



Danuta Witemberg-Perzyk

Politechnika Warszawska, Instytut Mechaniki i Konstrukcji, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, Poland
Corresponding author. E-mail: dperzyk@wip.pw.edu.pl

Otrzymano (Received) 03.02.2008

KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE DLA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH PRZY OBCIĄŻENIACH ZALEŻNYCH OD CZASU

W wielu pracach stwierdzono wpływ przebiegu obciążania (lub deformacji) w czasie, czyli historii odkształcenia, na naprężenie niszczące dla materiałów reologicznych, w tym kompozytów polimerowych. Do opisu tego typu efektów mogą być zastosowane kryteria zniszczenia, wykorzystujące pojęcia składników właściwej energii odkształcenia postaciowego, a w szczególności ich rozszerzone wersje, uwzględniające akumulację i dysypację energii wskutek zjawisk reologicznych. Celem niniejszej pracy była ocena stosowności tych kryteriów dla wybranego kompozytu polimerowego w próbach jednoosiowego rozciągania z różnymi programami obciążania. Stwierdzono, że żadna ze składowych energii odkształcenia nie jest stała, a zatem nie może być bezpośrednio zastosowana jako kryterium zniszczenia.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, naprężenie niszczące, historia odkształcenia, energetyczne kryterium zniszczenia

FAILURE CRITERIONS FOR POLYMER COMPOSITES SUBJECTED TO TIME-DEPENDENT LOADINGS

The mechanical properties of polymer materials, including composites, can be significantly time-dependent. In particular, an influence of the course of loading or deformation, i.e. history effect, on failure stress has been observed and described in several previous works. An acknowledged approach to the formulation of the failure criterion of inelastic materials is that utilizing the specific strain energy concept. In the present work tensile strength of a woven fiber reinforced thermoplastic composite was investigated. The tensile tests were carried out in the warp direction, using the MTS model 810 machine, which allowed arbitrary load or cross-head displacement programming in time. Two basic types of loading programs were examined: monotonic with two different machine cross-head speeds 0.05 mm/min and 5 mm/min as well as creep at several constant load levels, preceded by fast monotonic loading. The stored and dissipated energy components were calculated from a rheological material model consisting of the following elements connected in series: Hook's term, time-independent plastic term responsible for deviation of the stress-strain curve due to preceding structure damages as well as Kelvin's and Newton's terms, responsible for time-dependent energy dissipation and conservation. The model's parameters were calculated by fitting the theoretical curves to stress-strain-time experimental results using the simulated annealing optimization method. The results presented indicate that none of the main energy components is constant, but all of them seem to be linear functions of the failure stress and, consequently, they cannot be directly used as a failure criterion. The failure criterion requires further elaboration and validation for various types of time-load time-dependencies. A good starting point may be the stored strain energy, modified by including its dependency on stress.

Keywords: polymer composites, failure stress, strain history, strain energy failure criterion

WSTĘP

Własności mechaniczne kompozytów polimerowych mogą w znaczącym stopniu zależeć od czasu [1-6]. Stwierdzono ponadto wpływ przebiegu obciążania (lub deformacji) w czasie na naprężenie niszczące polimerowych materiałów reologicznych, w tym kompozytów, czyli występowanie w nich tak zwanych efektów historii odkształcenia [7-9].

Modele wytrzymałości czasowej kompozytów o osnowie polimerowej stanowiły przedmiot stosunkowo nielicznych prac, w większości omówionych w przeglądzie

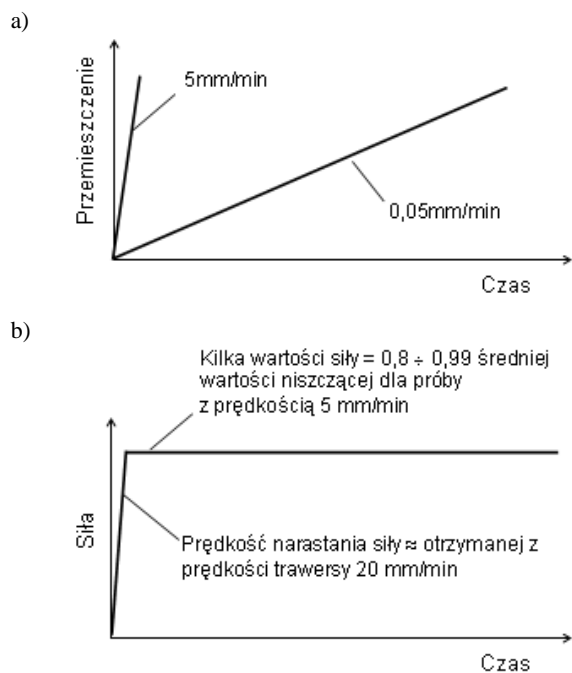
[1]. Zasadniczo traktują one kompozyt jako ośrodek ciągły, przy czym można je podzielić na dwie główne grupy. Pierwsza opiera się na mechanice kruchego pęknięcia materiałów, jednakże brak jest prac dotyczących wytrzymałości czasowej kompozytów wzmacnianych włóknem ciągłym. Przyczyną jest z pewnością złożoność zagadnienia, wymagającego m.in. uwzględnienia tzw. mieszanego sposobu obciążenia w mechanice kruchego pęknięcia.

