

## 11. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie nieniszczących badań ultradźwiękowych kompozytu degradowanego cieplnie i zmęczeniowo wyznaczono następujące zależności:

- prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu degradacji cieplnej (rys. 11.1),
- prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych (rys. 11.2),
- współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych (rys. 11.3),
- wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia (rys. 11.4),
- naprężeń gnących od liczby cykli zmęczeniowych (rys. 11.6 i 11.7).

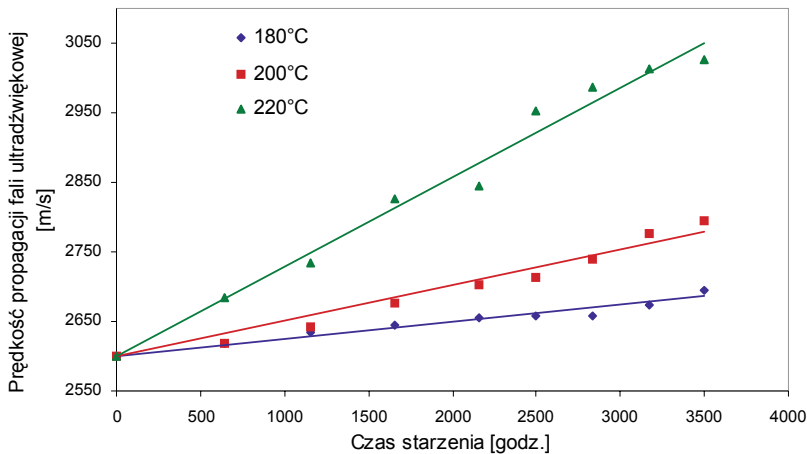
W badaniach termowizyjnych analizowano takie zależności jak:

- prędkość wzrostu temperatury próbki (rys. 11.8),
- czas stabilizacji temperatury (rys. 11.9 i 11.10).

### 11.1. Zależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu starzenia

Na rysunku 11.1 przedstawiono zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu degradacji cieplnej kompozytu TSE-2 w temperaturach 180°C, 200°C i 220°C. Zestawione poniżej wartości kwadratów współczynników korelacji liniowej potwierdzają zasadność liniowej aproksymacji zależności uzyskanych w wyniku pomiarów.

W miarę procesu starzenia prędkość propagacji fali ultradźwiękowej wzrasta. Wzrost jest tym większy, im wyższa jest temperatura starzenia. Obserwowany wzrost prędkości fali ultradźwiękowej wynika ze wzrostu sztywności kompozytów, powszechnie obserwowanego w procesach starzenia cieplnego żywic epoksydowych. Dla badanego kompozytu w czasie starzenia nawet w najwyższej temperaturze nie uzyskano spadku prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Wskazuje to, że kompozyt ten nie uległ w czasie badania degradacji istotnie hamującej propagację fali ultradźwiękowej (np. delaminacja). Uzyskano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu przy zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu starzenia. Współczynniki determinacji zawierają się w przedziale od 0,9584 do 0,981.



$$180^{\circ}\text{C}, \quad v = 0,0243t + 2600,7, \quad R^2 = 0,9584$$

$$200^{\circ}\text{C}, \quad v = 0,0506t + 2600,7, \quad R^2 = 0,9618$$

$$220^{\circ}\text{C}, \quad v = 0,1283t + 2600,7, \quad R^2 = 0,981$$

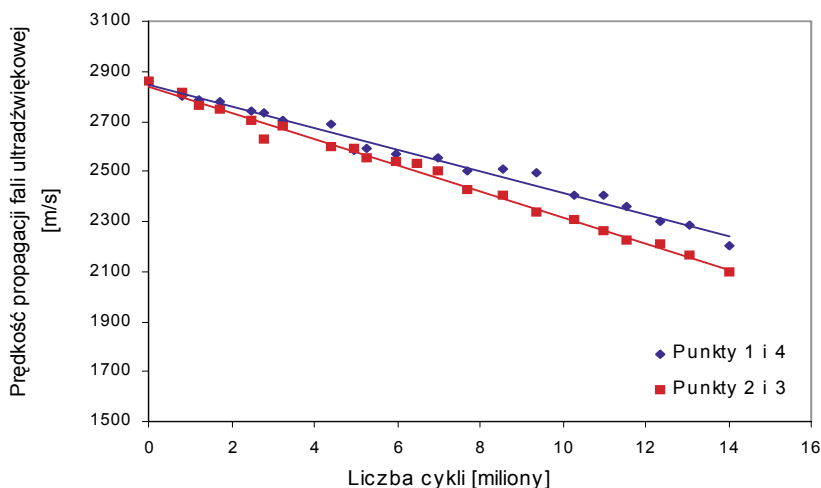
*Rysunek 11.1. Zależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu starzenia kompozytu TSE-2*

