

Dariusz Kwiatkowski

Politechnika Częstochowska, Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją, al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa, Poland
Corresponding author: E-mail: kwiatkowski@ipp.pcz.pl

Otrzymano (Received) 20.01.2010

BADANIE ODPORNOŚCI NA PĘKANIE KOMPOZYTÓW PA6 Z WŁÓKNEM SZKLANYM NA PODSTAWIE WSPÓŁCZYNNIKA INTENSYWNOŚCI NAPRĘŻEŃ

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zawartości włókna szklanego ciętego typu E w kompozytach poliamidu 6 na wartość współczynnika intensywności naprężeń. Do badań użyto poliamidu 6 o nazwie firmowej RESTRAMID oraz kompozytów na osnowie tego znanego tworzywa konstrukcyjnego z grupy termoplastów z włóknem szklanym. Kompozyt z maksymalną zawartością włókna szklanego, tj. 25%, został wytworzony za pomocą wyciągarki dwuślimakowej na przemysłowej linii produkcyjnej w firmie POLIMARKY w Rzeszowie. Pozostałe kompozyty o zawartości włókna szklanego 5, 10 i 15% wytworzono za pomocą wtryskarki firmy KRAUSS MAFFEI KM 65-160 C4 poprzez dodanie do kompozytów z maksymalnymi zawartościami napełniaczy odpowiedniej ilości PA6. Próbki do badań odporności na pękanie typu SENB (Single Edge Notch Bend) wykonano metodą wtryskiwania przy użyciu formy wtryskowej dwugniazdowej skonstruowanej i wykonanej w ramach projektu badawczego 4 T08 E 032 23. Badania odporności na pękanie przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Inspekt Desk 20 firmy Hegewald & Peschke wyposażonej w uchwyt do trójpunktowego zginania. Jako miarę odporności na pękanie przyjęto krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q . Przedstawiono graficznie wpływ zawartości napełniacza w postaci włókna szklanego ciętego na wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q w kompozytach PA6. W miarę wzrostu zawartości włókna szklanego w kompozycie PA6 wartość współczynnika intensywności naprężeń ulega podwyższeniu. Modyfikacja fizyczna polegająca na dodaniu do osnowy poliamidowej 25% włókien szklanych spowodowała zwiększenie odporności na pękanie o 47%.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, mechanika pękania, współczynnik intensywności naprężeń

THE STUDY OF CRACK RESISTANCE OF THE PA6 COMPOSITES WITH GLASS FIBER ON THE BASIS OF THE STRESS INTENSITY FACTOR

The results of examinations of the influence of cut glass fiber content in PA6 composites on the stress intensity factor have been presented in this article. The RESTRAMID polyamide 6 and composites warp material with glass fiber was used in this work. Composite with a maximum content of 25% of glass fiber was produced at the two screw extruder in POLIMARKY Rzeszów company. Other composites containing glass fiber 5, 10, and 15% of the injection molding machine manufactured at the company KRAUSS MAFFEI KM 65-160 C4 by adding to the composites with the maximum content of fillers to the PA6. Tests results of influence of cut glass fiber type E consist in composites of polyamide 6 for value of tension intensity coefficient were presented in this development. For the tests the polyamide 6 was used with commercial name RESTRAMID and composites on matrix of this well known constructional plastic from group of thermoplastics with glass fiber. The composite with maximal content of glass fiber i.e. 25% were produced on twin-screw extrusion machine on industrial production line in the POLIMARKY company in Rzeszów. The rest remaining composites with content of glass fiber of 5, 10, 15 and 20% were produced on injection machine type KRAUSS MAFFEI KM 65-160 C4 through addition of proper quantity of PA6 to composites with maximal contents of fillers. Samples for tests of crack resistance type SENB (Single Edge Notch Bend) were produced by method of injection with help of two-cavities injection mould designed and manufactured in a frames of the research project 4 T08 E 032 23. The tests of crack resistance were carried out on resistance testing machine type Inspekt Desk 20 from the company equipped with fixture for three-points bending. As far as crack resistance was adopted by a critical value of stress intensity factor. The place of intersection of the secant P_Q performance graph sets. The impact of graphic content in the form of talc filler on the stress intensity factor K_Q in PA6 composites was presented. The physical modification, consisting by adding 25% glass fibres to polyamide matrix, caused 47% crack resistance increase.

