

Anna Boczkowska<sup>1</sup>, Katarzyna Konopka<sup>2</sup>, Jerzy Schmidt<sup>3</sup>, Krzysztof J. Kurzydłowski<sup>4</sup>  
 Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

## BADANIA WPŁYWU BUDOWY ELASTOMERU I ADHEZJI NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE KOMPOZYTÓW CERAMIKA-ELASTOMER

Przedmiotem badań były kompozyty ceramika-elastomer, otrzymywane w wyniku infiltracji porowatej ceramiki SiO<sub>2</sub> segmentowym elastomerem uretanowo-mocznikowym o różnej zawartości segmentów sztywnych. W wyniku infiltracji powstają kompozyty o dwóch wzajemnie przenikających się fazach, przy czym ceramika stanowi szkielet wypełniający 60% objętości kompozytu. Powstała mikrostruktura, z perkolacją elastomeru w osnowie ceramicznej, nadaje kompozytom dużą wytrzymałość na ściskanie przy jednoczesnej zdolności do absorpcji odkształceń. Kompozyty takie zachowują spójność podczas ściskania i zdolność do powrotu do postaci wyjściowej po zdjęciu obciążenia.

Przeprowadzone badania wykazały, że wytrzymałość na ściskanie kompozytów zależy od budowy elastomeru, a także od adhezji pomiędzy ceramiką i elastomerem. Stwierdzono na krzywej ściskania obszar odkształceń w zakresie sprężystym, następnie po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężeń następuje początkowo spadek, a dalej stopniowy wzrost naprężeń przy jednoczesnym wzroście odkształceń. W celu pełniejszego poznania zjawisk zachodzących w przedmiotowych kompozytach podczas ich ściskania zastosowano metodę emisji akustycznej. Pozwoliła ona na wyodrębnienie kilku etapów w trakcie ściskania. Badania te mają jednak charakter wstępny i będą kontynuowane w przyszłości.

Słowa kluczowe: ceramika, kompozyty, elastomer, wytrzymałość na ściskanie, adhezja, emisja akustyczna

## INVESTIGATION OF ELASTOMER STRUCTURE AND ADHESION EFFECT ON COMPRESSION STRENGTH OF CERAMIC-ELASTOMER COMPOSITES

Ceramic-elastomer composites, obtained via infiltration of porous ceramics of SiO<sub>2</sub> by segmented urea-urethane elastomer with different hard segment content, were studied. As a result of the ceramics infiltration composites of two interpenetrating phases are obtained (Figs 1 and 2). They are composed in 60% of ceramics. The obtained microstructure with percolation of ceramic and polymeric phases gives the composites high compression strength together with the ability to absorption of the strain energy. Such composites retain their cohesion with the ability to return to initial shape after unloading.

Presented results of the studies show the effect of the elastomer structure and adhesion between ceramics and elastomer on composite compression strength (Figs. 3 and 4). As a result of the soft and hard segments content (Tab. 1) the structure and properties of elastomers change. Selected mechanical properties of obtained elastomers are presented in Table 2. Also the residual porosity of the samples before and after infiltration was measured (Tab. 3). The results of the studies proof very good infiltration of the pores by elastomer. However, it depends on hard segments content and coupling agent content too. Region of the elastic deformation is observed at the diagram of compression test, as shown in Figures 3 and 4. Next to the curve reached the maximum point, the decrease and after that the increase of stresses appears at the compression diagram. Simultaneously the increase of the strains is observed. The acoustic emission method was used to fully know the phenomena, which appears at the composites during their compression. Diagram of compression test with the history recorded by acoustic emission evaluated by count as a function of sample strain is shown in Figure 5. As a result of acoustic signal analysing six classes of acoustic emission signals evaluated by hits was found (Fig. 6). However, the research is at its early stage and will be continued.

Key words: ceramics, composites, elastomer, compression strength, adhesion, acoustic emission

### WPROWADZENIE

Kompozyty polimerowe, w których napełniaczami są proszki ceramiczne, takie jak SiO<sub>2</sub>, SiC, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, grafit, mika i inne, znane są i opisane w dostępnej literaturze [1-3]. Dodawanie proszków ceramicznych do polimeru ma na celu przede wszystkim podniesienie twardości, odporności cieplnej i zmniejszenie zużycia ściernego, a także w dalszej kolejności podniesienie jego sztywności i wytrzymałości.

Zdecydowanie rzadziej spotykane są prace dotyczące kompozytów ceramiczno-polimerowych, w których osnowę stanowi ceramika, a napełniaczem jest polimer [4, 5]. Badania prowadzone na Wydziale Inżynierii Materiałowej PW we współpracy z Wydziałem Chemicznym PW doprowadziły do opracowania oryginalnej metody otrzymywania kompozytów ceramika-polimer metodą infiltracji porowatej ceramiki polimerem [6]. Infiltracja ceramiki polimerem, a w szczególności

<sup>1,2,3</sup> dr inż., <sup>4</sup> prof. dr hab. inż.

elastomerem prowadzi do otrzymania kompozytu o podwyższonej odporności na kruche pękanie, zdolnego do przenoszenia większych naprężeń i dużych odkształceń [7-11]. Kompozyty takie nie tracą spójności w wyniku ściskania, nie ulegają całkowitemu zniszczeniu po przekroczeniu wytrzymałości na ściskanie, w przeciwieństwie do materiałów ceramicznych, które, pomimo iż mogą przenosić duże obciążenia ściskające, są mało odporne na kruche pękanie. Co więcej, kompozyty ceramika-elastomer charakteryzują się powrotem do postaci wyjściowej po zdjęciu obciążenia. Ponadto mogą być one wielokrotnie odkształcane, chociaż ich wytrzymałość na ściskanie i sztywność przy kolejnym odkształcaniu obniża się [8, 10]. Cechy takie sprawiają, że mogą to być materiały wykorzystywane jako tzw. „szok absorbery” do tłumienia i wygaszania uderzeń.

Innym potencjalnym obszarem zastosowań kompozytów ceramika-elastomer mogą być ultradźwiękowe przetworniki dla urządzeń hydrolokacyjnych w marynarce, w medycznych systemach diagnostycznych (np. ultrasonografii) i nieniszczących badaniach materiałów [12, 13]. Wówczas polimery łączone są z piezoelektryczną ceramiką, co w efekcie powoduje otrzymanie kompozytu o większej odporności na kruche pękanie, mniejszej gęstości i mniejszej stałej dielektrycznej. Właściwości elektryczne i mechaniczne takich kompozytów zależą głównie od udziału obu jego składników i oczywiście od właściwości każdego z nich, a także od sposobu powiązania (adhezji) ceramiki i polimeru [14].

W prezentowanej pracy są przedstawione wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów ceramika SiO<sub>2</sub>-elastomer nitrylomocznikowouretanowy, będące kontynuacją podjętych dwa lata temu prac, których wyniki prezentowano na poprzednich konferencjach. Tym razem nacisk położono na pełniejsze poznanie zjawisk zachodzących w kompozycie podczas jego ściskania. Przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie kompozytów otrzymywanych w wyniku infiltracji elastomerem o różnej budowie. Adhezję materiału organicznego, jakim jest elastomer, i nieorganicznego - ceramiki zwiększono przy użyciu silanowych promotorów adhezji. Zadaniem promotorów adhezji jest wpływanie na poprawę właściwości mechanicznych oraz odporności chemicznej kompozytu poprzez zwiększanie adhezji polimeru i ceramiki [15]. Zbadano wpływ adhezji pomiędzy ceramiką i elastomerem na wytrzymałość na ściskanie kompozytów.

Stwierdzono, że w wyniku ściskania następuje pękanie ceramicznej osnowy. Do badań wykorzystano również metodę emisji akustycznej. Metoda ta polega na rejestracji fal sprężystych generowanych w materiale w wyniku prowadzenia procesu odkształcania kompozytowej próbki. Analiza zapisanych sygnałów umożliwiła ocenę procesu deformacji i jego intensywność w każdym jego stadium. W analizie przeprowadzonego

doświadczenia wykorzystano klasyfikację sygnałów emisji akustycznej z zastosowaniem programu Visual Class, wykorzystującego metodę „pattern recognition”, w celu próby rozpoznania mechanizmów występujących w procesie odkształcania kompozytu. Badania z zastosowaniem techniki emisji akustycznej miały charakter wstępny i będą kontynuowane w przyszłości.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Badane materiały

Substratami do otrzymywania segmentowych elastomerów nitrylomocznikowouretanowych (PNMU) były:

- oligo(adypinian etylenu) (OAE) o nazwie handlowej PURATE, średnim ciężarze cząsteczkowym  $M_n = 2020$ ,
- diizocyjanian 4,4' difenylometanu (MDI) o nazwie handlowej Isonate M 125, firmy Dow Chemical Inc.,
- dicyjandiamid (DCDA) cz.d.a. produkcji POCH w Gliwicach, stosowany w postaci koncentratu w OAE o nazwie handlowej Cigmat.

Elastomery otrzymywano metodą jednoetapową, w reaktorze próżniowym, z intensywnym mieszaniem [16-18]. Odwadnianie mieszaniny substratów prowadzono w ciągu 2 h, w temperaturze  $150 \pm 5^\circ\text{C}$ , pod ciśnieniem  $2 \div 5$  hPa. Następnie dozowano MDI. Reakcję utwardzania elastomerów prowadzono *in situ* w porach ceramiki [6]. Wykonano syntezy PNMU o różnym stosunku molowym MDI/OAE, dzięki czemu uzyskano elastomery o różnej zawartości segmentów sztywnych (tab. 1). Efektem różnej zawartości segmentów sztywnych są istotne różnice we właściwościach mechanicznych elastomerów zastosowanych do infiltracji porowatej ceramiki (tab. 2).

TABELA 1. Rodzaje otrzymywanych elastomerów  
TABLE 1. Types of synthesized elastomers

Oznaczenie	Stosunek diizocyjanianu do oligodiolu MDI/OAE mol/mol	Stosunek molowy segmentów sztywnych do giętkich S/G mol/mol
1,25/P	1,25	0,25
2,5/P	2,5	1,5

TABELA 2. Wybrane właściwości mechaniczne otrzymywanych elastomerów  
TABLE 2. Selected mechanical properties of obtained elastomers

Oznaczenie	$\varepsilon_r$ %	$\varepsilon_{rt}$ %	$E$ MPa	$R_{rd}$ kN/m	$\Delta V_s$ mm <sup>3</sup>
1,25/P	835	4,7	7	52	21
2,5/P	420	11,0	27	79	102

$\varepsilon_r$  - odkształcenia do zerwania

$\varepsilon_{rt}$  - odkształcenia trwałe

$E$  - moduł Younga

$R_{rd}$  - wytrzymałość na rozdzielanie

$\Delta V_s$  - zużycie ściernie określone metodą Schoppera-Schlobacha

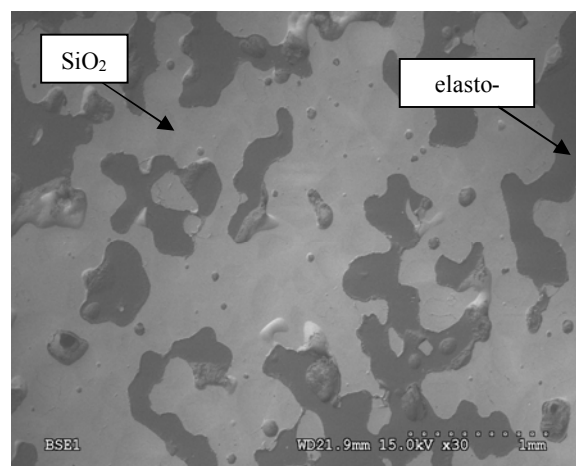
W celu zwiększenia adhezji pomiędzy ceramiką i elastomerem zastosowano N-2-aminoetylo-3-amino-propylotrimetoksylosilan o nazwie handlowej UNISILAN U-15, produkcji UNISIL Sp. z o. o. w Tarnowie. Jako osnowę zastosowano tworzywo porowate  $\text{SiO}_2$  o średniej porowatości otwartej 39,4%, w kształcie walców o średnicy 20 mm i wysokości 20 mm.

