

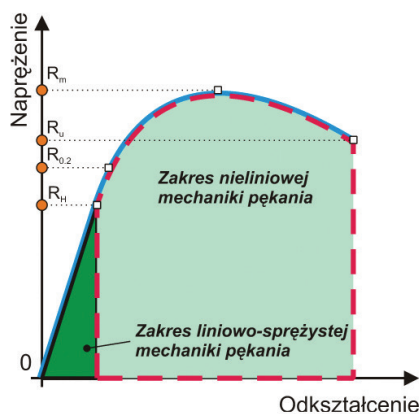
# Krucze pękanie kompozytów metalowo-ceramicznych

TADEUSZ SZYMCZAK, ZBIGNIEW L. KOWALEWSKI

W pracy 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 pękanie materiałów kompozytowych wytworzonych na bazie odlewniczego stopu aluminium 4420 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.

Kwalifikowanie materiałów do różnych zastosowań inżynierskich odbywa się na podstawie wyników z badań mechanicznych, w których wyznacza się między innymi takie parametry materiałowe 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 definiowany w ramach liniowo-sprężystej mechaniki pękania (rys. 1), a mianowicie współczynnik intensywności naprężenia (WIN), oznaczany jako  $K_I$ . Stosuje się go do określania odporności materiału na kruche pękanie. Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia, oznaczana jako  $K_{IC}$ , osiągnięta 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 pękania są szczególnie istotne dla materiałów kruchych, w przypadku których rozwój pęknięcia charakteryzuje się brakiem odkształcenia plastycznego. Zasadniczo, badanie odporności materiału na kruche pękanie polega na wytworzeniu szczeliny zmęczeniowej o określonej długości i przeprowadzeniu rozrywania w warunkach monotonicznie narastającej siły. Proces pękania materiału opisywany jest trzema mechanizmami: zarodkowaniem (inicjacją) 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 pękania [1] ( $R_H$  – granica proporcjonalności;  $R_{0,2}$  – umowna granica plastyczności;  $R_m$  – wytrzymałość doraźna;  $R_0$  – naprężenie rozrywające)

## Wytyczne przeprowadzania testu odporności materiału na kruche pękanie

### Określanie szerokości próbki oraz warunki wyznaczania współczynnika K<sub>IC</sub>

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 6,5 mm do 75 mm, 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 ( $\Delta a_i$ ), która nie powinna przekraczać wartości promienia strefy odkształcenia plastycznego mierzonego od wierzchołka karbu, tj.:

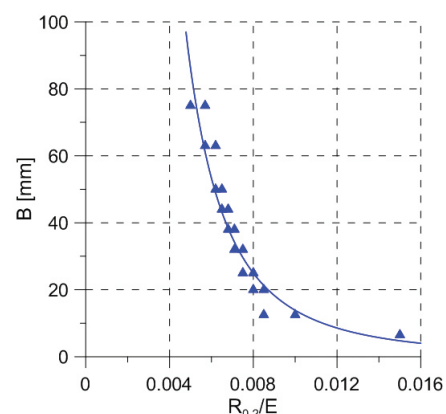
$$\Delta a_i \geq 0.05 \left( \frac{K_{IC}}{R_{0,2}} \right)^2 \quad (2)$$

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%.

Określenie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia możliwe jest po uprzednim obliczeniu współczynnika  $K_I$  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.



Rys. 2. Zmiana grubości ( $B$ ) próbki w zależności od  $R_{0,2}/E$

Tabela 1. Grubość (B) próbki w zależności od  $R_{0,2}/E$  [2]

