

OCENA JAKOŚCI NAWIJANYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH NA PODSTAWIE WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ

Małgorzata Szyciek

Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: malgorzata.szyciek@polsl.pl

Streszczenie

Celem pracy była ocena wpływu procesu degradacji starzeniowo-zmęczeniowej na dyfuzyjność cieplną kompozytu poliestrowo-szklanego. Dyfuzyjność cieplną określono na podstawie termowizyjnych map rozkładu temperatur na powierzchni próbki (metoda transmisyjna), opierając się na procedurze opracowanej przez Parkera. Zmiany strukturalne określono pośrednio na podstawie pomiaru chłonności wody. Dla potwierdzenia zmian właściwości użytkowych kompozytów przeprowadzono badania wytrzymałości na zginanie. Stopniowy spadek wytrzymałości na zginanie, modułu sprężystości oraz zwiększenie odkształcenia są wynikiem zmian strukturalnych, będących efektem degradacji zmęczeniowej. Stwierdzono, że dyfuzyjność cieplna obniża się wraz z postępującym procesem degradacji, co pozwala diagnozować stan materiału kompozytowego podczas eksploatacji.

Słowa kluczowe: termowizja, kompozyty poliestrowo-szklane, diagnostyka

QUALITY ASSESSMENT OF POLYMER WINDING COMPOSITES BASED ON THERMAL DIFFUSION COEFFICIENT

Summary

The aim of work was to evaluate the influence of aging-fatigue degradation process on thermal diffusivity of polyester-glass composite. Thermal diffusivity was determined based on thermovision maps of temperature distribution on the sample surface (transmission method) in accordance with the procedure developed by Parker. Structural changes were determined indirectly based on measuring the water absorption. The flexural strength tests were performed to confirm changes of composites properties. Gradual decrease in flexural strength, modulus of elasticity and increased strain are the result of structural changes due to fatigue degradation. It was found that thermal diffusivity decreases with the progressive process of degradation, which allows to diagnose composite material during exploitation.

Keywords: thermovision, polyester-glass composites, diagnostic

1. WSTĘP

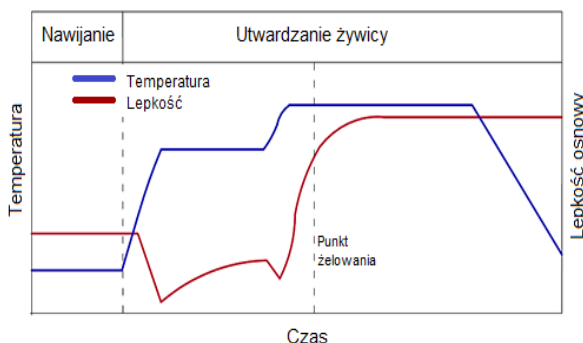
Materiały kompozytowe, ze względu na ich wysokie właściwości użytkowe (przy jednoczesnym zmniejszeniu ciężaru), charakteryzują się coraz szerszym spektrum aplikacji. Jednak ich jakość zależy od wielu

czynników warunkujących współpracę osnowy i wzmocnienia, które mogą być określane, jako addytywne (sumaryczne) lub wynikowe (synergiczne) [5,8]. Podział taki jest dosyć uproszczony, ponieważ uży-

skanie kompozytu o jak najlepszych właściwościach jest zdeterminowane przede wszystkim: odpowiednią adhezją żywicy do włókna, zwilżalnością i preparacją (apreturą) włókien, zawartością procentową wzmocnienia, a także równomiernością zdyspersowania środków modyfikujących w samej żywicy. Jednym z najważniejszych czynników przy projektowaniu polimerowych kompozytów konstrukcyjnych jest dobór rodzaju i geometrii wzmocnienia, który wynika z obszaru aplikacji i wymaganych właściwości. Właściwości makroskopowe kompozytu zależą od długości, rodzaju, zawartości oraz orientacji włókien [6,11]. Wymagane właściwości są również uzależnione od technologii wytwarzania danej powłoki. Przykładowo w pultruzji (ciągłym przeciąganiu) można wprowadzić 80% wzmocnienia wagowo, w BMC (Bulk Moulding Compounds) – 90%, w nawijaniu – 70%, a w RTM (Resin Transfer Moulding) – 60% [1,5,6,8,11].

