

Grzegorz Chruścielski*

MIKROSTRUKTURALNA CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMU PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO MATERIAŁU AW 7075-T651

Streszczenie. Materiał AW 7075 jest materiałem powszechnie stosowanym przy wytwarzaniu szczególnie odpowiedzialnych konstrukcji w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. W tych warunkach eksploatacyjnych niemal zawsze występuje zagrożenie pękaniem zmęczeniowym, więc poznanie mechanizmu takich pęknięć jest wciąż niezwykle istotne. W pracy przedstawiono przegląd literatury poświęconej problematyce zmęczenia oraz wyniki badań własnych mechanizmu pękania zmęczeniowego materiału AW 7075. W szczególności omówiono mechanizm łączenia się mikroporów powstałych wokół wydzieleni faz międzymetalicznych i wskazano na plastyczny charakter pękania zmęczeniowego.

Słowa kluczowe: stop aluminium, anizotropia, mechanizm pękania zmęczeniowego

Wprowadzenie

Zjawisko pękania zmęczeniowego w wysokowytrzymałych stopach aluminium jest od wielu lat przedmiotem licznych badań. Zainteresowanie to wynika przede wszystkim z faktu, że materiały te, charakteryzujące się bardzo korzystnymi własnościami fizycznymi i mechanicznymi (wysoką udarnością i plastycznością, dużą odpornością na zmęczenie i zadowalającą na korozję, łatwą obrabialnością, a przede wszystkim wysoką wytrzymałością w stosunku do gęstości [18]), są powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym [4, 19] i motoryzacyjnym [11]. W niemal wszystkich tych zastosowaniach niszczące działanie naprężeń zmęczeniowych jest nieuniknione.

W ostatnim dziesięcioleciu osiągnięty został znaczący postęp w badaniu procesu zmęczenia, ponieważ zastosowane zostały nowe techniki badawcze, pozwalające na elektronmikroskopową rejestrację poszczególnych etapów ewolucji struktury materiału podczas jednego cyklu zmęczeniowego. W ten sposób badano m.in. stop IN9052 z silnie rozdrobnionym ziarnem [21] oraz stop A356 z wydzieleniami eutektyki krzemowej [9]. Badania te wskazały, że w tych przypadkach rozwój pękania zmęczeniowego odbywa głównie poprzez rozwieranie materiału wzdłuż pasm ścinania (dla stopu IN 9052) oraz dodatkowo poprzez mikropęknięcia wydzieleni fazy kruchej (w przypadku A356).

Szczególną grupę stopów aluminium stanowią wysokowytrzymałe stopy serii 7000, których zachowanie się w warunkach naprężeń zmęczeniowych opisują m.in. prace [7, 10, 16]. Wśród tej grupy jednym z najczęściej stosowanych (np. na poszycia i dźwigary skrzydeł sa-

* Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, grzegorz.chruscielski@pwr.wroc.pl

molotów, elementy hamulców i pomp paliwa) jest stop EN AW 7075 (oznaczenie wg PN-EN 573-3:2010, symbol chem. AlZn5,5MgCu). Z racji zastosowań materiałowi temu poświęca się wiele prac, wśród których w ostatnich latach znaleźć można m.in. publikacje dotyczące prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego [22], zmęczeniowego zużycia ciemno-korozyjnego [15], odporności korozyjnej po utlenianiu [12], odkształceń sieci przy obciążeniach zmęczeniowych [17] czy trwałości zmęczeniowej [20, 23]. Jednak tylko nieliczne prace dotyczyły badań mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego [13].

Uznając, że tylko pełne poznanie mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego może przyczynić się do kontrolowania tego procesu, niniejsza praca poświęcona jest opisowi czynników wpływających na przebieg pęknięcia zmęczeniowego w materiale AW 7075-T651.