## 11.2. Zależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych

W badaniach ultradźwiękowych próbek poddawanych zmęczeniu wyznaczano zależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych oraz zależność współczynnika tłumienia od tej liczby. Na rysunku 11.2 przedstawiono zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w kompozycie TSE-2 w poszczególnych punktach pomiarowych od liczby cykli zmęczeniowych. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na próbkach do badań zmęczeniowych pokazano na rysunkach 10.4 i 10.7. Zgodnie z rysunkiem 10.4 na wykresach oznaczone są jako punkty 1 i 4 (takie same wielkości naprężeń gnących) i punkty 2 i 3 (również takie same wielkości naprężeń gnących).

Jak wskazują przedstawione na rysunku 11.2 zależności, wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych, a więc z postępem procesu degradacji zmęczeniowej, zmniejsza się prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. Jest to wynikiem generowania mikropeknięć, mikroobszarów utraty adhezji pomiędzy osnową a wzmocnieniem i innych wad w kompozycie, które stanowią

przeszkody na drodze propagacji fali ultradźwiękowej. Uzyskano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu dla zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych. Współczynniki determinacji wynoszą dla punktów pomiarowych 1 i 4 - 0,9787, a dla punktów pomiarowych 2 i 4 - 0,9892.



$$\text{Punkty 1,4} \quad v = -4E-05lc + 2863 \quad R^2 = 0,9787$$

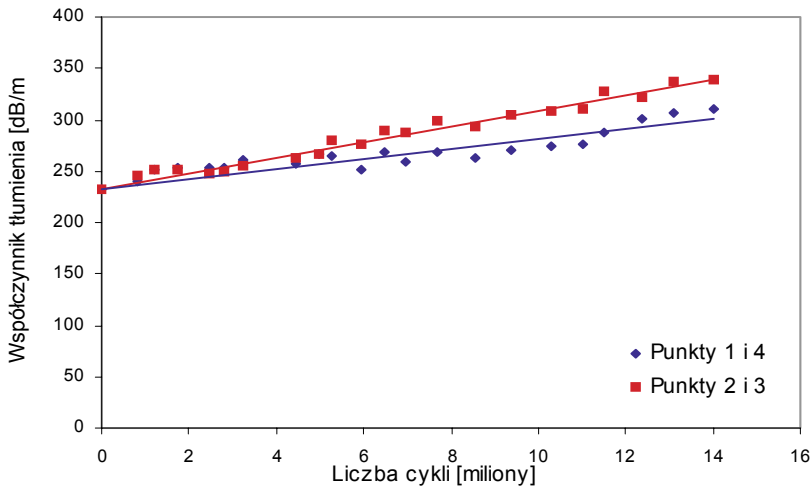
$$\text{Punkty 2,3} \quad v = -5E-050c + 2863 \quad R^2 = 0,9892$$

*Rysunek 11.2. Zależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych*

### 11.3. Zależność współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych

Na rysunku 11.3 przedstawiono zależności współczynnika tłumienia od liczby cykli zmęczeniowych.

