MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
43, s. 91-96, Gliwice 2012

UWZGLĘDNIENIE OBCIĄŻEŃ MECHANICZNYCH PRZY WYZNACZANIU WSKAŹNIKA TEMPERATUROWEGO DLA LAMINATÓW POLIMEROWYCH

ANDRZEJ KATUNIN

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska
e-mail: andrzej.katunin@polsl.pl

Streszczenie. Wskaźnik temperaturowy określa graniczną wartość temperatury pracy laminatów polimerowych pod kątem ich właściwości elektroizolacyjnych. Często ten wskaźnik jest używany do określania wartości temperatury granicznej w zastosowaniach mechanicznych. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na to, że graniczna temperatura pracy przy obciążeniach mechanicznych może być znacznie niższa niż wskaźnik temperaturowy dla danego materiału. Ze względu na lepkosprężystość matrycy laminatu podczas obciążeń mogą występować efekty mające wpływ na wartość temperatury granicznej.

1. WSTĘP

Powszechne zastosowanie metriałów kompozytowych w praktyce inżynierskiej wymaga przeprowadzenia dokładnych badań w zakresie ich zachowania w różnych warunkach i środowiskach pracy, a także analizy przebiegu ich degradacji i zniszczenia.

Istotnym parametrem przy wykorzystaniu laminatów polimerowych do zastosowań konstrukcyjnych jest odporność cieplna, którą charakteryzuje się zazwyczaj na podstawie wskaźnika temperaturowego TI (temperature index) lub względnej wytrzymałości cieplnej RTE (relative thermal endurance) określającej dopuszczalną temperaturę pracy ciągłej. Zgodnie z normą IEC 60216 [1] i określonymi w niej metodami wyznaczania TI i RTE właściwości elektroizolacyjne i mechaniczne nie powinny obniżyć się więcej niż 50% od wartości początkowych po 20000 godzin przebywania w tej temperaturze. Odmiany TI i RTE oraz sposoby ich wyznaczania, opracowane przez Underwriters Laboratories, zostały przedstawione w pracach [2,3]. W niektórych pracach [4-6] TI jest używany do opisu degradacji mechanicznej materiałów w podwyższonej temperaturze. W świetle przeprowadzonej przez autora serii badań eksperymentalnych dotyczących zachowania dynamicznego [7], zmęczenia cieplnego i degradacji laminatów polimerowych [8,9] zaobserwowano, że TI nie może być uznany za temperaturę graniczną pracy elementów wykonanych z laminatów polimerowych, jeżeli występują w nich naprężenia mechaniczne. Doniesienia przedstawione w pracy [10] potwierdzają niezgodność wartości TI z rzeczywistymi warunkami pracy materiałów polimerowych przy występowaniu obciążeń mechanicznych. Istnieje zatem potrzeba określenia rzeczywistych wartości granicznych temperatury pracy z uwzględnieniem zjawisk pochodnych występujących przy obciążeniach mechanicznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań i obserwacji przedstawiono zakresy temperatury granicznej pracy laminatów polimerowych przy występowaniu obciążeń mechanicznych oraz wskazano na zależności tej temperatury od warunków obciążenia elementu. Zdolność do przenoszenia obciążeń mechanicznych w podwyższonych temperaturach określono na podstawie termomechanicznych testów dynamicznych, a uzyskane wyniki porównano z TI podawanym przez producenta badanych laminatów polimerowych. Wyniki badań eksperymentalnych dotyczących zmęczenia cieplnego tych materiałów wskazują na fakt, że w przypadku pewnych zakresów parametrów wymuszenia cyklicznego elementów wykonanych z takich materiałów występują efekty pochodne (efekt samorozgrzania) wynikające z ich lepkosprężystego zachowania oraz niskiej przewodności cieplnej. Parametry wymuszenia determinują wartość krytycznej temperatury samorozgrzania, która znajduje się w relacji z charakterystycznymi temperaturami dla danego materiału. Analizując uzyskane wyniki eksperymentalne oraz opis teoretyczny kinetyki reakcji w polimerach przy podwyższonych temperaturach, określono zależności pomiędzy wartościami temperatury granicznej pracy oraz parametrami wymuszenia i temperaturami charakterystycznymi badanego laminatu.