### Techniki badawcze

Do obserwacji mikrostruktury wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy HITACHI S-3500N. Próby ściskania przeprowadzono z użyciem maszyny wytrzymałościowej typu Instron 1115. Badanie procesu ściskania próbki kompozytu (o dużej zawartości segmentów sztywnych) z zapisem generowanych sygnałów emisji akustycznej wykonano na systemie obciążającym Schenck PSB 100 z zastosowaniem specjalnie opracowanego oprzyrządowania, umożliwiającego prawidłowy zapis sygnałów. Do rejestracji sygnałów akustycznych wykorzystano system AMSY 5 Vallen z czujnikiem o częstotliwości rezonansowej 150 kHz. Analizę zapisanych sygnałów przeprowadzono, wykorzystując możliwości programu Visual Class w zakresie wykorzystania analizy parametrycznej i metody klasyfikacji sygnałów.

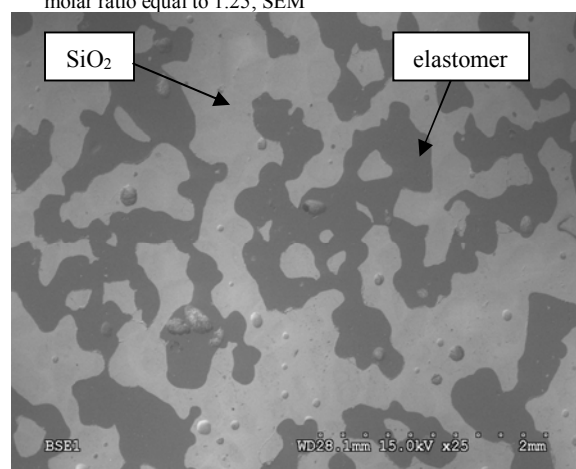
### WYNIKI BADAŃ

Obserwacje mikrostruktury kompozytów ceramika-elastomer, otrzymywanych w wyniku infiltracji porowatej ceramiki elastomerem, pozwoliły na stwierdzenie całkowitego wypełnienia porów przez elastomer i to niezależnie od budowy zastosowanego elastomeru (rys. rys. 1 i 2). Przeprowadzona analiza stereologiczna obrazów mikrostruktur za pomocą programu Micrometer pozwoliła na określenie udziału objętościowego poszczególnych faz. Okazało się, że udział objętościowy ( $V_v$ ) fazy ceramicznej wynosi 60%, a zatem polimer zajmuje 40% objętości całego kompozytu. Wyniki te potwierdziły, że w badanych kompozytach osnowę stanowi ceramika  $\text{SiO}_2$ .



Rys. 1. Struktura kompozytu otrzymanego z elastomeru o stosunku molowym MDI/OAE = 1,25; SEM

Fig. 1. Structure of the composite obtained from elastomer with MDI/OAE molar ratio equal to 1.25; SEM



Rys. 2. Struktura kompozytu otrzymanego z elastomeru o stosunku molowym MDI/OAE = 2,5; SEM

Fig. 2. Structure of the composite obtained from elastomer with MDI/OAE molar ratio equal to 2.5; SEM

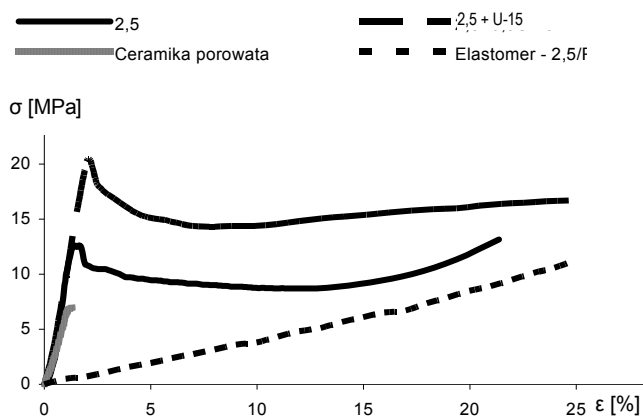
O dobrym wypełnieniu porów świadczą także wyniki pomiarów porowatości kompozytów, otrzymywanych zarówno bez, jak i z zastosowaniem silanowego środka proadhezyjnego UNISILAN U-15 (tab. 3). Przeprowadzone badania, polegające na pomiarze masy próbki na sucho i po nasączeniu wodą, wykonano zgodnie z normą PN-76/E-06307 „Elektroizolacyjne materiały ceramiczne”.

