnymi grzbietami. Na dnie wgłębień zauważyć można lokalne wzniesienia. Należy podkreślić, że wszędzie są widoczne jamki. Są one ulokowane tak na powierzchni fasetek, jak i we wgłębieniach. Zauważono dwa typy jamek różniące się rozmiarem oraz pocho-

dzeniem. Małe jamki na powierzchni fasetek, w większości o kształcie zbliżonym do okrągłej, powstają wskutek wypadania wtrąceń intermetalicznych. Natomiast większe jamki, położone na powierzchni wzniesień oraz we wgłębieniach, świadczą o plastycznym charakterze pęknięcia. Oprócz jamek widoczne są także pęknięcia wtórne, które znajdujemy wyłącznie we wgłębieniach. Jak wynika ze zdjęcia na rysunku 12d pęknięcie rozwija się wskutek inicjacji od jamek i propaguje przez połączenie tych jamek ułożonych w jednej linii. Powierzchnia fasetek pokryta jest prążkami zmęczeniowymi, przy czym orientacja tych prążków jest różna. Większe jamki powodują hamowanie rozwoju pęknięć (rys. 12e). Zatrzymują się na nich pęknięcia, które powstawały wskutek połączenia małych jamek. Jednocześnie w okolicy dużych jamek powstają krótkie, kruche pęknięcia. Taki obraz powierzchni przełomu świadczy o przebiegu plastyczno-kruchego mechanizmu pęknięcia z dominacją składowej plastycznej. Realizacja takiego mechanizmu jest uwarunkowana przygotowaniem próbki (wyjściowy bez nitów) oraz przebiegiem obciążenia ($R = 0,5$). Są to warunki sprzyjające takiemu pękaniu.

Charakterystyczny obraz zniszczenia w pobliżu przejścia do strefy resztkowej przedstawiają zdjęcia na rysunku 13. Na rysunku 13a w odróżnieniu od rysunku 12 widoczne są fasetki o większych rozmiarach. Jednak ich wielkość nie może



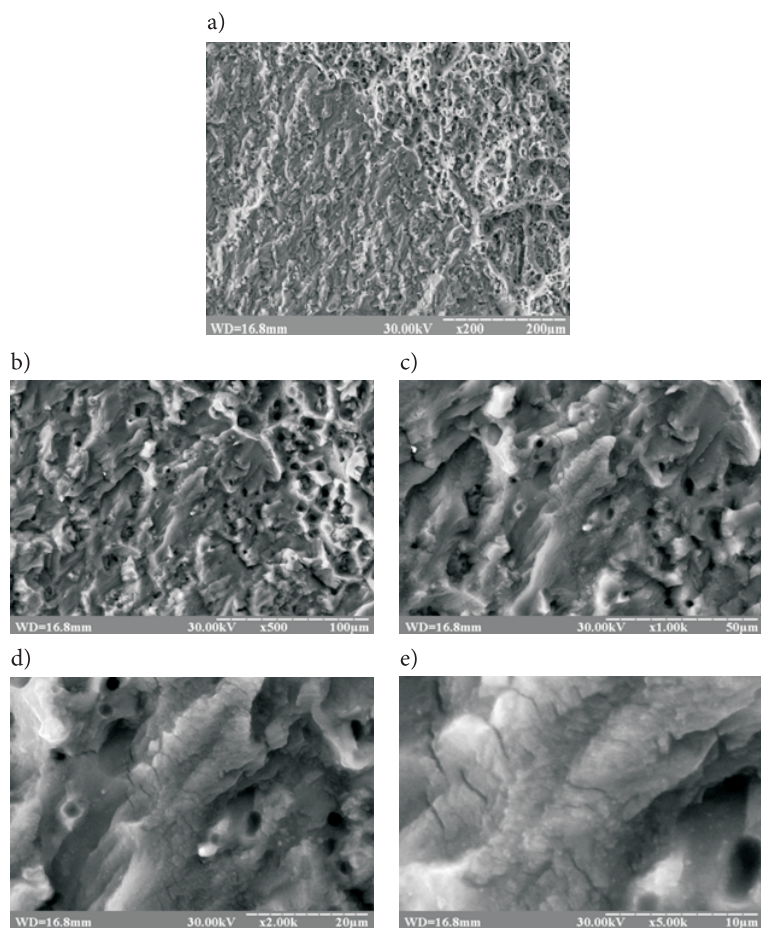
Rys. 13. Obraz przełomu w pobliżu przejścia do strefy resztkowej w próbce w stanie wyjściowym (objaśnienia w tekście)