Keywords: polymeric composites, crack mechanics, stress intensity factor

WSTĘP

Mechanika pękania jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki, łączącą problemy materiałoznawcze i wytrzymałościowe, zajmującą się bada-

niem zachowania się elementów i układów z karbem w określonych warunkach obciążenia. Odporność na pękanie jest niezwykle istotnym parametrem okreś-

lającym właściwości materiałów polimerowych, a zwłaszcza materiałów polimerowych konstrukcyjnych. Do oceny przydatności materiału polimerowego konstrukcyjnego nie wystarczają stałe materiałowe wyznaczone w próbie rozciągania czy ściskania, zdarza się niejednokrotnie, że materiały polimerowe konstrukcyjne o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych mają niewielką odporność na pękanie. Wówczas materiały takie mają ograniczoną przydatność jako materiały konstrukcyjne, szczególnie w przypadkach występowania w danej konstrukcji obciążeń zmęczeniowych. Odporność na pękanie może być określona następującymi trzema sposobami [1-5]:

- przeprowadzanie typowych prób technologicznych - są to jedynie badania jakościowe, pozwalające przede wszystkim na określenie, czy dany materiał konstrukcyjny nie znajduje się w stanie kruchym, a niedające możliwości ustalenia związku między wynikami badań a poziomem naprężeń inicjujących pękanie;
- badania próbek będących modelami określonych węzłów konstrukcyjnych i istniejących tam warunków obciążenia - próby te wymagają wykonywania próbek o dużych gabarytach i stosowania specjalnych dużych maszyn wytrzymałościowych, co znacznie podnosi koszty badań;
- wykonywanie badań opartych na zasadach mechaniki pęknięcia - poprzez badanie stosunkowo małych, znormalizowanych próbek pozwalają one na określenie warunków inicjacji pęknięć przy danej wielkości wady i przy danym poziomie naprężeń.

Za pomocą mechaniki pęknięcia określa się takie charakterystyczne miary odporności na pękanie, jak [1-5]:

- współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic} ,
- współczynnik uwolnienia energii $G\alpha$ ($\alpha = I, II, III$),
- rozwarcie szczeliny δT ,
- całka J .

Miary, których wartości określone są dla momentu inicjacji rozwoju szczeliny, przyjmują wartości krytyczne i są uważane za stałe materiałowe.

W zależności od udziału odkształceń plastycznych w pochłanianiu włożonej energii mechanikę pęknięcia podzielić można na dwie zasadnicze grupy [1-5]:

- mechanikę pęknięcia liniowo sprężystą - rozpatrującą przypadki, w których propagacja pęknięcia odbywa się przy bardzo małym odkształceniu plastycznym w obszarze wierzchołka szczeliny,
- mechanikę pęknięcia nieliniowo sprężystą - dotyczącą przypadków, w których odkształcenia plastyczne poprzedzające rozwój pęknięcia przekraczają wielkość określoną warunkami linowo sprężystej mechaniki pęknięcia.

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Badane materiały

Badaniom poddano kompozyty na osnowie poliamidu 6 o nazwie handlowej *RESTRAMID* wyprodukowanego

w firmie *POLIMARKY*. Poliamid 6 modyfikowano włóknem szklanym ciętym typu E ze szkła bezalkalicznego boro-glino-krzemowego o zawartości tlenków alkalicznych poniżej 1%. Kompozyty z maksymalną zawartością napełniacza, tj. 25%, zostały wytworzone za pomocą wyłaczarki dwuślimakowej na przemysłowej linii produkcyjnej w firmie *POLIMARKY* w Rzeszowie. Pozostałe kompozyty o zawartości włókna szklanego 5, 10 lub 15% wytworzono, używając wtryskarki firmy *KRAUSS MAFFEI KM 65-160 C4*, dodając do kompozytów z maksymalnymi zawartościami napełniaczy odpowiedniej ilości PA6.

