

Grzegorz Chruścielski*

WPLYW ANIZOTROPII PO WALCOWANIU NA ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE MATERIAŁU AW 7075-T651

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych i odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia w kierunku zgodnym i poprzecznym do kierunku walcowania dla stopu aluminium AW 7075 T651. Stwierdzono, że odporność na pękanie przy płaszczyźnie pęknięcia X-Y (prostopadłej do kierunku walcowania) jest wyższa o około 20% niż przy płaszczyźnie pęknięcia Y-X (zgodnej z kierunkiem walcowania). Przedstawiono wyniki badań elektronmikroskopowych powierzchni pęknięcia w obu przypadkach. Na podstawie fraktografii wykazano, że pękanie w kierunku X-Y, przebiegające w poprzek granic, propaguje przy udziale licznych uskoków i jest mniej stabilne, co przyczynia się do większej odporności na pękanie. Potwierdzono również mechanizm pęknięcia poprzez łączenie się mikropor, powstałych w strukturze materiału w miejscach wydzielenia faz międzymetalicznych.

Słowa kluczowe: stop aluminium, odporność na pękanie, anizotropia, mechanizm pęknięcia

Wprowadzenie

Stop AW 7075, którego polskim odpowiednikiem jest PA9, posiada szczególnie korzystne z punktu widzenia zastosowań konstrukcyjnych własności fizyczne i mechaniczne: małą gęstość, wysoką wytrzymałość, udarność i plastyczność, bardzo dużą odporność na zmęczenie i zadowalająca na korozję, łatwą obrabialność i przetwarzalność. Z tego względu znajdują one szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym [6, 12, 17].

Tak szeroki zakres zastosowań stopu AW 7075, w tym również na konstrukcje szczególnie odpowiedzialne, stwarza konieczność wszechstronnego poznania jego zachowania się przy obciążeniach cyklicznie zmiennych. Z punktu widzenia konstruktora istotna jest tu przede wszystkim wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na pękanie w płaskim stanie odkształcenia (K_{IC}) oraz prędkość wzrostu pęknięcia zmęczeniowego (da/dN).

Odporność na pękanie materiału 7075 i innych stopów aluminium jest od wielu lat przedmiotem wielu prac, wśród których znaleźć można zarówno wyniki badań doświadczalnych [1-3, 7-11, 13, 15, 16, 18], jak i modele zależności tej odporności od mikrostruktury i własności mechanicznych [4, 14]. Jednak z uwagi na znaczenie odporności na pękanie przy projektowaniu i doborze materiału, wciąż istnieje potrzeba budowania coraz szerszej bazy danych z wynikami parametru K_{IC} dla materiałów w różnym stanie obróbki cieplnej i plastycznej. Dlatego też, w niniejszej pracy przedstawione zostaną wyniki wieloseryjnych

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

badan odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia dla płaszczyzny pękania zgodnej i prostopadłej do kierunku walcowania (odpowiednio płaszczyzny Y-X i X-Y, określane według PN-EN ISO 12737) dla materiału AW 7075 w postaci T651. Zaprezentowane zostaną również wyniki badań przełomów otrzymanych po przeprowadzonych próbach, wyjaśniające różnice w odporności na pękanie w tych dwóch różnych kierunkach.

1. Własności mechaniczne i odporność na pękanie

Przedmiotem badań odporności na pękanie był materiał AW 7075 w stanie T651 (materiał przesypany, wyprężony w celu usunięcia naprężeń cieplnych i sztucznie starzony) w postaci walcowanej płyty o grubości 25,00 mm. Skład chemiczny materiału podano w tab. 1.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału AW 7075 (wg. Atestu Alcza 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

Własności wytrzymałościowe AW 7075 określono dla dwóch serii: seria KW obejmowała 6 próbek rozciąganych w kierunku walcowania, a seria KP – 6 próbek rozciąganych w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania. Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 810 z zastosowaniem ekstensometrów zaciskowych ręcznie nakładanych typu clip-on o rozdzielczości 0,1 μm , klasie dokładności 0,5 i zakresie pomiarowym 30 mm. Własności mechaniczne dla serii KW i KP przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Własności mechaniczne materiału AW 7050