być porównywana z fasetkami widocznymi w próbkach z wstępnym odkształceniem od nitów. Znacznie lepiej widać łańcuchy małych oraz pojedyncze duże jamki. Przy większym powiększeniu (rys. 13b) zauważamy, że kształt fasetek odróżnia się trochę od obserwowanych wcześniej. Teraz fasetki mają generalnie dwie charakterystyczne powierzchnie: jedną płaską i prawie gładką oraz drugą bardziej nierówną, z delikatnymi wgłębieniami i rwanymi krawędziami, które są jednak nieostre. Charakterystyczne jest to, że fasetki są zawsze zorientowane tymi płaszczyznami do wgłębień, uformowanych wokół dużych jamek. Małe jamki są ułożone zarówno na płaszczyźnie fasetki od strony gładkiej powierzchni, jak i na granicy wgłębienia (rys. 13c). W tym obszarze praktycznie nie ma pęknięć wtórnych. Taki stan powierzchni przełomu świadczy o przebiegu złożonego mechanizmu pęknięcia. Występuje pęknięcie plastyczno-kruche, przy czym w tej części pęknięcia oba te procesy występują równolegle. Zaznacza się jednak dominacja pęknięcia plastycznego zwłaszcza na poziomie makro. Natomiast na poziomie mikro wyraźniejsze są mechanizmy pęknięcia kruchego. Opisany mechanizm pęknięcia można traktować jako podstawowy dla procesów zachodzących w rzeczywistym złączy nitowym.

Z drugiej strony pojawienie się mechanizmu pęknięcia kruchego w procesie zniszczenia jest uzasadnione. W tej strefie, prawie tuż przed ostatecznym zniszczeniem próbki, rozwój pęknięcia powinien doprowadzać do ostatecznego wyczerpania zapasu plastyczności próbki. W strefie resztkowej zniszczenie realizuje się zawsze ze znacznym udziałem pęknięcia kruchego, jeżeli nie mamy do czynienia z materiałem idealnie plastycznym.

Dla potwierdzenia tego przypuszczenia niezbędna była analiza procesów niszczenia na przejściu pęknięcia zmęczeniowego do strefy resztkowej. W naszym przypadku taki stan ilustrują zdjęcia na rysunku 14. Na zdjęciu na rysunku 14a widoczna jest granica między pęknięciem zmęczeniowym a strefą resztkową. Ogólny obraz różni się kształtem fasetek. W obszarze pęknięcia zmęczeniowego niewielkie wzniesienia są wyciągnięte w kierunku czoła pęknięcia. Ułożenie fasetek tworzących strukturę plastrową w obrębie przejścia do strefy resztkowej świadczy o zmianie kierunku pęknięcia.

Natomiast w strefie resztkowej fasetki o strukturze komórkowej nie mają wyraźnego ukierunkowania (rys. 14b). Kształt fasetek widoczny na rysunku 14c jest wydłużony. We wgłębieniach widoczne są lokalne pęknięcia, których krawędzie są nieostre. Duże jamki zauważono na dnie wgłębień. W poprzek fasetek propagują lokalnie pęknięcia widoczne lepiej na rysunku 14d. Na tym zdjęciu widoczne są także pęknięcia na dnie wgłębień propagujące od dużych jamek, które nie były dotychczas spotykane. Grzbiety fasetek pokryte są siatką równoległych lokalnych pęknięć. Rozmiar każdego wynosi około 2 μm . Taki stan powierzchni przełomu pomimo tego, że przypomina plastyczny, w rzeczywistości świadczy o kruchym pęknięciu na poziomie mikro i jest dominujący na tym etapie niszczenia.



