

Izabella Hyla¹, Artur Lizurek²

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

ZASTOSOWANIE BADAŃ DYNAMICZNYCH DO ANALIZY MECHANIZMU PĘKANIA UDAROWEGO KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH

Polimerowe kompozyty włókniste, wykorzystywane w konstrukcjach inżynierskich w formie wielowarstwowych laminatów, charakteryzują się dużą wrażliwością na obciążenia udarowe. Obciążenia te, nawet wówczas gdy nie prowadzą do powstania złomu, powodują powstawanie w materiale mikropęknięć, co skutkuje spadkiem wytrzymałości laminatu. Zmieniają się w materiale zarówno wartości charakteryzujące jego wytrzymałość, jak również kinetyka rozwoju procesu zniszczenia. O odporności dynamicznej kompozytów włóknistych decyduje więc nie tylko wartość udarności, ale również stosunek poszczególnych członów energii zniszczenia w czasie od momentu obciążenia aż do momentu zniszczenia materiału. Na te dwa elementy zatem zwrócono uwagę w badanych kompozytach. W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań uzyskane dla kompozytu: żywica poliestrowa-włókna szklane, poddanego próbie trójpunktowego zginania dynamicznego. Badania realizowano przy wykorzystaniu oprzyrządowanego młota wahadłowego typu Charpy. Oprzyrządowanie młota pozwala rejestrować siłę zginającą i towarzyszącą jej ugięcie próbki w bardzo małych przedziałach czasu, co umożliwia uzyskanie wykresu siła-odkształcenie (rys. 1). Wykres ten ilustruje wydatek energii niezbędnej do zniszczenia próbki zarówno w obszarze odkształceń sprężystych (U_e), jak i w obszarze rozwoju nieodwracalnych zmian dekohezyjnych (U_p). Uzyskane wyniki badań wykazały, że o udarności kompozytu, a także jego odporności na pękanie, decydujące znaczenie ma obok ilości włókien, przede wszystkim ich postać, w jakiej są wprowadzone do osnowy. Włókna ciągle wprowadzone w formie tkaniny zapewniły znacznie większą udarność niż włókna krótkie wprowadzone w formie maty (rys. 2). Pozostaje to w ścisłym związku z kinetyką rozwoju zniszczenia kompozytu (rys. 3), o czym można również wnioskować na podstawie obrazu powstającego złomu.

Analiza wpływu głębokości karbu nanoszonego na próbki wykazała (rys. rys. 4 i 5), że wraz ze wzrostem głębokości karbu zmniejsza się nie tylko odporność udarowa kompozytu, ale również zmienia się kinetyka rozwoju jego zniszczenia. W kompozytach zbrojonych tkaniną wpływ głębokości karbu uwidacznia się przede wszystkim w drugim członie całkowitej energii zniszczenia (tzn. w wielkości energii U_p), natomiast w kompozytach zbrojonych matą obydwa człony całkowitej energii zniszczenia, tzn. zarówno energia U_e , jak i U_p , ulegają zbliżonej zmianie. Może stanowić to potwierdzenie faktu istnienia odmiennych warunków i możliwości rozwoju mikropęknięć w obu typach zbrojenia. O ile przy zbrojeniu włóknem krótkim pęknięcie może rozwijać się tylko w osnowie i omijać włókna, to przy zbrojeniu włóknem ciągłym makrodefekt musi pokonać oprócz oporu osnowy również opór włókien.

APPLICATION OF DYNAMIC TESTING TO THE ANALYSIS OF IMPACT STRENGTH IN LAMINATES COMPOSITES

Fibrous polymer composites in the form of multilayer laminates show high sensitivity to any impact loads. Even if we assume that the loads do not lead to fracture they definitely cause microcracks formation, which in turn result in the loss of laminate strength. The strength values of the material as well as the kinetics of the destruction process undergo significant changes. Therefore the dynamic strength of fibrous composites is not only effected by impact strength value but also by the interrelation between elements of the destructive energy in the period between load initiation and the moment of material destruction. Therefore our studies on composites focused on the above problem. The paper presents test results obtained for the composite: polyester resin-glass fibres, which has been subjected to a three-point dynamic bending test. The tests have been performed with Charpy pendulum machine. The instrumentation of the machine enables to record the bending force and the sample deflection at very small time intervals. This helps obtain force-strain diagram (Fig. 1). The diagram illustrates the amount of energy required for destruction of the sample both within elastic strain range (U_e) and the range of irreversible decohesive changes (U_p). The results obtained indicated that the impact strength of the composite and its crack resistance strongly depend on the number of fibres and the form in which they are introduced into the matrix. Continuous filament introduced in the form of a woven fabric ensured better impact strength than short fibres introduced in the form of a mat (Fig. 2). This remains in close dependence with the kinetics of composite destruction process (Fig. 3). Such conclusions may be drawn from the image of the fracture.