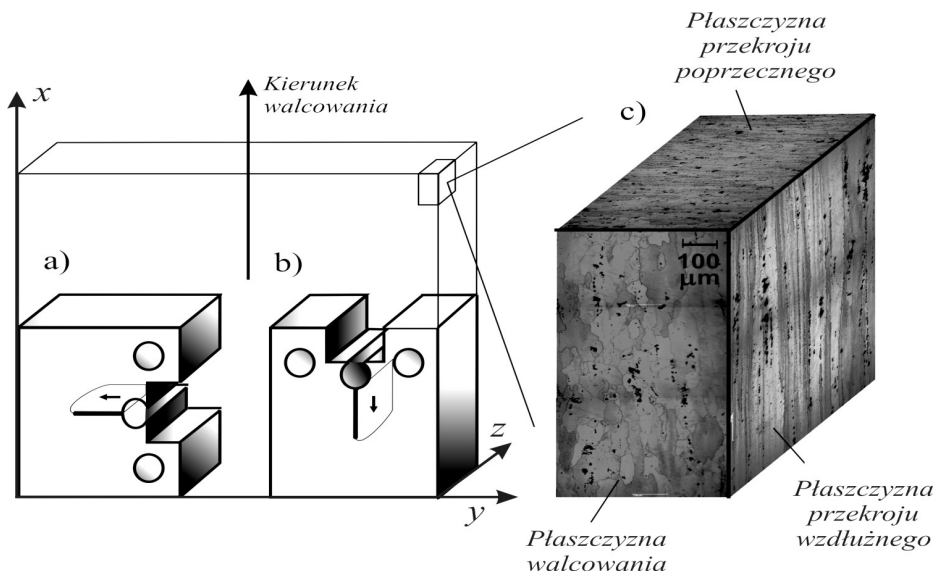
Wyznaczana wielkość	Seria próbek	
	KW	KP
$R_{p0,2}$ [MPa]	544	505
R_m [MPa]	600	570
A_5 [%]	10	9
Z [%]	12	9
E [MPa]	68382	71891

Korzystając z otrzymanych wyników badań mechanicznych dobrano grubość próbki do badań odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia. Według danych literaturowych [5] grubość ta zależy od wartości stosunku granicy plastyczności do modułu Younga, który w tym przypadku równa się:

$$(R_{p0,2}/E) \times 10^3 = 7,514 \quad (1)$$

Dla tej wartości $R_{p0,2}/E$ grubość próbek ustalono jako 25 mm.

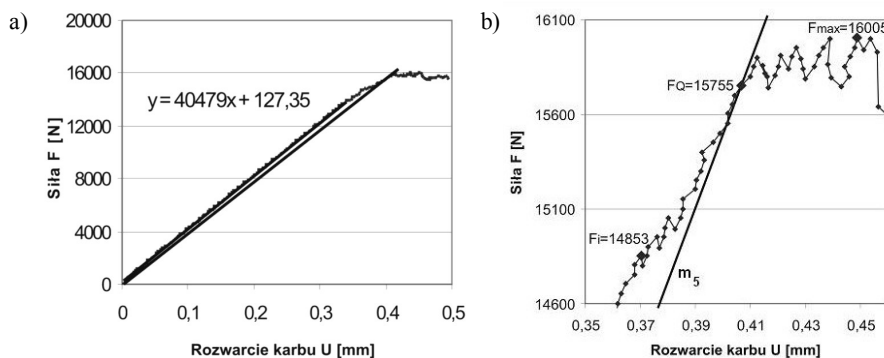
Badania odporności na pękanie prowadzono dla dwóch serii próbek zwartych, różniących się orientacją próbek w stosunku do kierunku walcowania: seria pierwsza obejmowała próbki o orientacji X-Y, a seria druga próbki o orientacji Y-X (rys. 1). Każda seria liczyła 12 próbek. Próbkę posiadały wstępnie wykonany karb w postaci szczeliny o szerokości 0,2 mm.