TABELA 3. Porowatość pozorna ceramiki i kompozytów  
TABLE 3. Residual porosity of ceramics and composites

Oznaczenie elastomeru	UNISILAN U-15	Porowatość pozorna, %	
		Próbek ceramicznych przed napełnieniem	Próbek kompozytowych po napełnieniu
1,25/P	nie	39,65	1,57
1,25/P	tak	39,60	0,91
2,5/P	nie	40,80	0,84
2,5/P	tak	39,55	0,70

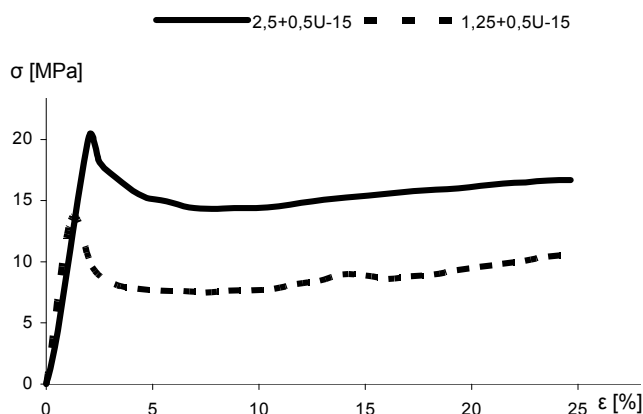
Wyznaczona porowatość pozorna dla większości badanych kompozytów mieści się poniżej 1%, co świadczy o naprawdę dobrym wypełnieniu porów ceramiki przez elastomer. Prawdopodobnie ilość zapełnionych porów może być nawet większa, ponieważ przyczyną wzrostu masy próbek po gotowaniu w wodzie destylowanej mogło być wchłonięcie pewnej ilości wody przez elastomer. Wyraźnie jednak widać, że przy większym stosunku MDI/OAE wypełnienie porów jest lepsze (mniejsza pozostała porowatość pozorna). Jest to spowodowane mniejszą lepkością mieszanki reaktywnej przy większej ilości MDI. Można również zauważyć, że zastosowanie silanowego promotora adhezji spowodowało większe wypełnienie porów materiału nieorganicznego (mniejsza pozostała porowatość pozorna), czego przyczyną jest niewątpliwie obniżenie napięcia powierzchniowego na styku ceramiki z elastomerem przez środek silanowy, co z kolei zwiększa zwilżalność ceramiki elastomerem.

Próby ściskania przeprowadzono na próbkach porowatej ceramiki, elastomeru, kompozytu otrzymanego w wyniku infiltracji elastomerem o różnym stosunku mowym substratów, a także kompozytu otrzymanego bez i z zastosowaniem silanowego promotora adhezji. Badania te pozwoliły na określenie wytrzymałości na ściskanie oraz charakteru krzywych ściskania kompozytu ceramika-elastomer w porównaniu do krzywych otrzymanych dla ceramiki i elastomeru osobno. Pozwoliły także na poznanie wpływu budowy elastomeru oraz adhezji ceramiki i elastomeru na wytrzymałość na ściskanie kompozytów. Krzywe uzyskane podczas ściskania przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Wykresy ściskania porowatej ceramiki, elastomeru i kompozytów bez (2,5) i z zastosowaniem środka silanowego (2,5 + U-15)

Fig. 3. Diagrams of compression tests of porous ceramics, elastomer and composites with (2.5) and without silanes agent (2.5 + U-15)



Rys. 4. Wykresy ściskania kompozytów otrzymanych z elastomeru o różnej zawartości segmentów sztywnych i giętkich

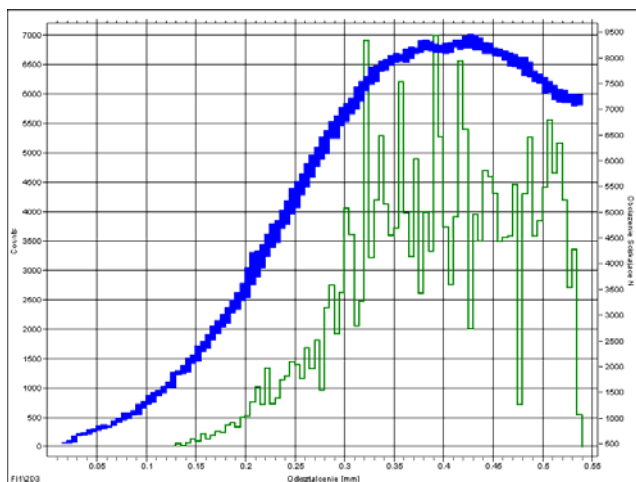
Fig. 4. Diagrams of compression tests of composites obtained from elastomer with different soft and hard segments content

Wprowadzenie elastomeru w pory ceramiki spowodowało blisko dwukrotny wzrost jej wytrzymałości na ściskanie (rys. 3). Nachylenie krzywej w zakresie odkształceń sprężystych jest takie samo dla ceramiki i kompozytu. Ceramika decyduje o przenoszeniu naprężeń, ponieważ moduł Younga elastomeru jest wielokrotnie mniejszy niż moduł ceramiki. Gdy porowata ceramika ulega zniszczeniu na krzywej ściskania kompozytu, obserwowany jest dość wyraźny spadek naprężeń przy jednoczesnym przyroście odkształceń. Dalsze ściskanie kompozytu przebiega w sposób analogiczny do krzywej ściskania elastomeru, lecz na znacznie wyższym poziomie naprężeń. Najprawdopodobniej w obszarze tym naprężenia przenoszone są w większym stopniu przez elastomer, który charakteryzuje się odkształceniami wysokoelastycznymi. Odkształcenia te powracają po zdjęciu obciążenia, również w kompozycie. Zastosowanie promotorów adhezji elastomeru do ceramiki spowodowało 3-krotny wzrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do porowatej ceramiki.

Na wytrzymałość na ściskanie badanych kompozytów ma wpływ również budowa elastomeru zastosowanego do infiltracji (rys. 4). Większa zawartość segmentów sztywnych wpływa korzystnie na wytrzymałość na ściskanie kompozytu. Przyczyną podwyższenia wytrzymałości na ściskanie przy większej zawartości segmentów sztywnych może być wyższy moduł Younga elastomeru o większej zawartości segmentów sztywnych. Wydaje się jednak bardzo prawdopodobne, że większa zawartość segmentów sztywnych, charakteryzujących się większą polarnością niż segmenty giętkie, powoduje wzrost adhezji elastomeru do ceramiki poprzez tworzenie wiązań wodorowych pomiędzy grupami znajdującymi się na powierzchni ceramiki a grupami mocznikowymi i uretanowymi elastomeru. Wymaga to jednak prowadzenia dalszych, szczegółowych badań.

Po raz pierwszy podjęto próbę zastosowania emisji akustycznej do badania procesu ściskania kompozytów ceramika-elastomer o strukturze perkolacji faz. Zareje-

stowaną podczas próby aktywność emisyjną naniesiono na charakterystykę obciążenie-odkształcenie próbki kompozytowej (rys. 5). Przedstawia ona intensywność zjawisk emisyjnych występujących na każdym poziomie obciążania.



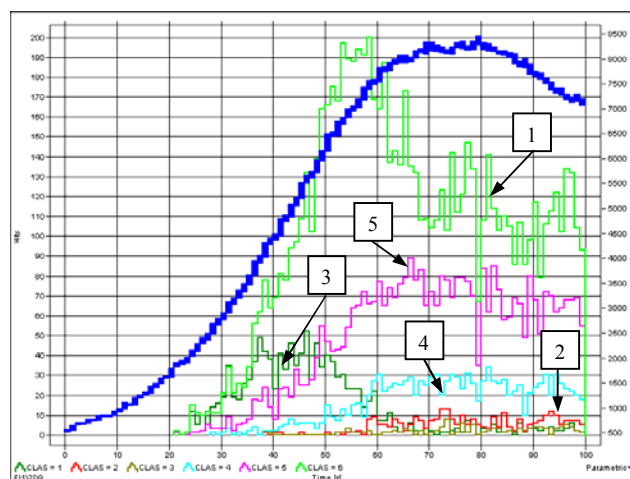
Rys. 5. Wykres ściskania z zarejestrowaną za pomocą emisji akustycznej historią wyrażoną ilością zliczeń (Counts) w funkcji odkształcenia próbki

Fig. 5. Diagram of compression test with the history evaluated by counts as a function of sample strain, recorded by acoustic emission

Otrzymane zapisy akustycznej aktywności kompozytu podczas procesu ściskania poddano analizie poprzez zadanie rozpoznania wybranych cech sygnałów. W wyniku uzyskano 6 klas odpowiadających charakterystycznym wzorcom, dla których sklasyfikowano zarejestrowane sygnały emisji akustycznej. Dla sygnałów charakterystycznych występujących w każdej z klas przeprowadzono analizę widmową i parametryczną, na podstawie której wyodrębniono dla procesu odkształcania trzy mechanizmy zniszczenia. Łącząc ocenę zachowania się struktury kompozytu na podstawie wykazanych wcześniej doświadczeń oraz wyniki przeprowadzonej analizy akustycznej, można mechanizmy te przypisać następującym zjawiskom:

- wyrównywania się poziomu naprężenia dla całej struktury szkieletu ceramiki w zakresie quasi-liniowej charakterystyki obciążania jako efektu wstępnej niejednorodności geometrycznej i istniejących naprężeń reszkowych (klasa 1, klasa 6),
- rozwoju procesu tarcia i uszkodzenia na granicy ceramika-elastomer (klasa 4, klasa 5),
- rozwoju pęknięcia i rozdzielania się szkieletu ceramiki (klasa 2, klasa 3).

Przedstawione przykładowo dla funkcji obciążenie-ściskające-czas historie występowania liczby zdarzeń emisji akustycznej (rys. 6), odpowiadające każdej z uzyskanych klas, ujawniają zakresy i poziomy działania naprężeń lub obciążeń odpowiadających wymienionym mechanizmom.



Rys. 6. Wykres ściskania kompozytu w funkcji czasu z historią poszczególnych klas sygnałów emisji akustycznej wyrażonej ilością zdarzeń (Hits); oznaczenia 1-5 odpowiadają klasom od 1 do 5

Fig. 6. Composite compression diagram as a function of the time, with the history of individual classes of acoustic emission signals evaluated by hits; numbers from 1 to 5 means classes 1-5

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania dowiodły, że możliwe jest wytwarzanie kompozytów o osnowie ceramicznej wypełnionej elastomerem. Kompozyty takie charakteryzują się mikrostrukturą z perkolacją fazy polimerowej. Proces infiltracji prowadzi do prawie całkowitego wypełnienia porów przez elastomer. Otrzymane kompozyty cechuje blisko dwukrotnie, a w przypadku poprawy adhezji pomiędzy ceramiką i elastomerem nawet trzykrotnie wyższa wytrzymałość na ściskanie od wytrzymałości porowatej ceramiki. Wprowadzenie elastomeru w pory ceramiki sprawia, że kompozyt wykazuje cechy materiału wysokoelastycznego, zdolnego do dużych, odwracalnych odkształceń. Kompozyt taki nie traci spójności, nie ulega katastroficznemu zniszczeniu (nie rozpada się tak jak ceramika). Zdolny jest do pochłaniania energii, o czym świadczy szerokie plateau na krzywej ściskania.