1. Własności mechaniczne i struktura badanego materiału

Materiałem przeznaczonym do badań był stop aluminium AW 7075 w postaci płyty walcowanej o grubości 25 mm w stanie T651 (oznaczenie T651 wskazuje, że materiał poddawany był przesycaniu, rozciąganiu w celu usunięcia naprężeń cieplnych i następnie sztuczemu starzeniu). Skład chemiczny stopu AW7075 przedstawiono w tabl. 1, a własności wytrzymałościowe w tabl. 2.

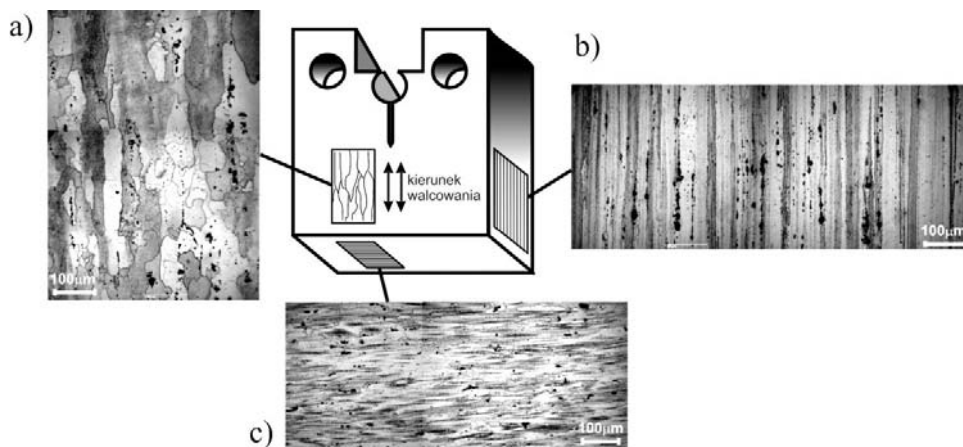
Tabela 1. Skład chemiczny materiału AW 7075 (wg. Atestu Alcoa Europe Flat Rolled Products, atest nr 0381740)

Pierwiastek	Al	Zn	Mg	Cu	Ti	Cr	Fe	Si	Mn	Sn	B	Na	Ti+Zr
Zawartość %	89,48	5,75	2,39	1,64	0,40	0,20	0,12	0,08	0,01	0,01	0,0009	0,0002	0,04

Tabela 2. Własności mechaniczne materiału EN AW 7050

Wyznaczana wielkość	Kierunek walcowania	Kierunek poprzeczny
$R_{p0,2}$ [MPa]	544	505
R_m [MPa]	600	570
A_5 [%]	10	9
Z [%]	12	10
E [MPa]	68382	71891
K_{IC} [MPa/m ^{1/2}]	31,00	25,95

Struktura badanego materiału 7075 wykazywała silną teksturę po walcowaniu. Do badań stosowano próbki zwarte, odpowiadające próbkom do badań odporności na pęknięcie. Orientacje próbek wraz ze strukturami powierzchni zewnętrznych, widocznymi na trawionych zglądach metalograficznych, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat próbki do badań mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego wraz ze zdjęciami struktur powierzchni zewnętrznych: a) płaszczyzna walcowania, b) powierzchnia przekroju wzdłużnego, c) powierzchnia przekroju poprzecznego. Trawienie Mi2Al

Na fotografiach przedstawionych na rys. 1 widać, że badany materiał posiada silną teksturę po walcowaniu. Widoczne są również liczne wydzielenia, których rozłożenie na powierzchni walcowania wykazuje pasmowość, nie związaną jednak z granicami ziaren (rys. 1a).