Rys. 1. Orientacja stosowanych próbek w stosunku do kierunku walcowania: a) próbka o orientacji X-Y, b) próbka o orientacji Y-X, c) struktury na powierzchniach próbek. Trawienie Mi2Al. Materiał AW 7075

Odporność na pękanie w płaskim stanie odkształcenia wyznaczano zgodnie z warunkami normy PN-EN ISO 12737. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 858 Mini Bonix. Przy wykonywaniu szczeliny zmęczeniowej stosowano siłę maksymalną 8 kN, współczynnik asymetrii cyklu $R=0,1$ i częstotliwość 8 Hz. Wartość maksymalna współczynnika intensywności naprężeń przy zmęczeniu nie przekraczała 80% wartości K_Q określonej w następnej fazie badań. W cyklu rozrywania próbek stosowano prędkość przyrostu siły równą 400 N/s. Rejestracja rozwarcia karbu (U) w funkcji siły (F) odbywała się za pomocą karty pomiarowej z dokładnością 50N. Typowy wykres zależności $F=f(U)$ wraz z funkcją opisującą zakres prostoliniowy wykresu oraz powiększenie fragmentu tego wykresu, na którym prosta pomocnicza m_5 przecina wykres siły, przedstawiono na rys. 2.

Wyniki badań odporności na pękanie materiału AW 7075 dla serii próbek o orientacji X-Y przedstawiono w tabeli 3, a dla serii próbek o orientacji Y-X – w tabeli 4. W tabelach, oprócz wartości wyznaczonego parametru K_{IC} , podano wartości siły F_p , przy której zarejestrowano pierwszy spadek wartości siły. Siła F_i ma istotne znaczenie z fizycznego punktu widzenia, bowiem świadczy o inicjacji procesu pękania próbki [11]. Oznaczenia i wartości siły F_p , siły F_Q (odpowiadającej krytycznemu współczynnikowi intensywności naprężeń), oraz siły maksymalnej F_{max} zaznaczone zostały na wykresie na rysunku 2b.



Rys. 2. a) Wykres zmienności rozwarcia karbu w funkcji siły $F=f(U)$ otrzymany przy wyznaczaniu odporności na pękanie K_{IC} dla próbki X1; b) powiększony fragment wykresu z prostą pomocniczą m_5 oraz zaznaczonymi wartościami sił F_i (siła inicjacji pęknięcia), F_Q (siła odpowiadająca odporności na pękanie K_{IC}) i F_{max} (siła maksymalna podczas próby)

Tabela 3. Wyniki badań odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia materiału AW 7075 dla serii X-Y

Oznaczenie próbki	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Grubość próbki B [mm]	24,92	24,93	24,95	24,92	24,95	24,95	24,81	24,95	24,89	24,95	24,95	24,95
Siła F_i [N]	14853	15656	16501	16553	16303	15954	15256	15401	15205	15606	16651	16553
Wartość średnia F_i [N]	15874											
Siła F_Q [N]	15755	16150	17550	17560	16711	16252	16105	15803	15713	16150	17200	17051
Siła F_{max} [N]	16004	16651	18402	18553	17151	16953	16603	16151	15751	17001	17312	17550
Odporność na pękanie K_{IC} [MPa/m ^{1/2}]	31,04	30,69	31,38	31,16	31,02	31,81	30,91	30,09	31,47	30,56	30,75	31,34
Wartość średnia $K_{IC} \pm$ niepewność pomiaru dla $k=2$ i współcz. zmienności V	31,00 \pm 0,27 [MPa/m ^{1/2}], V = 1,49%											

2. Badania mikrostruktury przelomów

Wyniki badań odporności na pękanie wykazały wyraźną różnicę dla próbek o orientacjach X-Y i Y-X. Jest oczywiste, że różnica ta spowodowana jest silną anizotropią własności mechanicznych, powstałą w materiale po walcowaniu [11, 18]. Jak można zobaczyć na rys. 2, w próbkach o orientacji X-Y pękanie następuje w płaszczyźnie przekroju poprzecznego, natomiast przy orientacji Y-X – w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego. W celu określenia mechanizmu pęknięcia materiału po każdej z tych płaszczyzn przeprowadzono badania struktury powierzchni przelomów dla obu rodzajów próbek.