2. PRZYGOTOWANIE I PRZEBIEG BADAŃ

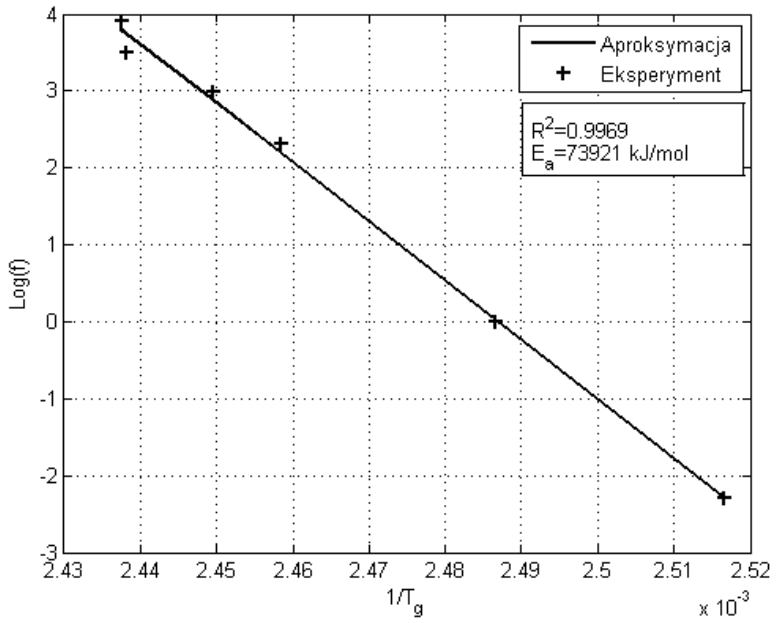
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem próbek wykonanych z laminatu z matrycą epoksydową zbrojonego tkaniną szklaną typu EPGC201 wg PN-EN-60893 dostarczonych przez Zakłady Tworzyw Sztucznych „Izo-Erg" S.A. w Gliwicach. W ramach weryfikacji właściwości materiałowych przeprowadzono statyczne testy wytrzymałościowe wg zaleceń norm PN-EN ISO 178 i PN-EN ISO 527-4 [7]. Wybrane właściwości materiałowe otrzymane w przeprowadzonych testach zostały zestawione w tabeli 1 i porównane z wartościami podawanymi przez producenta [11].

Tabela 1. Porównanie wybranych właściwości badanego laminatu

Wartości	Moduł sprężystości przy zginaniu, MPa	Naprężenia zrywające, MPa	Wskaźnik temperaturowy, °C
wg producenta [11]	24000	300	130
z eksperymentów [7]	24203.61	413	-

2.1. Dynamiczna analiza termomechaniczna

Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem dynamicznego analizatora termomechanicznego. Testy przeprowadzono na próbkach o długości 55 mm, szerokości 10 mm i grubości 2.5 mm w próbie trójpunktowego zginania przy wymuszeniu cyklicznym z wartością szczytową siły 5 N i amplitudą 0.08 mm. Próbki poddawano wymuszeniu z częstotliwościami 0.1, 1, 10, 20, 33.3 i 50 Hz dla zakresu temperatury 20÷200°C i stałej prędkości grania 3°C/min zgodnie z zaleceniami normy EN ISO 6721-1. Na podstawie otrzymanych modułu zachowawczego E', modułu stratnego E'' i tangensa kąta przesunięcia fazowego δ w funkcji temperatury wyznaczono wartości temperatury T_g jako wartości szczytowe funku E''–T, które zostały zestawione w funkcji częstotliwości na wykresie Arrheniusa (rys.1). Po zastosowaniu aproksymacji uzyskanych punków wyznaczono energię aktywacji E_a z nachylenia prostej aproksymującej.