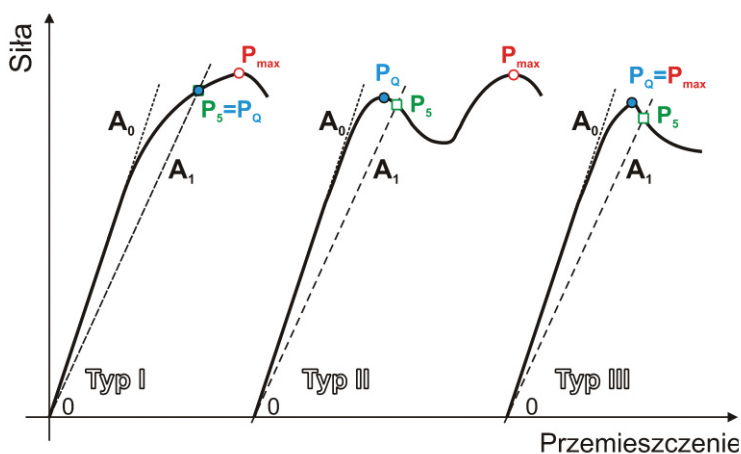
Zakres $R_{0,2}/E$	Minimalna grubość B próbki	
	[mm]	[cal]
0.0050-0.0057	75	3
0.0057-0.0062	63	2.5
0.0062-0.0065	50	2
0.0065-0.0068	44	1,75
0.0068-0.0071	38	1,5
0.0071-0.0075	32	1,25
0.0075-0.0080	25	1
0.0080-0.0085	20	0,75
0.0085-0.0100	12,5	0,5
0.0100 i więcej	6,5	0,25

Z kolei  $P_Q$  reprezentuje największą wartość obciążenia na odcinku  $OP_5$ .

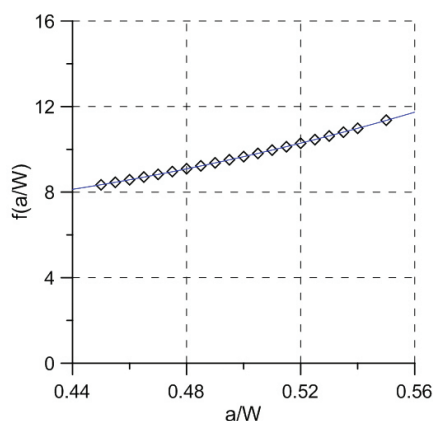
$$K_Q = (P_Q/BW^{0.5}) \cdot f(a/W) \quad (4)$$

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

Jeżeli warunek (2) jest spełniony, to przy wykorzystaniu wzoru (4), można obliczyć współczynnik  $K_Q$ , w którym funkcja  $f(a/W)$



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 ( $P_{max} = P_Q > P_5$ )



Rys. 4. Zmiany  $f(a/W)$  dla zakresu wartości proporcji  $a/W$  z przedziału (0.44;0.56)

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 niespełnienia warunku (3), możliwe jest jedynie wyznaczenie współczynnika wytrzymałości próbki.

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  $K_{IC}$ .

#### 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:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_K \Delta \phi_i}{\Delta \phi_K} \quad (8)$$

gdzie:  $\Delta a_K$  – całkowity przyrost długości szczeliny;  $\Delta \phi_K$  – całkowita zmiana potencjału;  $\Delta \phi_i$  – bieżąca zmiana potencjału.

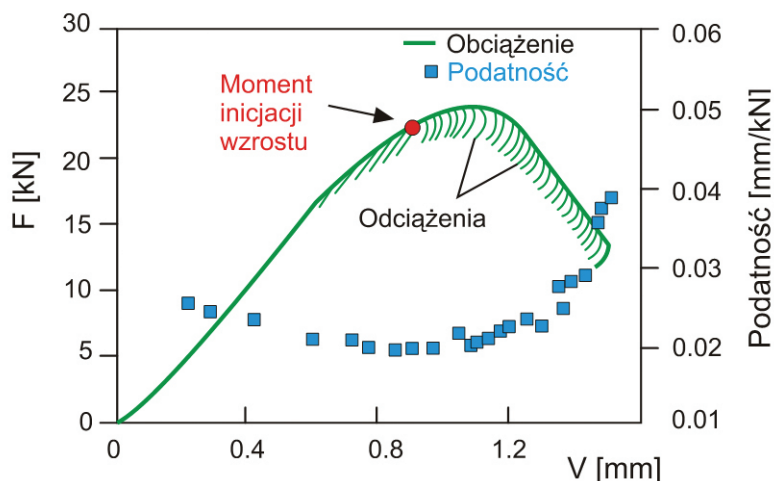
Metodę zmiany podatności można stosować, gdy dysponujemy maszyną wytrzymałościową sterowaną za pomocą komputera. Niezbędne wzory do obliczania długości szczeliny w zależności od zmiany podatności próbki podają normy PN-H-04336 [10] oraz ASTM E 813-88 [11]. Przykład wyników pochodzących z badań z wykorzystaniem 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.