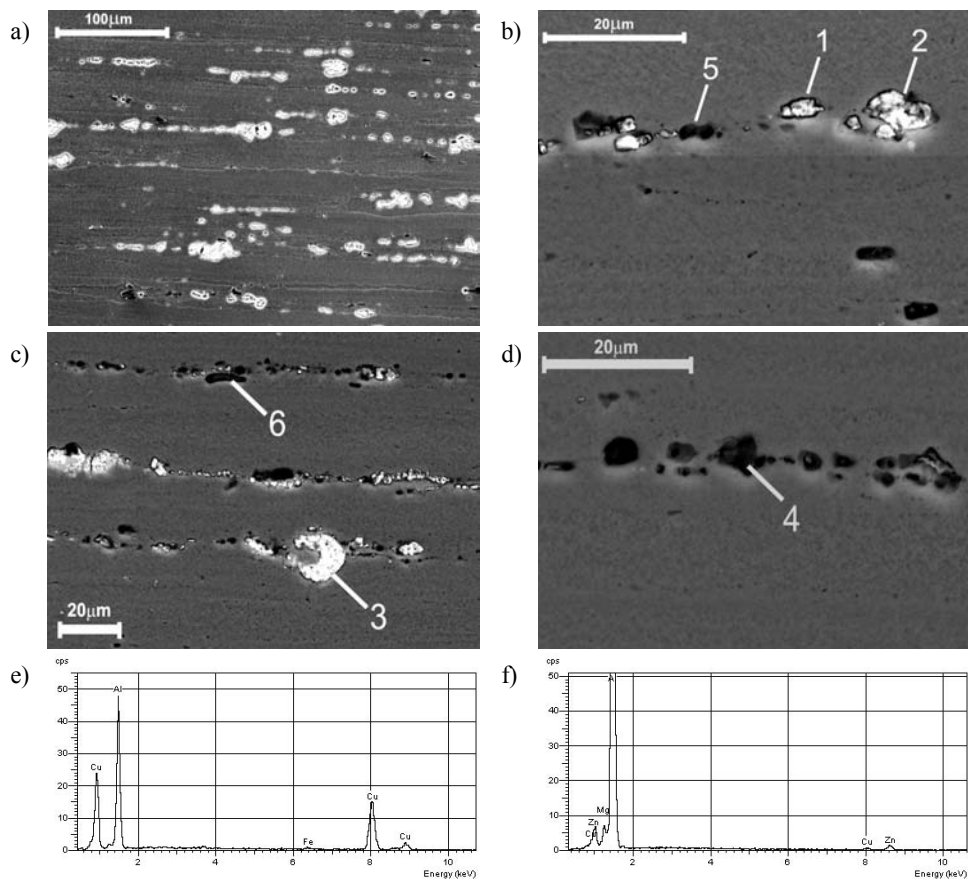
Analiza spektroskopowa (EDS) udziału procentowego pierwiastków wchodzących w skład typowych wydzielań, przedstawiona w tabeli 3, wykazała, że wydzielania te można podzielić na dwie grupy: związki bogate w miedź, które obserwowane pod mikroskopem skaningowym przy zastosowaniu detektora elektronów odbitych (BSE) widoczne są jako cząsteczki o bardzo jasnej barwie (rys. 2a-c), oraz związki z udziałem miedzi, cynku, krzemu i manganu, widoczne na podobnych zdjęciach jako cząsteczki ciemne. (rys. 2b-d). Na podstawie analizy udziału procentowego pierwiastków, ich masy molowej oraz danych literaturowych [2, 10, 14], w tabeli 3 podano również wzory związków chemicznych, jakie w przybliżeniu mogą być tworzone przez pierwiastki obecne w wydzieleniach.