Odpowiednie przygotowanie i zaprojektowanie kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem ciągłym jest trudnym zadaniem, a duża liczba parametrów, które mają wpływ na właściwości finalne materiału kompozytowego, przyczynia się do rozrzutu właściwości oraz powstających wad. W badaniach udowodniono [9,18], że najważniejszym czynnikiem, mającym wpływ na obniżenie właściwości wytrzymałościowych, jest zerwanie więzi adhezyjnej w tzw. międzywarstwie włókno – osnowa.

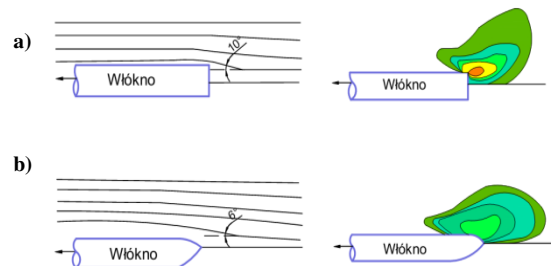
W przypadku technologii nawijania, wykorzystywanej m.in. do wytwarzania rur, zbiorników, ale również do produkcji ram rowerowych z preimpregnatów, wpływ parametrów realizacji procesu ma szczególne znaczenie. Opracowany przez D. Kokana [10] model procesu nawijania przedstawia zmianę temperatury i lepkości w funkcji czasu nawijania oraz utwardzania.



Rys. 1. Model procesu wytwarzania powłok cylindrycznych metodą nawijania [10]

Jak można zaobserwować na modelowym diagramie procesu nawijania (rys. 1), temperatura i lepkość ulegają zmianie dopiero w fazie sieciowania. W pierwszym etapie następuje obniżenie lepkości, która spada bezpośrednio po nawijaniu, co jest spowodowane wzrostem temperatury. Jednak w dalszym etapie, na skutek zachodzącej reakcji sieciowania

(reakcja egzotermiczna), lepkość gwałtownie wzrasta po przekroczeniu punktu żelowania. Obie te właściwości, a także rodzaj i stan włókien wzmocniających oraz ich zwilżalność, warunkują wielkość naprężeń i odkształceń wynikających z procesu wytwarzania. Dodatkowo na poziom naprężeń ma wpływ tarcie występujące na powierzchniach granicznych, które jest związane ze skurczem oraz różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej i zależy od udziału objętościowego włókien i ich rozmieszczenia. Skurcz prowadzi do powstawania naprężeń ściskających włókno, a w związku tym do koncentracji naprężeń ścinających w warstwie granicznej. Na końcach włókien obserwuje się obszary o wyższej koncentracji naprężeń, które mogą prowadzić do zjawiska karbu rys. 2. Im łagodniejsze jest zakończenie włókna, tym mniejsza jest koncentracja opisanych naprężeń. Wzrost naprężeń powoduje spadek wytrzymałości laminatów, co ma miejsce szczególnie przy małej zawartości wzmocnienia [9,17].



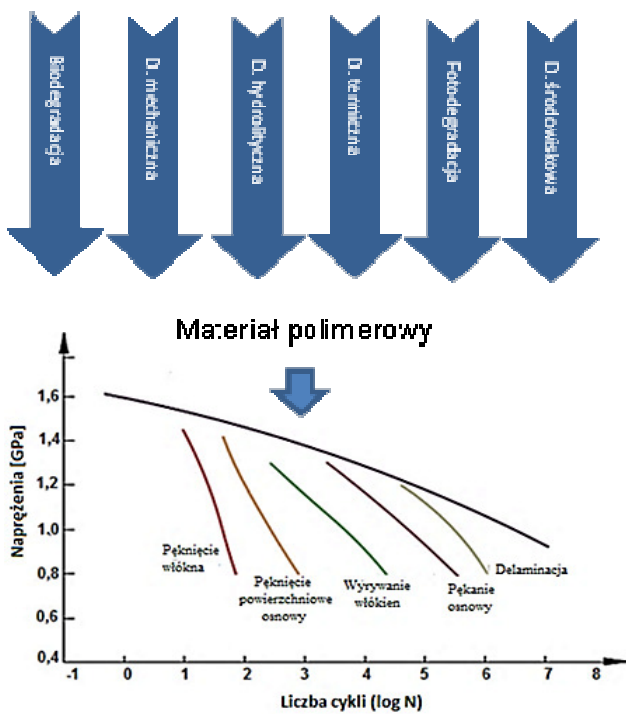
Rys. 2. Schematyczny rozkład naprężeń powstałych przy zniszczeniu włókna: (a) prostopadłe do osi, (b) łagodny przelom [17]