Druga grupa modeli wykorzystuje koncepcję składników krytycznej energii właściwej (tj. odniesionej do jednostki objętości) odkształcenia postaciowego, przyjmowanych jako kryterium zniszczenia materiału. Koncepcja ta sformułowana została po raz pierwszy przez Reintera i Weissenberga [10], a następnie rozszerzona przez Bychawskiego i Olszaka [11]; jej szersze omówienie można znaleźć w pracy [7].

Celem niniejszej pracy była ocena stosowalności kryteriów zniszczenia wykorzystujących pojęcia składników właściwej energii odkształcenia postaciowego, a w szczególności ich rozszerzone wersje, uwzględniające akumulację i dysypację energii wskutek zjawisk reologicznych [1, 8, 10, 11], dla wybranego kompozytu polimerowego, w próbach jednoosiowego rozciągania z różnymi programami obciążania.

METODYKA BADAŃ

Materiałem wybranym do badań był kompozyt o osnowie termoplastycznej (poliwęglan) wzmocniony tkaniną szklaną (szczegółową charakterystykę materiału oraz próbek podano w pracy [9]). Wszystkie próby mechaniczne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy MTS, model 810, która umożliwiała dowolne programowanie przebiegów obciążenia lub przemieszczenia trawersy w czasie. Wydłużenie mierzono za pomocą ekstensometru o bazie pomiarowej 50 mm. Zastosowano trzy programy obciążania, pokazane na rysunku 1.

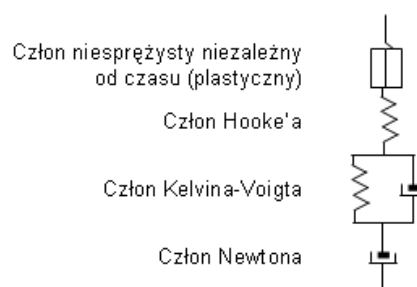


Rys. 1. Typy programów obciążania zastosowane w próbach rozciągania kompozytu: a) stała prędkość przemieszczania trawersy maszyny (stała prędkość odkształcania); b) stałe obciążenie (pełzanie)

Fig. 1. Types of loading programs applied in tensile testing of the composite: a) constant machine crosshead speed; b) constant load (creep tests)

KRYTERIA ZNISZCZENIA OPARTE NA WŁAŚCIWEJ ENERGII ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO

Składniki właściwej energii odkształcenia (akumulowanej i dysypowanej) obliczono na podstawie makroskopowego modelu materiału składającego się z 4 elementów połączonych szeregowo (rys. 2). Element niesprężysty niezależny od czasu (plastyczny) odpowiada za odchylenie krzywej rozciągania od prostej sprężystości wynikłe wskutek postępujących uszkodzeń struktury [9, 12], natomiast reologiczne człony Kelvina-Voigta oraz Newtona odpowiadają za zachowanie materiału zależne od czasu.



Rys. 2. Schemat modelu mechanicznego przyjętego w pracy do obliczeń składników właściwej energii odkształcenia postaciowego

Fig. 2. Schematic illustration of the mechanical model adopted for the specific deviatoric strain energy components calculations

Parametry modelu obliczono przez dopasowanie krzywych teoretycznych do doświadczalnych w następujący sposób: Jako pierwszą wyznaczano wartość modułu Younga na podstawie średniego nachylenia początkowych fragmentów krzywych naprężenie-odkształcenie. Następnie znajdowano parametry obu członów zależnych od czasu (Kelvina-Voigta oraz Newtona) przez dopasowanie krzywych teoretycznych do doświadczalnych dla prób pełzania (po osiągnięciu stałego obciążenia). W ostatnim kroku wyznaczano odkształcenie członu plastycznego jako różnicę pomiędzy odkształceniem całkowitym a sumą odkształceń: sprężystego i lepkosprężystego. Obliczenia wykonano, zakładając dwie różne wartości współczynnika Poissona dla odkształceń sprężystych: 0, 1 i 0,5, uzyskując jakościowo identyczne, zaś ilościowo - bardzo zbliżone wyniki. Wykresy przedstawione w dalszej części pracy pokazane zostaną dla wartości tego współczynnika równej 0,5.

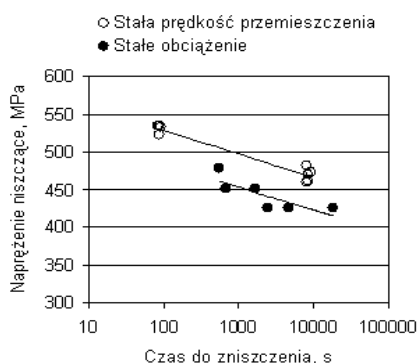
Dopasowanie krzywych teoretycznych do doświadczalnych dla pełzania wykonano, stosując specjalnie napisane w tym celu oprogramowanie, wykorzystujące dwie metody optymalizacji. Pierwsza to metoda symulowanego wyżarzania, stwarzająca znaczne szanse na znalezienie minimum globalnego funkcji błędów dopasowania. Polega ona na losowym przyjmowaniu wartości współczynników równania modelowego wg określonych zasad. W pierwszej serii losuje się je (wielokrotnie) w bardzo szerokim zakresie, gwarantującym, że

poszukiwane minimum błędu znajdzie się wewnątrz tego zakresu. Następnie przechodzi się do kolejnej serii losowań, w zakresie węższym, którego środek ustala się w punkcie, który dał minimalny błąd w poprzedniej serii. Szerokości przedziałów dla kolejnych serii losowań maleją w określonym stosunku. Metoda ta może być stosowana samoistnie i wówczas stosuje się od 5 do 10 przedziałów, przy czym szerokość ostatniego dobiera się zgodnie z pożądaną wartością błędu położenia minimum. Często metodę tę stosuje się jako wstępną w celu ustalenia optymalnych początkowych wartości dla metod gradientowych. Te drugie są dokładniejsze, ale z zasady prowadzą do znalezienia najbliższego wartości startowej minimum błędu dopasowania, a więc mogą znajdować minima lokalne. W wykorzystywanym w obliczeniach programie komputerowym metoda gradientowa wykorzystuje procedury dodatku „Solver” pakietu MSExcel.

WYNIKI

Na rysunku 3 pokazano wartości naprężeń niszczących uzyskane we wszystkich próbach w funkcji czasu. Znacząco niższe wartości uzyskano dla tych programów obciążania, które obejmowały pełzanie przy stałym obciążeniu, w porównaniu do prób ze stałą prędkością odkształcania. Istotne jest, że różnice te wystąpiły dla prób wykonywanych z niską wartością prędkości odkształcania i prób pełzania, w których uzyskano zbliżone czasy do zniszczenia.

Na rysunku 4 pokazano przykład wyniku dopasowania krzywej pełzania wyznaczonej z szeregowo połączonych członów Kelvina-Voigta i Newtona do punktów doświadczalnych. Należy zauważyć, że stosunkowo znaczny rozrzut punktów doświadczalnych wynika stąd, że odkształcenie pełzania jest bardzo małe w stosunku do całego odkształcenia kompozytu (sprężystego i plastycznego).

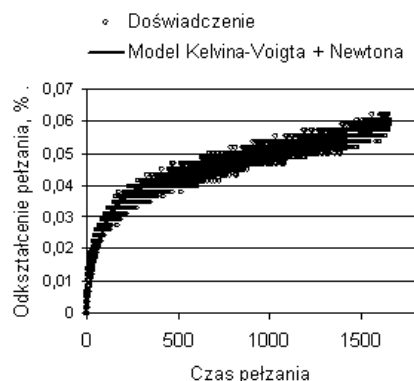


Rys. 3. Wartości doświadczalne naprężenia niszczącego w funkcji czasu do zniszczenia