Wytrzymałość na ściskanie badanych kompozytów zależy od budowy elastomeru, tj. od zawartości segmentów sztywnych, a w efekcie także od zawartości silnie polarnych grup mocznikowych i mniej polarnych grup uretanowych. Na wytrzymałość kompozytów ceramika-elastomer można wpływać również poprzez zmianę adhezji pomiędzy ceramiką i elastomerem. Zwiększenie adhezji powoduje wyraźny wzrost wytrzymałości na ściskanie kompozytów. Przedstawione wyniki próby zapisu aktywności akustycznej odkształcanego kompozytu oraz wyniki klasyfikacji sygnałów z zastosowaniem programu Visual Class upoważniają do stwierdzenia, że dla materiałów o takim charakterze złożenia zaawansowana technika emisji akustycznej uzupełniona innymi metodami badawczymi daje możliwości wyodrębnienia występujących w procesie deformacji zjawisk i mecha-

nizmów zniszczenia i przypisanie ich poziomowi naprężenia.

## Podziękowania

*Autorzy artykułu dziękują Panu prof. drowi hab. Mikołajowi Szafranowi z Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej za wykonanie kształtek porowatej ceramiki.*

## LITERATURA

- [1] Ślęziona J., Podstawy technologii kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998, 28.
- [2] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., Kompozyty, Wyd. II zmienione, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2003, 61, 107.
- [3] Bula K., Jesionowski T., Fojud Z., Jurga J., Badania struktury kompozytów PET/SiO<sub>2</sub> i PBT/SiO<sub>2</sub>, X Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 2003, 57.
- [4] Szafran M., Konopka K., Rokicki G., Lipiec W., Kurzydłowski K. J., Porowata ceramika infiltrowana metalami i polimerami, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 5, 313.
- [5] Szafran M., Lipiec W., Okowiak J., Konopka K., Kurzydłowski K.J., Nowe kompozyty ceramika-polimer o matrycy z ceramicznego tworzywa porowatego z tlenku glinu, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 8, 337.
- [6] Szafran M., Boczkowska A., Konopka K., Kurzydłowski K., Rokicki G., Batorski K., Kompozyt ceramiczno-polimerowy i sposób wytwarzania kompozytu ceramiczno-polimerowego, Zgłoszenie patentowe nr P.353130, 2002.
- [7] Konopka K., Boczkowska A., Batorski K., Kurzydłowski K., Szafran M., Propagacja pęknięcia w kompozycie o
- osnowie ceramiki porowatej SiO<sub>2</sub> infiltrowanej elastomerem, Kompozyty (Composites) 2002, 3, 108-113.
- [8] Konopka K., Boczkowska A., Szafran M., Kurzydłowski K., Mikrostruktura i właściwości kompozytów ceramika-elastomer, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 7, 216.
- [9] Konopka K., Boczkowska A., Szafran M., Kurzydłowski K., Novel ceramics-polymer composites obtained via infiltration method, European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes Euromat 1-5. 09. 2003, Lozanna.
- [10] Konopka K., Boczkowska A., Batorski K., Szafran M., Kurzydłowski K.J., Microstructure and Properties of Novel Ceramic-Elastomer Composites, wysłane do Acta Materialia.
- [11] Boczkowska A., Konopka K., Kurzydłowski K.J., Effect of elastomer structure on ceramic-elastomer composite properties, 12<sup>th</sup> Achievements in Mechanical & Materials Engineering AMME 2003, Zakopane 2003, 111.
- [12] Schwarzer S., Roosen A., Tape Casting of Piezo Ceramic/Polymer Composites, Journal of the Europea Ceramic Society 1999, 19, 1007.
- [13] Cui C., Baughman R.H., Iqbal Z., Kazmar T.R., Dahlstrom D.K., Improved Piezoelectric Ceramic/Polymer Composites for Hydrophone Applications, Syntetic Metals 1997, 85, 1391.
- [14] Schwartz M. (red.), Encyclopedia of Smart Materials, vol. 2, Wiley & Sons Inc., New York 2002, 780-825, 860-873.
- [15] Marciniak B., Guliński J., Mirecki J., Foltynowicz Z., Silanowe środki wiążące, cz. I, Polimery 1990, 35, 213.
- [16] Patent 139 841 (1986).
- [17] Patent 148 671 (1986).
- [18] Patent 150 154 (1986).

Recenzent  
Ludosław Stobierski