Postęp degradacji zmęczeniowej spowodował wzrost współczynnika tłumienia. Można to wytłumaczyć, analogicznie jak w przypadku spadku prędkości propagacji fali ultradźwiękowej, nagromadzeniem się w kompozycie w czasie degradacji zmęczeniowej mikroprzeszkód tłumiących propagację fali. Uzyskano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu dla zależności współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych. Współczynniki determinacji wynoszą dla punktów pomiarowych 1 i 4 - 0,813, a dla punktów pomiarowych 2 i 3 - 0,9796.



$$\text{Punkty 1 i 4} \quad T1 = 5E-06lc + 233,15 \quad R^2 = 0,813$$

$$\text{Punkty 2 i 3} \quad T1 = 8E-06lc + 233,15 \quad R^2 = 0,9736$$

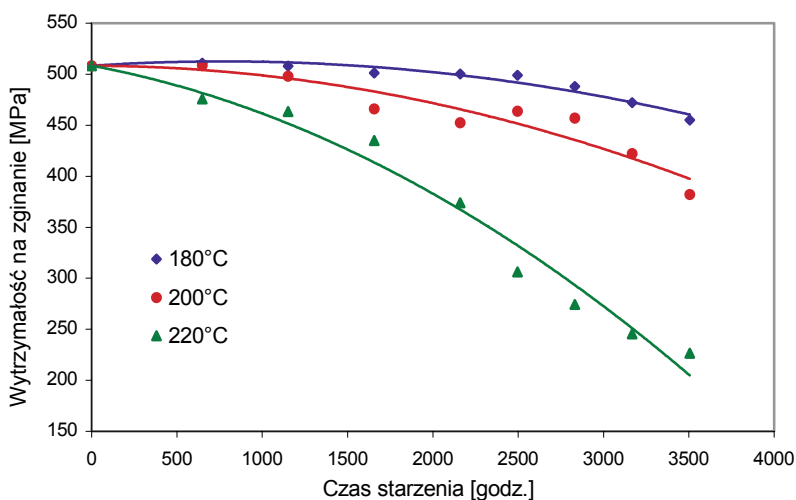
*Rysunek 11.3. Zależność współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych*

#### 11.4. Zależność wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia

Próbki degradowane cieplnie po nieniszczących badaniach ultradźwiękowych i termowizyjnych poddawano niszczącej próbie wytrzymałości na zginanie. Wyznaczano wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości przy zginaniu. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Heckert FPZ 100/1. Próbę zginania wykonano w następujących warunkach:

- temperatura badania:  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,
- promień krzywizny końcówki trzpienia obciążającego: 0,5 mm,
- promień krzywizny końcówek podpór: 5 mm,
- rozstaw podpór: 160 mm,
- prędkość zginania (trzpienia obciążającego): 2 mm/min,

Na rysunkach 11.4 i 11.5 przedstawiono zależności wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości kompozytu TSE-2 od czasu i temperatury starzenia.

