

Tadeusz Szymczak¹⁾

Zbigniew L. Kowalewski^{1), 2)}

¹⁾ Instytut Transportu Samochodowego

^{1), 2)} Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

BADANIE ODPORNOŚCI KOMPOZYTÓW METALOWO-CERAMICZNYCH NA KRUCHE PĘKANIE PRZY UŻYCIU PRÓBEK KOMPAKTOWYCH (CT)

W artykule omówiono wybrane zagadnienia z zakresu mechaniki pękania dotyczące wyznaczania współczynnika intensywności naprężenia i jego krytycznej wartości (K_{IC}). Zaprezentowano projekt zminiaturyzowanej próbki kompaktowej (CT) o wymiarach czterokrotnie mniejszych niż jej wersja standardowa. Zamieszczono wyniki z badań odporności na kruche pęknięcie materiałów kompozytowych wytworzonych na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200 z różną zawartością Al_2O_3 . Analiza rezultatów przeprowadzonych testów wykazała brak wpływu udziału Al_2O_3 i jego postaci, tj. włókien bądź cząstek, na zmianę krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia.

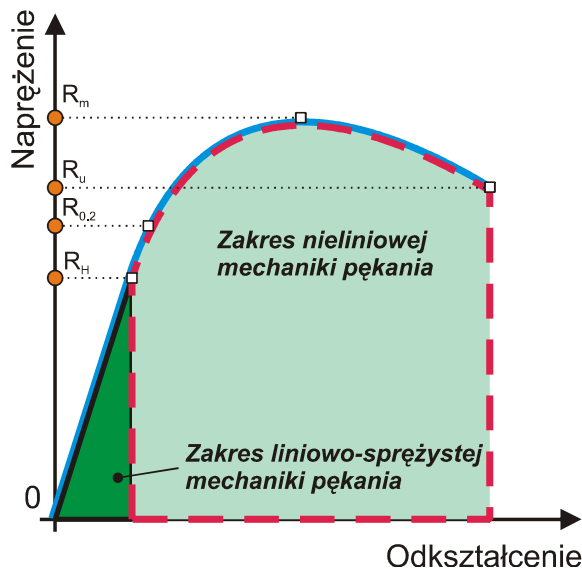
FRACTURE TOUGHNESS INVESTIGATIONS OF METAL-CERAMIC COMPOSITES USING COMPACT SPECIMENS (CT)

Selected aspects of fracture mechanics focused on determination of the stress intensity factor and its critical values denoted as K_{IC} are presented in the paper. A design of compact tension (CT) specimen four times smaller than typical one is shown. The results from testing of composites made on the basis of 44200 cast aluminium alloy with different content of Al_2O_3 are presented. An analysis of experimental data showed a negligible influence of Al_2O_3 contribution and its form, i.e. fibres and particles, on critical values of the stress intensity factor.

1. Wprowadzenie

Kwalifikowanie materiałów do różnych zastosowań inżynierskich odbywa się na podstawie wyników z badań mechanicznych, w których wyznacza się między innymi takie parametry jak: moduł Younga, granicę proporcjonalności, granicę plastyczności lub wytrzymałość doraźną. Nie są to jednak jedyne właściwości mechaniczne wykorzystywane w praktyce inżynierskiej. Oprócz nich uwzględnia się także parametr zdefiniowany w ramach liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (rys. 1), a mianowicie współczynnik intensywności naprężenia (WIN), oznaczany jako K_I . Stosuje się go do określania odporności materiału na kruche pęknięcie. Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia, oznaczana jako K_{IC} , osiągana jest w chwili gwałtownego rozwoju pęknięcia. Parametr ten wyznacza się w testach na próbkach zawierających karby i propagujące się z ich końców pęknięcia zmęczeniowe.

Badania z obszaru mechaniki pęknięcia są szczególnie istotne dla materiałów kruchych, w przypadku których rozwój pęknięcia charakteryzuje się brakiem odkształcenia plastycznego. Zasadniczo, badanie odporności materiału na kruche pęknięcie polega na wytworzeniu szczeliny zmęczeniowej o określonej długości i przeprowadzeniu rozrywania w warunkach monotonicznie narastającej siły. Proces pęknięcia materiału opisywany jest trzema mechanizmami: zarodkowaniem (inicjacja) mikropęknięć, ich akumulacją i łączeniem się, oraz powstaniem głównego pęknięcia, które po osiągnięciu wielkości krytycznej rozwija się z dużą prędkością, prowadząc do rozdzielenia elementu [1].