#### Szczegóły techniki badawczej i wyniki testów

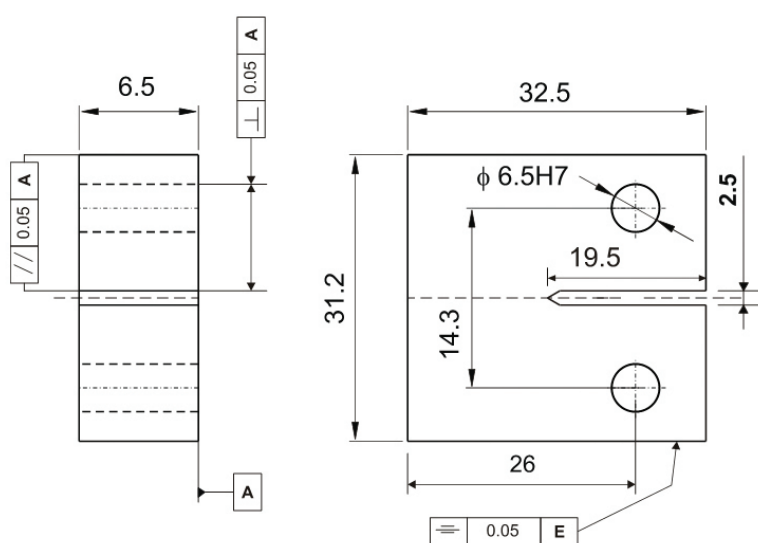
Program badawczy do określania odporności materiału na kruche pęknięcie zawierał dwa etapy: wstępny i zasadniczy. Celem takiego postępowania było sprawdzenie, czy zaprojektowana próbka kompaktowa (CT – „compact tension” specimen), o wymiarach znaczenie mniejszych niż jej odpowiednik powszechnie stosowany, może być wykorzystywana do wyznaczenia

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

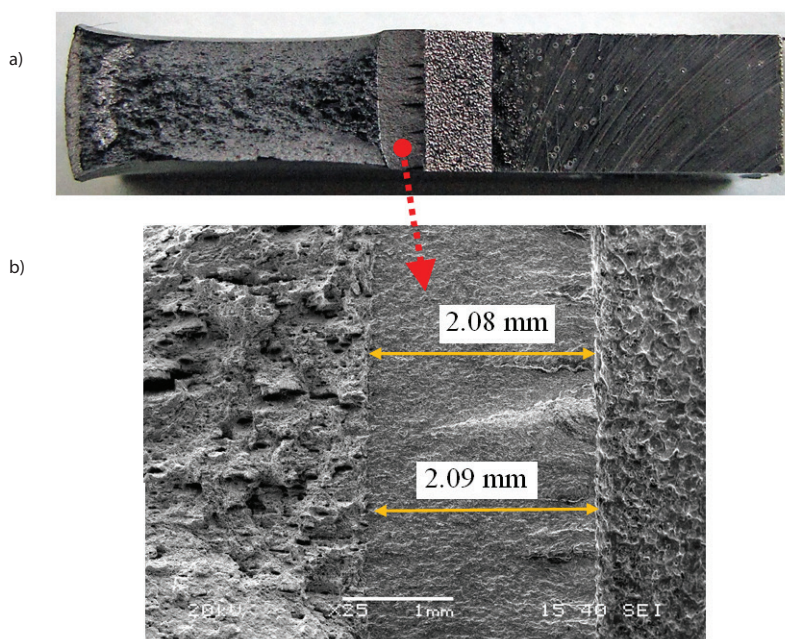
Lp.	$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
1	0.450	8.340	0.500	9.659
2	0.455	8.458	0.505	9.810
3	0.460	8.579	0.510	9.964
4	0.465	8.704	0.515	10.123
5	0.470	8.830	0.520	10.286
6	0.475	8.960	0.525	10.453
7	0.480	9.093	0.530	10.625
8	0.485	9.230	0.535	10.802
9	0.490	9.369	0.540	10.984
10	0.495	9.512	0.550	11.364



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



Rys. 6. Próbkę kompaktową



Rys. 7. Przełom stali 40H po badaniu odporności na kruche pęknięcie: (a) od lewej: strefa dołamania, (b) strefa zmęczeniowa wraz z wymiarami frontu pęknięcia w skali mikro (powiększenie 25 $\times$ )

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.