Kolejnymi istotnymi czynnikami warunkującymi wymagane właściwości jest: kąt nawijania, prędkość nawijania, która jest uzależniona od prędkości obrotowej rdzenia i przesuwu suportu oraz naciąg włókien. Parametry te wpływają w istotny sposób m.in. na stopień przesylenia włókien. Badania przeprowadzone przez Martiny'ego [12] wskazują, że wytrzymałość kompozytu zależy od naciągu włókien. Zgodnie z warunkami obciążenia włókien wyższe wartości naciągu uzwojenia prowadzą do wzrostu odporności na uszkodzenia elementów nawijanych.

Z punktu widzenia nośności nawijanej konstrukcji kompozytowej, która przenosi zarówno siły osiowe, jak i naprężenia obwodowe, istotna jest tzw. architektura nawoju, opisana w pracy Błażejewskiego [4], na którą składa się liczba wiązek, kąt i skok nawijania. Optymalny kąt nawoju wynosi $54^{\circ}45'$ i zapewnia odpowiedni rozkład naprężeń w kierunku obwodowym i osiowym.

W związku z istotnym wpływem czynników technologiczno-materiałowych na właściwości kompozytów nawijanych opisanych w wielu pracach [1,5,6,8,11,12] istotnego znaczenia nabiera ocena jakościowa tego

typu materiałów. Weryfikacji jakości materiałów dokonuje się nie tylko bezpośrednio po procesie produkcyjnym, ale również podczas eksploatacji w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Warunki te istotnie zmieniają właściwości kompozytu, obniżając jego charakterystyki użytkowe, które są uzależnione od mechanizmu zniszczenia, będącego synergicznym efektem oddziaływania czynników degradacyjnych [18] – rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy mechanizm zniszczenia pod wpływem obciążenia mechanicznego

Wiadomo, że liczba przepłotów włókien jest wprost proporcjonalna do potencjalnej ilości pustek i pęcherzy. W związku z tym taki kompozyt wykazuje większe prawdopodobieństwo podatności na warunki degradacyjne. Zawartość mikronieciągłości rośnie w procesie użytkowania, prowadząc przez ich kumulację do powstawania makrowad. Procesy degradacyjne są bezpośrednią przyczyną zmian właściwości użytkowych, których zewnętrznym efektem są zmiany właściwości obserwowane w skali makroskopowej, np. obniżenie wytrzymałości na zginanie. Proces degradacji prowadzi do względnego obniżenia się charakterystyk wytrzymałościowych nawet do 50% w momencie zniszczenia.

Określenie wpływu procesu degradacji na właściwości użytkowe ma istotne znaczenie dla eksploatacji konstrukcji i jest słabo rozpoznane. Podwyższenie bezpieczeństwa i niezawodności można osiągnąć przez opracowanie prostych sposobów oceny stanu materiału nieniszczącymi metodami diagnostycznymi. W tym zakresie obserwuje się dynamiczny rozwój nieinwazyj-

nych metod diagnostycznych polimerowych kompozytów konstrukcyjnych, umożliwiających bieżącą ocenę jakości konstrukcji podczas eksploatacji. Są to badania termowizyjne, ultradźwiękowe, optyczne, rentgenograficzne pozwalające na identyfikację wad na etapie zarówno wytwarzania, montażu jak i eksploatacji. Zjawiska będące efektem użytkowania mają wpływ na wytrzymałość kompozytu oraz bezawaryjną eksploatację obiektów konstrukcyjnych. Kluczowym zadaniem jest opracowanie zatem relacji diagnostycznych wiążących w sposób możliwie jednoznaczny charakterystyki stanu materiału z cechami sygnału diagnostycznego [2,3,7,17].