Rys. 14. Obraz przełomu na przejściu do strefy reszkowej w próbce w stanie wyjściowym (objaśnienia w tekście)

Analiza mechanizmów niszczenia w blachach stanowiących podkładki złącza nitowego zostanie pominięta ze względu na ograniczoną objętość publikacji. Jest to tyle uzasadnione, że uszkodzeniu ulegają prawie zawsze nakładki z otworami o charakterystycznym stożkowym pogłębieniu. Z kolei badania dotyczące procesów niszczenia całych złączy nitowych opisane zostaną w dalszych publikacjach.

Podsumowanie

Analiza mikrofraktograficzna przeprowadzona na przełomach próbek wykonanych z platerowanego aluminium dowiodła podwójnej natury procesu niszczenia.

Mechanizmy pęknięcia kruchej oraz plastycznej przeplatają się ze sobą, wykazując przemiennie dominującą rolę na kolejnych etapach pęknięcia, od stadium inicjacji poprzez zakres stabilnego rozwoju aż do ostatecznego zniszczenia. Na taki przebieg procesów niszczenia mają wpływ zarówno charakter obciążenia zewnętrznego, jak i odkształcenia wynikające z procesu zakuwania złącza nitowego. Obraz rozwoju pęknięcia w postaci przelomu zmęczeniowego pozwala wnioskować, że rzeczywisty mechanizm niszczenia jest skomplikowany i przebiega w dwóch kierunkach:

- inicjacja i rozwój pęknięcia w kierunku prostopadłym do kierunku przyłożenia obciążenia (rozwój pęknięcia w kierunku szerokości próbki);
- jednoczesna propagacja pęknięcia w kierunku przyłożenia obciążenia na poziomie mikro (rozwój pęknięcia w kierunku długości próbki).

Taki przebieg mechanizmów pęknięcia obserwowany w najłabszym elemencie złącza nitowego w znacznej mierze decyduje o trwałości konstrukcji, ponieważ powoduje lokalne uszkodzenia struktury, zmianę rzeczywistych naprężeń w strefie nitu oraz inicjację i rozwój pęknięcia zmęczeniowego pod jego łbem. Przebieg procesów pęknięcia na poziomie mikrostrukturalnym powinien być zatem uwzględniony w modelach obliczeniowych służących przewidywaniu pozostałego rezerwu elementów konstrukcyjnych w trakcie eksploatacji.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] X. D. LI, L. EDWARDS, *Analysis of short crack growth from microscopic fatigue properties*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 23, 1995, 187-198.
- [2] P. M. G. P. MOREIRA, P. F. P. DE MATEOS, P. M. S. T. DE CASTRO, *Fatigue striation spacing and equivalent initial flaw size in Al 2024-T3 riveted specimens*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 43, 2005, 89-99.
- [3] D. KOCAŃDA, V. HUTSAYLYUK, V. HLADO, *Analiza rozwoju małych pęknięć zmęczeniowych od otworu oraz mikromechanizm pęknięcia platerowanej blachy stopu aluminium 2024-T3*, Biul. WAT, 4, 2007, 37-54.
- [4] D. KOCAŃDA, S. KOCAŃDA, P. KULEC, *Short fatigue crack in avia aluminum alloy 2024-T3*, Science book Opole Polytechnic series Mechanics, 83, 2, 2005, 83-90.
- [5] D. KOCAŃDA, *Analyze propagation fatigue short cracks, MTU, aluminum alloys*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Warsaw, 24, 1996, 217-231.
- [6] S. PERSON, *Investigation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and subsequent propagation of very short fatigue cracks*, Engineering Fracture Mechanics, 7, 1975, 235-47.
- [7] K. J. MILLER, *Short crack problem*, Fatigue of Engineering Materials and Structures, 5, 1982, 223-32.
- [8] K. J. MILLER, *Initiation and growth rates of short fatigue cracks*, in: Fundamentals of Deformation and Fracture, Eshelby Memorial Symposium, Cambridge University Press, 1985, 477-500.
- [9] K. TANAKA, *Mechanisms and mechanics of short fatigue crack propagation*, JSME International Journal (Bulletin of the JSME), 30, 1987, 1-13.