Rys. 1. Ilustracja zakresów mechaniki pęknięcia [1] (R_H – granica proporcjonalności, $R_{0,2}$ – umowna granica plastyczności, R_m – wytrzymałość doraźna, R_u – naprężenie rozrywające)

Fig. 1. Illustration of fracture mechanics areas [1] (R_H – proportional limit, $R_{0,2}$ – yield point, R_m – ultimate tensile strength, R_u – rupture stress)

2. Wytyczne przeprowadzania testu odporności materiału na kruche pękanie

2.1. Określanie szerokości próbki oraz warunki wyznaczania współczynnika K_{IC}

Podstawowym warunkiem zapewniającym wyznaczenie współczynnika K_{IC} jest badanie materiału w płaskim stanie odkształcenia (PSO) [1-5]. Zakłada się, że taki stan odkształcenia wystąpi w próbce o grubości B , dla której będzie spełniony następujący warunek:

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{R_{0.2}} \right)^2 \quad (1)$$

Jednak wyznaczenie wartości B przy wykorzystaniu nierówności (1) jest możliwe dopiero po zakończeniu próby. Dlatego też, wstępnego doboru grubości próbki dokonuje się na podstawie ilorazu umownej granicy plastyczności ($R_{0.2}$) i modułu Younga (E), jak zostało to pokazane w tabeli 1. Zamieszczone w niej zestawienie wskazuje na stosunkowo duży zakres zmian wymiaru B , tj. od 6.5mm do 75mm, zależny w sposób nieliniowy od ilorazu $R_{0.2}/E$ (rys. 2). Oprócz warunku dla PSO, drugim istotnym kryterium zapewniającym prawidłowe przeprowadzenie próby jest graniczna wartość przyrostu pęknięcia zmęczeniowego (Δa_i), która nie powinna przekraczać wartości promienia strefy odkształcenia plastycznego mierzonych od wierzchołka karbu, tj.:

$$\Delta a_i \geq 0.05 \left(\frac{K_{IC}}{R_{0.2}} \right)^2 \quad (2)$$

W trakcie trwania próby rejestruje się wykres zmiany siły w funkcji przemieszczenia (rozwarcia krawędzi karbu), rys. 3, na podstawie którego określa się siłę P_Q . Wyznaczenie jej wartości przeprowadza się stosując obrót prostej stycznej do odcinka reprezentującego zakres stosowności prawa Hooke'a, zgodnie z ruchem wskazówek zegara, o wartość tangensa kąta jej nachylenia pomniejszony o 5%.

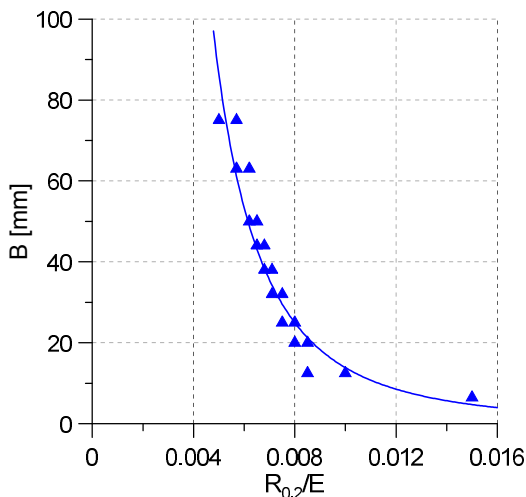
Tabela 1

Grubość (B) próbki w zależności od $R_{0.2}/E$ [2]

Table 1

Specimen thickness (B) depending on $R_{0.2}/E$ [2]

Zakres $R_{0.2}/E$	Minimalna grubość B próbki	
	[mm]	[cal]
0.0050÷0.0057	75	3
0.0057÷0.0062	63	2.5
0.0062÷0.0065	50	2
0.0065÷0.0068	44	1.75
0.0068÷0.0071	38	1.5
0.0071÷0.0075	32	1.25
0.0075÷0.0080	25	1
0.0080÷0.0085	20	0.75
0.0085÷0.0100	12.5	0.5
0.0100 i więcej	6.5	0.25



Rys. 2. Zmiana grubości (B) próbki w zależności od $R_{0.2}/E$
 Fig. 2. Variation of specimen thickness (B) versus $R_{0.2}/E$

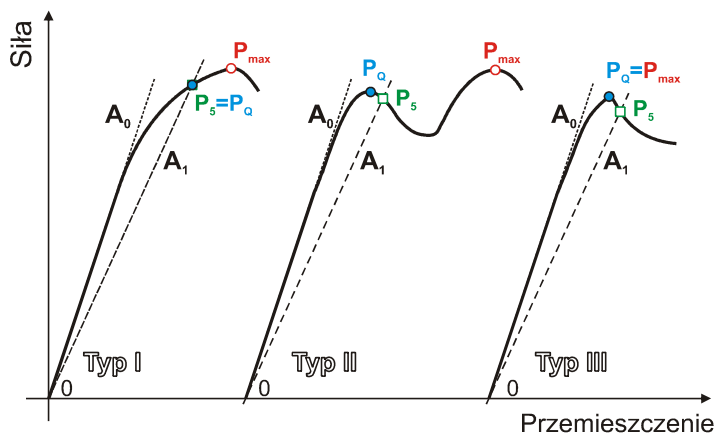
Określenie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia możliwe jest po uprzednim obliczeniu współczynnika K_Q i sprawdzeniu poniższego warunku:

$$\frac{P_{\max}}{P_Q} \leq 1.10 \quad (3)$$

gdzie P_{\max} oznacza maksymalną siłę w całym zakresie, aż do rozerwania próbki. Z kolei P_Q reprezentuje największą wartość obciążenia na odcinku OP_5 .

$$K_Q = (P_Q / BW^{0.5}) \cdot f(a/W) \quad (4)$$

$$f(a/W) = \frac{(2+a/W)(0.886+4.64a/W-13.32a^2/W^2+14.72a^3/W^3-5.6a^4/W^4)}{(1-a/W)^{3/2}} \quad (5)$$