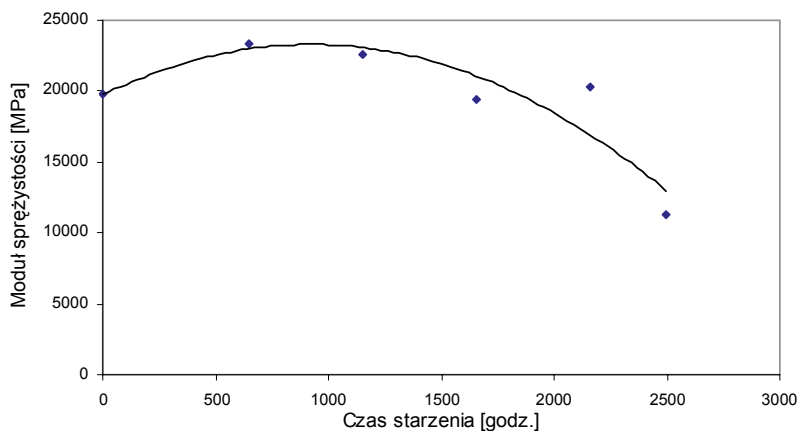


180°C,  $R_g = -6E-06 \cdot t^2 + 0,0068 \cdot t + 512,39$   $R^2 = 0,9281$

200°C,  $R_g = -9E-06 \cdot t^2 - 0,0007 \cdot t + 508,39$   $R^2 = 0,9023$

220°C,  $R_g = -2E-05 \cdot t^2 - 0,031 \cdot t + 508,39$   $R^2 = 0,976$

**Rysunek 11.4.** Zależność wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia próbek z kompozytu TSE-2



220°C,  $E_g = -0,0042 \cdot t^2 + 7,7196 \cdot t + 19739$   $R^2 = 0,816$

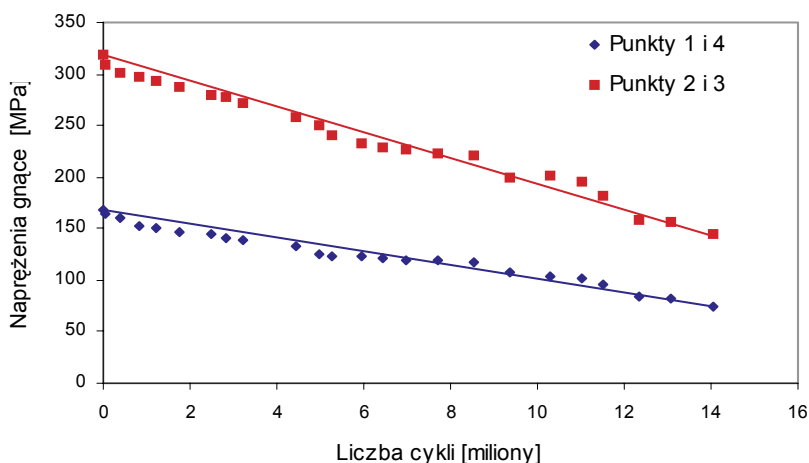
**Rysunek 11.5.** Zależność modułu sprężystości wyznaczonego w próbie zginania od czasu starzenia próbek w temperaturze 220°C

Analiza uzyskanych wyników jednoznacznie wskazuje na ścisłą zależność wytrzymałości na zginanie od czasu i temperatury starzenia. Na rysunkach 11.4 i 11.5 zamieszczono również postacie funkcji aproksymacyjnych drugiego stopnia oraz wartości współczynników determinacji. Uzyskano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu dla zależności wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia. Współczynnik determinacji zawiera się w przedziale od 0,9023 do 0,976. Natomiast dla zależności modułu sprężystości od czasu starzenia zanotowano znacznie większy rozrzut wyników. Współczynnik determinacji wynosi około 0,816. Wzrost modułu sprężystości w początkowym okresie starzenia świadczy o dotwardzeniu żywicy, a w późniejszym czasie o spadku modułu spowodowanym degradacją osnowy polimerowej. Wskazywała na to obserwacja procesu pęknięcia w próbie zginania. Im wyższa była temperatura i dłuższy czas starzenia, tym próbki pękały bardziej krucho. Zależność pomiędzy modułem sprężystości, a czasem starzenia nie jest monotoniczna, a wyniki pomiarów cechuje znacznie większy rozrzut, co uniemożliwia jej wykorzystanie do budowy relacji diagnostycznych obejmujących pełny zakres temperaturowo-czasowy przeprowadzonych badań. W związku z powyższym wyniki modułów sprężystości wyznaczone w próbie zginania nie były brane pod uwagę.

## 11.5. Zależność naprężeń gnących od liczby cykli zmęczeniowych

Na podstawie wyników badań zmęczeniowych wyznaczono krzywe zależności naprężenia gnącego, generowanego w zginanej próbce, przy zachowaniu stałej strzałki ugięcia (3 mm). Na rysunku 11.6 przedstawiono zależność średniego naprężenia gnącego w poszczególnych punktach pomiarowych od liczby cykli zmęczeniowych dla kompozytu TSE-2.

Procedura badań zmęczeniowych została przedstawiona w rozdziale 9.1 i 10.3. Przeprowadzone próby zmęczeniowe nie doprowadziły do zniszczenia badanych próbek. Jako miarę wyczerpania własności wytrzymałościowych przyjęto spadek naprężeń gnących potrzebnych do utrzymania stałej strzałki ugięcia w cyklu zmęczeniowym. Wykresy zależności naprężeń gnących oraz wykresy względnego spadku naprężeń gnących od liczby cykli zmęczeniowych przedstawiono na rysunkach 11.6 i 11.7. Ze względu na zbliżony stan naprężeń w punktach 2 i 3 oraz 1 i 4 (rys. 11.6.) do opisu poziomu naprężeń w badanych punktach próbek brano wartości średnie odpowiednio dla par punktów pomiarowych 2 i 3 oraz 1 i 4.