- [10] J. C. NEWMAN JR., *Fracture mechanics parameters for small fatigue cracks*, in: Larsen J. M., Allison J. E., editors, *Small-crack test methods*, ASTM STP 1149, 1992, 6-33.
- [11] C. H. WANG, K. J. MILLER, *Short fatigue crack growth under mean stress, uniaxial loading*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 16, 2, 1993, 181-98.
- [12] J. C. NEWMAN JR., *Fatigue-life prediction methodology using a crack-closure model*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 117, 1995, 433-9.
- [13] C. H. WANG, *Effect of stress ratio on short fatigue crack growth*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118, 1996, 362-6.
- [14] J. C. NEWMAN JR., *The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective*, *Progress in Aerospace Science*, 34, 1998, 347-90.
- [15] R. O. RITCHIE, *Small crack growth and the fatigue of traditional and advanced materials*, Plenary Lecture, in: *Proceedings of Fatigue' 99*, Beijing, China, 1999, 3-14.
- [16] S. BAVERJEE, *Crack closure in fatigue — a review*, Part I: *Mechanisms and prediction*, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 38, 2, 1985, 167-86.
- [17] A. L. DOWSON, M. D. HALLIDAY, C. J. BEEVERS, *In-situ SEM studies of short crack growth and crack closure in a near-alpha Ti alloy*, in: *Conf. IRC'92*, Birmingham, England, 1992.
- [18] J. Z. ZHANG, M. D. HALLIDAY, P. POOLE, P. BOWEN, *Crack closure in small fatigue cracks — a comparison of finite element predictions with in-situ scanning electron microscope measurement*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 20, 9, 1997, 1279-93.
- [19] J. C. LI, D. TAYLOR, *A new model of short crack closure*, in: *Advances in Fracture Research*, *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture*, Sydney, Australia, 1997, 3, 14431-50.
- [20] D. S. DUGDALE, *Yielding of steel sheets containing slits*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 1960, 100-4.
- [21] S. SURESH, R. O. RITCHIE, *A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness*, *Metallurgical Transaction, A* 1982, 13A, 1627-31.
- [22] J. C. NEWMAN JR., *A crack closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading*, ASTM STP748, 1981, 53-84.
- [23] J. C. NEWMAN JR., *A non-linear fracture mechanics approach to the growth of small cracks*, in: *AGARD Conference Proceedings*, 328, Canada, 1982, 6.16.25.

V. HUTSAYLYUK, J. MIERZYŃSKI, V. HLADO

Fatigue micromechanisms of rivet joints under stable cyclic load of aluminium alloy 2024-T3

Abstract. Fatigue micromechanisms of fracture during the initiation stage of crack and next its propagation, at microstructural level, and also during macrocrack formation on the stage of its transition into final failure in rivet connections of aluminum 2024-T3 alloy were investigated. Due to analysis of these processes, actual degree of connection damage has been determined as well as additional data on a type of short fatigue cracks have been known. It was stated that fracture mechanism is affected both by external loading and also by deformations and stress produced during rivet clenching. It was observed that failure mechanism is a complicated process in which micromechanisms of brittle and plastic cracks occur at different stages of fatigue crack propagations.

Keywords: fracture mechanic, short fatigue cracks, fatigue micromechanism, microstructure damage, rivet joint

Universal Decimal Classification: 539.431