Rysunek 3 przedstawia struktury powierzchni pęknięcia w próbce o orientacji Y-X (lewa kolumna) i o orientacji XY (prawa kolumna). Na rys. 3a i 3b przedstawiono zdjęcia tej struktury obserwowane pod mikroskopem optycznym. Jak widać, obie płaszczyzny posiadają

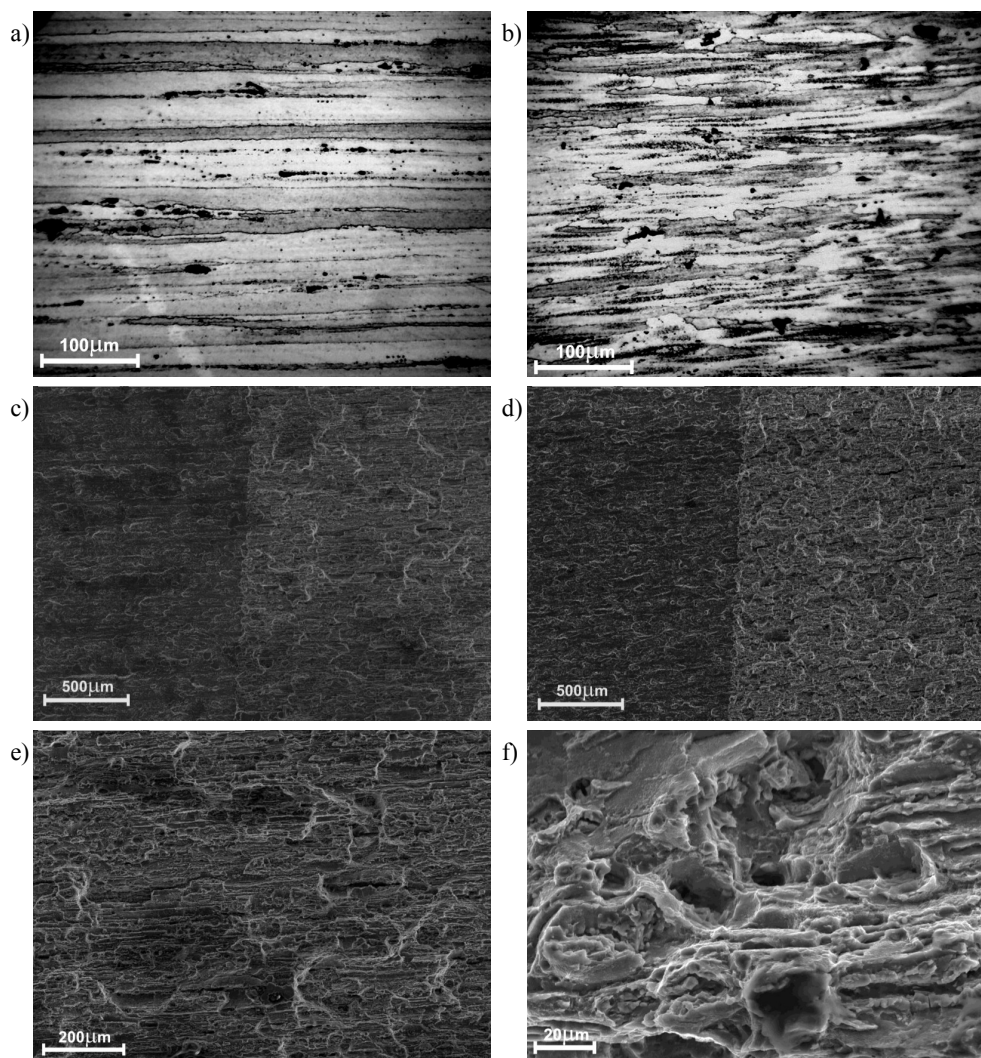
Tabela 4. Wyniki badań odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia materiału AW 7075 dla serii Y-X