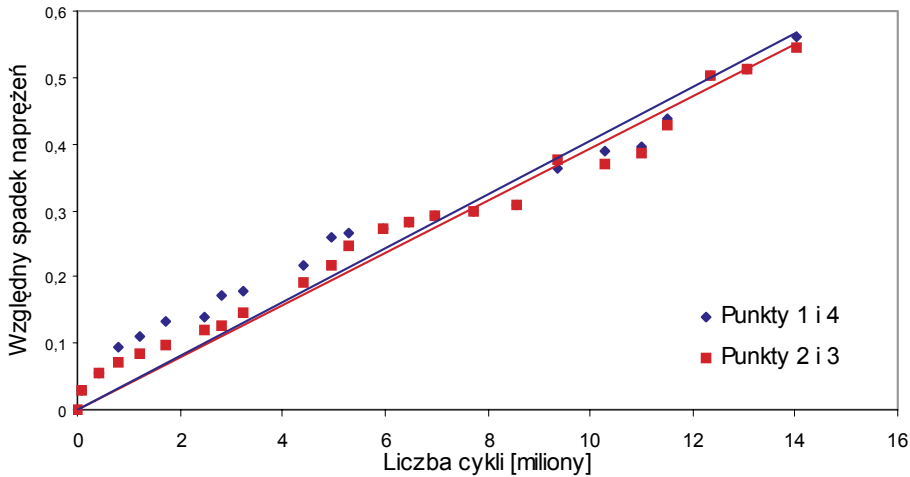
Punkty 1 i 4	$\sigma = -7E-06 \cdot lc + 168,94$	$R^2 = 0,9354$
Punkty 2 i 3	$\sigma = -1E-05 \cdot lc + 319,11$	$R^2 = 0,9712$

**Rysunek 11.6.** Zależność naprężeń gnących w punktach pomiarowych od liczby cykli zmęczeniowych

Uzyskane zależności (rys. 11.6.) są miarą degradacji zmęczeniowej badanych kompozytów. Zmniejszający się w czasie degradacji moduł sprężystości skutkuje zmniejszeniem siły gnącej koniecznej do uzyskania określonej strzałki ugięcia, co prowadzi do zmniejszenia naprężeń w zginanej próbce.

Na rysunku 11.7 przedstawiono zależności względnego spadku naprężeń od liczby cykli zmęczeniowych w punktach pomiarowych 2 i 3 oraz 1 i 4. Względny spadek naprężeń wyliczono ze stosunku naprężeń w badanej próbce po określonej liczbie cykli do naprężeń dla zerowej liczby cykli.

Analiza przebiegu zależności przedstawionych na rysunkach 11.6 i 11.7 wskazuje, że w miarę postępu procesu degradacji zmęczeniowej zmniejsza się poziom naprężeń koniecznych do uzyskania stałej, założonej strzałki ugięcia. Przedstawione do rysunku 11.6 wartości współczynników determinacji są wysokie (0,9712; 0,9354) i świadczą o bardzo dobrym dopasowaniu funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu. Zależności względnego spadku naprężeń od liczby cykli zmęczeniowych (rys. 11.7) mają we wszystkich punktach pomiarowych podobny charakter i również posiadają bardzo dobry współczynnik determinacji (wartości wynoszą odpowiednio 0,9354 i 0,971).



Punkty 1 i 4       $\Delta\sigma/\sigma = 4E-08lc$        $R^2 = 0,9354$

Punkty 2 i 3       $\Delta\sigma/\sigma = 4E-08lc$        $R^2 = 0,971$

**Rysunek 11.7.** Zależność względnego spadku naprężeń w punktach pomiarowych 2 i 3 oraz 1 i 4 od liczby cykli zmęczeniowych

Nieniszczące badania ultradźwiękowe i termowizyjne prowadzone były na tych samych próbkach degradowanych cieplnie i poddanych cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym. W związku z tym wyniki badań wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia (rys. 11.4) oraz zależność naprężeń gnących od liczby cykli zmęczeniowych (rys. 11.6) zostały wykorzystane do opracowania relacji diagnostycznej oceny stanu wytrzymałości badanego kompozytu na podstawie wyników uzyskanych w badaniach ultradźwiękowych i termowizyjnych.

Dla kompozytu degradowanego cieplnie relacje diagnostyczne opracowano na podstawie wyników uzyskanych w badaniach ultradźwiękowych i termowizyjnych w zależności od wytrzymałości na zginanie badanego kompozytu. Natomiast dla kompozytu poddanego cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym relacje diagnostyczne opracowano na podstawie wyników badań ultradźwiękowych i termowizyjnych w odniesieniu do względnego spadku naprężeń.

Uzyskane zależności posłużyły do opracowania relacji diagnostycznych opisanych w rozdziale 12.



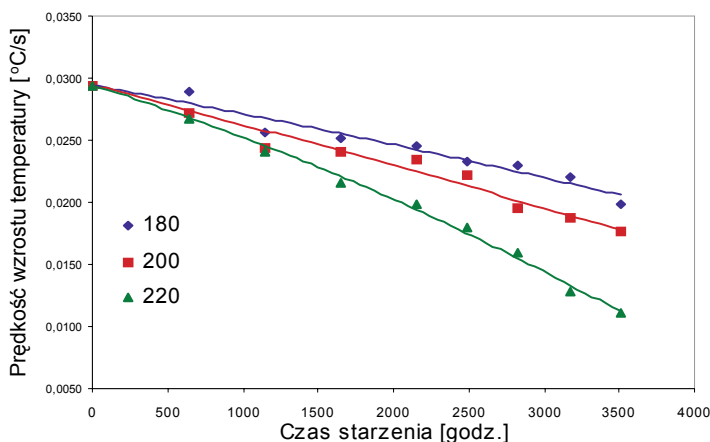
## 11.6. Badania termowizyjne kompozytów degradowanych cieplnie i zmęczeniowo

W badaniach termowizyjnych analizowano takie cechy uzyskanych zależności jak przedstawione graficznie na rysunku 10.12, czyli:

- prędkość wzrostu temperatury próbki,
- czas stabilizacji temperatury.

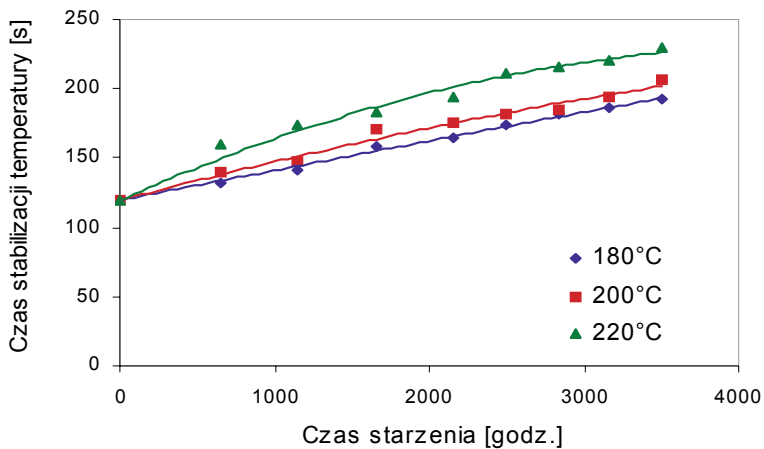
Trwałość oceniano na podstawie zmian przebiegów temperatury na powierzchni badanych próbek, wyznaczanych techniką termograficzną oraz na podstawie utraty wytrzymałości z upływem czasu degradacji cieplnej. W badaniach termograficznych jako kryteria oceny wpływu czasu starzenia na własności cieplne wybrano prędkość wzrostu temperatury i czas stabilizacji temperatury (rys. 10.12).

Wykresy zależności prędkości wzrostu temperatury i czasu stabilizacji temperatury od czasu starzenia w różnych temperaturach (wyznaczone w badaniach termograficznych) przedstawiono na rysunkach 11.8. do 11.9. Na rysunkach tych zamieszczono postacie funkcji aproksymacyjnych drugiego stopnia oraz wartości kwadratów współczynników korelacji. Uzyskano bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnych do wyników eksperymentu. Współczynnik determinacji krzywych na rysunku 11.8. zawiera się w przedziale od 0,9493 do 0,9953, a krzywych z rysunku 11.9. od 0,9758 do 0,9945.



