

Krzysztof Naplocha<sup>1</sup>, Zdzisław Samsonowicz<sup>2</sup>

Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Łukasiewicza 3/5, 50-371 Wrocław

## MECHANIZM PĘKANIA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH NA OSNOWIE STOPU AISi9Mg UMACNIANYCH WŁÓKNAMI

Omówiono mechanikę pęknięcia materiałów kompozytowych umacnianych włóknami „Saffil” poddanych jednoosiowemu rozciąganiu. Materiały wytworzone na osnowie stopu AK9 zawierały od 10 do 54% obj. włókien. Przeprowadzone badania mikroskopowe pokazały sposób powstawania przelomu oraz pozwoliły określić teoretyczny stan naprężeń. Zwrócono szczególną uwagę na rolę osnowy i defektów w niej występujących. Przedstawiono przykład propagacji pęknięcia oraz zaproponowano nowy model dekohezji materiałów kompozytowych umacnianych włóknami.

### MECHANISMS OF CRACKING IN A FIBRE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITE

The crack growth of no directional, fibre reinforced metal matrix composite have been discussing and the results compared with model prediction. Composite materials were produced by squeeze casting method. Heated porous preforms were placed in the heated die, then pouring of overheated molten AISi9Mg alloy into the die and pressing it in order to infiltrate the porous preforms with the molten alloy. Microscopic investigations revealed homogeneous distribution of ceramic fibres in the matrix. Composite fractures after tensile tests revealed good bonding at the interphases and no pull-out of fibres (Fig. 2).

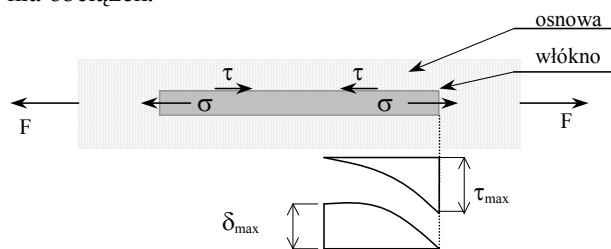
The present observations have been used to assess the failure of composite. During matrix dissolution, the fracture fibres were not removed (Fig. 3). Many developments in the field of composite crack have revealed extend of fibre failure due to leak bonding between fibre and matrix. In this study microscopic observations showed events of longitudinal splits of the fibres, which might prove a considerable strength of the link. Sometimes cracks growth in the unreinforced matrix, crossing fibres and further extend (Fig. 4). It might prove that the first step of crack take place in matrix by defect derived from manufacturing process. Load is bored by the layer with the fibres and led to matrix. Stress require for initiate matrix cracking in terms of component geometry and various constituent properties delivers energy needed to its extend. Between fibres may occur particular stress state (Fig. 5) that the cracks propagate along the matrix. These observations are consistent with the simplified fibre agreement, driving force for crack extension in the composite can origin also from other places.

### WPROWADZENIE

Dotychczasowe rozważania nad mechanizmem pęknięcia materiałów kompozytowych umacnianych włóknami koncentrowały się głównie na określeniu roli włókien w przenoszeniu naprężeń [1, 2]. Włókna zatopione w strukturze kompozytu, mocno z nim związane, powinny przenosić naprężenia tym skuteczniej, im lepsze uzyska się połączenie między nimi a osnową. Nie bez znaczenia są własności włókien oraz zdefiniowana w teorii „shear lag” [3] długość krytyczna włókna, przy której wystąpi efektywne, całościowe wykorzystanie ich własności wytrzymałościowych. Przyłożone zewnętrzne naprężenie rozciągające, zgodnie z tą teorią, odkształca sprężyste osnowę i jedynie w niewielkim stopniu włókna. Wywołane naprężenia ścinające  $\tau$  za pośrednictwem strefy przejściowej włókno-osnowa (interfejsu) powodują powstawanie we włóknach naprężeń rozciągających  $\sigma$  (rys. 1).

Ponieważ największe naprężenie  $\tau_{\max}$  wystąpi w sąsiedztwie końca włókna, należy się spodziewać, że w tym miejscu będzie dochodzić do oddzielenia go od

osnowy. Ponadto uzyskiwanie wartości maksymalnych  $\sigma_{\max}$  w środkowej części włókna wskazuje, że końce włókien nie są efektywnie wykorzystane do przenoszenia obciążeń.



Rys. 1. Stan naprężeń w materiale kompozytowym poddanym rozciąganiu [3, 4]

Fig. 1. Stress state in tensile loaded composite material [3, 4]

Ciekawą analizę tego problemu przedstawiono w pracy [4]. Poparte doświadczeniami wyniki prac wy-

<sup>1</sup> dr inż., <sup>2</sup> prof. dr hab. inż.

kazały odmienny mechanizm pękania kompozytu zależny od zawartości włókien. Wychodząc z wyżej wspomnianej teorii, przedstawiono model rozkładu naprężeń w sąsiedztwie włókien (rys. 1) i stwierdzono, że przy dużej zawartości włókien (68% obj.) dochodzi do oddzielania końców włókien od osnowy i rozprzestrzeniania się powstałych pęknięć na sąsiednie włókna. Analiza przekonująca, choć trudna do przeniesienia wprost na wszystkie tego typu materiały, zwłaszcza na te, w których brak jest chociaż częściowego uporządkowania włókien. Niemniej opisywane zjawiska, modele, rozkłady naprężeń będą również obecne i pomocne w próbach wyjaśnienia zjawisk zachodzących w materiałach kompozytowych umacnianych kształtkami ceramicznymi. Prezentowaną pracę początkowo oparto na podobnych założeniach. Niestety przeprowadzone badania wskazywały na obecność nieco innych zjawisk. Wykonano badania wytrzymałościowe oraz obserwacje mikroskopowe na grupie materiałów kompozytowych o bardzo zróżnicowanej zawartości włókien. Przedstawiono mechanizm pękania kompozytów poddanych próbie rozciągania.

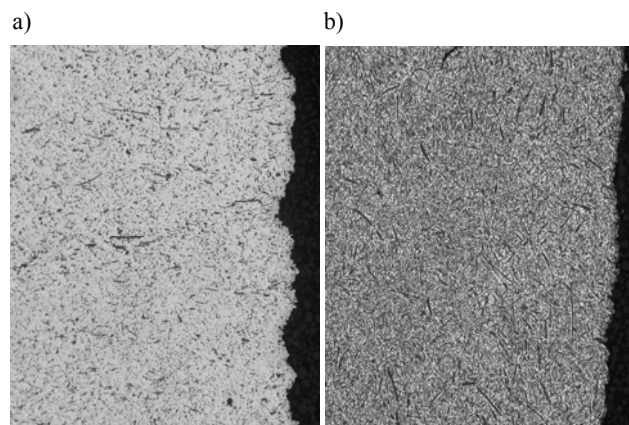
## BADANIA WŁASNE

Materiały kompozytowe zawierające od 10 do 20% obj. włókien wytwarzano metodą prasowania w stanie ciekłym („squeeze casting”). Porowate kształtki wykonane z włókien „Saffil” podgrzewano do temperatury 700°C, wkładano do formy i zalewano ciekłym stopem AK9, na który w kolejnym etapie wywierano ciśnienie. Szczegółowy opis opracowanej technologii został przedstawiony w pracy [5]. Nową technikę wytwarzania użytą dla kompozytów zawierających ponad 25% obj. włókien oparto w znacznej mierze na powyższych elementach. Wprowadzono dwustopniową operację nasycania oraz wykonano nowe oprzyrządowanie. Ze względu na występowanie wad kompozytów w dalszym ciągu ta technika jest modernizowana.

### Obserwacje mikroskopowe

Obserwacje przełamów próbek materiałów kompozytowych zawierających od 10 do 54% obj. włókien przeprowadzono na mikroskopie skaningowym oraz optycznym. Obserwacje wzrokowe oraz mikroskopowe przełamów próbek przy niewielkich powiększeniach wykazały nieznacznie gładszą ich powierzchnię przy większej zawartości włókien (rys. 2b). Nie pokrywa się to ze spostrzeżeniami przedstawionymi w pracy [4]. Zaprezentowany tam model utraty ciągłości kompozytu oparty na analizie rozkładu naprężeń wokół włókien zakładał wyciąganie włókien z osnowy i dużą nieregularność zarysu przełomu przy większej zawartości włókien.

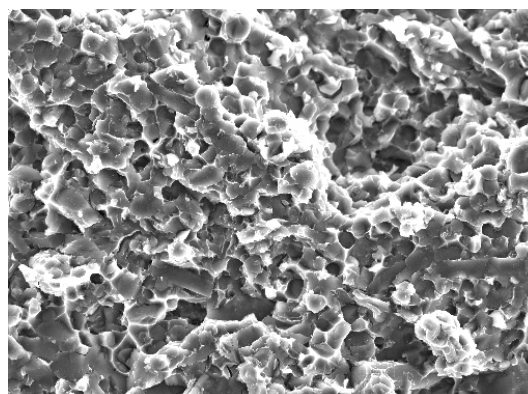
W niniejszych badaniach zmiany w wyglądzie przełamów materiałów różniących się zawartością włókien są stosunkowo niewielkie. Można stwierdzić, że im większa zawartość włókien, tym złom będzie się charakteryzował nieznacznie gładszą powierzchnią i rzadziej będzie dochodziło do wyrywania cząstek materiału.



Rys. 2. Przełomy próbek kompozytów zawierających 10% obj. (a) oraz 47% obj. włókien (b)

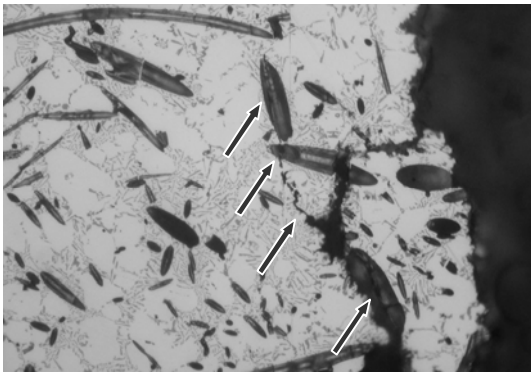
Fig. 2. Tensile fracture surfaces of composites reinforced with 10% vol. (a) and 47% vol. fibres (b)

Podczas dokładnych obserwacji powierzchni przełomu nie zauważono przypadków wyciągania włókien, a także nie stwierdzono, że przyczyną powstania przełomu może być dekohezja między włóknem a osnową. Nie jest to wykluczone, choć znacznie bardziej prawdopodobnym miejscem inicjacji pęknięcia są obszary nieumocnione lub obarczone defektami struktury. Na rysunku 3 przedstawiono widok przełomu próbki przy powiększeniu 500x. Próbka zawiera około 54% obj. włókien Saffil. Widoczne owalne kształty to pęknięte włókna ułożone prostopadle do powierzchni rysunku. Można zaobserwować stosunkowo jednorodne rozmieszczenie włókien, brak jest porowatości czy też lokalnych obszarów pozbawionych całkowicie włókien. Przeważające ukierunkowanie włókien zostało wymuszone w procesie wytwarzania. Przy tym powiększeniu materiał kompozytowy wydaje się być pozbawiony wad, a włókna są pewnie osadzone w osnowie.



Rys. 3. Widok przełomu próbki materiału kompozytowego zawierającego 54% obj. włókien

Fig. 3. Tensile fracture surface of composite reinforced with 54% vol. fibres  
 Na rysunku 4 przedstawiono fragment materiału kompozytowego przy powierzchni przełomu, który podczas rozciągania został częściowo oderwany. Można zaobserwować sposób propagacji pęknięcia. Patrząc od dołu, pęknięcie przenika wzdłuż włókna, następnie poprzez osnowę, napotyka krysztaly krzemu, przechodzi poprzecznie przez włókno, aby ponownie przełamać włókno wzdłuż osi. Prezentowane pęknięcie nie jest wyjątkowe, podobne przypadki spotykano także w innych próbkach. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem zawartości włókien były one coraz rzadsze.



Rys. 4. Pęknięcie zaobserwowane w sąsiedztwie przełomu. Powiększenie 700x

Fig. 4. Crack in the vicinity of fracture surface. Magnification 700x

## PODSUMOWANIE

Na podstawie obserwacji mikroskopowych oraz badań wytrzymałościowych można przypuszczać, że źródła powstawania przełomu materiałów kompozytowych umacnianych włóknami należy szukać nie na powierzchni włókien, ale w samej osnowie. Opierając się na klasycznych koncepcjach wytrzymałościowych, można zaobserwować podczas rozciągania tych materiałów stany elastokruche. Potwierdza to brak granicy plastyczności na wykresach rozciągania otrzymanych w badaniach wytrzymałościowych. Powstające odkształcenia trwałe i następująca po nich dekohezja są zjawiskami fizycznymi, uzależnionymi od stanu równowagi

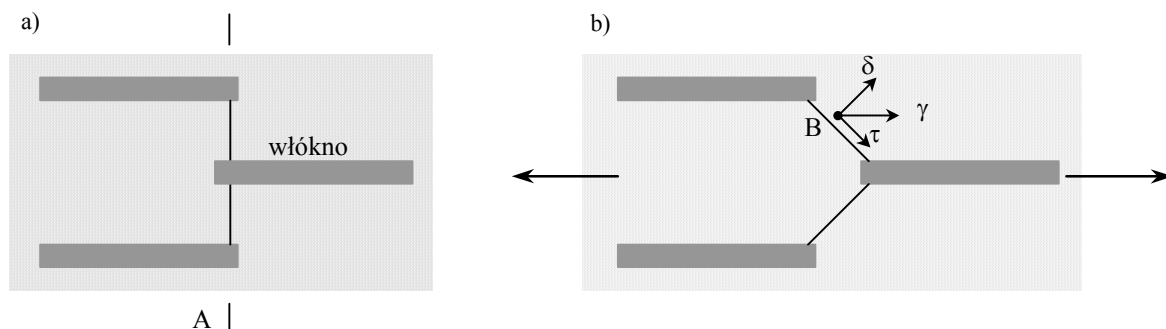
sił międzyatomowych oraz obecności defektów trudnych do uniknięcia w procesie wytwórczym. Lokalne przekroczenia sił spójności i powstanie pęknięcia przyczynia się do złomu całego przekroju. Nastąpi to w chwili, kiedy lokalne wydłużenie definiowane równaniem osiągnie wartość krytyczną [6]

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\delta_x - \nu(\delta_y - \delta_z)] \quad (1)$$

Można przypuszczać, że najczęściej proces zostanie zainicjowany w miejscu występowania wad strukturalnych. Na podstawie licznych obserwacji przełomów próbek materiałów kompozytowych poddanych jednoosiowemu rozciąganiu oraz podstawowych zależności wytrzymałościowych zaproponowano model dekohezji tych materiałów. Uwagę zwrócono na rozkład naprężeń w płaszczyźnie A (zaznaczonej na rysunku 5a), na której podczas rozciągania rozkład sił pomiędzy włóknami prowadzi do odkształceń osnowy i znacznych naprężeń. W materiale jednorodnym definiuje się naprężenia styczne  $\tau$  oraz normalne  $\delta$ , zaznaczone na rysunku 5b w punkcie B. W prezentowanych badaniach proces ten będzie bardziej złożony, jednakże opisany rozkład będzie przydatny w zrozumieniu zachodzących zjawisk. W przypadku wystąpienia mikroporowatości w punkcie B naprężenia te będą źródłem energii powierzchniowej niezbędnej do powiększania się mikropęknięcia. Należy podkreślić, że zaproponowany model powstawania pęknięcia sprostowany obserwacjami mikroskopowymi, który odbiega od dotychczasowych modeli teoretycznych, jest wstępną propozycją.

## LITERATURA

- [1] Meguid S.A., Mechanics and mechanisms of toughening of advanced ceramics, *Journal of Materials Processing Technology* 1996, 56, 978-989.
- [2] Wells J.K., Beaumont W.R., Fracture energy maps for fibre composites, *Journal of Materials Science* 1982, 17, 397-405.
- [3] Kaczmar J.W., Spiekane materiały kompozytowe uzyskiwane w procesie mechanicznego wytwarzania stopów i wyciskania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [4] Rochardjo Heru S.B., Komotori Jun, Shimizu Masao, Miyano Yasushi, Effects of the fiber content on the longitudinal tensile fracture behaviour of uni-directional car-



Rys. 5. Rozkład naprężeń w materiale kompozytowym umacnianym włóknami poddanym rozciąganiu: a) próbka w stanie swobodnym, b) próbka rozciągana

Fig. 5. Stress state in tensile loaded composite material strengthened by fibres. Sample not loaded (a), sample loaded (b)

- bon/epoxy composites, *Journal of Materials Processing Technology* 1997, 67, 89-93.
- [5] Naplocha K., Optymalizacja parametrów technologicznych procesu wytwarzania materiałów kompozytowych na osnowie stopu Ak9 umacnianych włóknami ceramicznymi typu  $Al_2O_3$ , Praca doktorska, ITMiA, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 1999.
- [6] Hyla I., *Elementy mechaniki kompozytów*, Wyd. Politechniki Slaskiej, Gliwice 1995.

Recenzent  
Józef Suchy