Tabela 3. Udziały procentowe pierwiastków występujących w wydzieleniach w strukturze materiału AW 7075

Nr wydzieleń	Udziały procentowe pierwiastków						Teoretyczny związek chem.*	Przybliżony rzeczywisty związek chem.**
	Al	Cu	Si	Fe	Zn	Mg		
1	60,9	38,5		0,6			$\text{Cu}_{36}\text{Al}_{210}\text{Fe}$	Al_2Cu
2	42,3	54,2		3,5			$\text{Cu}_3\text{Al}_{25}\text{Fe}$	$(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$
3	12,5	82,6		4,9			$\text{Cu}_{14}\text{Al}_5\text{Fe}$	$(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$
4	85,1	6,7		4,5	2,9	0,8	$\text{Al}_{95}\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{ZnMg}$	$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$
5	95,3	0,8			3,3	0,6	$\text{Al}_{280}\text{Zn}_4\text{Mg}_2\text{Cu}$	$(\text{Al,Zn})_6\text{Mg}$
6	60,5	0,9	34,5		3,5	0,6	$\text{Al}_{158}\text{Si}_{86}\text{Zn}_3\text{MgCu}$	$(\text{Al}_2\text{Si})_2$

(*) na podstawie analizy udziału procentowego pierwiastków i ich masy molowej

(**) na podstawie danych literaturowych [2, 10, 14]



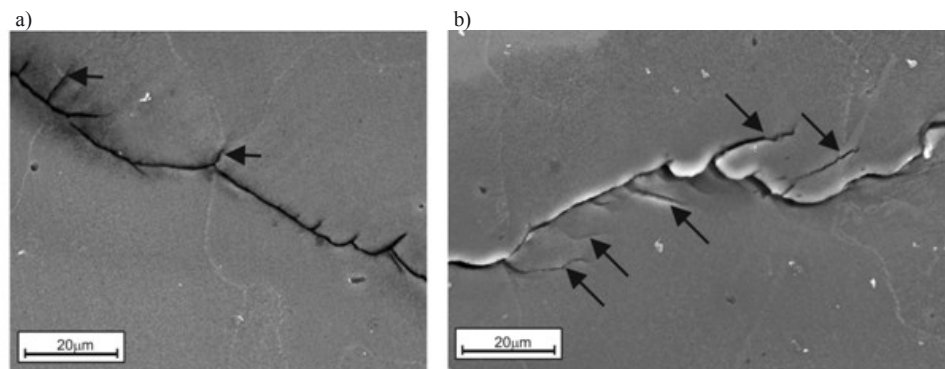
Rys. 2. Powierzchnia przekroju wzdłużnego materiału AW 7075 po walcowaniu: a) pasmowe wydzielenia faz międzymetalicznych na tle granic ziaren, b-d) wydzielienia poddane analizie chemicznej (zaznaczone numerami od 1 do 6), e, f) przykładowe spektrogramy energii (EDS) otrzymane dla wydzieli nr 1 i nr 5

2. Badania mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego

Do badań mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego wykorzystano próbki stosowane do wyznaczania odporności na pęknięcie (por. rys. 1), w których pęknięcie przebiegało w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania (orientacja X-Y wg PN-EN ISO 12737). Podczas obciążania zmęczeniowego stosowano siłę zmienną w zakresie 2-10 kN z częstotliwością 10 Hz.

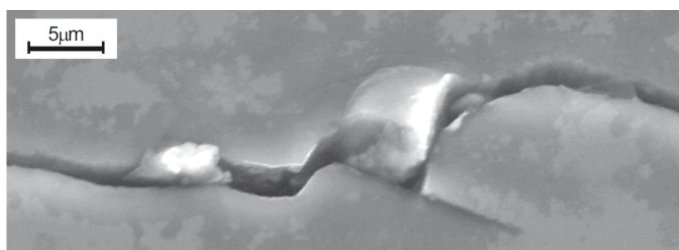
Na fotografiach 3a i 3b przedstawiono zdjęcia SEM trawionej powierzchni bocznej próbki po wystąpieniu pęknięcia zmęczeniowego. Jak można zauważyć, głównemu frontowi pęknięcia towarzyszą liczne uskoki, które niekiedy związane są z granicami ziaren (dwa takie przypadki zaznaczono na rys. 3a strzałkami), ale częściej występują w obrębie ziaren, jak można zobaczyć na rys. 3b. Tego typu uskoki śródkrystaliczne świadczą o odkształcaniu

i pękaniu materiału wzdłuż trwałych pasm poślizgu wewnątrz ziaren [8] (ewentualne pasma ścinania, które również mogą powodować pęknięcie śródkrystaliczne, występują niezmiernie rzadko w stopach serii 7000 w postaci T6 lub T7 z powodu ich odpuszczania [3]).



Rys. 3. Fotografie SEM pęknięcia zmęczeniowego z licznymi uskokami związanymi z granicami ziaren (zaznaczonymi strzałkami na fot. 3a) i z pasmami poślizgu (zaznaczonymi strzałkami na fot. 3b)

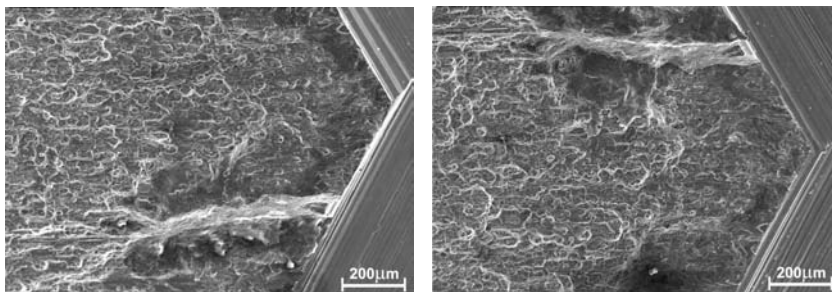
Na rys. 4 przedstawiono zdjęcie SEM przedstawiające interakcję frontu pęknięcia z polem naprężeń generowanym przez wydzielenie fazy międzymetalicznej. Wydzielenia takie, stanowią nieciągłość struktury osnowy, często stają się źródłem powstania mikroporów i przyczyniają się do przyspieszenia pęknięcia, które wówczas odbywa się na drodze zrywania połączeń (mostków) między wydzieleniami. Mechanizm taki znalazł potwierdzenie również przy omówionej w dalszej części analizie fraktografii pęknięcia. Z drugiej jednak strony, uskok widoczny na rys. 4 przy większym wydzieleniu, świadczy o chwilowym powstrzymaniu frontu pęknięcia.



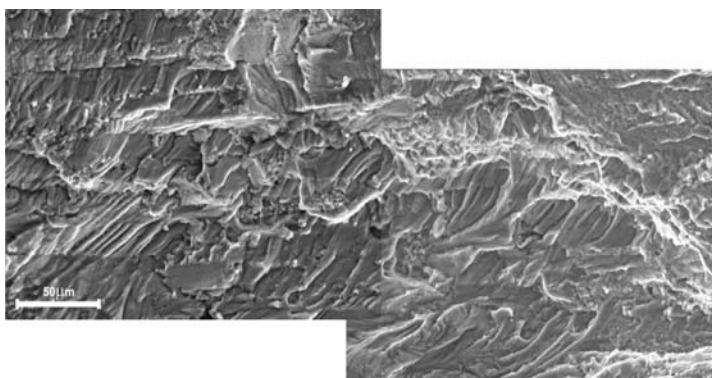
Rys. 4. Fotografia SEM przedstawiająca interakcję pęknięcia zmęczeniowego w wydzieleniu w strukturze materiału AW 7075

Na rys. 5 przedstawiono zdjęcia SEM dwóch przylegających stron przełomu zmęczeniowego próbki. Ułożenie języczków odkształcenia – na obu powierzchniach wypukłością zwróconych przeciwie do kierunku propagacji pęknięcia – wskazuje wyraźnie na plastyczny charakter pęknięcia i odpowiada mimoosiowemu, nierównomiernemu rozrywaniu [8]. O plastycznym charakterze pęknięcia zmęczeniowego świadczy również obecność na powierzchni

niach przełomu prążków plastycznych (rys. 6), będących śladem kolejnych cykli pękania zmęczeniowego, jak również liczne wgłębienia i bruzdy na powierzchni pęknięcia, widoczne na mikroskopie SEM przy większych powiększeniach (rys. 7). Jak stwierdzono, wgłębienia te powstały podczas pękania głównie w miejscach wydzielania się faz międzymetalicznych. Pozostałości tych wydzieleni widoczne są na rys. 7d.

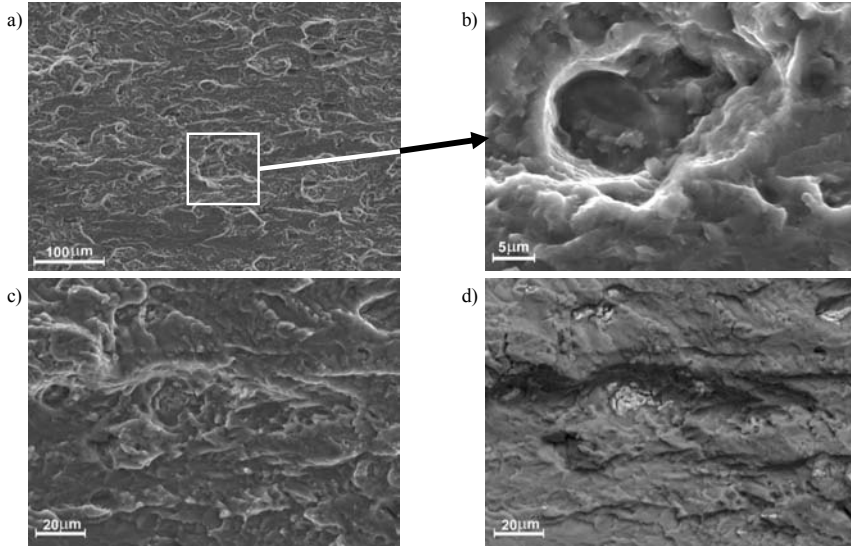


Rys. 5. Fraktografie dwóch przylegających stron przełomu zmęczeniowego. Materiał AW 7075

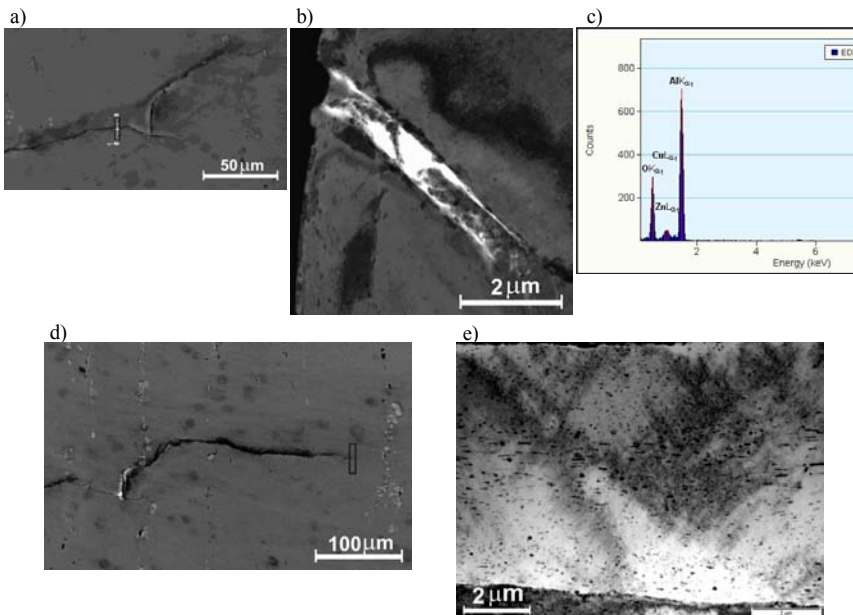


Rys. 6. Fraktografia przełomu zmęczeniowego z widocznymi prążkami odkształcenia plastycznego, powstałymi podczas kolejnych cykli obciążania zmęczeniowego. Materiał AW 7075