The analysis of the crack length (Figs 4 and 5) showed that the deeper the crack was the smaller the impact strength of the composite became but at the same time different kinetics of its destruction. In composites reinforced with a fabric the crack length effect is visible mainly in the second element of the total destructive energy (i.e. U_p energy value). In composites reinforced with a mat both elements of the total destructive energy (i.e. U_e and U_p) undergo similar change. This might prove the existence of different environment and different possibilities for microcrack development in both types of reinforcements. In case of short fibre reinforcement the crack can develop only in the matrix and avoid fibres. However at continuous fibre reinforcement the macrodefect has to overcome both resistance of the matrix and that of the fibres.

¹ prof. dr hab. inż., ² mgr inż.

WSTĘP

Polimerowe kompozyty wielowarstwowe, zwane również w języku potocznym laminatami, są wykorzystywane w praktyce w wielu odpowiedzialnych konstrukcjach inżynierskich. Konstruktorzy obiektów latających lub pływających chętnie wykorzystują tego rodzaju kompozyty z uwagi na wysoki wskaźnik tzw. wytrzymałości właściwej i właściwego modułu sprężystości [1].

Jednak, obok tych liczących się zalet, ta grupa materiałów ma również pewne wady, do których zalicza się m.in. dużą wrażliwość na obciążenia uderowe. Obciążenia te, nawet w tych przypadkach, gdy nie prowadzą do powstania złomu, powodują jednak powstawanie w materiale poudarowych mikroszczelin, co prowadzi do spadku wytrzymałości kompozytu. Zmieniają się w materiale zarówno wartości charakteryzujące jego wytrzymałość, jak również kinetyka rozwoju procesu zniszczenia. Znajomość wpływu elementów budowy laminatu na jego zachowanie się w sytuacji uderowego obciążenia ma zatem istotne znaczenie w procesie projektowania i eksploatacji odpowiedzialnych konstrukcji inżynierskich. Prezentowana praca ma na celu przedstawienie wyników badań wskazujących, w jakim stopniu postać zbrojenia oraz głębokość karbu mogą wpływać na udarność polimerowych kompozytów warstwowych oraz kinetykę rozwoju procesu ich zniszczenia.

WARUNKI BADAŃ

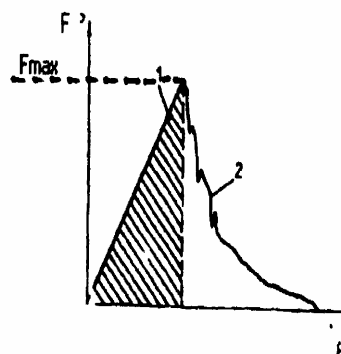
Metodyka i aparatura

W badaniach wykorzystano próbę dynamicznego trójpunktowego zginania próbek z karbem. Do tego celu zastosowano młot wahadłowy typu Charpy'ego, RESIL 50, który dzięki dodatkowemu oprzyrządowaniu pozwala określić nie tylko udarność, ale również zmiany siły zginającej i towarzyszące jej odkształcenia, w bardzo małych przedziałach czasu [2, 3]. Umożliwia to graficzną rejestrację przebiegu zmian wydatkowanej energii podczas zginania uderowego. Mając do dyspozycji niezbędny program obliczeniowy, można za pomocą tej próby określić zarówno wartość całki J dla badanych materiałów, jak również tzw. wskaźnik lepkości DI , związany z kinetyką rozwoju procesu zniszczenia.

Wskaźnik ten: $(DI = U_e/U_p)$ określa proporcję pomiędzy pracą stanu sprężystego U_e , kończącą się osiągnięciem siły maksymalnej F_{max} (rys. 1), odpowiadającej osiągnięciu przez materiał największego, możliwego poziomu obciążenia, a pracą U_p , charakteryzującą opór materiału w procesie rozwoju jego zniszczenia. Można również wyznaczyć całkę J_{Id} , korzystając z zależności zaproponowanej przez Sumptera i Turnera [4, 5]

$$J_{Id}^{ST} = \frac{\eta_e A_e}{B(w-a)} + \frac{\eta_p A_p}{B(w-a)} (1-M)$$

w której wyodrębnia się obie składowe całkowitej energii zniszczenia.



Rys. 1. Wykres siła-odkształcenie (F - f) uzyskany podczas dynamicznego trójpunktowego zginania na oprzyrządowanym młocie wahadłowym typu Charpy'ego: 1 - U_e - praca stanu sprężystego, 2 - U_p - praca związana z rozwojem powstałych defektów

Fig. 1. Graph force-deformation (F - f) obtained in Charpy hammer test: 1 - U_e - work of elastic strain, 2 - U_p - work for non linear fracture evolution

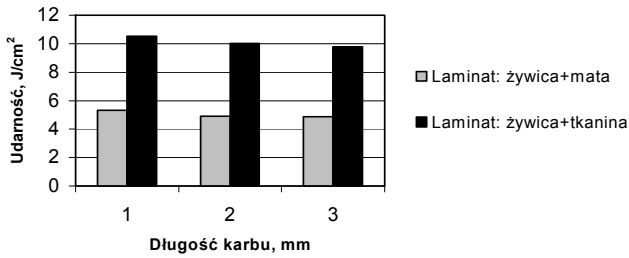
Materiały stosowane do badań

W badaniach stosowano próbki kompozytowe, wielowarstwowe, o wymiarach i kształcie zgodnymi z zaleceniami normy PN-81/C-89029. Osnowę kompozytu stanowiła żywica POLIMAL 109E, a zbrojenie włókna szklane. Włókna szklane stosowano w postaci tkaniny - co uznano za zbrojenie włóknem ciągłym - lub w postaci maty, co uznano za zbrojenie włóknem nieciągłym. Wybór odpowiedniego typu tkaniny i maty oraz ilość warstw pozwalała na uzyskanie określonej wielkości udziału objętościowego zbrojenia. Żywicę poliestrową utwardzono przy użyciu 0,4% przyspieszacza w postaci naftianianu kobaltu oraz 4% inicjatora wodoronadtlenku metyloetyloketonu. Proces utwardzania przebiegał w temperaturze pokojowej, pod ciśnieniem atmosferycznym, w ciągu 24 godzin. Do zbrojenia próbek wykorzystano włókno szklane E wprowadzone do osnowy w postaci maty (EM 1004/450/125) oraz w postaci tkaniny (STR 008-580-110). Na próbkach naniesiono karb o zróżnicowanych głębokościach: 1; 1,5; 2; 2,5; 3 mm. Prezentowane wyniki badań ograniczono do grupy próbek o niezmiennym udziale włókien zbrojących, wynoszącym 30% [6].

UZYSKANE WYNIKI I ICH ANALIZA

Dla zilustrowania wpływu głębokości karbu na udarność kompozytu zbrojonego włóknem ciągłym lub włóknem krótkim przedstawiono na rysunku 2 histogram oparty na średnich wartościach uzyskanych co najmniej z 5 pomiarów.

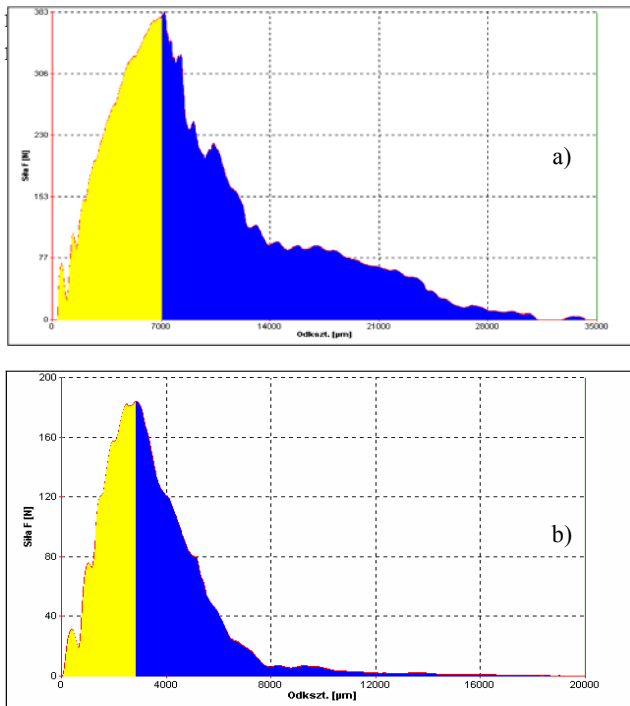
Przedstawione wyniki badań wskazują na to, że zmiana głębokości karbu w zakresie 1÷3 mm nie wywiera w zasadzie istotnego wpływu na uderność kompozytu, niezależnie od tego, czy osnowa zbrojona jest włóknem ciągłym czy nieciągłym. Natomiast wartość bezwzględna uderności zależy w sposób istotny od postaci włókien zbrojących. Przy zbrojeniu włóknem ciągłym uderność niemal dwukrotnie przewyższa uderność kompozytu zbrojonego włóknem krótkim.