Do wyznaczenia współczynnika intensywności naprężeń stosuje się próbki trójpunktowo zginane, oznaczane jako SENB (Single Edge Notch Bend). Próbki typu SENB (rys. 1) wykonano metodą wtryskiwania za pomocą formy wtryskowej dwugniazdowej skonstruowanej i wykonanej w ramach projektu badawczego 4 T08 E 032 23. Forma składa się z dwóch części: stałej przymocowanej do korpusu wtryskarki i ruchomej przesuwanej po prowadnicach zamocowanych do korpusu. W części ruchomej zamontowano wymienną wkładkę formującą - matrycę, a w części nieruchomej wkładkę, w której zamocowano poprzez połączenie wciskowe element formujący karb prostokątny próbki. Temperaturę formy ustalano za pomocą termostatu *WITTMANN Tempro Plus 140*. Na rysunku 2 przedstawiono natomiast widok formy dwugniazdowej zamontowanej na wtryskarce. Wymiary próbki SENB muszą spełniać warunek płaskiego stanu odkształcenia PSO. Uznaje się, że warunek ten zachodzi wówczas, gdy spełniona jest nierówność [6, 7]:

$$B, a, W / 2 \geq \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{Re}} \right)^2$$

w której:

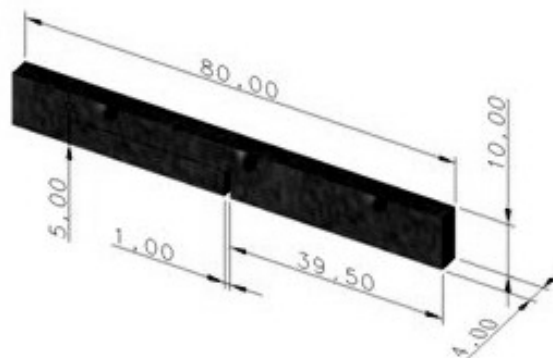
B - szerokość próbki,

a - długość karbu,

W - wysokość próbki,

K_{Ic} - współczynnik intensywności naprężeń,

σ_{Re} - granica plastyczności.



Rys. 1. Próбка SENB używana do oznaczenia współczynnika intensywności naprężeń

Fig. 1. SENB sample



Rys. 2. Widok formy wtryskowej dwugniazdowej
Fig. 2. View of double-cavity injection mould

Ważną czynnością przed pomiarami odporności na pękanie jest wykonanie przedpęknięcia zmęczeniowego, którego zadaniem jest maksymalne wyostrenie wierzchołka szczeliny. Najważniejszym ustaleniem norm w tym zakresie jest to, aby długość przedpęknięcia nie była mniejsza od 1,5 mm [6, 7].

Aparatura i metodyka badań

Jako miarę odporności na pękanie przyjęto krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q . Wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q obliczono wykorzystując równanie [1-5]:

$$K_Q = \frac{4 \cdot P_Q \cdot Y}{B \cdot \sqrt{W}}$$

w którym:

- P_Q - siła krytyczna, N,
- Y - funkcja podatności,
- B - grubość próbki, m,
- W - wysokość próbki, m.

Występująca w liczniku funkcja podatności Y może być obliczona na podstawie stosunku wymiarów: długości szczeliny i wysokości próbki (a/W). Dla próbki SENB [1-5]:

$$Y = \frac{6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 1,99 - \frac{a}{W} \cdot \left[1 - \left(\frac{a}{W}\right) \right] \cdot \left[2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right\}}{\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{a}{W}\right) \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Wyznaczenie krytycznej wartości obciążenia P_Q polega na umieszczeniu na uzyskanym wykresie siły w funkcji przemieszczenia ciecznej, pochylonej o 5% w stosunku do wcześniej wyznaczonej stycznej do wy-

kresu. Miejsce przecięcia siecznej z wykresem wyznacza siłę P_Q . Należy też pamiętać o sprawdzeniu wartości dopuszczalnej nieliniowości wykresu oraz ilorazu siły P_Q w stosunku do siły maksymalnej P_{max} , tak by ta ostatnia nie przewyższała krytycznej o więcej niż 10% [6, 7].

Badania odporności na pękanie przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Inspekt Desk 20 firmy Hegewald & Peschke wyposażonej w uchwyt do trójpunktowego zginania. Widok maszyny wraz z zamocowaną próbką SENB przedstawia rysunek 3.

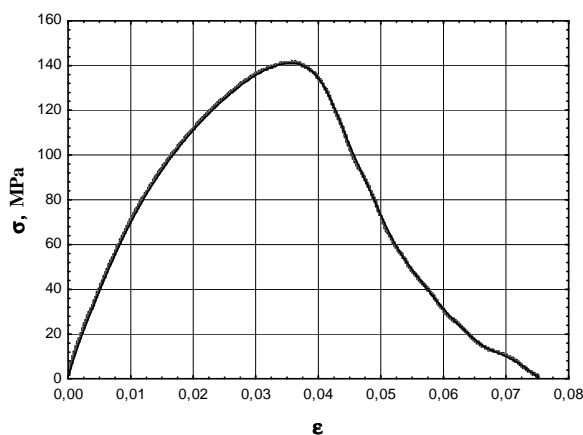


Rys. 3. Widok maszyny wytrzymałościowej wraz z zamocowaną próbką SENB

Fig. 3. View of tensile machine with attached sample SENB

WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 4 zamieszczono przykładową zależność naprężenia w funkcji odkształcenia dla PA6 z 25% zawartością napełniacza włóknistego w postaci włókna szklanego ciętego. Na rysunku tym można zauważyć, iż w miarę zwiększenia odkształcenia próbki rośnie wartość naprężenia. Dzieje się tak, aż próbka osiągnie odkształcenie 0,036 mm, wtedy próbka z PA6_30GF wykazuje maksymalne naprężenie 140 MPa. Po osiągnięciu maksymalnego naprężenia dalsze zwiększanie odkształcenia nie powoduje zwiększenia wartości naprężenia, lecz jego gwałtowne zmniejszenie się. Na rysunku 5 przedstawiono zależność krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń K_Q od zawartości włókna szklanego ciętego w poliamidzie 6. W miarę wzrostu zawartości włókna szklanego ciętego w kompozycie PA6 wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q ulega podwyższeniu. Wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_Q dla PA6 wynosi około $3,44 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, a przy maksymalnej zawartości włókna szklanego wartość K_Q wzrosła do $7,3 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Modyfikacja fizyczna polegająca na dodaniu do osnowy poliamidowej 25% włókien szklanych spowodowała zwiększenie odporności na pękanie o 47%.



Rys. 4. Zależność naprężenia od odkształcenia dla kompozytu PA6 z 25% zawartością włókna szklanego ciętego

Fig. 4. Relationship between stress and strain of PA6 composite with 25% content of the glass fiber



Rys. 5. Zależność współczynnika intensywności naprężeń od zawartości włókna szklanego

Fig. 5. Relationship between stress intensity factor K_Q and content glass fiber

WNIOSKI

Wraz ze zwiększeniem zawartości włókna szklanego w osnowie poliamidowej można zaobserwować zwiększenie się wartości współczynnika intensywności naprężeń K_Q . Wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_Q dla PA6 wynosi około $3,44 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, zaś przy maksymalnej zawartości włókna szklanego wartość K_Q wzrosła do $7,3 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Modyfikacja fizyczna polegająca na dodaniu do osnowy PA6 włókien szklanych spowodowała zwiększenie się odporności na pękanie. Zastępowanie tworzyw polimerowych ich kompozytami stwarza szerokie możliwości podwyższania odporności na pękanie tych materiałów. Modyfikowanie fizyczne kompozytów polimerowych pod tym kątem wymaga jednak szczegółowej analizy zjawisk występujących w skali mikro w procesach zniszczenia tych materiałów.

LITERATURA

- [1] Bochenek A., Elementy mechaniki pękania, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.
- [2] German J., Podstawy mechaniki pękania, Politechnika Krakowska, Kraków 2001.
- [3] Neimitz A., Mechanika pękania, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1998.
- [4] Erdogan F., Fracture mechanics, International Journal of Solids and Structures 2000, 37, 171-183.
- [5] Anderson T.L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 1995.
- [6] Norma PN-87/H-04335, Metoda badania odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
- [7] ASTM D5045-93, Plain - Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastics Materials.