Rys. 3. Schematy wykresów siła-przemieszczenie do wyznaczenia krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia [1, 2]: typ I ($P_5 = P_Q < P_{\max}$), typ II ($P_5 < P_Q < P_{\max}$), typ III ($P_{\max} = P_Q > P_5$)

Fig. 3. Schemes of force-displacement diagrams for determination of critical value of the stress intensity factor [1, 2]: type I ($P_5 = P_Q < P_{\max}$), type II ($P_5 < P_Q < P_{\max}$), type III ($P_{\max} = P_Q > P_5$)

Jeżeli warunek (2) jest spełniony, to przy wykorzystaniu wzoru (4), można obliczyć współczynnik K_Q , w którym funkcja $f(a/W)$ jest wielomianem czwartego stopnia (wzór 5). Przyjmuje on wartości podane w tab. 2, które zmieniają się nieliniowo w zależności od stosunku a/W , jak zostało to pokazane na rys. 4. W przypadku nie spełnienia warunku (3), możliwe jest jedynie wyznaczenie współczynnika wytrzymałości próbki.

Tabela 2

Wartości $f(a/w)$ dla wybranego stosunku a/W [2]

Table 2

Values of $f(a/w)$ for selected proportion of a/W [2]

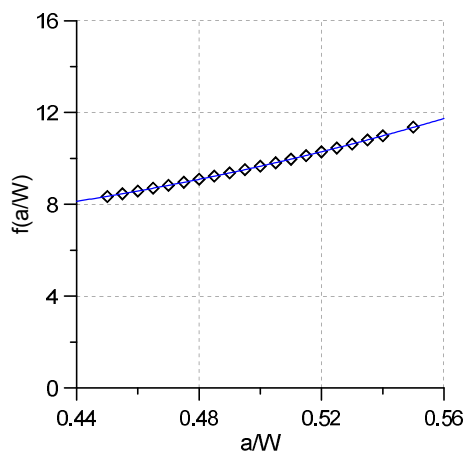
Lp	a/W	$f(a/W)$	a/W	$f(a/W)$
1	0.450	8.340	0.500	9.659
2	0.455	8.458	0.505	9.810
3	0.460	8.579	0.510	9.964
4	0.465	8.704	0.515	10.123
5	0.470	8.830	0.520	10.286
6	0.475	8.960	0.525	10.453
7	0.480	9.093	0.530	10.625
8	0.485	9.230	0.535	10.802
9	0.490	9.369	0.540	10.984
10	0.495	9.512	0.550	11.364

Obliczona wartość K_Q jest tożsama ze współczynnikiem K_{IC} , gdy spełnione są jednocześnie następujące zależności [2]:

$$2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{0.2}} \right) < B \quad (6)$$

$$2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{0.2}} \right) < a \quad (7)$$

W przeciwnym przypadku test nie może być uznany jako ważny w celu wyznaczenia współczynnika K_{IC} .



Rys. 4. Zmiany $f(a/W)$ dla zakresu wartości proporcji a/W z przedziału $\langle 0.44; 0.56 \rangle$
 Fig. 4. Variations of $f(a/W)$ for the range of a/W magnitude within $\langle 0.44; 0.56 \rangle$

2.2. Techniki pomiaru przyrostu szczeliny

Do powszechnie stosowanych metod pomiaru przyrostu szczeliny zmęczeniowej [5-9] należą:

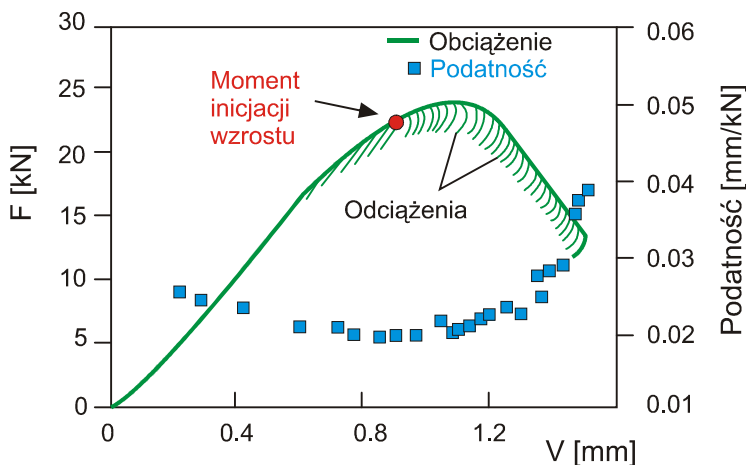
- metoda spadku potencjału,
- metoda zmian podatności próbki (rys. 5).

Metoda spadku potencjału polega na zasileniu próbki prądem o dużej gęstości oraz pomiarze obniżenia energii potencjalnej ładunków elektrycznych - odniesionej do wartości ładunku w polu elektrycznym, na skutek zmian (zmniejszenia) przekroju czynnego próbki powodowanych przyrostem długości szczeliny. Wskutek tego zwiększa się opór elektryczny i przy stałym prądzie wzrasta spadek potencjału między elektrodami. W metodzie tej zakłada się liniową zależność między obniżeniem potencjału a przyrostem długości szczeliny

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_K \Delta \varphi_i}{\Delta \varphi_K} \quad (8)$$

gdzie: Δa_K - całkowity przyrost długości szczeliny, $\Delta \varphi_K$ - całkowita zmiana potencjału, $\Delta \varphi_i$ - bieżąca zmiana potencjału.