Badania na mikroskopie transmisyjnym (TEM) struktur dyslokacyjnych w obszarze bezpośrednio przylegającym do pęknięcia zmęczeniowego wykazały występowanie pasmowych struktur dyslokacyjnych oraz obszarów wolnych od dyslokacji (rys. 8 a-d). Tworzenie się takich splotów dyslokacji możliwe jest dzięki temu, że w stopach aluminium, jak we wszystkich materiałach o sieci Al, dyslokacje wykazują znaczną ruchliwość, nawet przy niskich temperaturach [5]. Jak wykazano w pracy [1], pasmowe ułożenie splotów dyslokacji ma wpływ na skłonność materiału do pękania zmęczeniowego. Potwierdza to rys. 8d, na której widać, że pęknięcie przebiega po granicy obszaru wolnego od dyslokacji. Badanie składu chemicznego struktury w obrębie pęknięcia wykazało obecność amorficznego tlenku aluminium (rys. 8e), którego obecność może jednak wiązać się ze wzrostem temperatury materiału podczas wykonywania preparatu do badań transmisyjnych.



Rys. 7. Wgłębienia i bruzdy na powierzchni przelomu zmęczeniowego: a) powierzchnia przelomu przy małym powiększeniu, b) wgłębienie z środkowej części zdjęcia (a) z widoczną na dnie pozostałością po wydzieleniu, c,d) bruzdy na powierzchni pęknięcia w obrazie SE (c) i BSE (d) z widocznymi pozostałościami po wydzieleniach



Rys. 8. Struktura dyslokacyjna w środku pęknięcia zmęczeniowego (a, b) i w wierzchołku pęknięcia (d, e). Na rys. (b) widoczne wydzielenie amorficznego tlenku aluminium, którego skład chemiczny przedstawia analiza spektrograficzna widma na rys. (c). Na rys. (e) widoczne obszary splotów dyslokacyjnych i obszary wolne od dyslokacji

3. Wnioski

Badania mechanizmu pęknięcia wykazały, że pęknięcie zmęczeniowe przy jednostronnym rozciąganiu mimośrodowym ma charakter plastyczny. Wskazują na to mikropęknięcia wnikające w głąb ziaren (przebiegające po trwałych pasmach poślizgu), obecne na przelomie próbki prądku plastyczne oraz liczne wgłębienia i bruzdy.

Występującą przy wierzchołku pęknięcia zmęczeniowego strefę odkształceń plastycznych można łatwo określić, obliczając jej teoretyczny promień według wzoru [6]:

$$r_p = (K_I/R_{p0,2})^2/6\pi \quad (1)$$

i dla badanego materiału promień ten wynosi około 2,7 mm. Strefa plastyczna jest więc na tyle niewielka, że materiał 7075 uznaje się za materiał kruchy, spełniający (przy odpowiedniej grubości) warunki płaskiego stanu odkształceń.

Stwierdzona obecność pozostałości wydzieleni faz międzymetalicznych (wśród których wyróżnić można grupę związków bogatych w miedź, a także związki aluminium z miedzią, cynkiem, krzemem i manganem) we wgłębieniach i bruzdach na powierzchni pęknięcia wskazuje, że wokół wydzieleni (na granicy wydzielenie – osnowa) dochodzi do tworzenia się mikroporów, i że pęknięcie zmęczeniowe, przynajmniej częściowo, przebiega na drodze zrywania mostków między mikroporami. Mechanizm taki jest typowy dla pęknięcia zmęczeniowego stopów aluminium.