#### 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].

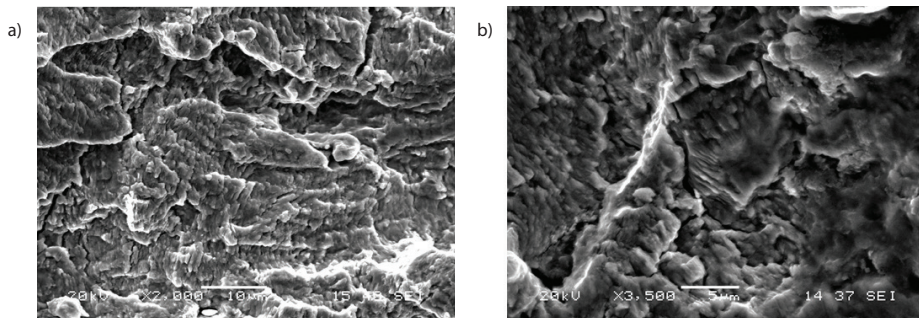
Możliwość określania współczynnika  $K_{IC}$  z użyciem nowej próbki została zweryfikowana na podstawie badań stali 40H. W przypadku tego materiału wytworzono szczelinę zmęczeniową (rys. 7a) oraz określono jej długość (rys. 7b), przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Obszar występowania szczeliny miał cechy przełomu mieszanego (rys. 7, rys. 8) z widocznymi prążkami zmęczeniowymi (rys. 8b). Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia dla stali 40H wyniosła 38,8 MPa  $m^{1/2}$  (według danych literaturowych przyjmuje się wartość 40 MPa  $m^{1/2}$ ).

#### Wyniki badań kompozytu o osnowie ze stopu aluminium 44200

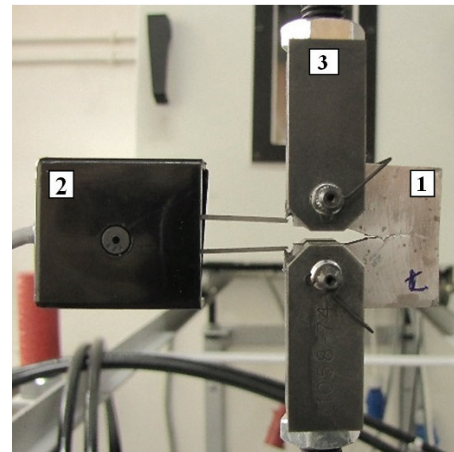
Badaniom poddano materiał kompozytowy wytworzony na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200 [12] (AK11 wg normy PN-76/H-88027) z różnym procentowym udziałem zbrojenia ceramicznego o nazwie Saffil ( $Al_2O_3$ ) w postaci włókien (10%, 15%, 20%) oraz cząstek (20%) – charakteryzującego się wysoką wytrzymałością 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].

Wytypowane do badań kompozyty w porównaniu do powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych okazały się stosunkowo trudne w obróbce skrawaniem. Dlatego wykonanie próbki (rys. 6) 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,

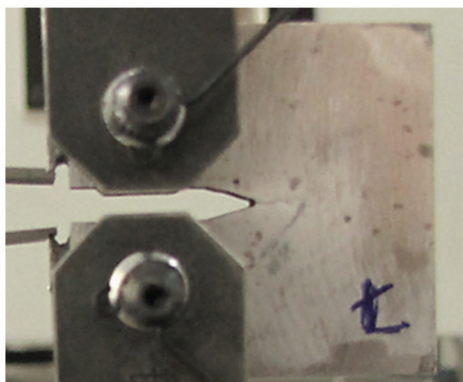




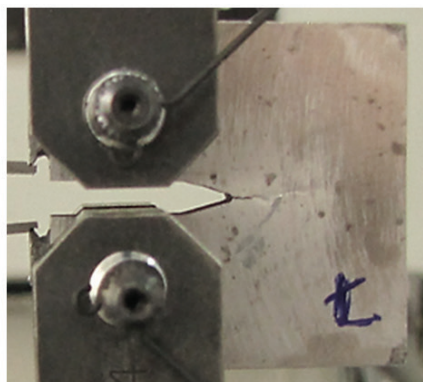
Rys. 8. Mikroskopowy obraz zmęczeniowego przełomu stali 40H po badaniu odporności na kruche pęknięcie: (a) powiększenie 2000 $\times$ , (b) powiększenie 3500 $\times$



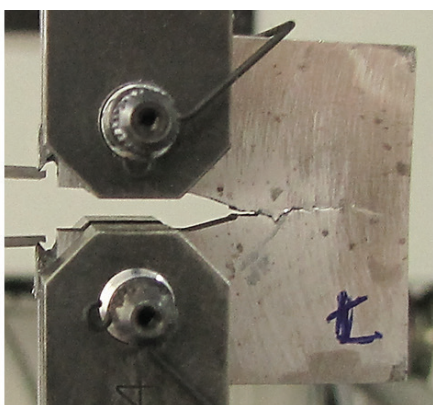
Rys. 9. Schemat układu mocującego próbkę w maszynie wytrzymałościowej: 1 – próbka kompaktowa, 2 - ekstensometr, 3 - zestaw uchwytów



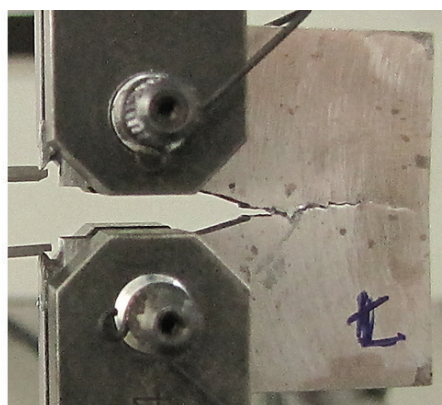
Etap I



Etap II



Etap III



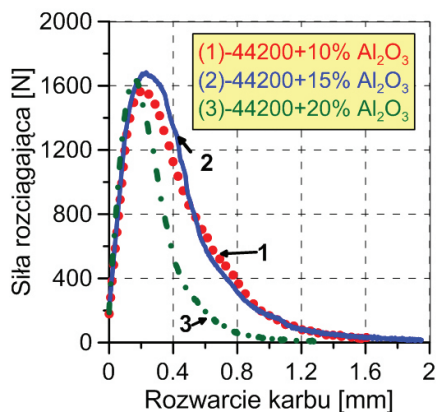
Etap IV

Rys. 10. Wybrane etapy pęknięcia próbki z kompozytu 44200+15% włókien Saffil

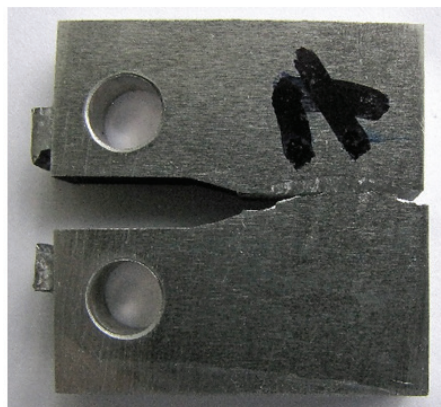
a pomiar rozwarcia końców karbu realizowano wykorzystując odpowiedni ekstensometr (rys. 9).

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 typu niszczenia materiału (rys. 3).

Propagacja szczeliny zmęczeniowej następowała prostopadle do przeciwnego boku próbki (rys. 10, 12). Strefa ze szczeliną nie wykazywała tak typowych cech przełomu zmęczeniowego (rys. 12b, 13), jak obserwowane w przypadku badanej stali (rys. 7, 8). Powierzchnie rozwoju szczeliny w kompozytach miały cechy przełomu kruchego (rys. 13a, 14a), a ponadto, w przypadku materiału z 20% zawartością  $Al_2O_3$  w postaci włókien widoczne były ich odspojenia od materiału bazowego (rys. 14b). Materiały kompozytowe wykazały 3-krotnie niższą, w porównaniu do stali

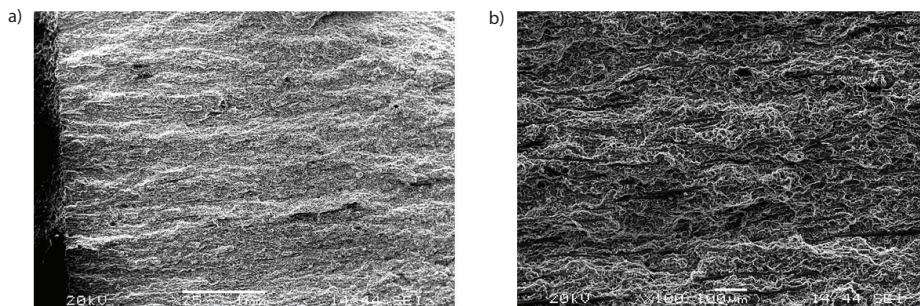


Rys. 11. Wykres siła rozciągająca-rozwarcie karbu dla kompozytu na bazie stopu 44200 z różną zawartością włókien Saffil