Metodę zmiany podatności można stosować, gdy dysponujemy maszyną wytrzymałościową sterowaną za pomocą komputera. Niezbędne wzory do obliczania długości szczeliny w zależności od zmiany podatności próbki podają normy PN-H-04336 [10] oraz ASTM E 813-88 [11]. Przykład wyników pochodzących z badań z wykorzystaniem tej metody zamieszczono na rys. 5. Wykres przedstawia wzrost podatności próbki od chwili inicjacji szczeliny zmęczeniowej w celowo naciętym karbie, po czym staje się on coraz bardziej gwałtowny od momentu osiągnięcia maksimum siły. W dalszym ciągu rozwoju szczeliny zmęczeniowej, pomimo obniżania siły, obserwuje się intensywny przyrost podatności.



Rys. 5. Zmiany podatności próbki w zależności od wzrostu szczeliny w trakcie jej kolejnych cykli obciążenia i odciążenia, gdzie: F – siła, V – rozwarście karbu [8]

Fig. 5. Variations of specimen compliance depending on a crack growth at subsequent loading and unloading cycles, where: F – force, V – crack extension [8]

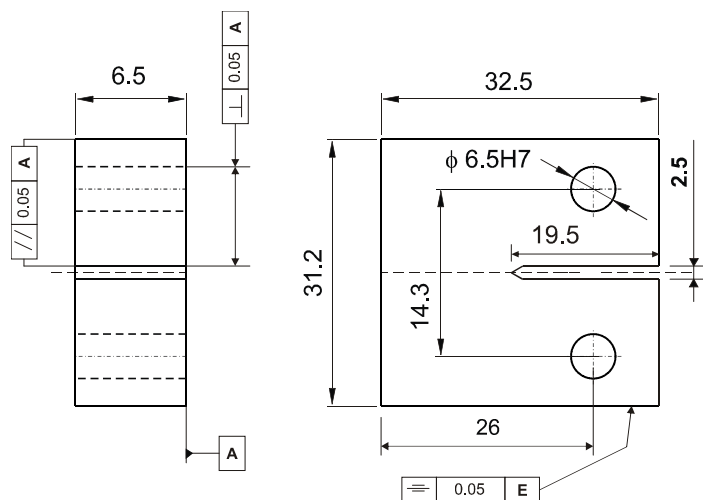
3. Szczegóły techniki badawczej i wyniki testów

Program badawczy do określania odporności materiału na kruche pękanie zawierał dwa etapy: wstępny i zasadniczy. Celem takiego postępowania było sprawdzenie, czy zaprojektowana próbka kompaktowa (CT – „compact tension” specimen), o wymiarach znacznie mniejszych niż jej odpowiednik powszechnie stosowany, może być wykorzystywana do wyznaczania krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia. Realizacja drugiego etapu programu badawczego, polegającego na określeniu współczynnika K_{IC} dla wytworzonych materiałów kompozytowych, zależała od pozytywnego wyniku pierwszej jego części.

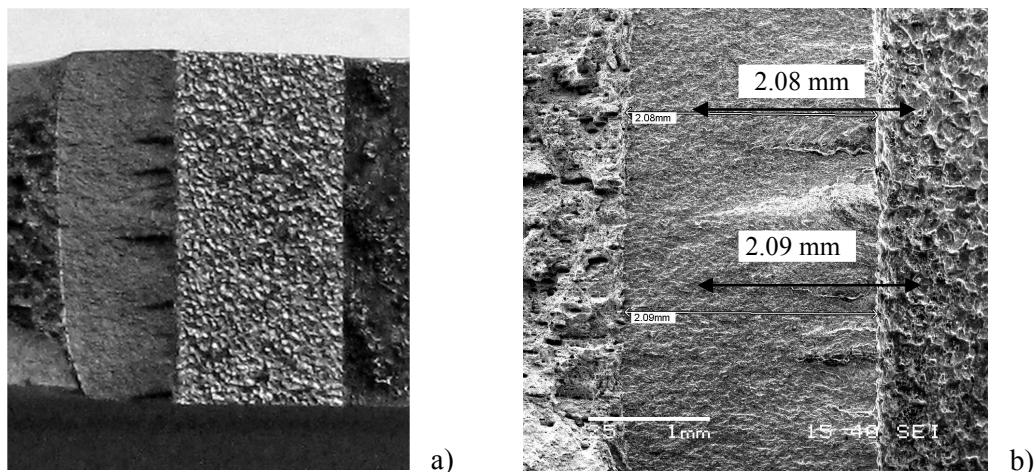
3.1. Próbka i wyniki badań wstępnych

Z uwagi na małe gabaryty dostarczonego przez producenta półwyrobu, próbki do badań K_{IC} zaprojektowano dla czterokrotnie mniejszych wymiarów (rys. 6), w stosunku do próbki standardowej, przy zachowaniu wymagań normy amerykańskiej ASTM [2] oraz krajowej PN-EN [4].

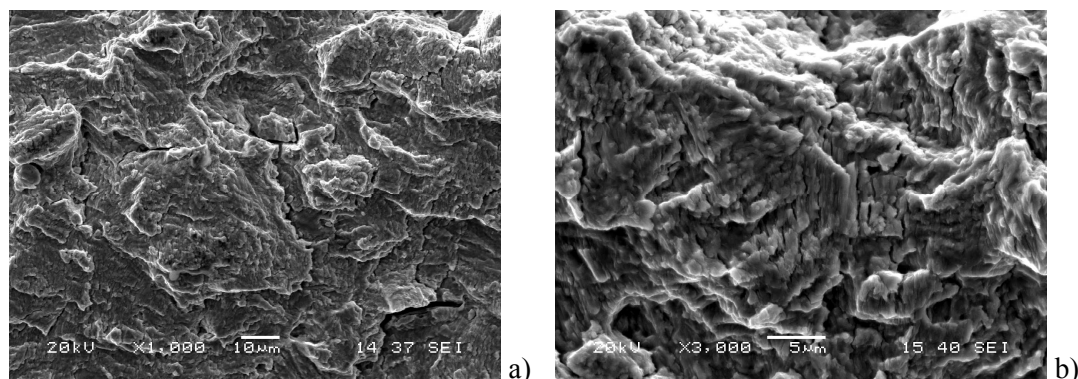
Możliwość określania współczynnika K_{IC} z użyciem nowej próbki została zweryfikowana na podstawie badań stali 40H. W przypadku tego materiału wytworzono szczelinę zmęczeniową (rys. 7a) oraz określono jej długość (rys. 7b), przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Obszar występowania szczeliny miał cechy przelomu mieszanego (rys. 7, rys. 8) z widocznymi prążkami zmęczeniowymi (rys. 8b). Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia dla stali 40H wyniosła $38.8 \text{ MPa m}^{1/2}$ (według danych literaturowych przyjmuje się wartość $40 \text{ MPa m}^{1/2}$).



Rys. 6. Próbka kompaktowa
Fig. 6. Compact specimen



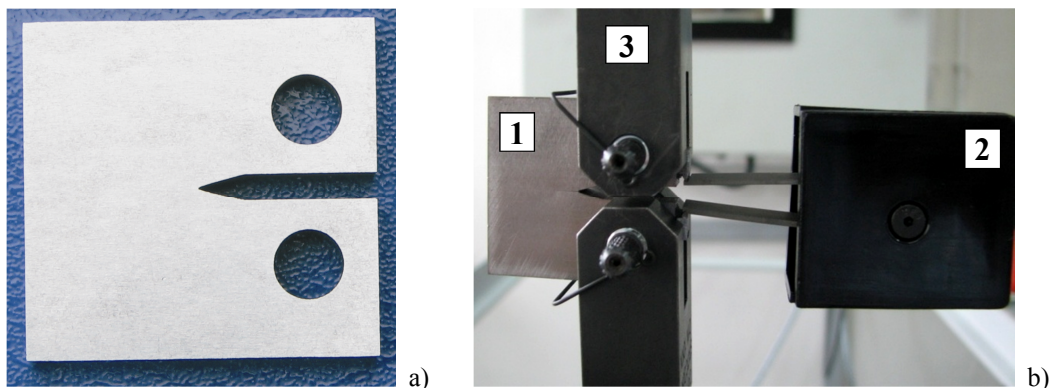
Rys. 7. Przełom stali 40H po badaniu odporności na kruche pękanie: (a) strefa zmęczeniowa w skali makro, (b) strefa zmęczeniowa w skali mikro (powiększenie 25×)
Fig. 7. Fracture surface of the 40H steel after fracture toughness testing: (a) fatigue zone in macro scale, (b) fatigue zone in micro scale (magnification 25×)



Rys. 8. Mikroskopowy obraz zmęczeniowego przełomu stali 40H po badaniu odporności na kruche pękanie: (a) powiększenie 1000×, (b) powiększenie 3000×
Fig. 8. Microscope image of fatigue fracture surface of the 40H steel after fracture toughness testing: (a) magnification 1000×, (b) magnification 3000×

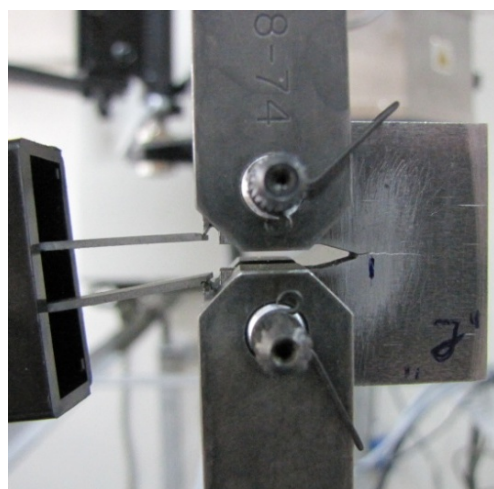
3.2. Wyniki badań kompozytu o osnowie ze stopu aluminium 44200

Badaniom poddano materiał kompozytowy wytworzony na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200 [12] (AK11 wg normy PN-76/H-88027) z różnym procentowym udziałem zbrojenia ceramicznego o nazwie Saffil (Al_2O_3) w postaci włókien (10%, 15%, 20%) oraz cząstek (20%) - charakteryzującego się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, ok. 1800MPa, oraz modułem Younga rzędu 300GPa, [13, 14]. W porównaniu do parametrów mechanicznych stali lub stopów specjalnego przeznaczenia, właściwości włókien klasyfikują je w grupie materiałów wysokowytrzymałych. Dodatkową ich zaletą jest duża odporność na działanie temperatury. Daje to możliwość szerszego wykorzystywania włókien w wielu aplikacjach inżynierskich z temperaturą pracy sięgającą nawet do 1750°C, [15].