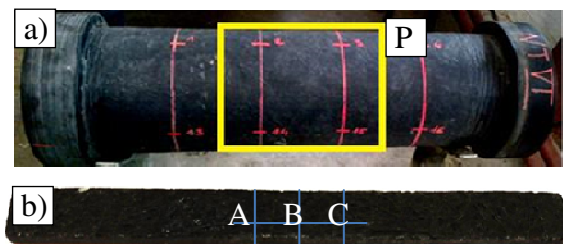
Ocena jakości kompozytów i monitorowanie stopnia ich zużycia na każdym etapie eksploatacji są uzasadnione ze względów ekonomiczno-społecznych. Wykorzystanie do tego celu nieniszczących badań termowizyjnych pozwala na identyfikację obszarów o zwiększonym prawdopodobieństwie wystąpienia uszkodzenia.

Celem pracy była ocena jakości materiałów kompozytowych na podstawie pomiaru dyfuzyjności cieplnej określonej za pomocą metody Parkera. Pomiaru dyfuzyjności cieplnej dokonano przy użyciu aktywnej termowizji. Potwierdzeniem zmian zachodzących w strukturze kompozytu był pomiar chłonności wody oraz charakterystyki wytrzymałościowe, które pozwalają na ocenę stopnia zniszczenia kompozytu.

2. PRACA WŁASNA

2.1. MATERIAŁ

Badaniom poddano próbki wycięte z rur poliesterowo-szklanych poddanych procesowi zmęczenia w warunkach dynamicznego obciążenia o wymuszeniu prostokątnym (amplituda napężenia cyklu 3,5 MPa) i kąpeli wodnej o temperaturze 40°C. Próbki o wymiarach 240 x 20 x 7 mm wycięto z obszaru o największym odkształceniu obwodowym tj. z środkowego obszaru rury (oznaczony, jako P) – rys.4. Na rys. 4 zaznaczono przykładowe punkty A, B i C, dla których określono zmianę temperatury w funkcji czasu.



Rys. 4. Rura z zaznaczonym obszarem a) o największym odkształceniu i b) próbka do badań

Zgodnie z teorią stanu napężenia w przekroju powłoki grubościowej w obszarze P (rys. 4a) dominujące są

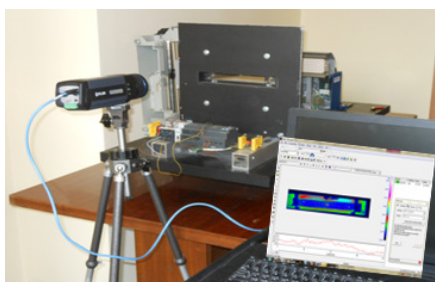
naprężenia obwodowe σ_U . Naprężenia promieniowe σ_R dla rur o stosunkowo niewielkiej grubości są pomijalnie małe i na powierzchni zewnętrznej przyjmują wartość zero. Dla badanego układu naprężenia promieniowe na powierzchni zewnętrznej wynoszą 8 MPa, natomiast obwodowe 108,15 MPa. Na powierzchni wewnętrznej naprężenia obwodowe wynoszą 100,15 MPa. Naprężenia wzdłużne są równe zero, co wynika z systemu montażu rur.

2.2. PROGRAM BADAŃ

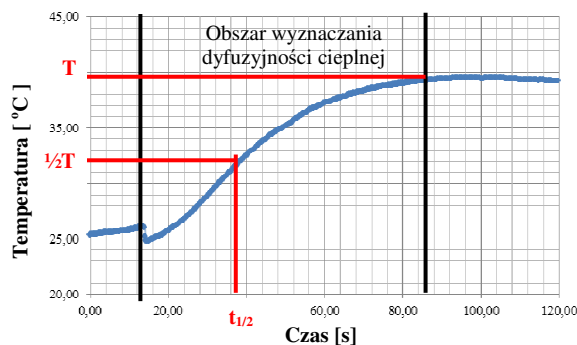
Badania obejmowały określenie dyfuzyjności cieplnej metodą Parkera oraz chłonności wody. W końcowym etapie określono współzależność pomiędzy dyfuzyjnością cieplną a chłonnością wody przy uwzględnieniu etapów degradacji. Badania prowadzono w założonym programowo czasie co 10×10^3 cykli zmęczeniowych do 100×10^3 . Zmiany jakościowe w materiale, określone wymienionymi wyżej charakterystykami, potwierdzono badaniami wytrzymałościowymi.

Przed badaniami próbki kondycjonowano w temperaturze 60°C przez 24 h w suszarkach z wymuszonym obiegiem powietrza.

Metoda Parkera polega na nagraniu próbki i rejestracji rozkładu temperatury po przeciwnej stronie do aktywacji cieplnej. Badania przeprowadzono na stanowisku zaprojektowanym zgodnie z wytycznymi opisanymi w normie PN-EN ISO 821-2: 2002 [15]. Próbkę nagrzewano w czasie 12 s za pomocą płaskiego promiennika podczerwieni o mocy 1200 W i długości emitowanej fali od 2 do 10 μm – rys. 5. Zmianę temperatury, w czasie 120 s, rejestrowano za pomocą kamery Flir A615 współpracującej z oprogramowaniem IRcontrol – rys. 6.



Rys. 5. Stanowisko do pomiaru dyfuzyjności cieplnej



Rys. 6. Zależność rejestrowanej temperatury w czasie dla wybranej próbki płaskiej [17]

Wartość dyfuzyjności cieplnej α określono z zależności [13]:

$$\alpha = 1,38 \frac{L^2}{\pi^2 t_{1/2}}, \quad (1)$$

gdzie:

L – grubość badanej próbki [cm],

$t_{1/2}$ – czas do uzyskania połowy maksymalnej temperatury na przeciwległej powierzchni do aktywowanej cieplnie (rys. 6).

Badania chłonności wody prowadzono według normy PN-ISO 8361-1: 1994 [16] w kąpielii wodnej o temperaturze 40°C w czasie 24 h. Przyjęte warunki odpowiadały parametrom degradacji starzeniowo-zmęczeniowej rur. Następnie próbki do badań suszono w suszarkach z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze 60°C , aż do uzyskania stałej wagi. Chłonność wody określano metodą wagową z zależności:

$$W = \frac{M_w}{M_s} 100 [\%], \quad (2)$$

gdzie:

W – chłonność wody [%],

M_w – masa próbki po wyjęciu z kąpielii wodnej [kg],

M_s – masa próbki po wyjęciu z suszarki [kg].

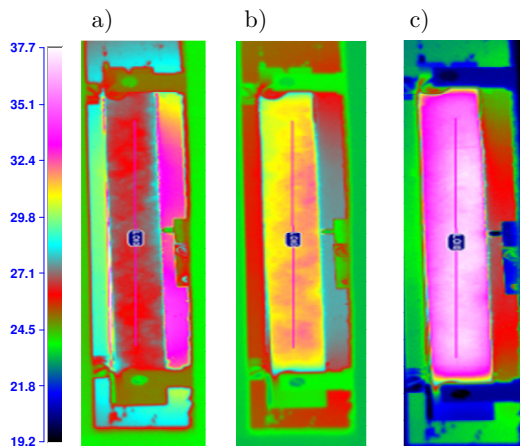
Stopień utraty zdolności nośnych określono na podstawie wytrzymałości na zginanie wyznaczonej wg normy PN-EN ISO 178 [14]. Badania prowadzono na maszynie Zwick/Roell Z020 z prędkością 5 mm/min.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano funkcję wiążącą dyfuzyjność cieplną i chłonność wody.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

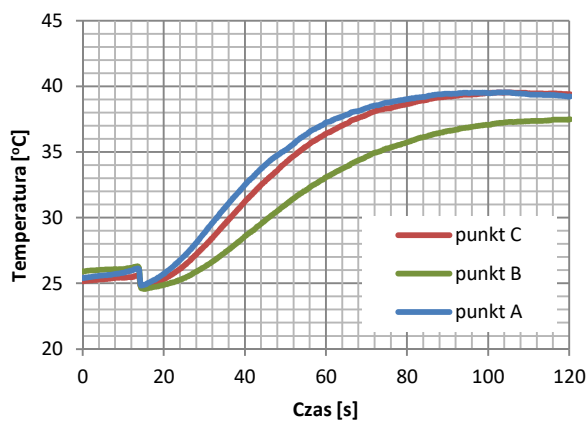
Dyfuzyjność cieplną określono na podstawie pomiaru maksymalnej temperatury przy studzeniu, uśrednionej na długości próbki (rys. 6). Rozkład temperatury na

powierzchni próbki w kolejnych fazach nagrzewania przedstawiono na rys.7.



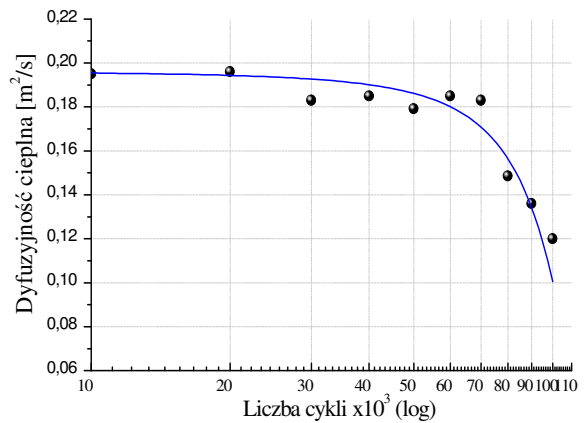
Rys. 7. Termogramy zarejestrowane w czasie a) 12 s, b) 35 s oraz c) 82 s dla wybranej próbki

Na rys. 8 przedstawiono zmianę temperatury w funkcji czasu dla przykładowych punktów A, B, C zaznaczonych na rys. 4. Jak można zaobserwować, w punkcie B odnotowano niższą temperaturę, co może być spowodowane defektami struktury.



Rys. 8. Przykładowy zmiana temperatury w czasie dla wybranej próbki

Zmianę dyfuzyjności cieplnej w funkcji liczby cykli zmęczeniowych (N) przedstawiono dla wartości średniej z pięciu pomiarów.



Rys. 9. Zależność dyfuzyjności cieplnej w funkcji liczby cykli zmęczeniowych

Przedstawioną na rys. 9 zależność opisano funkcją eksponencjalną w postaci:

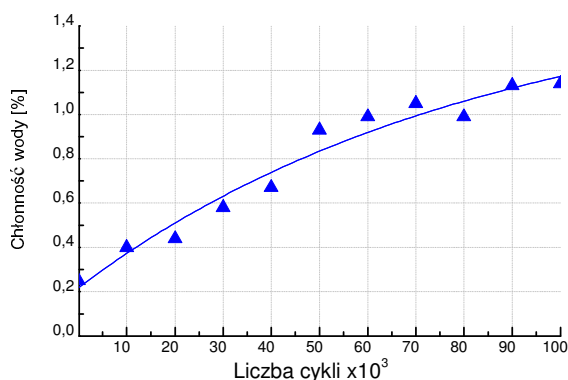
$$\alpha = -0,01e^{N/23,21} + 0,19, \quad (3)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,94$.