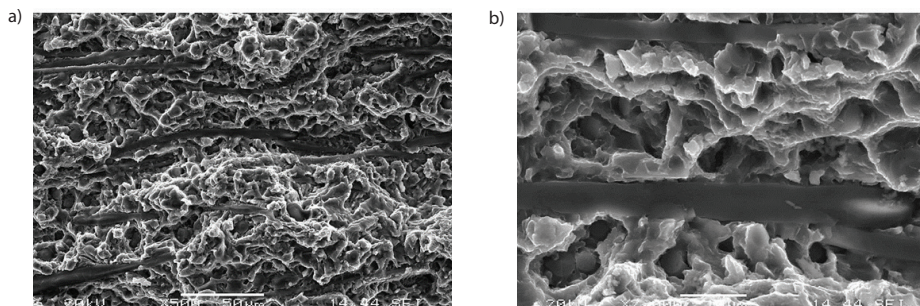


Rys. 12. Próbkę z kompozytu 44200+15% włókien Saffil po teście na  $K_{IC}$ : (a) próbka, (b) powierzchnia przełomu





Rys. 13. Obraz mikroskopowy strefy zmęczeniowej kompozytu 44200+15% włókien Saffil: (a) powiększenie 25 $\times$ , (b) powiększenie 100 $\times$



Rys. 14. Mikroskopowy obraz strefy zmęczeniowej kompozytu 44200+15% włókien Saffil: (a) powiększenie 500 $\times$ , (b) powiększenie 2000 $\times$

Tabela 3. Wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężenia  $K_{IC}$  kompozytów

Lp.	Rodzaj materiału	$K_{IC}$ [MPa m <sup>1/2</sup> ]
1	44200 + 10% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> włókna Saffil	12.2
2	44200 + 15% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> włókna Saffil	12.1
3	44200 + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> włókna Saffil	11.9
4	44200 + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cząstki Saffil	11.8
	<b>Wartość średnia</b>	<b>12</b>

40H, wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężenia (tab. 3), co świadczy o ich niewielkiej odporności na kruche pęknięcie.

okazała się trzykrotnie mniejsza w porównaniu do stali 40H.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności materiałów kompozytowych wytworzonych na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200 z różną zawartością Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przede wszystkim w postaci włókien. Ich analiza pozwoliła na sformułowanie następujących uwag:

- próbka o wymiarze czterokrotnie mniejszym niż standardowa może być z powodzeniem wykorzystywana do wyznaczania krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia  $K_{IC}$ ;
- strefa, w której wytworzono szczelinę w materiałach kompozytowych, nie miała cech charakterystycznych dla typowych przelomów zmęczeniowych;
- nie zaobserwowano wpływu wzrostu udziału włókien Saffil (od 10 do 20%) na zmianę współczynnika  $K_{IC}$ ;
- odporność przebadanych materiałów kompozytowych na kruche pęknięcie

## 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 pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia, 2011.
- [5] A. Neimitz, Mechanika pęknięcia, 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 pęknięcia – podstawy teoretyczne, Dozór Techniczny, 5, 2005.
- [10] PN-H-04336:1998, Metale, Metoda badania odporności na pęknięcie przez wyznaczanie krytycznej wartości całki J, JIC.
- [11] ASTM E813-88, Standard Test Method for JIC, 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 podstawie stopu aluminium 7075 umacnianych włóknami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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](http://www.saffil.com/index/fibre_home/property_information.aspx).

## 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.

Artykuł został przygotowany na podstawie publikacji pt.: „Badanie odporności kompozytów metalowo-ceramicznych na kruche pęknięcie przy użyciu próbek kompaktowych (ct)”, autorstwa: Tadeusz Szymczak, Zbigniew L. Kowalewski, Transport Samochodowy, 2, 2012, strony 119-131.

**dr inż. Tadeusz Szymczak**  
**Institut Transportu**  
**Samochodowego**  
**prof. dr hab. inż.**  
**Zbigniew L. Kowalewski**  
**Institut Podstawowych**  
**Problemów Techniki PAN**  
**Institut Transportu**  
**Samochodowego**