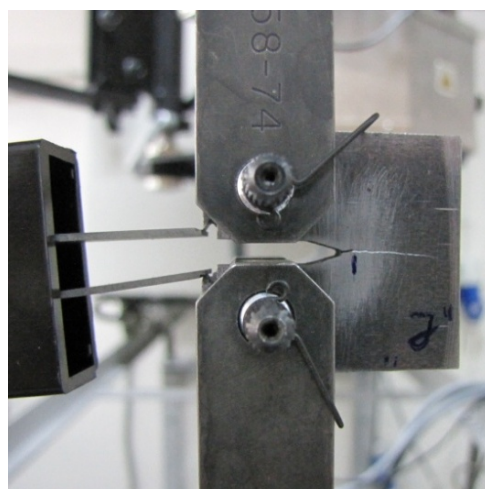


Rys. 9. Widok próbki: (a) przed badaniem; (b) zamocowanej w układzie obciążającym maszyny wytrzymałościowej: 1 - próbka, 2 - ekstensometr, 3 - zestaw uchwytów

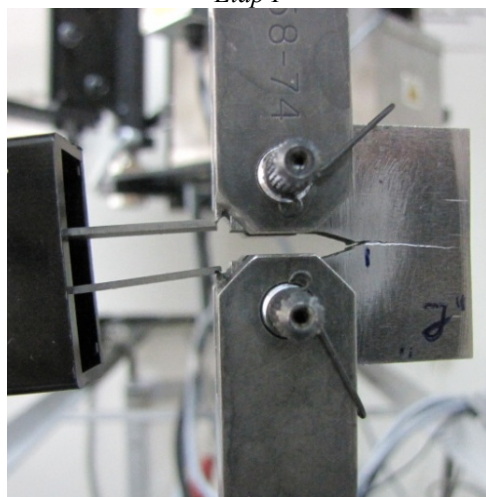
Fig. 9. View of specimen: (a) before testing; (b) mounted in loading system of testing machine: 1 - specimen, 2 - extensometer, 3 - gripps



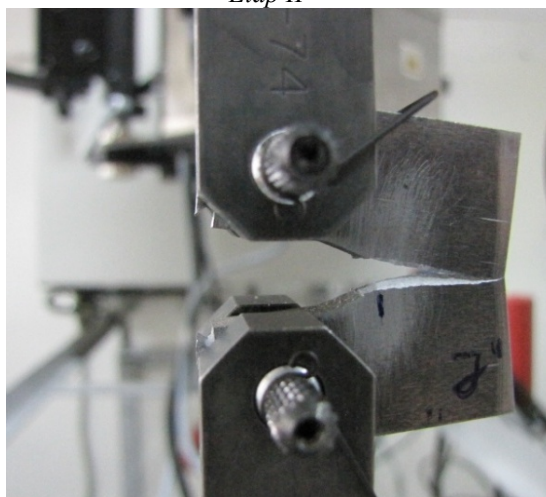
Etap I



Etap II



Etap III

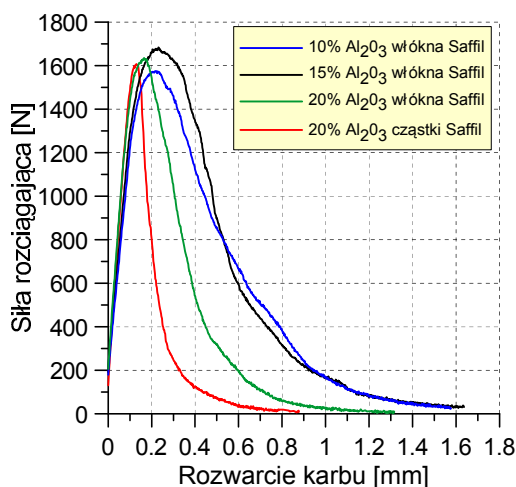


Etap IV

Rys. 10. Etapy pęknięcia próbki z kompozytu 44200+20% włókien Saffil

Fig. 10. Rupture stages of specimen made of 44200+20% Saffil fibres composite

Wytypowane do badań kompozyty w porównaniu do powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych okazały się stosunkowo trudne w obróbce skrawaniem. Dlatego wykonanie próbki (rys. 6, rys. 9a) w zalecanej klasie dokładności wymagało użycia znacznie więcej etapów w procesie technologicznym jej wykonania niż stosuje się w przypadku materiałów klasycznych. Przygotowane próbki mocowano w układzie obciążającym maszyny wytrzymałościowej stosując specjalne uchwyty, a pomiar rozwarcia końców karbu realizowano wykorzystując odpowiedni ekstensometr (rys. 9b).