180°C	$V = -8E-11 \cdot t^2 - 2E-06 \cdot t + 0,0294$	$R^2 = 0,9493$
200°C	$V = -5E-11 \cdot t^2 - 1803E-06 \cdot t + 0,0294$	$R^2 = 0,9686$
220°C	$V = -4E-10 \cdot t^2 - 4E-06 \cdot t + 0,0294$	$R^2 = 0,9953$

**Rysunek 11.8.** Zależność prędkości wzrostu temperatury od czasu starzenia



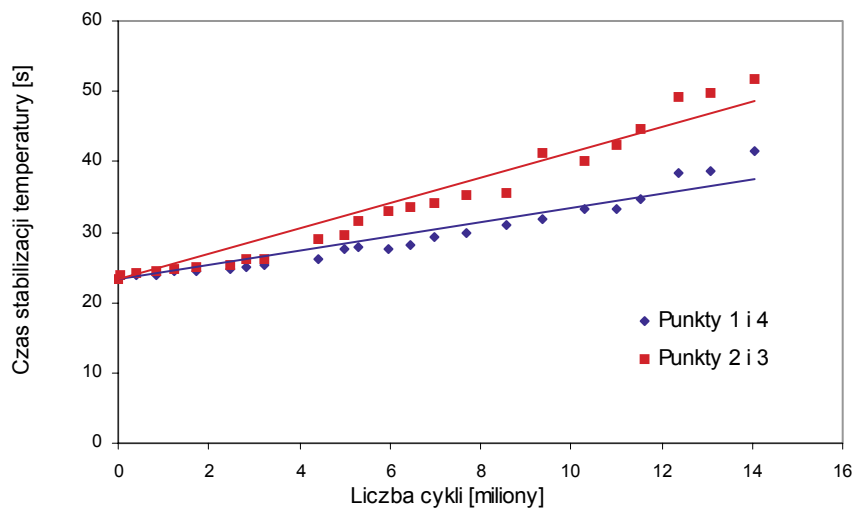
180°C	$t_s = -6E-06 \cdot t^2 + 0,0502 \cdot t + 119,4$	$R^2 = 0,9945$
200°C	$t_s = -2E-06 \cdot t^2 + 0,0296 \cdot t + 119,4$	$R^2 = 0,9818$
220°C	$t_s = -2E-07 \cdot t^2 + 0,022 \cdot t + 119,4$	$R^2 = 0,9758$

**Rysunek 11.9.** Zależność czasu stabilizacji temperatury od czasu starzenia próbek w trzech różnych temperaturach

Analiza przebiegu zależności prędkości wzrostu temperatury od czasu starzenia wskazuje, że czym większy stopień degradacji cieplnej, tym prędkość wzrostu temperatury jest mniejsza. Jest to związane ze zmianami struktury osnowy polimerowej i powstawaniem mikronieciągłości w kompozycie. Te same przyczyny powodują wzrost czasu stabilizacji temperatury w badaniach termograficznych wraz ze wzrostem czasu i temperatury starzenia.

Na rysunku 11.10. przedstawiono zależności pomiędzy czasem stabilizacji temperatury wyznaczonym w badaniach termograficznych, a liczbą cykli zmęczeniowych.

Uzyskano wzajemnie jednoznaczne zależności pomiędzy badanymi wielkościami. Współczynniki determinacji wynoszą 0,9259 oraz 0,9514. Z przedstawionych wykresów wynika, że wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych rośnie czas stabilizacji temperatury. Jest to związane ze zmianami struktury osnowy polimerowej i powstawaniem mikronieciągłości w kompozycie, co utrudnia przepływ ciepła w badaniach termograficznych i uwiadcza się wydłużeniem czasu stabilizacji temperatury.



Punkty 1,4       $t_s = 1,0263x + 23,25$        $R^2 = 0,9259$

Punkty 2,3       $t_s = 1,8061x + 23,25$        $R^2 = 0,9514$

**Rysunek 11.10.** Zależność czasu stabilizacji temperatury od liczby cykli zmęczeniowych punktów pomiarowych 2 i 3 oraz 1 i 4