Oznaczenie próbki	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Grubość próbki B [mm]	24,75	24,82	24,81	24,82	24,91	24,97	24,90	24,87	24,92	24,94	24,95	24,55
Siła F_i [N]	13250	14603	12302	13804	11953	13152	12852	13502	13801	13751	13050	13501
Wartość średnia F_i [N]	13293											
Siła F_o [N]	13351	14952	12556	14251	12651	13851	13152	14400	14200	13901	14156	14102
Siła F_{max} [N]	13701	14952	12700	15007	12654	13903	13604	14800	14851	14101	14453	14304
Odporność na pękanie K_{IC} [MPa/m ^{1/2}]	25,56	26,36	25,71	26,11	25,78	26,30	25,09	26,57	25,50	26,08	26,30	25,92
Wartość średnia $K_{IC} \pm$ niepewność pomiaru dla $k=2$ i współcz. zmienności V	25,95 \pm 0,25 [MPa/m ^{1/2}], V= 1,65%											

silną teksturę po odkształceniu plastycznym, przy czym ziarna na płaszczyźnie przekroju wzdłużnego są silnie wydłużone i ułożone pasmowo (rys. 3a), a ziarna na płaszczyźnie przekroju poprzecznego są krótsze i mają bardziej nieregularne kształty (rys. 3b). Grubości pasm ziaren w obu przypadkach wahają się od 5 do 30 μm , przy czym można przyjąć, że grubość średnia to 10 μm . Na obu powierzchniach widoczne są liczne wydzielienia faz międzymetalicznych – stwierdzono, że są to przede wszystkim związki bogate w miedź, typu $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$ oraz $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. Średni rozmiar wydzielań wynosi ok. 15 μm , a największe z nich osiągają długość 30 μm . Co istotne, na powierzchni przekroju wzdłużnego wydzielienia te rozłożone są przede wszystkim wzdłuż granic ziaren, podczas gdy na powierzchni przekroju poprzecznego ich powiązanie z granicami ziaren jest o wiele mniejsze.

Rysunek 3 c-d przedstawia fraktografie z mikroskopu skaningowego (SEM), wykonane przy niewielkim powiększeniu. Fotografie te obejmują obszary przejścia ze strefy pęknięcia zmęczeniowego do strefy pęknięcia doraźnego, a więc strefy, w których przy wzrastającej sile rozrywającej, po przekroczeniu krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń w wierzchołku szczeliny zmęczeniowej doszło do inicjacji pęknięcia (momentowi temu odpowiada siła F_i). Jak widać, granica między oboma strefami pęknięcia jest przy tym powiększeniu w obu przypadkach bardzo wyraźna, a porównując powierzchnie pęknięcia dla obu próbek dostrzec można pewne różnice. Przy pęknięciu po powierzchni Y-X powierzchnia pęknięcia jest bardziej jednorodna, co wskazuje, że pęknięcie ma charakter stabilny. Większa część przelomu ma tu charakter włóknisty, co jeszcze lepiej jest widoczne przy większym powiększeniu (fot. 3e). Pasma włókien mają tu grubość od 5 do 20 μm , co wskazuje, że są to granice wydłużonych po walcowaniu pasmowych ziaren.

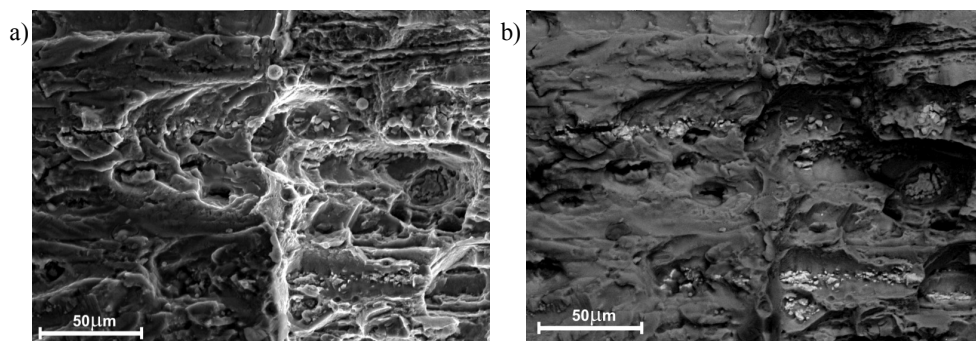
W drugiej próbce, w której płaszczyzna pęknięcia miała kierunek X-Y, włókniste układy ziaren są bardziej nieregularne i pokryte gęstą siatką uskoków (fot. 3d). Pęknięcie tutaj nie ma charakteru stabilnego, ponieważ front pęknięcia przebiega w poprzek kierunku orientacji ziaren (por. układ ziaren na powierzchniach próbek na rys. 1). Przy większym powiększeniu (rys. 3f) widoczne są liczne bruzdy i wgłębienia, co wskazuje na ciągliwy charakter pęknięcia, ale dostrzec też można obszary przelomu międzykrystalicznego (lewy górny róg na fot. 3f).