Rys. 2. Wykres zależności uderności od długości karbu dla podanych laminatów

Fig. 2. Influence of the length of crack on the Charpy impact strength

Zwykła próba uderności nie pozwala jednak sformułować żadnych wniosków dotyczących wielkości części składowych energii zniszczenia próbki kompozytowej, na podstawie czego można by wnioskować o kinetyce rozwoju procesu zniszczenia. Zatem do osiągnięcia tego celu wykorzystano specjalne oprzyrządowanie młota wahadłowego, dzięki któremu rejestrowano wykresy zginania próbki obciążonej dynamicznie. Przykładowo uzyskiwane wykresy przedstawione zostały na

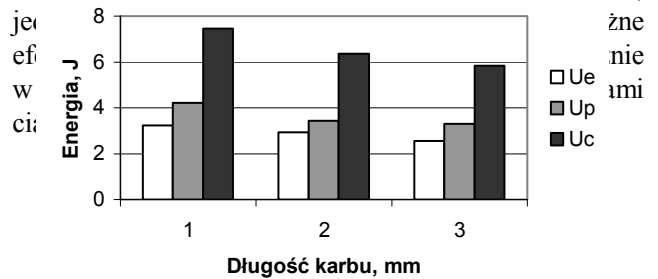


Rys. 3. Charakterystyka zniszczenia laminatu (karb 2,0 mm): a) żywica+tkanina, b) żywica+mata

Fig. 3. Fracture characteristic of laminates (length of crack 2.0 mm): a) resin+woven, b) resin+mat

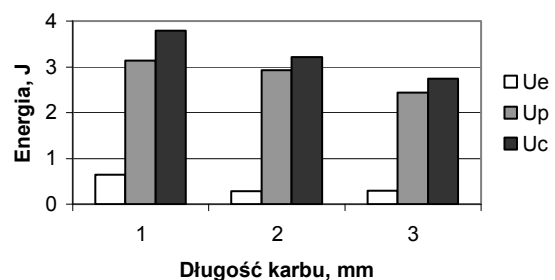
Długość karbu naniesionego na próbkę w obu przedstawionych wykresach jest identyczna i wynosi 2 mm. Jak widać z wykresów, kinetyka rozwoju procesu zniszczenia w obu przypadkach różni się w sposób istotny. W próbkach zbrojonych matą ilość energii wydatkowana na odkształcenia, aż do momentu uzyskania siły maksymalnej (U_e), jest niewiele mniejsza od energii wydatkowanej na dalszy rozwój zniszczenia (U_p). Natomiast w kompozytach zbrojonych tkaniną ilość wydatkowanej energii U_p znacznie przewyższa ilość energii U_e . Włókna ciągłe w postaci tkaniny stanowią, jak widać, istotną przeszkodę w procesie rozwoju zniszczenia kompozytu. Inna kinetyka rozwoju procesu zniszczenia może zatem m.in. stanowić uzasadnienie tak dużej różnicy w uderności obu badanych kompozytów. Wpływ długości karbu na proporcje omawianych składowych energii zniszczenia pokazują histogramy na rysunkach 4 i 5.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że w kompozytach zbrojonych matą zmiana długości karbu wywiera w zasadzie taki sam wpływ na obie części energii zniszczenia, zarówno na U_e , jak i na U_p . Natomiast w kompozytach zbrojonych tkaniną wpływ ten uwidacznia się przede wszystkim w odniesieniu do energii U_p . Potwierdza to istotną rolę wpływu postaci fazy zbrojącej na



Rys. 4. Wykres zależności energii od długości naciętego karbu dla próbek pobranych z laminatu żywica+mata

Fig. 4. Fracture energy - length of crack diagram for resin+mat specimens



Rys. 5. Wykres zależności energii od długości naciętego karbu dla próbek pobranych z laminatu żywica+tkanina

Fig. 5. Fracture energy - length of crack diagram for resin+woven specimens

LITERATURA

- [1] Hyla I., Beitrag zum Schädigungs - und Bruchverhalten von faserverstärkten Verbundwerkstoffen, Hutnictwo, ZN 33, Gliwice 1989.
- [2] Grellmann W., Seidler S., Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen, Springer Verlag 1998.
- [3] Hyla I., Metoda określania odporności na pęknięcie tworzyw polimerowych, Materiały Konferencyjne nt. Kompozyty i ich wykorzystanie w technice 2000.
- [4] Sumpter J.G.D., Turner C.E., Cracks and Fracture, ASTM STP 601, 1976.
- [5] Neimitz A., Mechanika pęknięcia, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [6] Hyla I., Myalski J., Zastosowanie dynamicznej całki J do określenia mechanizmów zniszczenia kompozytów, Sprawozdanie z BW-520/RM (praca niepublikowana).

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński