

Dr inż. Małgorzata Szymiczek

Department of Theoretical and Applied Mechanics
Silesian University of Technology
Konarskiego str. 18A, 44-100 Gliwice, Poland
E-mail: malgorzata.szymiczek@polsl.pl

Badania ultradźwiękowe i termowizyjne jako narzędzie diagnostycznej oceny kumulacji nieciągłości struktury rur poliestrowo – szklanych

Słowa kluczowe: *ultradźwięki, termowizja, badania starzeniowo – zmęczeniowe, kompozyty poliestrowo – szklane, rury*

Streszczenie: Celem pracy jest opracowanie metodyki oceny kumulacji nieciągłości metodami nieniszczącymi. Badaniom poddano handlowe rury poliestrowo – szklane wytwarzana metodą nawijania śrubowego. Obserwowane nieciągłości były efektem zarówno wad poprodukcyjnych, ale przede wszystkim procesu degradacji starzeniowo – zmęczeniowej. Oceny stopnia degradacji bezpośrednio związanej z procesem propagacji nieciągłości dokonano przy użyciu termowizji aktywnej oraz defektoskopii ultradźwiękowej. Charakterystyką diagnostyczną w przypadku termografii była prędkość nagrzewania i chłodzenia określona na podstawie rozkładu temperatury na powierzchni aktywowanej cieplnie. W przypadku defektoskopii ultradźwiękowej jako wielkość diagnostyczną przyjęto czas przejścia fali ultradźwiękowej wyznaczony metodą echa. Zmiany struktury pośrednio określono na podstawie chłonności wody. Stwierdzono, że istnieje korelacja pomiędzy własnościami określonymi w badaniach nieniszczących a chłonnością wody. Im wyższa chłonność, co świadczy o większej liczbie wad, tym niższe prędkości nagrzewania i chłodzenia oraz czas przejścia fali ultradźwiękowej.

Ultrasonic and thermal testing as a diagnostic tool for the assessment of cumulative discontinuities of the structure of polyester - glass pipes

Keywords : *ultrasound, thermovision, ageing-fatigue tests, polyester –glass composites, pipes*

Abstract: The aim of the work was to develop a methodology for evaluating the accumulation of discontinuities with the application of non-destructive methods. Commercial polyester - glass pipes produced by a method of helical filament winding were tested. The observed discontinuities were the result of post-production flaws, but first of all, the aging-fatigue degradation process. Assessment of the degree of degradation directly related to the process of discontinuities propagation was performed with the use of active thermography and ultrasonic inspection. Diagnostic characteristics were the heating and cooling rate estimated from the temperature distribution on the heat-activated surface. In the case of ultrasonic inspection, as the value of the diagnostics was assumed, transition time of ultrasonic wave determined by echo method. Structural changes were indirectly determined on the basis of water absorption. It has been found that there is a correlation between the properties set out in the non-destructive testing and water absorption. The higher absorption, which indicates a greater number of defects, the lower the heating and cooling rate and transition time of ultrasonic wave.

1. Wprowadzenie

Szerokie spektrum aplikacji kompozytów polimerowych powoduje, że są one narażone na wiele czynników degradacyjnych, które mają istotny wpływ na ich własności użytkowe. Są to czynniki zarówno środowiskowe (np. woda, temperatura, mikroorganizmy, promieniowanie UV) [1,2,5,6,8,10,12] jak i zmęczeniowe (np. wielkość naprężeń, częstotliwość) [4,18,19]. Synergizm zjawisk wywołanych tymi czynnikami prowadzi do stopniowej degradacji materiału, co w przypadku materiału polimerowego ma szczególne znaczenie [18,22].

Własności konstrukcyjnych kompozytów polimerowych, w tym poliestrowo – szklanych uzależnione są m.in. od charakterystyk materiałów wejściowych (wzmocnienia, osnowy), ich wzajemnego, adhezyjnego połączenia oraz technologii wytwarzania. Złe dobrany, chociaż jeden z czynników powoduje spadek własności kompozytów. Stosunkowo wysoki wpływ na jakość uzyskanych kompozytów ma technologia ich wytwarzania [9,11,13]. Wykazano, że w technologii nawijania [11] niewłaściwie dobrana siła naciągu powoduje złe przesylenie włókien, a to prowadzi do powstawania wad typu pustki, nieciągłości.

Identyfikacja zmian powstających w kompozytach jest szeroko badana. Badania zmian struktury kompozytu epoksydowo-węglowego prowadzone przez Tarleja [18] pozwoliły na określenie kolejnych etapów od pęknięć pojedynczych włókien, przez mikropęknięcia osnowy, zerwanie więzi adhezyjnej aż po delaminację. Są to przede wszystkim efekty degradacji zmęczeniowej kompozytu. Szczególnie istotne znaczenie dla obserwowanych procesów degradacyjnych ma ciepło, które w znacznym stopniu przyspiesza szybkość reakcji zgodnie z prawem Arrheniusa [10]. Połączenie oddziaływania termicznego np. z promieniowaniem UV, wodą, skutkuje m.in. uwalnianiem wolnych rodników, czy reakcją hydrolizy. Chłonność wody, która pozwala pośrednio na ocenę stopnia degradacji, jest zdeterminowana materiałem, temperaturą eksploatacji oraz środowiskiem pracy [5,6,15].

Ocena stopnia degradacji materiałów kompozytowych jest podstawą do określenia przydatności danej konstrukcji do eksploatacji. Opisane w pracach metody [2,12,18,19] powodują zniszczenie konstrukcji, co jest kosztowne, a może być nieuzasadnione. Ciągłe monitorowanie wpływu procesów degradacyjnych na własności na każdym etapie użytkowania aż po zniszczenie umożliwia prognozowanie czasu bezpiecznej przydatności konstrukcji. Taka obserwacja jest możliwa dzięki nieniszczącym metodom badań np. ultradźwiękowym, termowizyjnym, rentgenograficznym, które pozwalają na nieinwazyjne diagnozowanie stanu konstrukcji kompozytowej [3,8,17,20,23,24].

W niniejszej pracy oceny postępu degradacji kompozytu dokonano zgodnie z opracowaną metodyką, wykorzystującą pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej oraz prędkości nagrzewania i chłodzenia (termowizja). Zmiany struktury pośrednio określono na podstawie chłonności wody.

2. Badania eksperymentalne

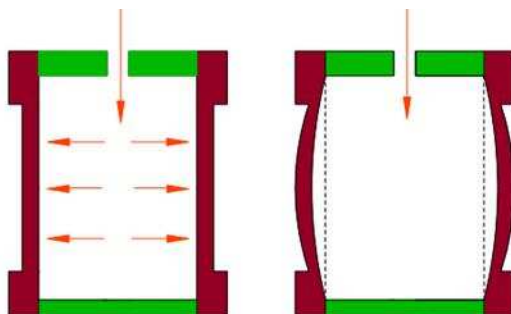
2.1. Program badań

Część eksperymentalna pracy obejmowała badania:

- starzeniowo – zmęczeniowe,
- termowizyjne,
- ultradźwiękowe,
- chłonności wody.

Badania starzeniowo - zmęczeniowe, których celem było uzyskanie odpowiedniego stopnia degradacji rur kompozytowych prowadzono w termostатовanej kąpielii wodnej o

temperaturze 30°C, o amplitudzie cyklu naprężenia 3MPa z wymuszeniem prostokątnym i czasie 7s (1,5s czas narostu ciśnienia, 2s czas utrzymania maksymalnego ciśnienia). Sposób montażu i uszczelnienia rur, opisany w [22] zapewniał wyeliminowanie naprężeń wzdłużnych zgodnie z teorią wyężenia rur bez dennic w oparciu o hipotezę naprężeń zredukowanych Hubera [7]. Zaprojektowany system montażu powodował, że rura ulegała tylko odkształceniu obwodowemu i wzdłużnemu, co przedstawiono na Rys. 1, a naprężenie promieniowe jest pomijalnie małe. Na powierzchni wewnętrznej wynoszą one 7MPa, a na zewnętrznej są równe zero. Naprężenia obwodowe przy maksymalnym obciążeniu 7MPa wynoszą odpowiednio 96,95MPa i 89,95MPa. Pod wpływem zadanego obciążenia następuje zwiększenie średnicy i skrócenie długości badanej rury.



Rys. 1. Schemat odkształcenia próbek

Badania termowizyjne prowadzono na stanowisku opisanym w pracy [17]. Zmiany temperatury podczas nagrzewania i chłodzenia określono na podstawie badań termowizyjnych aktywując cieplnie przez 60s powierzchnię zewnętrzną rury. Zmiana temperatury w czasie, rejestrowana przy użyciu kamery termowizyjnej Flir A615, posłużyła do wyznaczenia prędkości nagrzewania i chłodzenia.

Czas przejścia fali ultradźwiękowej określono w środowisku wodnym za pomocą głowic firmy Parametrics o częstotliwości 2,25MHz współpracujących z defektoskopem UMT 17.

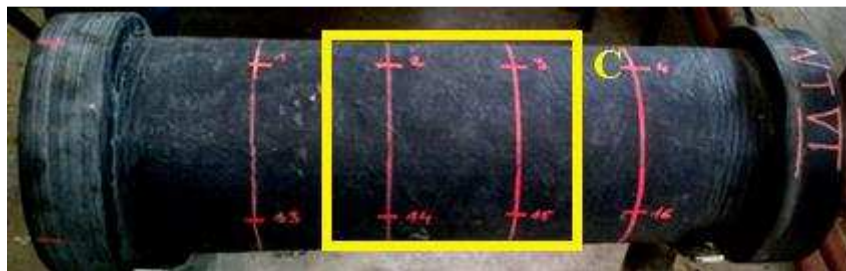
Badania chłonności wody, które pośrednio pozwoliły na ocenę stanu struktury, przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-ISO 8361-1:1994 [14].

Badania termowizyjne, ultradźwiękowe oraz chłonności wody prowadzono sukcesywnie początkowo (do 10×10^3 cykli) co $2,5 \times 10^3$ cykli zmęczeniowych, a później co 10×10^3 cykli.

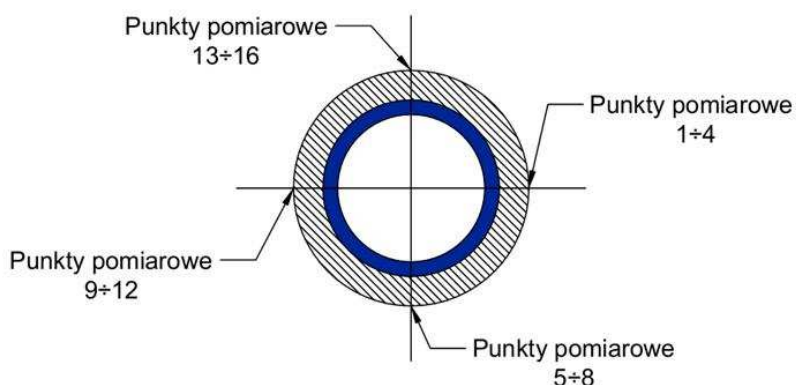
2.2. Materiał badawczy

Badania prowadzono na rurach poliestrowo – szklanych wytwarzanych metodą nawijania. Kąt nawijania wynosił 54°, a udział wagowy szkła 52%. Na osnowę wykorzystano kompozycję żywic poliestrowych Polimal 104 TS oraz Estromal 14.CNP -03/P. Są to żywice zawierające związki uniepalniające, które pozwalają na uzyskanie klasy palności V0 wg normy PN-EN 60695. Jako wzmocnienia użyto rovingu szklanego ER 3003 o apreturze winylowo – silanowej, natomiast na przekładki zastosowano matę szklaną EMC 300 o preparacji silanowej. Końce próbek rurowych wzmocniono kołnierzami nawiniętymi obwodowo. Zadaniem kołnierzy było zapewnienie odpowiedniej sztywności obwodowej w miejscach uszczelnienia. Na rysunku 2 przedstawiono widok próbki z 16 punktami pomiarowymi oznaczonymi po 4 na każdej z tworzących, wyznaczonych jej osiowym obrotem o 90°.

a)



b)



Rys. 2. Widok próbki do badań (a) schemat oznaczonych punktów pomiarowych (b)

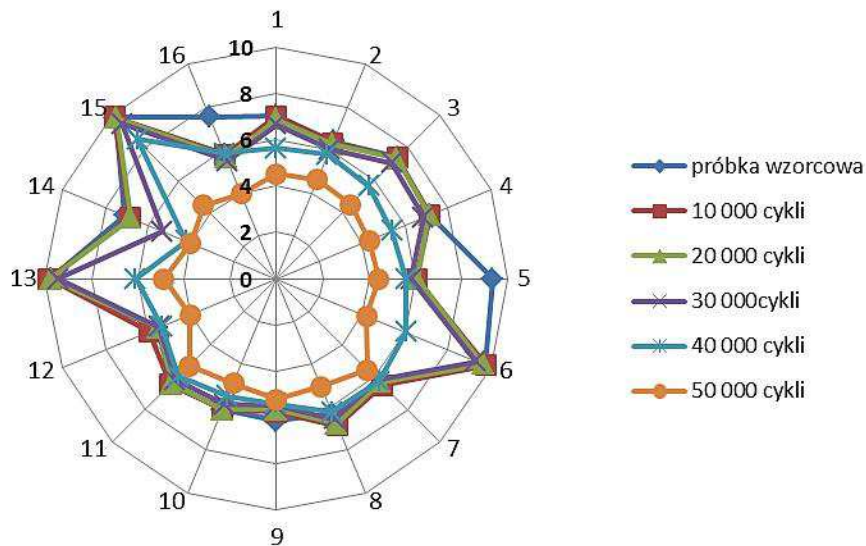
Wszystkie próbki, przed przystąpieniem do badań starzeniowo – zmęczeniowych, poddano procesowi dotwardzania w temperaturze 60°C przez 24 h. Efektem było ustabilizowanie własności rur.

Badania chłonności wody przeprowadzono na próbkach w postaci belek o wymiarach $95 \times 20 \times 6$ mm, wyciętych z środkowego obszaru rur, oznaczonego jako C na Rys. 2a.

2.3. Wyniki i ich analiza

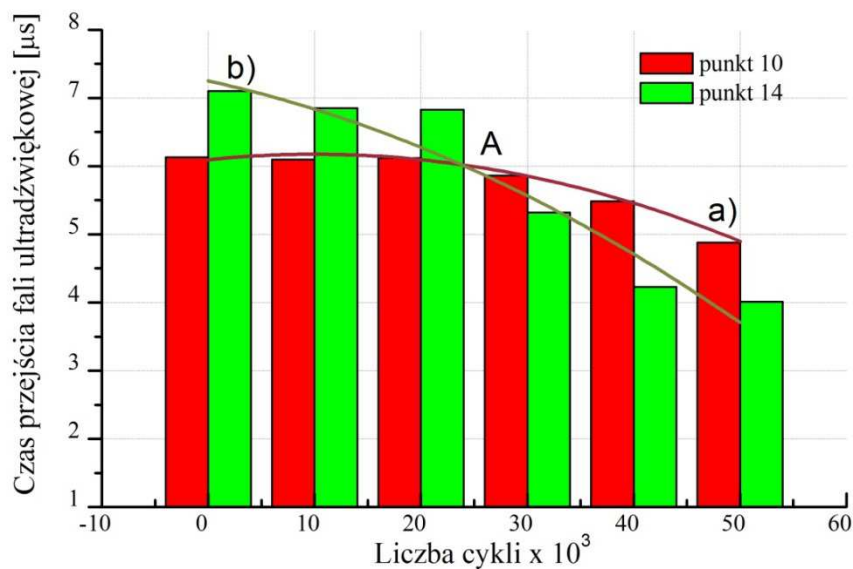
2.3.1. Badania ultradźwiękowe

Na podstawie przeprowadzonych badań ultradźwiękowych wyznaczono zmianę czasu przejścia fali ultradźwiękowej w oznaczonych punktach pomiarowych (Rys.2b) w zależności od liczby cykli zmęczeniowych. Zmiany czasu przejścia fali ultradźwiękowej pozwalają na ocenę zmian strukturalnych postępujących w trakcie procesu degradacji starzeniowo – zmęczeniowej. W obszarach występowania nieciągłości jest on znacznie krótszy. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład czasu przejścia na powierzchni rury (zgodnie z Rys. 2b). Na obwodzie oznaczono poszczególne punkty pomiarowe, a na osi y czas przejścia fali ultradźwiękowej. Jest to przykładowy wykres dla rury poddanej obciążeniom zmęczeniowym wg podanych parametrów i 50×10^3 cykli zmęczeniowych. Rozbieżności obserwowane dla próbki niepoddanej procesowi degradacji starzeniowo - zmęczeniowej wynikają ze zróżnicowanej grubości ścianki rury, co związane jest z technologią wytwarzania.



Rys. 3. Zmiana czasu przejścia fali ultradźwiękowej w funkcji liczby cykli zmęczeniowych

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę czasu przejścia fali ultradźwiękowej dla dwóch punktów 14 i 10, wybranych na podstawie zaobserwowanych zmian badanej charakterystyki. W punkcie 14 następuje gwałtowny spadek czasu przejścia potwierdzający makropęknięcia. Punkt 10 przedstawia powolne, ciągle skracanie się czasu przejścia. Zmiany czasu przejścia fali ultradźwiękowej obrazują postępujący proces degradacji starzeniowo - zmęczeniowej przejawiający się w pierwszym etapie mikrowadami (minimalne skrócenie czasu przejścia) będącymi potencjalną strefą nukleacji pęknięć prowadzących do delaminacji.



Rys. 4. Zmiana czasu przejścia fali ultradźwiękowej w funkcji liczby cykli zmęczeniowych obserwowana w punkcie a) 10 i b) 14 jednej wybranej rury

Zmiany czasu przejścia fali ultradźwiękowej opisano wielomianem drugiego stopnia:

- krzywa a):

$$y = 7,25 - 0,03N - 7,34e^{-4} N^2 \quad , \quad (1)$$

- o współczynniku korelacji $R = 0,92$,
- krzywa b):

$$y = 6,09 + 0,02N - 7,99e^{-4} N^2 \quad , \quad (2)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,989$.

Zależności 1 i 2 pozwalają na uzyskanie najlepszego dopasowania funkcji aproksymującej wyników badań. Są to jednak zależności istotne dla badanych nawijanych rur poliestrowo – szklanych poddanych procesowi degradacji starzeniowo – zmęczeniowej w założonym zakresie.

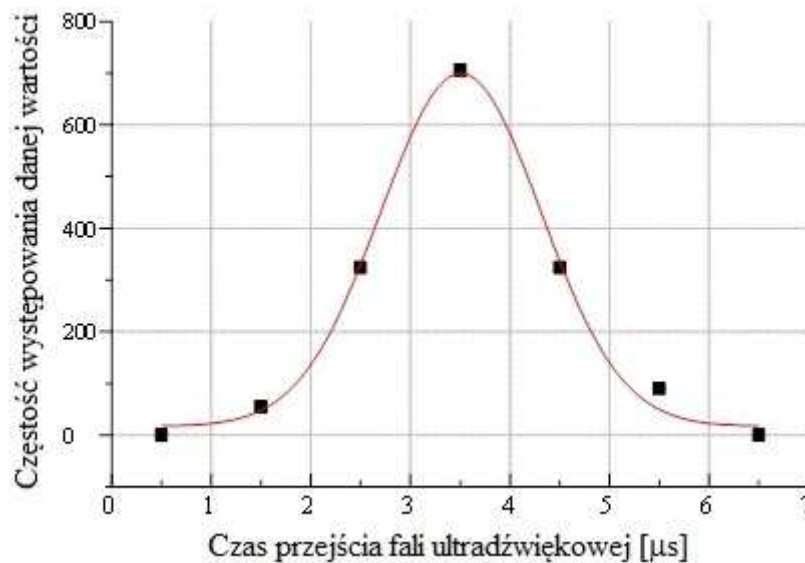
Jak można zaobserwować na Rys. 3 i 4, w pierwszej fazie badań, czas przejścia fali ultradźwiękowej nie zmienia się lub zmienia się w niewielkim stopniu. Opracowane krzywe a i b (Rys. 4) przecinają się punkcie A tj. około 30×10^3 cykli zmęczeniowych. Wyraźne skrócenie czasu przejścia fali odpowiada zmianom strukturalnym obserwowanym przede wszystkim w wyniku degradacji zmęczeniowej.

Ze względu na różnice w mierzonym czasie przejścia fali, wynikające z grubości próbek (7 ± 1 mm) oraz postępującego procesu zniszczenia, dokonano analizy częstości występowania danej wartości czasu przejścia w kolejnych fazach procesu degradacji. Zakładając funkcję częstości występowania badanej wielkości zgodną z rozkładem Gaussa, wyznaczano wartość najczęściej występującą. Tak określoną wartość przyjęto jako podstawę wyznaczenia relacji czasu przejścia fali ultradźwiękowej od liczby cykli. Na rysunku 5 przedstawiono funkcję częstości występowania danej wartości czasu przejścia fali ultradźwiękowej dla próbek wzorcowych, niepoddanych procesowi degradacji starzeniowo – zmęczeniowej, opisaną równaniem:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-X_c)^2}{w^2}} \quad (3)$$

gdzie: $y_0 = 17,18$; $X_c = 3,51$ [μs]; $w = 1,61$ [μs]; $A = 1378,75$ [μs].

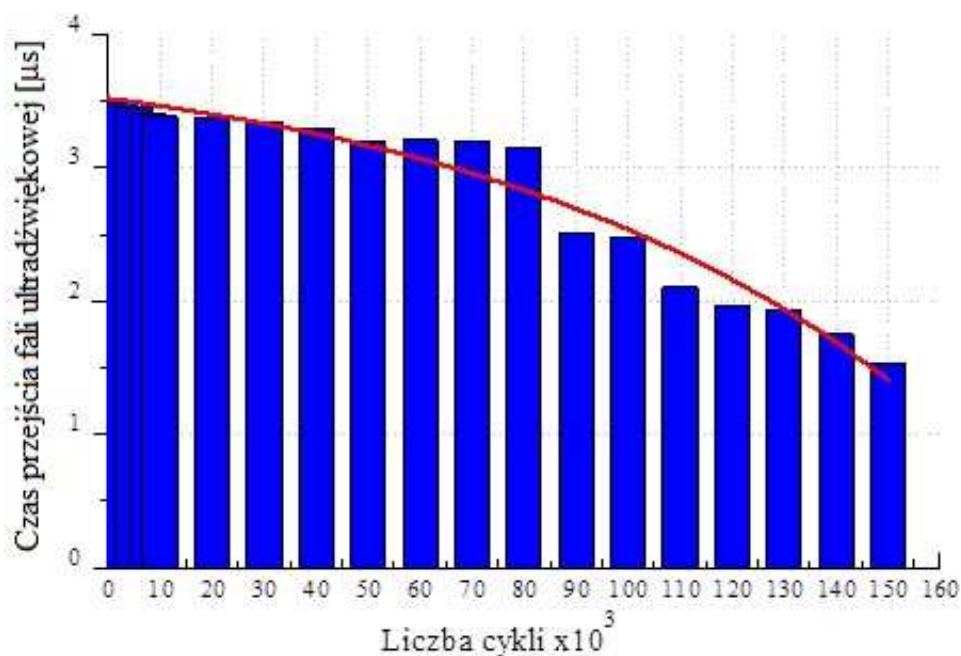
Współczynnik dopasowania do funkcji opisanej zależnością 3 wynosi $R = 0,99$.



Rys. 5. Funkcja częstości występowania czasu przejścia fali ultradźwiękowej dla próbki wzorcowej

W miarę postępującej degradacji starzeniowo – zmęczeniowej obserwowano zmniejszenie współczynnika korelacji funkcji częstości występowania danej wartości czasu przejścia fali ultradźwiękowej zgodnej z rozkładem Gaussa aż do $R = 0,68$ przy liczbie cykli 150×10^3 oraz jej spłaszczenie, co świadczy o zwiększonym rozrzucie wyników. Otrzymane wartości mieszczą się w 30% przedziale rozrzutu, co jest dopuszczalne w kompozytach.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność czasu przejścia fali ultradźwiękowej w funkcji liczby cykli, utworzoną zgodnie z wcześniej opisaną procedurą.



Rys. 6. Zależność czasu przejścia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych

Wyniki aproksymowano funkcją eksponentialną, która podobnie jak w przypadku zależności 1 i 2 najlepiej opisuje zmiany czasu przejścia w funkcji liczby cykli (współczynnik korelacji $R=0,95$), w postaci:

$$t_u = -0,41e^{(-N/-82,81)} + 3,92, \quad (4)$$

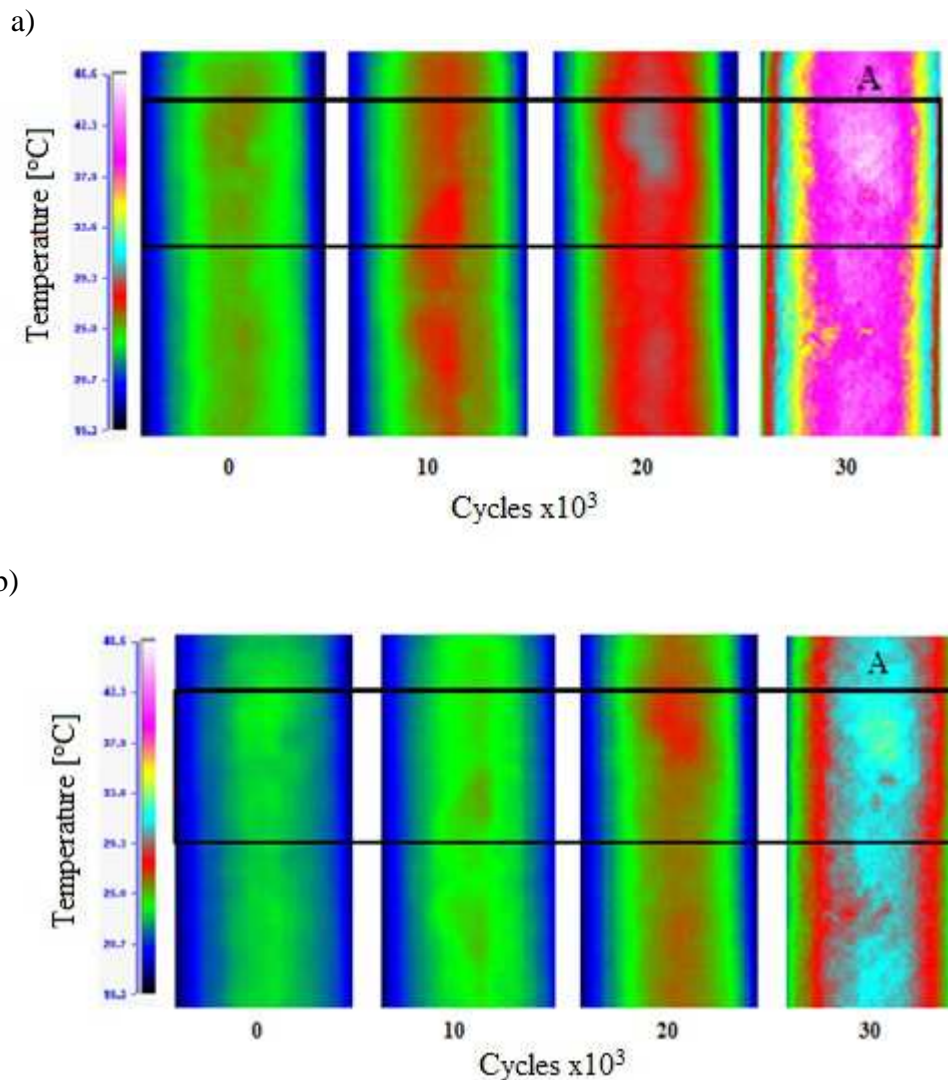
gdzie: t_u – czas przejścia fali ultradźwiękowej [μs], N – liczba cykli zmęczeniowych.

Jak można zaobserwować na Rys. 6, w pierwszej fazie procesu degradacji, tj. do około 5×10^3 cykli zmęczeniowych, czas przejścia fali ultradźwiękowej zmienia się w niewielkim zakresie. Towarzyszące procesowi degradacji pojawiające się mikropęknięcia przejawiają umiarkowany, równomierny spadek czasu przejścia. Gwałtowniejsza zmiana, w indywidualnym przypadku może być spowodowana kumulacją nieciągłości czy delaminacją. Na wykresie (Rys. 6) efekt ten jest obserwowany w gwałtownej postaci po około 80×10^3 liczby cykli. Wy tłumaczeniem tego spadku jest stopień zaawansowania procesu kumulacji defektów zmęczeniowych. Ilościową identyfikację wyznaczonej korelacji można przyjąć za podstawę diagnostycznej oceny stopnia wyczerpania zdolności nośnej badanych materiałów.

2.3.2. Badania termowizyjne

Na podstawie uzyskanych podczas badań termowizyjnych rozkładów temperatury na powierzchni zewnętrznej rury (Rys. 7) przeprowadzono analizę zmiany stanu materiału w zależności od liczby cykli zmęczeniowych. Analizy dokonano w oparciu o wyznaczone

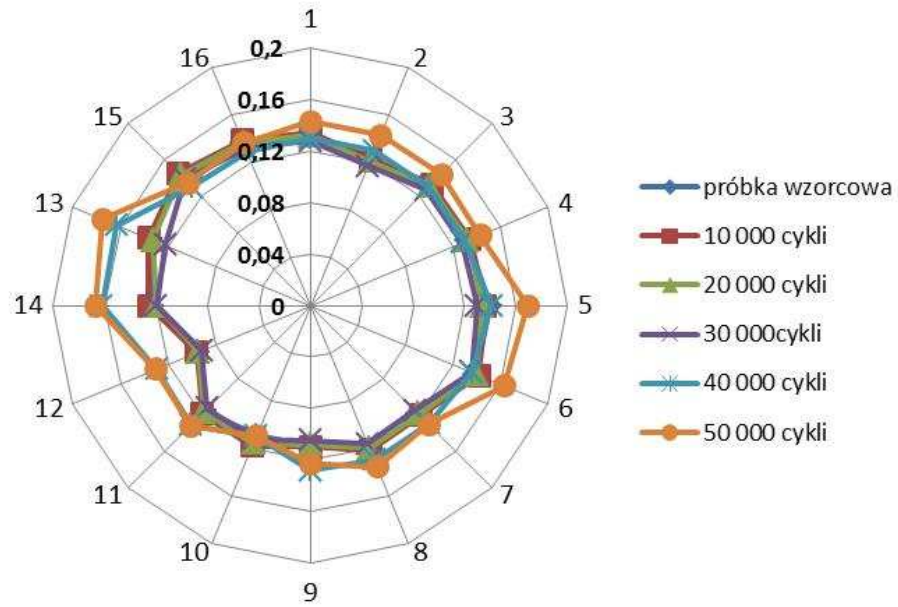
zmiany prędkości nagrzewania i chłodzenia. Na rysunku 8 przedstawiono wykresy kołowe zmian prędkości nagrzewania (Rys. 8a) oraz chłodzenia (Rys. 8b) dla wybranej rury poddanej procesowi degradacji starzeniowo – zmęczeniowej po 30×10^3 cykli. Zaznaczono obszar A, w którym występują defekty strukturalne.



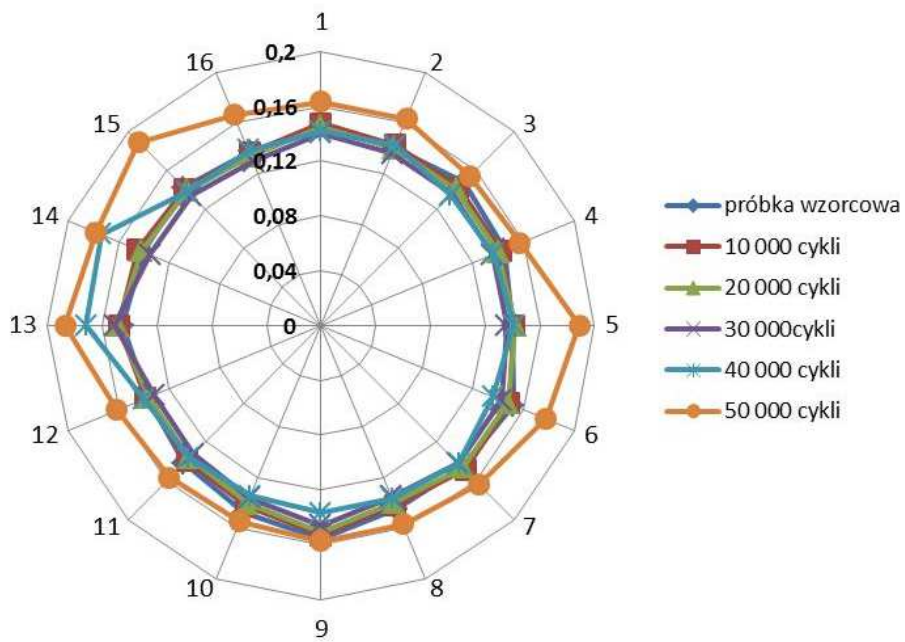
Rys. 7. Termogram z zaznaczonym obszarem uszkodzeń (A) obrazowanym podczas (a) procesu nagrzewania oraz (b) chłodzenia

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wykresy zmian prędkości nagrzewania oraz chłodzenia obserwowanych w punktach 10 i 14 (wyraźne pęknięcia) tej samej rury, której wyniki badań ultradźwiękowych zostały zaprezentowane na Rys. 3. i 4.

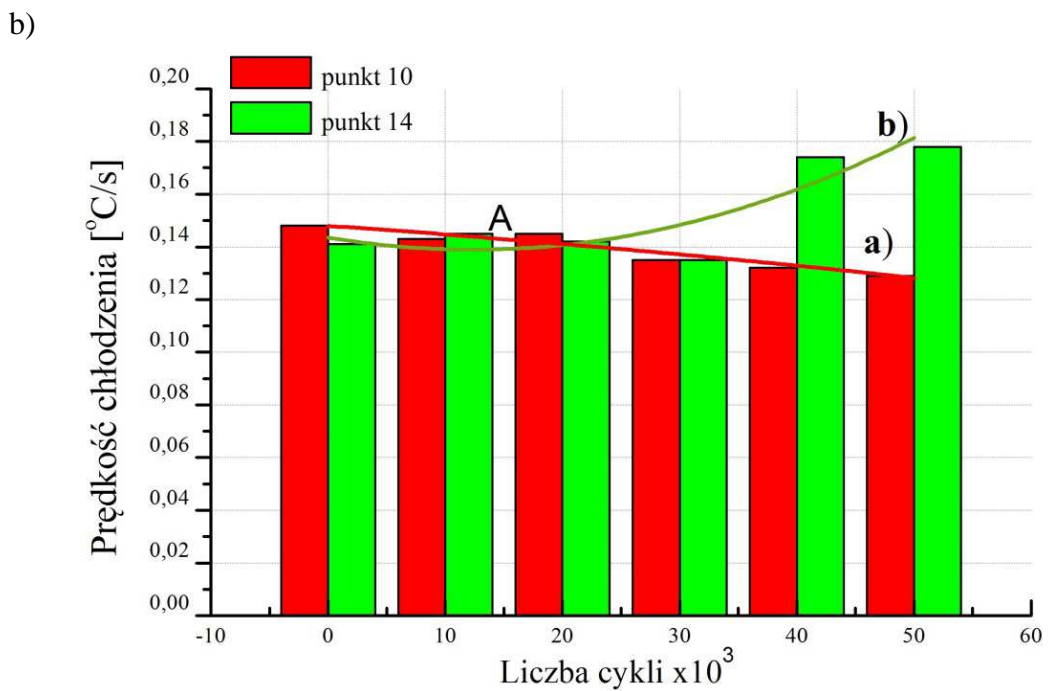
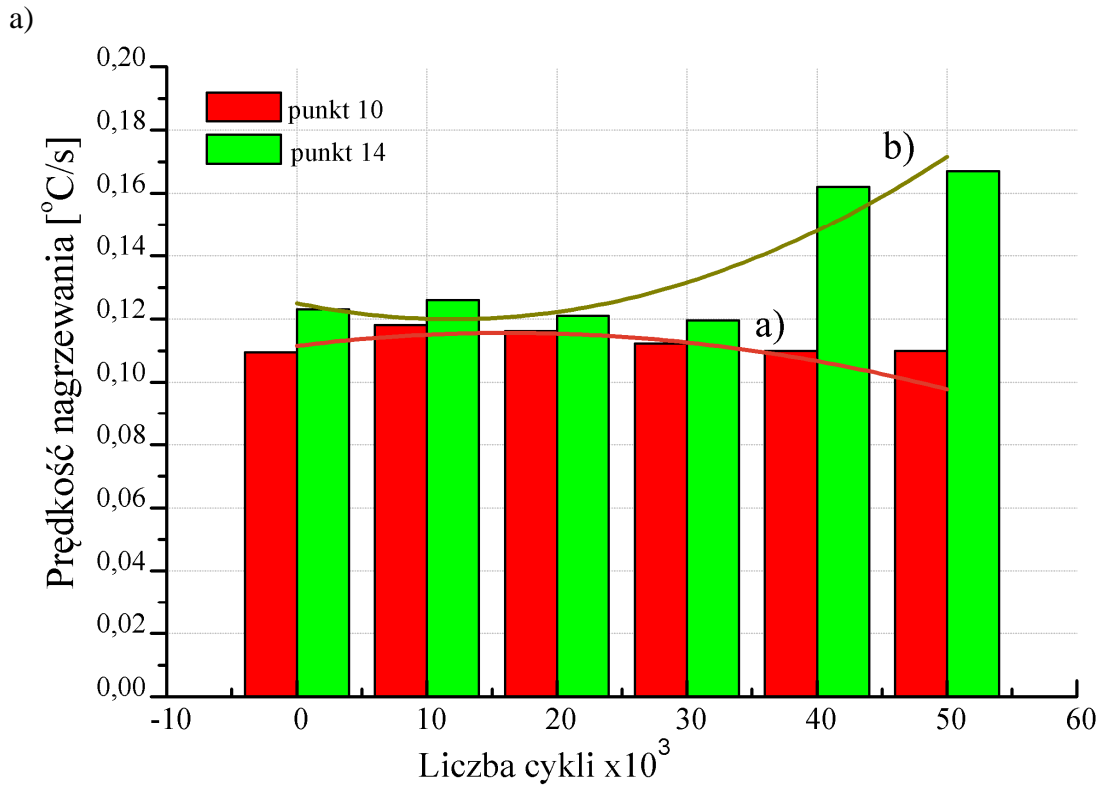
a)



b)



Rys. 8. Zmiana prędkości a) nagrzewania i b) chłodzenia w funkcji liczby cykli zmęzeniowych



Rys. 9. Zmiana prędkości a) nagrzewania i b) chłodzenia w funkcji liczby cykli zmęczeniowych dla wybranych punktów 10 (krzywa a) oraz 14 (krzywa b)

Otrzymane wyniki aproksymowano wielomianem drugiego stopnia. Zmiany prędkości nagrzewania w wybranych punktach można opisać:

- krzywa (a) w obszarze bez delaminacji:

$$y = 0,125 - 8,52e^{-4}N + 3e - 5N^2 \quad , \quad (5)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,91$.

- krzywa (b) w obszarze z wyraźnymi makropęknięciami:

$$y = 0,11 + 5,03e^{-4N} - 1,55e - 5N^2, \quad (6)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,93$,

Zmiany prędkości chłodzenia opisano zależnościami:

- krzywa (b) w obszarze bez delaminacji:

$$y = 0,15 - 2,77e^{-4N} - 3,17e - 6N^2, \quad (7)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,99$,

- krzywa (a) w obszarze z wyraźnymi makropęknięciami:

$$y = 0,14 - 7,43e^{-4N} + 3e - 5N^2, \quad (8)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,88$.

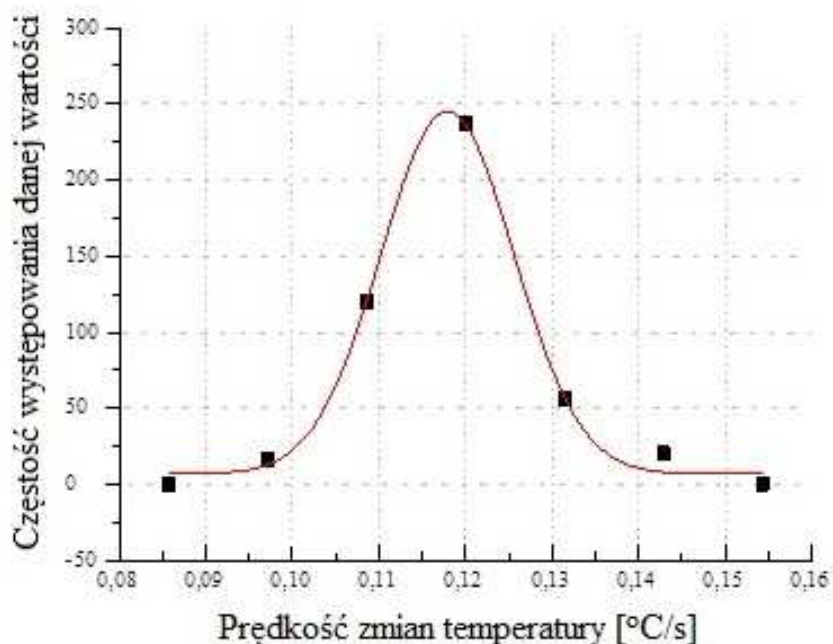
Zaobserwowano, iż wady w postaci mikropęknięć nie wpływają w sposób istotny na zmiany badanych charakterystyk termicznych. Natomiast delaminacja, pęknięcia powodują gwałtowne zmiany zarówno prędkość nagrzewania, jak i chłodzenia. Jest to spowodowane w głównej mierze zmianą przewodności cieplnej i ciepła właściwego, co związane jest nieodzownie z powstawaniem wad strukturalnych. W podanym przykładzie, można było zauważyć obszary (punkty 13-16, oraz 5-6) z wyraźnymi pęknięciami powłoki kompozytowej.

Ze względu na rozbieżności w wyznaczonych prędkościach nagrzewania i chłodzenia w całej populacji badanych próbek, w celu określenia wartości danej prędkości w kolejnej fazie degradacji przeprowadzono analizę częstości występowania opisaną funkcją zgodną z rozkładem Gaussa. Na rysunku 10 przedstawiono wyznaczone funkcje częstości występowania prędkości nagrzewania (Rys. 10a) oraz chłodzenia (Rys. 10b) rury niepoddanej degradacji o współczynnikach odpowiednio dla procesu:

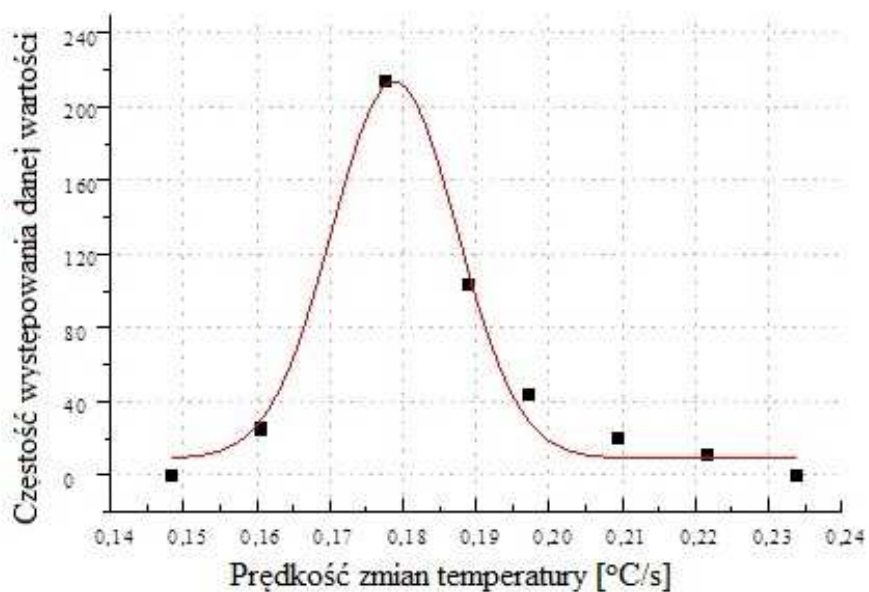
- aktywacji cieplnej: $y_0 = 6,80986$, $x_c = 0,1179$ [$^{\circ}\text{C/s}$], $w = 0,01534$ [$^{\circ}\text{C/s}$], $A = 4,58613$ [$^{\circ}\text{C/s}$]. Współczynnik korelacji wynosi $R = 0,99$,
- przepływu ciepła po wyłączeniu źródła aktywacji: $y_0 = 9,04342$, $x_c = 0,17883$ [$^{\circ}\text{C/s}$], $w = 0,01706$ [$^{\circ}\text{C/s}$], $A = 4,3785$ [$^{\circ}\text{C/s}$]. Współczynnik korelacji wynosi $R = 0,99$.

Współczynniki korelacji funkcji przedstawionych na Rys. 10 zmniejszały się w miarę postępującego procesu degradacji. Jest to proces podobny do obserwowanego w przypadku czasu przejścia fali ultradźwiękowej.

a)



b)



Rys. 10. Funkcje częstości występowania wartości prędkości zmian temperatury w procesie (a) aktywacji cieplnej oraz (b) chłodzenia dla próbki wzorcowej

Istotną zaletą nieniszczącej diagnostyki termowizyjnej jest możliwość obserwacji i lokalizacji wad na głębokości już na etapie prowadzenia rejestracji rozkładu temperatury. Jest to możliwe m.in. dzięki zasadzie kontrastu temperaturowego [23]. Im wyżej umiejscowiona wada pod powierzchnią, tym wyższa temperatura nagrzewania. Na podstawie przeprowadzonych nieniszczących badań termowizyjnych opracowano charakterystyki zmian prędkości nagrzewania i chłodzenia w funkcji liczby cykli (Rys.11). Zależności aproksymowano wielomianem drugiego stopnia, który ma postać:

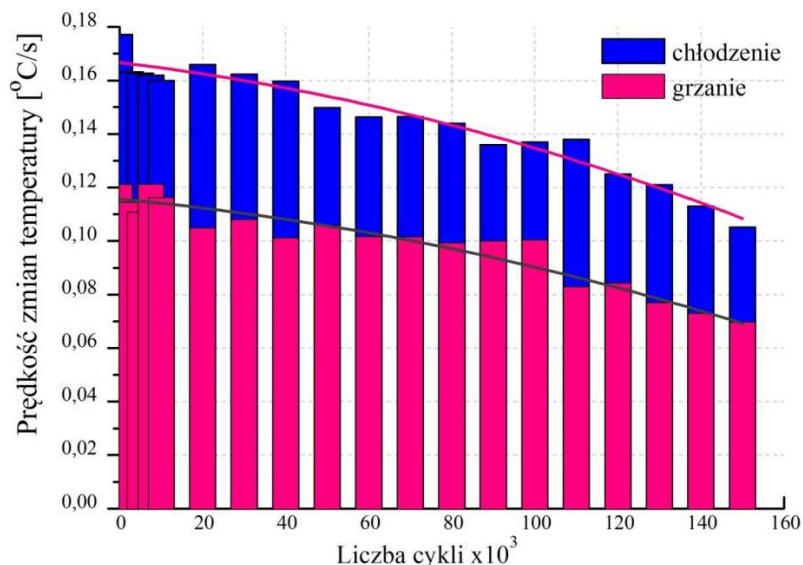
- dla fazy nagrzewania:

$$v_n = -1,36e^{-6}N^2 - 1,83e^{-4}N + 0,17 \quad , \quad (9)$$

- o współczynniku korelacji $R = 0,97$,
dla fazy chłodzenia:

$$v_{ch} = -1,11e^{-6}N^2 - 1,43e^{-7}N + 0,12, \quad (10)$$

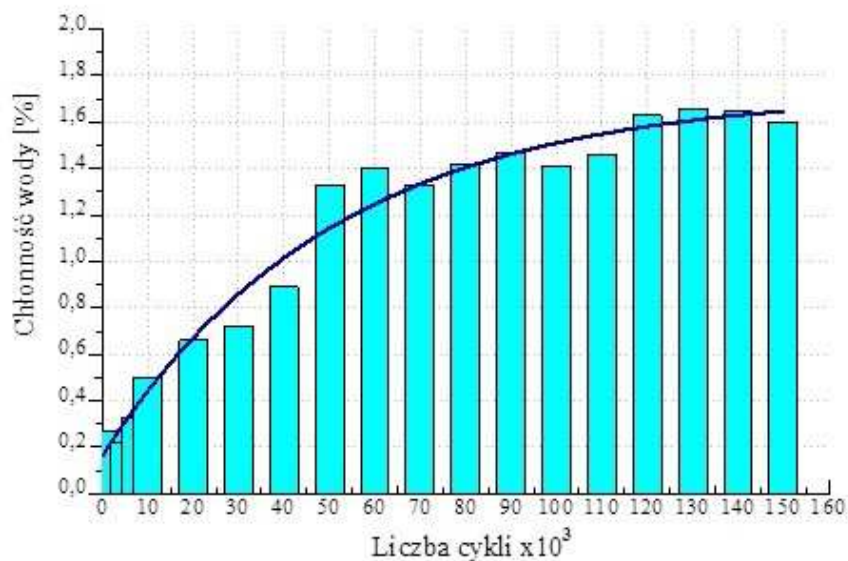
o współczynniku korelacji $R = 0,93$.
Wyższe prędkości zaobserwowano dla procesu chłodzenia.



Rys. 11. Zmiany prędkości nagrzewania i chłodzenia w funkcji liczby cykli

2.3.3. Badania chłonności wody

Wyniki chłonności wody w funkcji liczby cykli przedstawiono na Rys. 12. Chłonność wody w danym punkcie pomiarowym jest średnią z 15 wartości po odrzuceniu najbardziej skrajnych. Jak można zaobserwować, absorpcja wody wrasta wraz z postępującym procesem propagacji uszkodzeń, które są wynikiem degradacji zmęczeniowej.



Rys. 12. Zależność chłonności wody od liczby cykli

Wyniki aproksymowano funkcją eksponentyjalną o postaci:

$$W = 1,67 - 1,51e^{-N/46,66} \quad , \quad (11)$$

o współczynniku korelacji $R = 0,98$.

Zaobserwowane zmiany chłonności wody pośrednio mogą charakteryzować stan struktury powłoki kompozytowej. Im więcej defektów w objętości materiału, tym wyższa absorpcja wody, co opublikowano m.in. w pracy [21]. Pojawiające się mikropęknięcia w efekcie stopniowego łączenia prowadzą do tworzenia większych nieciągłości spełniających kryterium odkształceniowe FPF (First Ply Failure) [1]. Kumulacja rozproszonych mikropęknięć może prowadzić do propagacji pęknięć naruszających ciągłość kompozytu. Jest to istotne z punktu widzenia własności wytrzymałościowych badanego materiału.

Obserwowane różnice w przebiegu badanych charakterystyk wynikają z przyjętej metodyki badań. W przypadku chłonności wody wyraźny wzrost wartości chłonności zauważono dla 50×10^3 liczby cykli zmęczeniowych (Rys. 12). Jest to spowodowane stanem odkształcenia rur podczas badań starzeniowo - zmęczeniowych zgodnie z Rys. 1. Próbkę pobrano z obszaru o największym odkształceniu (Rys. 2a), w związku z czym zaobserwowano największe zmiany strukturalne, które są efektem mikropęknięć tworzących kapilary absorbujące wodę.

W przypadku badań ultradźwiękowych prowadzonych metodą echa fala ultradźwiękowa odbija się od pierwszej napotkanej nieciągłości. Ze względu na fakt, że największe naprężenia obwodowe występują na powierzchni wewnętrznej rury zgodnie z hipotezą Hubera zniszczenie powłok następuje od tej strony. Wyraźne skrócenie czasu przejścia fali ultradźwiękowej przy 80×10^3 cyklach zmęczeniowych jest efektem pojawiających się wad od strony powierzchni wewnętrznej (Rys.6). Metoda ta jednak wymaga dostępu do badanego obiektu. Wyniki badań termowizyjnych potwierdzają zmiany strukturalne w materiale jednak nie można w sposób jednoznaczny określić punktu wyraźnego spadku prędkości nagrzewania czy chłodzenia (Rys.11). Makrowady powodują znaczny wzrost prędkości nagrzewania i chłodzenia (Rys. 9).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1. Czas przejścia fali ultradźwiękowej zmniejszył się wraz z liczbą cykli zmęczeniowych. Zastosowana metoda echa, wykorzystująca falę podłużną, pozwala na identyfikację nieciągłości występujących w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji fali ultradźwiękowej.
2. Zmiany prędkości nagrzewania i chłodzenia rejestrowane termowizyjnie (metodą odbiciową) w przyjętych warunkach pomiaru, malały wraz ze wzrostem liczby cykli. Główną przyczyną takiego zjawiska jest proces kumulacji nieciągłości prowadzących do delaminacji. Zmiany strukturalne powodują obniżenie własności cieplnych kompozytu (np. współczynnika przewodności cieplnej).
3. W obszarze makro wad następuje gwałtowne skrócenie czasu przejścia fali ultradźwiękowej, czego nie obserwuje się w przypadku pojawiających się stopniowo mikronieciągłości. Prędkości nagrzewania i chłodzenia w obszarze mikrodefektów ulegają obniżeniu. Proces kumulacji mikropęknięć prowadzący w końcowym etapie do delaminacji powoduje szybki wzrost mierzonych wielkości termowizyjnych.
4. Rozkłady mierzonych wielkości termowizyjnych i ultradźwiękowych na obwodzie rury (Rys. 3 i 8) są porównywalne i pozwalają na zidentyfikowanie obszarów narażonych na zniszczenie.

5. Dla właściwej oceny stopnia degradacji kompozytów polimerowych badania nieniszczące należy prowadzić przynajmniej dwoma metodami, a wyniki odnosić do próbki wzorcowej, niepoddanej procesowi degradacji starzeniowo - zmęczeniowej
6. Efektem postępującego procesu degradacji starzeniowo – zmęczeniowej kompozytowych powłok rurowych były nieciągłości struktury, będące wynikiem przede wszystkim obciążeń zmęczeniowych. Wady te wpływały na zwiększoną absorpcję wody w badanym kompozycie. Chłonność wody w końcowym etapie wynosiła ok. 1,6%.

References

1. Bamford C.H. Degradation of polymers. Serie: Comprehensive chemical kinetic, Vol. 14 New York: Elsevier, 1975.
2. Brondsted P., Andersen S.I., Lilholt H. Fatigue performance of glass/polyester laminates and the monitoring of material degradation. *Mechanics of Composites Materials* 1996; 32 (1): 21-29.
3. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composites materials. *Procedia Structural Integrity*, 2016; 1:50-57.
4. Hasin Z., Rotem A. A cumulative – damage theory of fatigue failure. *Materials Science and Engineering* 1978; 34(2): 147-160.
5. Huang G., Sun A. Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites. *Materials and Design* 2007; 28(5):1647-1650.
6. Imielińska K., Wojtyra R.: Wpływ absorpcji wody na własności laminatów winyloestrowych wzmocnionych włóknem aramidowym i szklanym. *Kompozyty – Composites* 2003; 3(7): 192-197.
7. Jakubowicz A., Orłós Z. *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1981.
8. Katunin A. *Degradacja cieplna laminatów polimerowych*. Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego, Seria „Biblioteka Problemów Eksploatacji” nr 2326, 2012.
9. Kokan D. *Development of an Improved Filament-Winding Process Model*. Georgia Institute of Technology: Doctors Thesis, 1997.
10. Martin R. *Ageing of composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.
11. Mertiny P., Ellyin F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Composites: Part A* 2002; 33: 1615 – 1622.
12. Mouzakis D.E., Zoga H., Galiotis C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). *Composites Part B* 2008; 39 (3): 467–475.
13. Peters S.T. *Composite Filament Winding*. Ohio: ASM International, 2011.
14. PN-ISO: Rury i kształtki z termoplastycznych tworzyw sztucznych -- Chłonność wody - - Ogólna metoda badania
15. Stabik J. Ageing of laminates in boiling NaCl water solution. *Polymer Testing* 2005; 24 (1): 101-103.

16. Staszewski W., Boller Ch., Tomlinson G.: Health monitoring of aerospace structures, John Willey & Sons, Chichester, 2004, ISBN 9780470092866,
17. Szymiczek M., Wróbel G., Rojek M., Czaplą T. Simulation diagnostics of the polyester-glass pipes degradation process; experimental basis. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2013; 59 (1): 37-47.
18. Talreja R. Fatigue-induced damage mechanisms in carbon fibre-reinforced plastic composites, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 1981; 378 (1775): 461-475.
19. Walczak K., Mamos J. Wytrzymałość zmęczeniowa rur laminowanych GRP stosowanych w górnictwie. Kompozyty – Composites 2004; 4 (10): 194-199.
20. Więcek B., De Mey G. Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Warszawa: Wydawnictwo PAK, 2011.
21. Wróbel G., Szymiczek M.: Wykorzystanie własności łańcucha Markowa w analizie procesu degradacji nośnych rur poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie, 2015, 4(27): 155-168.
22. Wróbel G., Szymiczek M., Rojek M. Charakterystyki cieplne w diagnostyce zmian starzeniowo - zmęczeniowych powłok kompozytowych. Przetwórstwo Tworzyw, 2014, 1: 110-115,
23. Wysocka - Fotek O. Szacownie wielkości i położenia defektów podpowierzchniowych za pomocą impulsowej termografii podczerwieni. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk: Rozprawa doktorska, 2012.
24. Zhu Y.K., Tian G.Y., Lu R.S., Zhang H. A review of optical NDT technologies. Sensors 2011; 11:7773-7798.