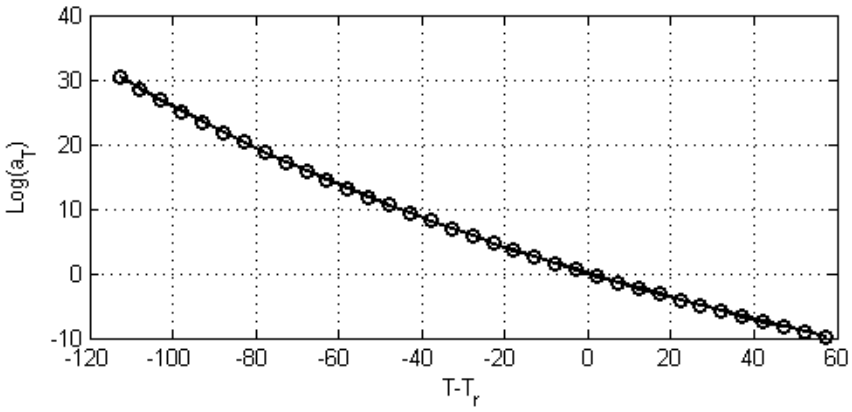


Rys.1. Wykres Arrheniusa dla uzyskanych wartości temperatury zeszklenia

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono współczynniki przesunięcia poziomego a_T wykorzystując równanie Arrheniusa

$$\log a_T = \frac{E_a \log e}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right), \tag{1}$$

gdzie R = 8.314472 J/Kmol jest stałą gazową, a T_r oznacza temperaturę referencyjną (w danym przypadku $T_r = T_g$). Współczynniki a_T przedstawiono na rys.2.

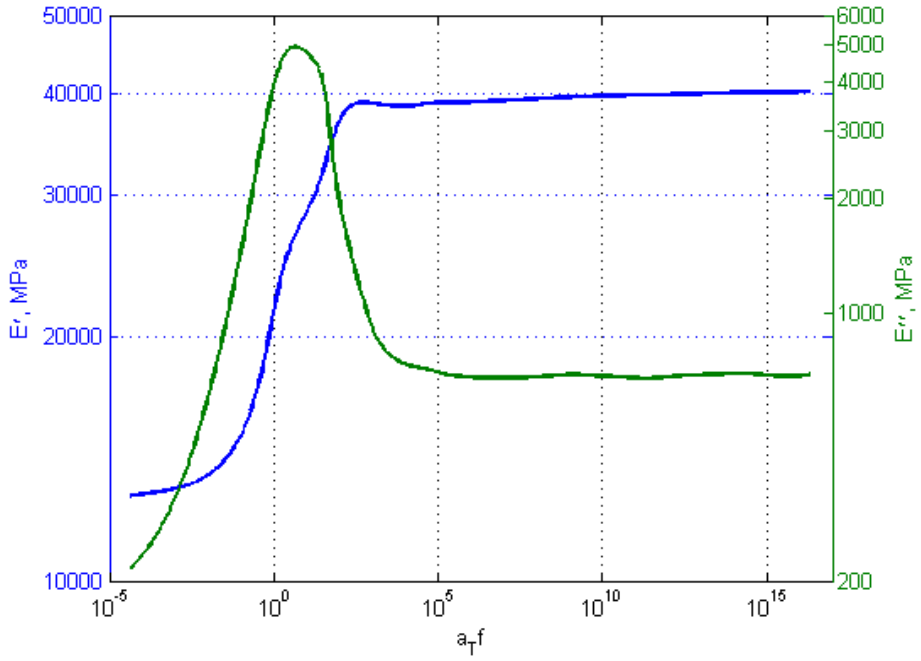


Rys.2. Współczynniki przesunięcia poziomego

Wykorzystując uzyskane wyniki, możliwe jest skonstruowanie krzywych wiodących dla *E'*, *E''* i tan δ opisujących zachowanie laminatu w różnych temperaturach oraz przy różnych częstotliwościach wymuszenia. W tym celu skany temperaturowe uzyskane podczas dynamicznej analizy termomechanicznej rozpatrywane w dziedzinie częstotliwości wykreślono w postaci krzywych izotermicznych, a następnie z zastosowaniem wyznaczonych współczynników przesunięcia poziomego przesunięto względem temperatury referencyjnej, co jest zgodne z zasadą superpozycji czasowo-temperaturowej

$$\bullet(f,T) = \bullet(a_T f, T_r), \tag{2}$$

gdzie $\bullet(\,)$ oznacza dany parametr dynamiczny. Krzywe wiodące dla modułów dynamicznych przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Krzywe wiodące dla modułów dynamicznych

Otrzymane krzywe wiodące pozwalają wyznaczyć wartości modułów dynamicznych dla poszczególnych częstotliwości wymuszenia i wartości temperatury. Biorąc pod uwagę, że *E'* odpowiada stanowi składową sprężystą, a *E"* składową lepką odpowiedzi dynamicznej materiału, można dokonać oceny spadku parametrów dla TI podanego przez producenta. Zakładając małą częstotliwość wymuszenia 0.001 Hz oraz temperaturę 130°C, można odczytać wartość modułu zachowawczego równą 12960 MPa. Dla identycznej częstotliwości wymuszenia i temperatury 20°C moduł zachowawczy wynosi 39760 MPa, czyli wzrost temperatury spowodował spadek o 67.4 %, co nie odpowiada wymoganiom normy [1], zgodnie z którą parametry materiału mogą się obniżyć nie więcej niż o 50% przy temperaturze równej TI.

2.2. Eksperyment dynamiczny

W przypadku obciążeń dynamicznych laminatów polimerowych, przy których występują znaczne naprężenia, dochodzi do wystąpienia efektu samorozgrzania będącego wynikiem lepkosprężystej natury matrycy laminatu. Przeprowadzone badania eksperymentalne [9] wskazują, że istnieje pewna wartość temperatury, krytyczna temperatura samorozgrzania, po której przekroczeniu następuje intensywna degradacja i zniszczenie struktury, dlatego z punktu widzenia eksploatacji elementów wykonanych z laminatów polimerowych jest ona wartością graniczną, która może być osiągana podczas pracy elementów.

Badania zostały przeprowadzone na próbkach o długości roboczej 40, 45, 50 i 55 mm, szerokości 10 mm i grubości 2.5 mm, które były wymuszane cyklicznie przy częstotliwościach 20, 25 i 30 Hz. Podczas eksperymentów chwilowe rozkłady temperatury samorozgrzania były rejestrowane przy pomocy kamery termowizyjnej. W wyniku badań wyznaczono wartości krytyczne temperatury samorozgrzania w zależności od długości próbek

i częstotliwości wymuszenia. Wartości maksymalne krytycznej temperatury samorozgrzania na powierzchni badanych próbek zostawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości krytyczne temperatury samorozgrzania

Długość robocza, mm	Częstotliwość wymuszenia, Hz		
	20	25	30
	Krytyczna temperatura samorozgrzania, °C		
40	80.06	86.63	98.69
45	68.53	74.78	77.07
50	59.93	77.96	78.56
55	59.21	67.32	75.03

Jak można zauważyć, w przypadku występowania efektu samorozgrzania krytyczne wartości temperatury pracy elementów wykonanych z laminatów polimerowych są znacznie niższe od TI. Jest to spowodowane od części degradacją mechaniczną materiału, warto jednak zaznaczyć, że nieuwzględnienie efektu samorozgrzania podczas określania granicznej temperatury pracy laminatów może prowadzić do znacznych błędów.

3. DYSKUSJA I WNIOSKI

Jak wskazują wyniki termomechanicznej analizy dynamicznej, temperatura pracy badanych laminatów polimerowych powinna być niższa od wskaźnika temperaturowego w przypadku obciążeń mechanicznych. Rozpatrzony przypadek obciążeń dynamicznych z częstotliwością wymuszenia wynoszącą 0.001 Hz pozwala na pominięcie parametru częstotliwości w niniejszych rozważaniach i uzyskanie zależności modułu zachowawczego jedynie od temperatury. Przedstawione wyniki wykazują, że spadek modułu zachowawczego znacznie przekracza dopuszczalną granicę podaną w [1]. Należy zauważyć, że krytyczna temperatura pracy jest uzależniona od częstotliwości wymuszenia, o ile bezpośrednio zależy od temperatury zeszklenia. Graniczna temperatura pracy laminatów polimerowych jest zatem w logarytmicznej zależności od częstotliwości wymuszenia zgodnie z zasadą Arrheniusa (1) oraz zasadą superpozycji czasowo-temperaturowej (2). Wyniki przedstawione w pracy [7] wskazują na fakt, że ta temperatura zależy również od prędkości grzania, która ma znaczący wpływ na wartości parametrów dynamicznych materiału.

W przypadku obciążeń cyklicznych graniczna temperatura pracy jest uzależniona od występującego w laminacie efektu samorozgrzania powstającym w wyniku dyssypacji energii mechanicznej w postaci ciepła. W danym przypadku, oprócz częstotliwości wymuszenia, graniczna temperatura pracy zależy od wielkości powstających naprężeń podczas obciążeń dynamicznych.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że wykorzystanie wskaźnika temperaturowego do oceny temperatury pracy elementów wykonanych z laminatów polimerowych przy występowaniu obciążeń mechanicznych może prowadzić do znacznych błędów. W związku z tym ocena granicznej temperatury pracy powinna być dokonywana na podstawie wyników analiz dynamicznych. W przypadku występujących obciążeń mechanicznych ocena może opierać się na wartościach temperatury zeszklenia zależnej od częstotliwości wymuszenia.

LITERATURA

1. International Standard IEC 60216: Electrical insulating materials – thermal endurance properties. Geneva: International Electrotechnical Comission, 2010.
2. Shah V.: Handbook of plastics testing and failure analysis. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
3. James R.E.: Condition assessment of high voltage insulation in power system equipment. London: Institution of Engineering and Technology, 2008.
4. Budrugeac P.: Thermal lifetime evaluation of polymeric materials exhibiting a compensasion effect and dependence of activation energy on the degree of conversion. "Polymer Degradation and Stability" 1995, 50, p. 241-246.
5. Budrugeac P.: On the evaluation of thermal lifetime of polymeric materials which exhibit a complex mechanism of thermal degradation consisting of two successive reactions. "Polymer Degradation and Stability"2000, 67, p. 271-278.
6. Budrugeac P.: On the use of oxidative stability measurements for short-term thermal endurance characterization of polymeric materials. "Polymer Degradation and Stability" 2000, 68, p. 289-293.
7. Katunin A., Gnatowski A.: Influence of heating rate on evolution of dynamic properties of polymeric laminates. "Plastics Rubber and Composites", w druku, DOI: 10.1179/1743289811Y.0000000037.
8. Katunin A., Fidali M.: Self-heating of polymeric laminated composite plates under the resonant vibrations: theoretical and experimental study. "Polymer Composites" 2012, 33, 1, p. 138-146.
9. Katunin A.: Critical self-heating temperature during fatigue of polymeric composites under cyclic loading. "Kompozyty", w druku.
10. New heat-ageing test suggests we've got it all wrong. "Additives for Polymers" 2000, 5, p. 8-9.
11. Katalog produkcji Zakładów Tworzyw Sztucznych "Izo-Erg" S.A. w Gliwicach.

CONSIDERING OF MECHANICAL LOADS DURING DETERMINATION OF A TEMPERATURE INDEX OF POLYMERIC LAMINATES

Summary. Temperature index describes an operation temperature limit of polymeric laminates due to their electro-insulating properties. Often this index is used for determination of temperature limit in mechanical applications. Results of conducted research show, that operating temperature limit during mechanical loads could be significantly lower, than temperature index for a given material. Due to the viscoelasticity of matrix of a laminate during operation loading the effects, which have an influence on value of a temperature limit, may occur.

Praca naukowa częściowo finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w latach 2009-2012 w ramach projektu badawczego nr N N504 282137.