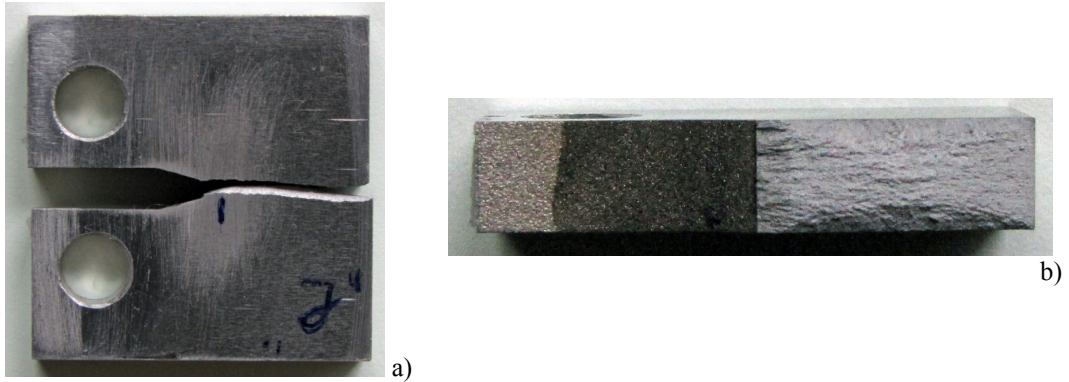


Rys. 11. Wykres siła rozciągająca-rozwarcie karbu dla kompozytu na bazie stopu 44200 z różną zawartością włókien Saffil

Fig. 11. Diagram of tensile force-crack extension for the composite made on the basis of 44200 aluminium alloy with different content of Saffil fibres

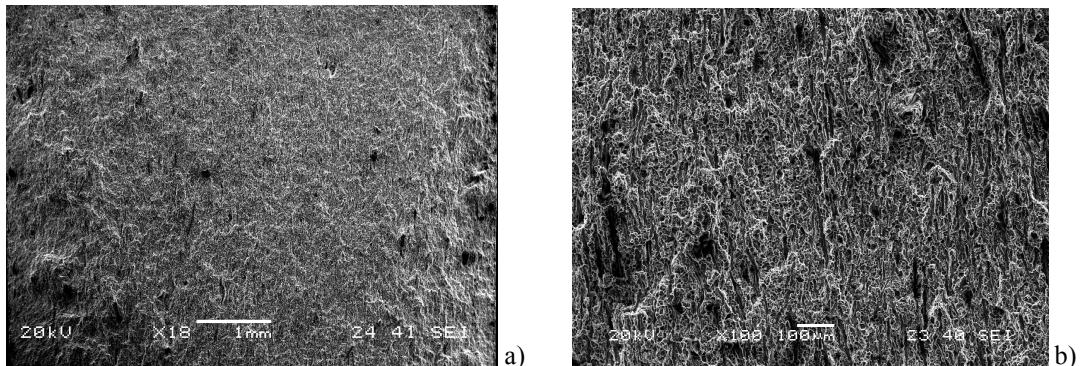
W przypadku wszystkich przebadanych kompozytów najpierw wytworzono szczelinę zmęczeniową, a następnie poddano ją działaniu monotonicznie narastającej siły. Uzyskane przebiegi siła rozciągająca-rozwarcie karbu (rys. 11) wykazały podobieństwo do I typu niszczenia materiału (rys. 3).

Propagacja szczeliny następowała prostopadle do przeciwległego boku próbki (rys. 10, rys. 12). Strefa ze szczeliną nie wykazywała tak typowych cech przełomu zmęczeniowego (rys. 12b, rys. 13), jak obserwowane w przypadku badanej stali (rys. 7, rys. 8). Powierzchnie rozwoju szczeliny w kompozytach miały cechy przełomu kruchego (rys. 13a, rys. 14a), a ponadto, w przypadku materiału z 20% zawartością Al₂O₃ w postaci włókien widoczne były ich odspojenia od materiału bazowego (rys. 14b). Materiały kompozytowe wykazały się 3-krotnie niższą, w porównaniu do stali 40H, wartością krytycznego współczynnika intensywności naprężenia (tab. 3), co świadczy o ich niewielkiej odporności na kruche pękanie.



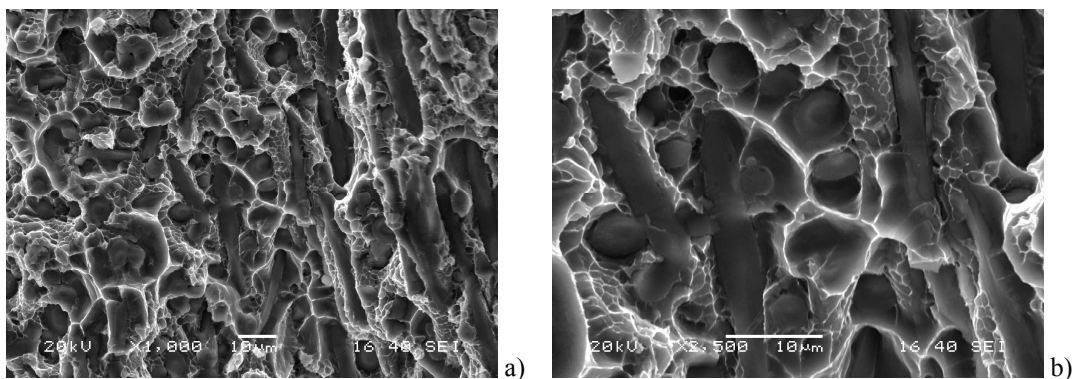
Rys. 12. Próbkę z kompozytu 44200+20% włókien Saffil po teście na K_{IC} : (a) próbkę, (b) powierzchnię przelomu

Fig. 12. Specimen made of the 44200+20% Saffil fibres composite after tests for K_{IC} : (a) specimen, (b) fracture surface



Rys. 13. Obraz mikroskopowy strefy zmęczeniowej kompozytu 44200+20% włókien Saffil: (a) powiększenie 18 \times , (b) powiększenie 100 \times

Fig. 13. Microscope images of fatigue fracture surface of the 44200+20% Saffil fibres composite: (a) magnification 18 \times , (b) magnification 100 \times



Rys. 14. Mikroskopowy obraz strefy zmęczeniowej kompozytu 44200+20% włókien Saffil: (a) powiększenie 1000 \times , (b) powiększenie 2500 \times

Fig. 14. Microscopic image of fatigue fracture surface of the 44200+20% Saffil fibres composite: (a) magnification 1000 \times , (b) magnification 2500 \times

Wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężenia K_{IC} kompozytów*Critical values of the stress intensity factor K_{IC} of the composites*

Lp	Rodzaj materiału	K_{IC} [MPa m ^{1/2}]
1.	44200+10% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	12.2
2.	44200+15% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	12.1
3.	44200+20% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	11.9
4.	44200+20% Al ₂ O ₃ cząstki Saffil	11.8

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności materiałów kompozytowych wytworzonych na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200 z różną zawartością Al₂O₃ w postaci włókien i cząstek. Ich analiza pozwoliła na sformułowanie następujących uwag:

- a) próbka o wymiarze czterokrotnie mniejszym niż standardowa może być z powodzeniem wykorzystywana do wyznaczania krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia K_{IC} ,
- b) strefa, w której wytworzono szczelinę w materiałach kompozytowych, nie miała cech charakterystycznych dla typowych przelomów zmęczeniowych,
- c) nie zaobserwowano wpływu wzrostu udziału włókien Saffil (od 10% do 20%) na zmianę współczynnika K_{IC} ,
- d) odporność przebadanych materiałów kompozytowych na kruche pękanie okazała się trzykrotnie mniejsza w porównaniu do stali 40H.

Podziękowanie. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy zostały uzyskane w ramach projektu KomCerMet (nr umowy POIG.01.03.01-00-013/08) finansowanego przez Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka 2007-2013.

LITERATURA:

- [1] L. Dobrzański, R. Nowosielski, Metody badań metali i stopów, tom I, „Badania własności mechanicznych i fizycznych”, Politechnika Śląska, Gliwice 1986.
- [2] Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Metals-Mechanical Testing: Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography, Vol. 03.01, 509-539, 1993.
- [3] BS 186:1991, Method for determination of threshold stress intensity factors and fatigue crack growth rates in metallic materials, 1991.
- [4] PN-EN ISO 12737: 2011, Metale – Określanie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia, 2011.
- [5] A. Neimitz, Mechanika pękania, PWN, 1998.

- [6] R.O. Ritchie, K.J. Bathe, On the calibration of the electrical potential technique for monitoring crack growth using finite element methods, *International Journal of Fatigue*, 15, 1, 1979.
- [7] A. Neimitz, A phenomenological model of the elastic-plastic CCT specimen containing a growing crack, *Engineering Fracture Mechanics*, 68, 1219-1239, 2001.
- [8] Z.L. Kowalewski, *Kierunki i perspektywy rozwoju badań wytrzymałościowych*, Warszawa, 2008.
- [9] Z.L. Kowalewski, J. Deputat, Identyfikacja wad materiałowych w ujęciu mechaniki pękania – podstawy teoretyczne, *Dozór Techniczny*, 5, 2005.
- [10] PN-H-04336:1998, *Metale, Metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczanie krytycznej wartości całki J, J_{IC}*.
- [11] ASTM E813-88, Standard Test Method for J_{IC}, a measure of fracture toughness, Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Philadelphia, 1988.
- [12] PN-EN 1676:2011, *Aluminium i stopy aluminium – Gąski stopowe do przetopienia – Specyfikacje*.
- [13] K. Naplocha, J.W. Kaczmar, Własności trybologiczne materiałów kompozytowych na osnowie stopu aluminium 7075 umacnianych włóknami Al₂O₃, *Archives of Foundry Engineering*, 11, Special Issue 2, 30/2, 153–158, 2011.
- [14] H. Dieringa, N. Hort, K.U. Kainer, Compression creep of short fibre reinforced magnesium alloy AE42, *Composites*, 3, 7, 275-278, 2003.
- [15] http://www.saffil.com/index/fibre_home/property_information.aspx.