Rys. 3. Powierzchnie pęknięcia materiału AW 7075 dla próbki o orientacji Y-X (kolumna lewa) i próbki o orientacji X-Y (kolumna prawa): a, b) zdjęcia struktury z mikroskopu optycznego, trawione Mi2Al; c – f) przełomy próbek po wykonaniu prób wyznaczania odporności na pęknięcie. Front pęknięcia postępował od strony lewej do prawej. Fotografije wykonane na mikroskopie skaningowym (SEM)

Na rys. 4 przedstawiono fotografie SEM tego samego obszaru z granicy między pęknięciem zmęczeniowym a doraźnym, przy czym fotografia 4b wykonana została w technice BSE, która ujawnia obecność na dnie bruzd i wgłębień pozostałości wydzieleni faz międzymetalicznych. Jest to dowód na to, że te niekoherentne wydzielenia pełnią w materiale rolę mikropor, które uaktywniały mechanizm pęknięcia polegający na zrywaniu „mostków” mię-

dzy wydzieleniami i łączeniu się mikropor. Mechanizm ten jest często spotykany w stopach aluminium serii 7000 [1, 4, 8, 9, 13].



Rys.4. Powierzchnie pęknięcia materiału dla próbki Y-X przy wierzchołku pęknięcia zmęczeniowego (rys. a) i obraz BSE tego samego miejsca z widocznymi pozostałościami po kryształach wydzieleni faz międzymetalicznych na dnie mikropor (rys. b). Fotografie SEM

3. Wnioski

Badania wytrzymałościowe płyty walcowanej z materiału AW 7075 wykazały, że materiał ten posiada o ok. 5-7% większą wartość granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w kierunku walcowania (KW) niż w kierunku poprzecznym (KP). Własności plastyczne okazały się lepsze w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania. Różnica w wartości modułu Younga jest nieznaczna (ok. 2%) i mieści się w granicach błędu statystycznego.

Badania odporności na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia wykazują, że wartość K_{IC} wynosi 25,95 MPaxm^{0,5} dla próbek o orientacji Y-X i 31,00 MPaxm^{0,5} dla próbek o orientacji X-Y; różnica wynosi więc niemal 20%. Wartości te są nieco wyższe niż dane podawane przez Alcoa, zgodnie z którymi K_{IC} wynosi odpowiednio 28,6 i 24,2 MPaxm^{0,5} [19]. Ponadto stwierdzić można, że istnieje korelacja między wartością K_{IC} a własnościami wytrzymałościowymi materiału w określonym kierunku: próbki rozciągane w kierunku walcowania (KW) mają większą wartość R_m i $R_{p0,2}$, podobnie jak wartość K_{IC} jest większa dla próbek, w których siła rozciągająca jest zgodna z kierunkiem walcowania (są to próbki serii XY – por. rys. 1). Zależność taka znalazła też potwierdzenie w pracy [7].

Badania struktury przelomów wykazały, że przy pęknięciu po powierzchni Y-X (zgodnej z kierunkiem walcowania) powierzchnia pęknięcia jest bardziej jednorodna, z włóknami tworzonymi przez granice ziaren. Pęknięcie przebiega tu bardziej stabilnie, co daje efekt w postaci mniejszej odporności na pęknięcie K_{IC} dla tego kierunku odkształcenia. Przy pęknięciu w płaszczyźnie X-Y, gdzie front pęknięcia przebiega w poprzek kierunku walcowania, układy włókniste ziaren są pokryte gęstą siatką uskoków, co wskazuje na hamowanie pęknięcia i tłumaczy większą odporność na pęknięcie K_{IC} . Ponadto, w obu przypadkach stwierdzono występowanie mechanizmu pęknięcia materiału na drodze łączenia się mikropor, powstałych w miejscach wydzielenia się faz międzymetalicznych.

Literatura

1. Cvijović Z. i in.: Microstructural dependence of fracture toughness in high-strength 7000 forging alloys. *Eng. Fracture Mech.*, 75, 2008, 2115-2129.
2. De Jong H.F.: Thickness direction inhomogeneity of mechanical properties and fracture toughness as observed in aluminium 7075-T651 Plate Material. *Engineering Fracture Mechanics*, 13, 1980, 175-192.
3. Deshpande N.U. i in.: **Relationship Between Fracture Toughness, Fracture Path, and Microstructure of 7050 Aluminum Alloy: Part I. Quantitative Characterization.** *Metallurgical and Materials Transactions*, Apr 1998, 29A, 4, 1191-1201.
4. Dumont D. i in.: A model of predicting fracture mode and toughness in 7000 series aluminium alloys. *Acta Mater.* 52, 2004, 2529-2540.
5. Gołaski L.: *Elementy doświadczalnej mechaniki pękania. Podręcznik akademicki.* Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.
6. Heinz A. i in.: Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. *Material Science and Engineering A* 2000, 280 (1), 102-107.
7. Kawabata T. i in.: On the relationship between ductility and fracture toughness in an Al-6.0% Zn-2.5% Mg alloy. *Acta Metallurgica* 29 (1), 1981, 229-239.
8. Lai M.O. i in.: Fracture toughness of aluminium alloy 7075-T6 in the as-cast condition. *Materials Science and Engineering*, 74 (2), 1985, 133-138.
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 Jin-feng i in.: Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18, 2008, 755-762.
11. Majerus J.N. i in.: Anisotropy in Fracture Behavior of Thin Al 7075-T651 Plates. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 56 No. 3, 1997, 437-442.
12. Miller W.S. i in.: Recent development in aluminum alloys for the automotive industry. *Mater Sci Eng A*, 2000, 280 (1), 37-49.
13. Mishnaevsky L.L.Jr i in.: In situ observation of damage evolution and fracture in Al-Si7Mg0.3 cast alloys. *Engineering Fracture Mechanics* 63, 1999, 395-411.
14. Roven H.J.: A model for fracture toughness predictions in aluminium alloys exhibiting the slip band decohesion mechanism. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 26 (9), 1992, 1383-1388.
15. Sen R. i in.: Plane strain fracture toughness of scandium doped Al-6Mg alloy. *Journal of Alloys Compounds* 457, 2008, 135-143.
16. Somekawa H. i in.: Fracture toughness in Mg-Al-Zn alloy processed by equal-channel-angular extrusion. *Scripta Materialia* 54, 2006, 633-638.
17. Williams J.C., Starke E.A.: Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia* 2003, 51(19), 5775-5799.
18. Zinkham R.E.: Anisotropy and thickness effect in fracture of 7075-T6 and – T651 aluminium alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 1968, 1, 275-289.

19. Alloy 7075 Plate and Sheet. All Around Consistent Performance. Alcoa Mill Product. http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf.

EFFECT OF ROLLING ANISOTROPY ON FRACTURE TOUGHNESS OF AW 7075-T651 ALLOY

Summary. The work presents results of researches of mechanical properties and fracture toughness along and across rolling direction for aluminium alloy AW 7075 T651. It is confirmed that in case of fracture on direction XY (perpendicular to rolling direction) fracture toughness is 20% higher than in case of fracture on direction Y-X (situated along rolling direction). The results of SEM and TEM researches of fracture surface are also presented. Based on fractography it is showed that fracture in X-Y direction that runs across grain boundaries has many leaps and is unstable what causes increasing of fracture toughness of material. Mechanism of microvoids coalescence close to particles of the second phases was also observed.

Key words: aluminium alloy, fracture toughness, anisotropy, fracture mechanics