Literatura

1. Awatani J. i in.: Structure changes in metal fatigued at ultrasonic frequency. 1 Report, Aluminium. Bulletin JSME Japan Society. Mechanical Engineers, 12 (53), 1969, 940-946.
2. Chandan Mondal i in.: On the nature of T (Al₂Mg₃Zn₃) and S (Al₂CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy. Material Science and Engineering A 391 (2005) s. 367-376.
3. Dumont D. i in.: A model of predicting fracture mode and toughness in 7000 series aluminium alloys. Acta Mater. 52, 2004, 2529-2540.
4. Heinz A i in.: Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. Material Science and Engineering A 2000, 280 (1), s. 102-107.
5. Hertzberg R. W.L.: Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th ed. New York, John Wiley and Sons, 1996.
6. Irwin G. R.: Relation of crack toughness measurements to practical applications. Weld. J. Res. Suppl. 1962, 41, s. 519.
7. Jata K. V. i in.: Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness Behavior of an Al-Li-Cu Alloy. Metallurgical Transactions A, 17A, 1986, 1011-1026.
8. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT Warszawa 1978.
9. Lee K. i in.: Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, rheo-casting, and casting-forging processes. Engineering Fracture Mechanics 75, 2008, 4200-4216.

10. Li X.- M. i in.: Effect of compositional variations on characteristics of coarse intermetallic particles in overaged 7000 aluminium alloys. *Materials Science and Technology*, Nov. 2001, 17, 11, 1324-1328.
11. Miller WS i in.: Recent development in aluminum alloys for the automotive industry. *Material Science and Engineering A* 2000, 280 (1), s. 37-49.
12. Moszczyński P., Trzaska M.: Odporność korozyjna anodowo utlenianego stopu aluminium AW-7075. *Ochrona przed korozją* 4-5, 2010.
13. Payne J. i in.: Observations of fatigue crack initiation in 7075-T651. *International Journal of Fatigue* 32, 2010, 247-255.
14. Salamci E. i in.: Investigation of secondary phase particles in spray deposited 7000 series aluminium alloys. *Materials Science and Technology*, Dec. 2002, 18, 12, 1445-1452.
15. Shinde S. R. i in.: Quantitative analysis of fretting fatigue degradation in 7075-T6 aluminium alloy. *Tribology International* 40, 2007, 542-547.
16. Srivatsan T. S.: The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminum alloy 7055. *Materials Science and Engineering A* 281, 2000, 292-304.
17. Turkmen H. S. i in.: On the mechanical behaviour of AA 7075-T6 during cyclic loading. *International Journal of fatigue* 23, 2003, 267-281.
18. Woei-Shyan L., Wu-Chung S, Chi-Feng L, Chin-Jyi W.: The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy. *Journal of Material Processing Technology* 2000, 100, s.116-122.
19. Williams JC, Starke EA: Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia* 2003, 51 (19), 5775-5799.
20. Xue Y. i in.: Microstructure-based multistage fatigue modeling of aluminum alloy 7075-T651. *Engineering Fracture Mechanics* 74, 2007, 2810-2823.
21. Zhang J.Z.: A shear band decohesion model for small fatigue crack growth in an ultra-fine grain aluminum alloy. *Engineering Fracture Mechanics* 65, 2000, 665-681.
22. Zhao T. i in.: A study of fatigue growth of 7075-T651 aluminium alloy. *Inter. J. of Fatigue* 30, 2008, 1169-1180.
23. Zhao T. i in.: Fatigue of 7075-T651 aluminium alloy. *International Journal of Fatigue*, 30, 2008, 834-849.

MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTIC OF FATIGUE FRACTURE MECHANISM IN AW 7075-T651 ALLOY

Summary. AW 7075 material is commonly used in particularly reliable constructions in aircraft and automotive industry. In these conditions the danger of fatigue fracture is very frequent so knowledge of such fracture mechanics is still deeply important. In this article the review of works dedicated to fatigue issues and the results of authors researches of fatigue fracture of AW 7075 alloy were presented. In particular the mechanism of coalescence of microvoids arised around intermetallic phase particles were described and ductile character of fatigue fracture was pointed.

Key words: aluminium alloy, anisotropy, fatigue fracture mechanics