Fig. 3. Failure stress values obtained experimentally vs time-to-failure

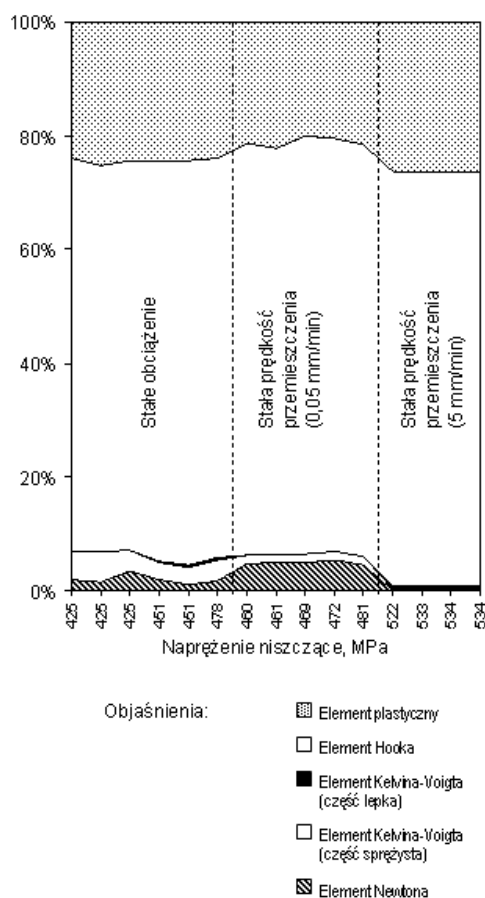
Dla wszystkich prób, których wyniki przedstawiono na rysunku 3, wyznaczono wszystkie składniki energii odkształcenia postaciowego, przy założeniu wymienio-

nych wyżej dwóch skrajnych wartości współczynników Poissona. Na rysunku 5 pokazano przykładowe udziały poszczególnych elementów modelu w całkowitej wartości energii odkształcenia (pracy naprężeń). Należy zwrócić uwagę, że główna część energii akumulowanej pochodzi od członu Hooke'a, podczas gdy główna część energii dysypowanej związana jest z członem plastycznym (niezależnym od czasu).



Rys. 4. Przykładowy wynik działania procedury optymalizacyjnej doboru parametrów członów lepko-sprężystych modelu

Fig. 4. Exemplary result of the fitting procedure for the Kelvin-Voigt's and Newton's elements constants evaluation

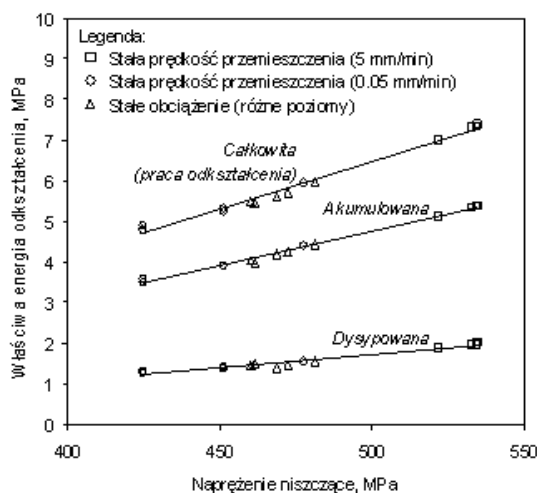


Rys. 5. Udziały elementów modelu w energii właściwej odkształcenia postaciowego w chwili zniszczenia kompozytu dla wszystkich prób przy założeniu współczynnika Poissona = 0,5

Fig. 5. Contributions to the failure strain energy components in the stress work of model segments calculated for all the experiments for Poisson's ratio = 0.5

Na rysunku 6 główne składowe energii odkształcenia przedstawiono w funkcji naprężenia niszczonego. Widoczne jest, że żadna z tych składowych nie jest stała, a zatem nie może być bezpośrednio zastosowana jako kryterium zniszczenia.

Wszystkie składowe energie są najwyraźniej liniowymi funkcjami naprężenia niszczonego i leżą na wspólnych prostych, niezależnie od typu próby. Odnosząc się do rysunku 5, można zauważyć, że udział energii akumulowanej, który dla prób ze stałą wysoką prędkością odkształcenia był niemal całkowicie związany z członem Hooke'a, dla prób pełzania i z niską prędkością odkształcenia został częściowo zastąpiony przez energię pochodzącą od części sprężystej członu Kelvina-Voigta. Podobne zastąpienia można zaobserwować dla udziałów energii dysypowanej.



Rys. 6. Zależność głównych składowych energii odkształcenia postaciowego w chwili zniszczenia kompozytu od naprężenie niszczonego otrzymana dla wszystkich trzech typów prób przy założeniu współczynnika Poissona = 0,5

Fig. 6. Dependence of the main components of the macroscopic strain energy at composite failure on the failure stress, obtained in all three types of tests, calculated for Poisson's ratio = 0.5

Liniowa zależność krytycznej energii akumulowanej od naprężenia została ostatnio także zaproponowana przez innego autora jako wynik jego własnych badań [8]. Jednakże związek uzyskany w niniejszej pracy zawiera również znaczący wyraz wolny i może być przedstawiony w następującej postaci:

– dla współczynnika Poissona = 0,5:

$$\text{energia zakumulowana do zniszczenia} = 0,0169 \times \text{naprężenie niszczące} - 3,71$$

– dla współczynnika Poissona = 0,1:

$$\text{energia zakumulowana do zniszczenia} = 0,0122 \times \text{naprężenie niszczące} - 2,623$$

Ujemne wartości wyrazów wolnych wskazują, że tylko pewna część energii akumulowanej odkształcenia, przekraczająca pewną wartość progową, decyduje o zniszczeniu kompozytu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Naprężenie niszczące dla kompozytu polimerowego może nie tylko zależeć od prędkości odkształcania, ale także od przebiegu odkształcania lub obciążania w czasie. Zależność ta może mieć złożony charakter.

Podobnie jak w przypadku jednoskładnikowych materiałów polimerowych, kryteria akumulowanej części właściwej energii odkształcenia postaciowego Reiner-Weissenberga [10] oraz całkowitej energii odkształcenia postaciowego Bychawskiego i Olszaka [11] okazały się dla badanego materiału i przyjętych charakterystycznych sposobów obciążania niesłuszne.

Wykorzystanie składników właściwej energii odkształcenia postaciowego jako kryterium zniszczenia wymaga dalszych badań i analiz. Dobrym punktem wyjścia wydaje się być kryterium energii akumulowanej, zmodyfikowane przez uwzględnienie liniowej zależności tej energii od naprężenia.

LITERATURA

- [1] Jayaraman R., Fracture Criteria to Predict Creep Rupture of Polymers and Polymer Composites, TRIP (Elsevier) 1997, 5, 116-122.
- [2] Cardon A.H., Qin Y., Van Vossle C., Bouquet P., Prediction of the Residual Structural Integrity of a Polymer Matrix Composite Construction Element, Mech. Time-Depend. Mater. 2000, 4, 155-167.
- [3] Bocchieri R.T., Schapery R.A., Experimental Methods for Characterizing the Time-dependent Behavior of Fiber Composites with Growing Damage, Proc. Offshore Technol. Conf., Huston, USA 2000, 3, 355-364.
- [4] Raghavan J., Meschii M., Creep rupture of polymer composites, Compos. Sci. Technol. 1997, 57, 375-388.
- [5] Moore R.H., Dillard D.A., Time-Dependent Matrix Cracking in Cross-Ply Laminates, Compos. Sci. Technol. 1990, 39, 1-12.
- [6] Miyano Y., Nakada M., Muki R., Applicability of fatigue life-prediction method to polymer composites, Mechanics of Time-Dependent Materials 1999, 3, 141-157.
- [7] Witemberg-Perzyk D., Perzyk M.A., Applicability of energy yield criteria to glassy polymers, Acta Polymerica 1987, 38, 107-110.
- [8] Guedes R.M., Mathematical analysis of energies for viscoelastic materials and energy based failure criteria for creep loading, Mechanics of Time-Dependent Materials 2004, 8, 2, 169-192.
- [9] Witemberg-Perzyk D., Boczkowska A., Pakieła Z., Influence of loading course on failure stress of glass fabric reinforced polycarbonate composite, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 1, 51-55.
- [10] Reiner M., Plastic yielding in anelasticity, J. Mech. Phys. Solids 1960, 8, 255-260.
- [11] Bychawski Z., Olszak W., Energetyczna interpretacja stanów krytycznych w ciałach lepkosprężystych, IBTP Reports (Prace IPPT PAN) 1967, 2.
- [12] Osada T., Nakai A., Hamada H., Initial fracture behavior of satin woven fabric composites, Composites Structures 2003, 61, 333-339.