Jak można zaobserwować na rys. 9., w początkowym etapie degradacji starzeniowo-zmęczeniowej, tj. do około 20×10^3 cykli zmęczeniowych, dyfuzyjność cieplna zmienia się w minimalnym zakresie. Następnie badana charakterystyka stopniowo obniża się o około 6%. Po 70×10^3 cykli zmęczeniowych następuje ostry spadek dyfuzyjności cieplnej, która w końcowym etapie (tj. 100×10^3 cykli zmęczeniowych) osiąga wartość $0,123 \text{ m}^2/\text{s}$. Jest to spowodowane zmianami strukturalnymi będącymi efektem procesu degradacji, co potwierdziły wyniki chłonności wody w funkcji liczby cykli – rys. 10. Im więcej nieciągłości w strukturze materiału kompozytowego, tym większa chłonność wody oraz mniejsza dyfuzyjność cieplna. Jednak w pierwszym etapie (do 20×10^3 cykli zmęczeniowych), dla stosunkowo niewielkich zmian dyfuzyjności (rys. 9), chłonność wody zmienia się prawie dwukrotnie (rys. 10). Prawdopodobną przyczyną obserwowanego efektu mogą być mikrowady, ale również brak zabezpieczenia krawędzi próbek żywicą. Zmianę absorpcji wody w zależności od postępującego procesu zmęczeniowego materiału opisano funkcją eksponencjalną:

$$W = -1,36e^{N/83,05} + 1,36, \quad (4)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,96$.



Rys. 10. Zależność chłonności wody w funkcji liczby cykli zmężeń

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki badań wytrzymałościowych

Liczba cykli x10 ³	Moduł sprężystości x 10 ³ [MPa]		Wytrzymałość na zginanie [MPa]		Odształcenie [%]	
	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe
0	12,1	0,73	146	7,2	1,05	0,08
10	7,38	0,51	104	7,9	1,21	0,11
20	7,22	0,36	118	8,6	1,57	0,07
30	6,58	0,45	98,9	6,56	1,92	0,13
40	4,89	0,32	70,2	5,98	2,02	0,1
50	4,84	0,26	76,6	8,4	2,43	0,31
60	4,66	0,34	68,9	5,2	2,56	0,44
70	3,83	0,41	50,2	4,9	4,6	0,32
80	2,52	0,21	43	3,6	5,04	0,73
90	2,03	0,23	35,8	4,09	5,13	0,61
100	1,72	0,21	29,9	1,98	5,61	0,93

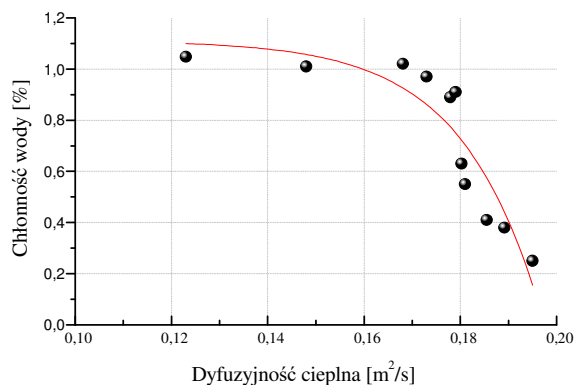
Charakterystyki określone w próbie statycznego zginania również zmieniają się wraz z postępującym procesem zniszczenia zmęczeniowego, co potwierdza uzyskane wyniki chłonności wody i dyfuzyjności cieplnej. Odnotowane zmiany właściwości wytrzymałościowych wynoszą średnio około 80% w końcowym etapie degradacji. Największe zmiany zaobserwowano dla wyznaczonego modułu sprężystości, tj. ok. 85%. Odształcenie badanych próbek po 100 x 10³ cykli zmęczeniowych wraza pięciokrotnie w stosunku do wartości początkowej. Podobną tendencję wzrostową odnotowano dla chłonności wody. Dyfuzyjność cieplna obniżyła się o około 65%.

Na podstawie zmian badanych charakterystyk w funkcji czasu wyznaczono zależność dyfuzyjności

cieplnej od chłonności wody (rys.11), która opisana funkcją:

$$W = -6,66 + e^{\alpha/0,02} + 1,11, \quad (5)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,92$.



Rys. 11. Zależność chłonności wody od dyfuzyjności cieplnej

Jak widać na rys. 11, istnieje współzależność pomiędzy dyfuzyjnością cieplną kompozytów poliestrowo-szkłanych poddanych procesowi degradacji starzeniowo-zmęczeniowej a chłonnością wody.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- Dyfuzyjność cieplna obniża się wraz z postępującym procesem degradacji starzeniowo-zmęczeniowej.
- Pomiar dyfuzyjności cieplnej pozwala diagnozować stan materiału kompozytowego podczas eksploatacji. Jej zmiana uwarunkowana jest strukturą materiału. Im więcej wad występuje w materiale, tym niższa wartość dyfuzyjności cieplnej. Jednak w początkowym procesie degradacji zmiana jest minimalna, co sugeruje, że na wartość dyfuzyjności mają wpływ przede wszystkim wady w wymiarze makro.
- Obserwowany wzrost chłonności wody potwierdza zmiany dyfuzyjności cieplnej spowodowane nieciągłościami materiału. Im więcej wad występuje w materiale, tym większa chłonność wody.
- Zmiany dyfuzyjności cieplnej oraz chłonności wody są wynikiem przede wszystkim niszczenia zmęczeniowego. Postępujący proces propagacji pęknięć uwidoczony jest przez zmieniające się charakterystyki, m.in. wytrzymałościowe, wyznaczone w ramach badań.
- Opracowana współzależność pomiędzy dyfuzyjnością cieplną a chłonnością wody pozwala na diagnozowanie stanu kompozytu poliestrowo-szkłanego,

- Dla pełnego obrazu zmian właściwości kompozytu poliestrowo-szklanego należałoby rozszerzyć program badań o degradację materiału dla zmiennych warunków procesu starzenia i zmęczenia (np. inny profil wymuszenia obciążenia, zakres temperaturowy).

Literatura

1. Advani S., Hsiao K.-T.: Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). Woodhead Publishing, Cambridge 2012.
2. Akers D., Rideout C.: Non-destructive damage detection and life cycle prediction for advanced composites components. SAE Technical Paper, 2004.
3. Bates D., Smith G., Lu D., Hewitt J.: Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components. Composites: Part B, 31, 2000, p. 175-185.
4. Błażejowski W.: Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe wzmocnione włóknami według wzorów mozaikowych. Wrocław: Ofic. Wyd. Pol. Wrocl., 2013.
5. Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witenberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: Kompozyty. Warszawa: Ofic. Wyd. Pol. Warsz., 2003.
6. Campbell F. C.: Structural composites materials. ASM International, Ohio 2010.
7. Eitzen D. G., Breckenridge F. R., Clough R. B., Fuller E. R., Hsu N. N., Simmons J. A.: Fundamental developments for quantitative acoustic emission measurements. NBS Interim Report to EPRI, 1981.
8. Hull D., Clyne T. W.: An introduction to composite materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
9. Jones R. M.: Mechanics of composites materials. Second edition. New York: Taylor & Francis, 1998.
10. Kokan D.: Development of an improved filament-winding process model. Doctors thesis. Georgia Institute of Technology, 1997.
11. Królikowski W.: Polimerowe kompozyty włókniste. Warszawa: PWN, 2012.
12. Mertiny P., Ellyin F.: Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. Composites: Part A, 33, 2002, p. 1615-1622.
13. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L.: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. "Journal of Applied Physics" 1961, 32, 9, p. 1679-1684.
14. PN-EN 178 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy zginaniu,
15. PN-EN ISO 821-2: 2002 – Techniczna ceramika zaawansowana -- Ceramika monolityczna -- Właściwości termofizyczne -- Część 1: Oznaczanie rozszerzalności cieplnej
16. PN-ISO 8361-1:1994 – Rury i kształtki z termoplastycznych tworzyw sztucznych – Chłonność wody – Ogólna metoda badania.
17. Szymiczek M.: Ocena stopnia degradacji poliestrowo-szklanych kompozytów nawijanych. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2016.
18. Talreja R.: Fatigue-induced damage mechanisms in carbon fibre-reinforced plastic composites. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1981, 378, 1775, p. 461-475.



Artykuł dostępny na podstawie licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0 Polska.
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl>