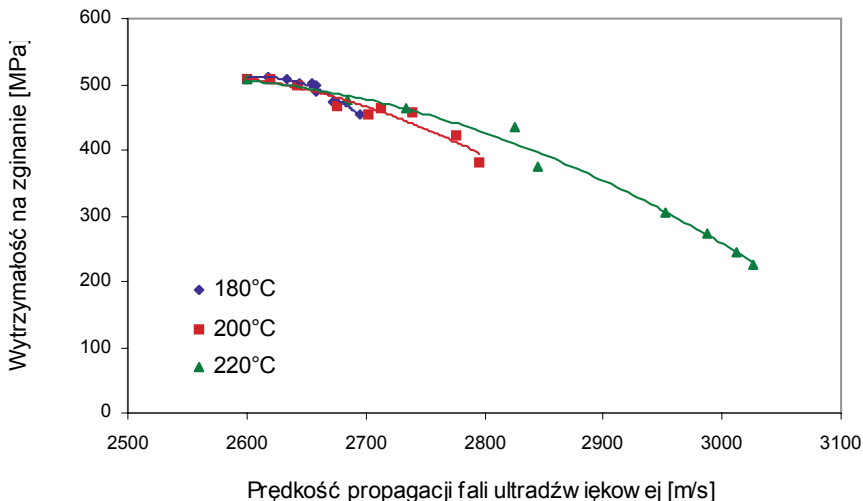


12. Wyznaczenie relacji diagnostycznej oceny stanu wytrzymałości badanych materiałów kompozytowych

12.1 Wyznaczanie relacji diagnostycznych w badaniach ultradźwiękowych

W wyniku przeprowadzonych statycznych badań wytrzymałościowych oraz nieniszczących badań ultradźwiękowych kompozytu degradowanego cieplnie uzyskano współzależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej i wytrzymałości na zginanie od czasu starzenia w różnych temperaturach. Te współzależności prowadzą do wzajemnej korelacji badanych charakterystyk, która posiada cechy relacji diagnostycznej. Należy podkreślić, że nie oznacza to związku przyczynowo-skutkowego pomiędzy zmianami prędkości propagacji fali ultradźwiękowej i wytrzymałości na zginanie.

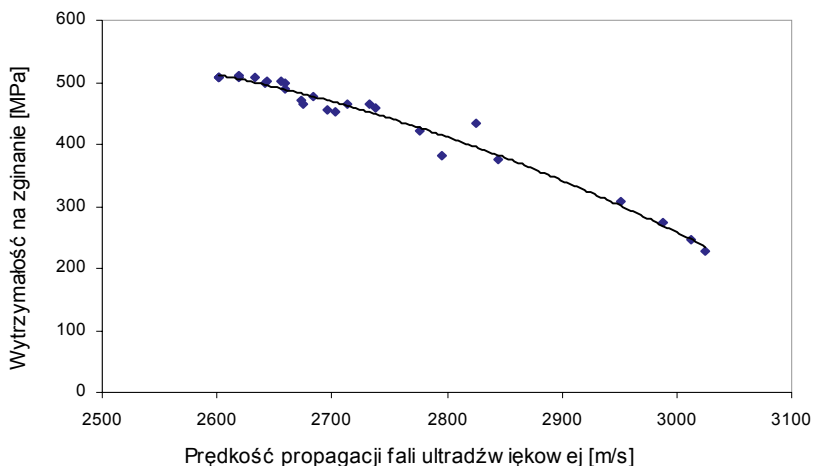
Graficzną reprezentację otrzymanych relacji diagnostycznych przedstawiono na rysunku 12.1.



180°C	$Re = -0,0087v^2 + 45,502v - 58951$	$R^2 = 0,9446$
200°C	$Re = -0,0017v^2 + 8,3382v - 9992,1$	$R^2 = 0,932$
220°C	$Re = -0,0011v^2 + 5,6628v - 6633,3$	$R^2 = 0,9867$

Rysunek 12.1. Współzależność wytrzymałości na zginanie i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej dla próbek z kompozytu TSE-2 degradowanych cieplnie

Na rysunku 12.2. przedstawiono jedną, wspólną współzależność wytrzymałości na zginanie i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej dla kompozytu TSE-2 we wszystkich próbkach degradowanych cieplnie.



$$R_e = -0,0007v^2 + 3,0982v - 3035,6 \quad R^2 = 0,9768$$

Rysunek 12.2. Współzależność wytrzymałości na zginanie i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej dla próbek z kompozytu TSE-2 degradowanych cieplnie w temp. 180°C, 200°C i 220°C

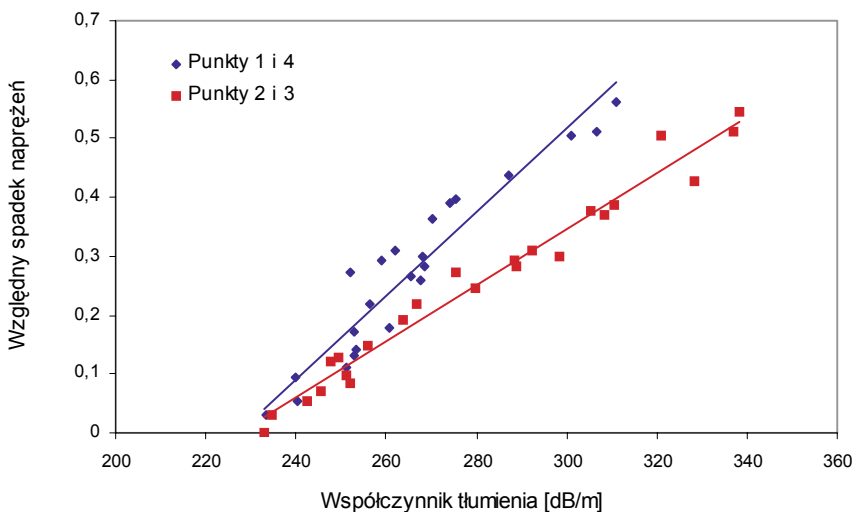
Wszystkie przedstawione współzależności wskazują, że w badanym obszarze spadkowi wytrzymałości na zginanie towarzyszy wzrost prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Związane jest to z usztywnieniem kompozytów w miarę postępu procesu degradacji. Im wyższa temperatura starzenia, tym krzywe współzależności mają większe nachylenie. Krzywe przedstawione na rysunkach 12.1 i 12.2 wskazują, że obserwowane zależności są również słuszne w całym zakresie badanych wartości temperatur. Wartość współczynnika determinacji dla współzależności wyznaczonych dla poszczególnych temperatur jest w każdym przypadku większa od 0,9 i wynosi 0,9446, 0,932 i 0,9867, natomiast przy współzależności zbiorczej wynosi 0,9768.

W wyniku badań zmęczeniowych i ultradźwiękowych uzyskano następujące współzależności (korelacje) diagnostyczne:

- względnego spadku naprężeń w warunkach próby zmęczeniowej przy stałej strzałce ugięcia i współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej - w miarę postępu procesu degradacji zmęczeniowej,

- względnego spadku naprężeń w warunkach próby zmęczeniowej oraz współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej - w miarę postępu procesu degradacji współczynnik tłumienia fali ultradźwiękowej rośnie,
- względnego spadku naprężeń i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w badanej próbce podczas próby zmęczeniowej przy stałej strzałce ugięcia - w miarę postępu procesu degradacji zmęczeniowej prędkości propagacji fali oraz naprężenia ulegają zmniejszeniu.

Graficzne reprezentacje współzależności współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej i względnego spadku naprężeń w poszczególnych punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 12.3.



$$\text{Punkty 1 i 4} \quad \Delta\sigma/\sigma_0 = 0,0071Tl - 1,6169 \quad R^2 = 0,9142$$

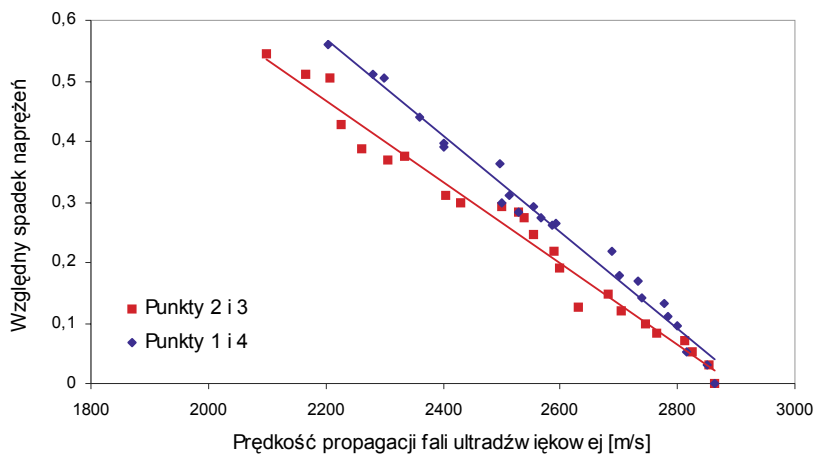
$$\text{Punkty 2 i 3} \quad \Delta\sigma/\sigma_0 = 0,0048Tl - 1,0879 \quad R^2 = 0,9734$$

Rysunek 12.3. Współzależność względnego spadku naprężeń w punktach pomiarowych 1 i 4 oraz 2 i 3 i współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej

Graficzne odwzorowanie współzależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej i względnego spadku naprężeń w poszczególnych punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 12.4.

Na rysunku 12.5 przedstawiono współzależność współczynnika tłumienia i względnego spadku naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych na długości próbek degradowanych

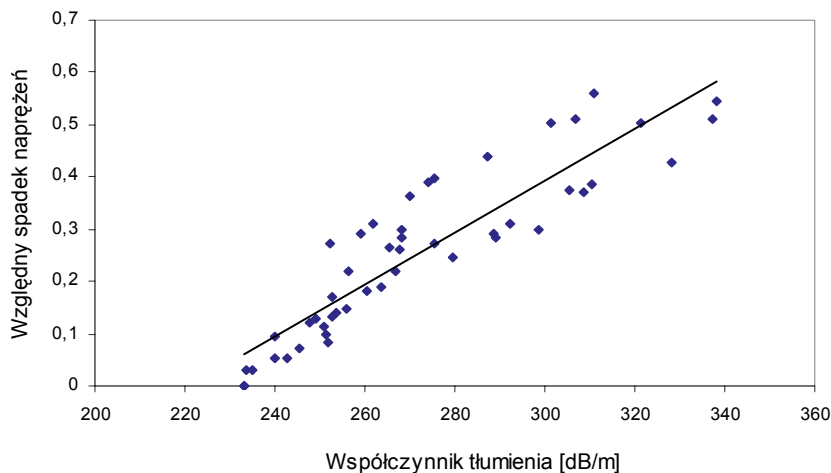
zmęczeniu, a na rysunku 12.6 współzależność prędkości propagacji fali ultradźwiękowej i względnego spadku naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych tych samych próbek.



Punkty 1 i 4 $\Delta\sigma/\sigma_0 = -0,0007v + 1,9588$ $R^2 = 0,9785$

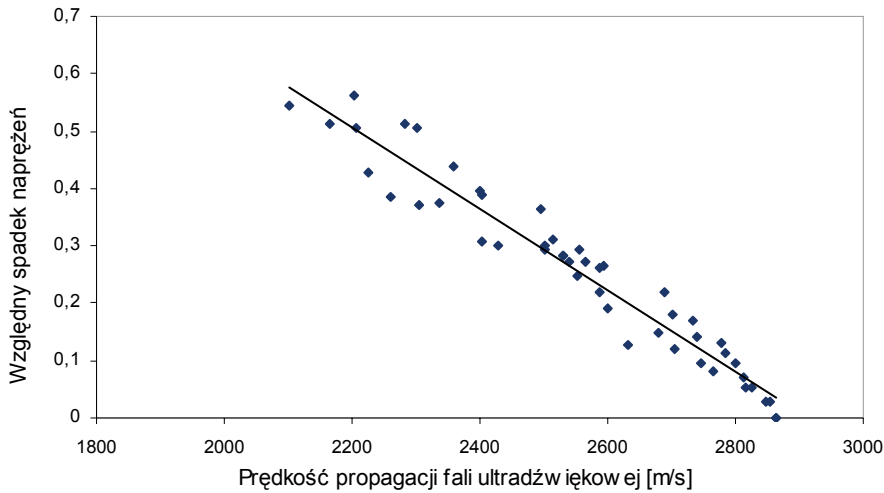
Punkty 2 i 3 $\Delta\sigma/\sigma_0 = -0,0008v + 2,3308$ $R^2 = 0,9837$

Rysunek 12.4. Współzależność względnego spadku naprężeń w punktach pomiarowych 1 i 4 oraz 2 i 3 i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej



$\Delta\sigma/\sigma_0 = 0,005T1 - 1,096$ $R^2 = 0,8188$

Rysunek 12.5. Współzależność względnego spadku naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych i współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej



$$\Delta\sigma/\sigma_0 = -0,0007v + 2,0655$$

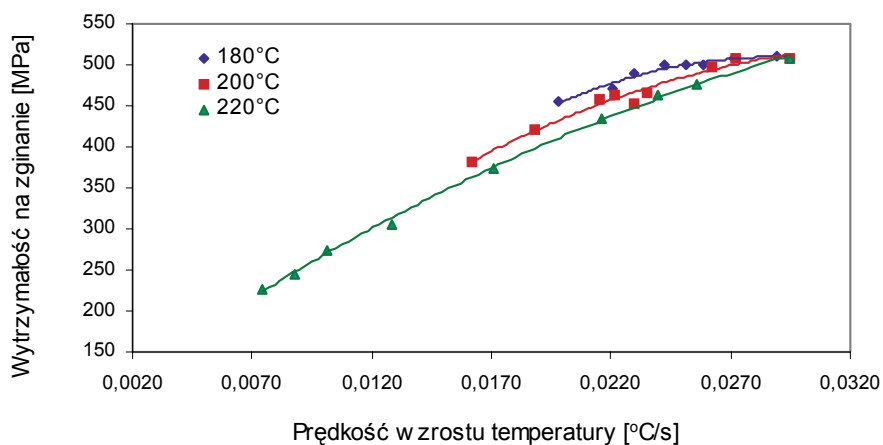
$$R^2 = 0,9421$$

Rysunek 12.6. Współzależność względnego spadku naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

Wszystkie przedstawione współzależności wskazują, że prędkość propagacji fali ultradźwiękowej jest tym większa, im niższe są wartości względnego spadku naprężeń (większe naprężenie gnące). Związane jest to z większymi naprężeniami próbek o mniejszym stopniu degradacji. Tym samym mechanizmem można tłumaczyć związek współczynnika tłumienia z poziomem naprężeń gnących. Niski poziom naprężeń gnących (wysokie wartości względnego spadku naprężeń) świadczący o większym stopniu degradacji skorelowany jest z większym współczynnikiem tłumienia fali ultradźwiękowej. Wykresy przedstawione na rysunkach 12.5 i 12.6 wskazują, że charakter obserwowanych współzależności jest podobny również w przypadku wyznaczonych dla wszystkich punktów pomiarowych łącznie. Rozrzut wyników pomiarów w stosunku do współzależności zbiorczych jest jednak znacznie większy niż dla wyznaczonych w odniesieniu do poszczególnych punktów pomiarowych z osobna (współzależności lokalne). Wartości współczynnika determinacji dla krzywych lokalnych wynoszą od 0,9142 do 0,9837. Natomiast dla zależności zbiorczej względnego spadku naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej wartość ta wynosi 0,9421, a względnego spadku naprężeń od współczynnika tłumienia 0,8188.

12.2. Wyznaczenie relacji diagnostycznej w badaniach termowizyjnych

W badaniach degradacji cieplnej poszukiwano relacji statystycznie istotnych wiążących stopień wyczerpania własności wytrzymałościowych, określony w niszczących badaniach mechanicznych (próba zginania), będący skutkiem starzenia cieplnego, z wynikami badań termograficznych kompozytów. W badaniach określano wielkości takie jak prędkość wzrostu temperatury po stronie przeciwnej do nagrzewanej oraz czas stabilizacji temperatury. Na rysunku 12.7 przedstawiono współzależność wytrzymałości na zginanie próbek starzonych w różnych temperaturach oraz prędkości wzrostu temperatury określonej w badaniach termograficznych, a na rysunku 12.8 współzależności wytrzymałości na zginanie oraz czasu stabilizacji temperatury.

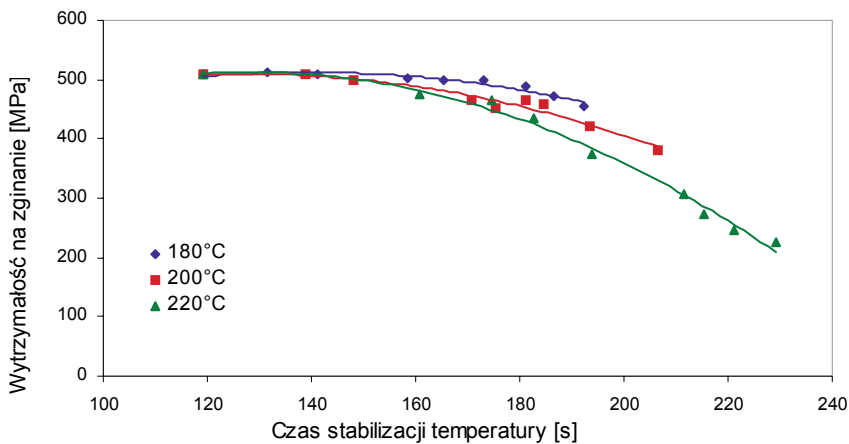


180°C	$R_g = -680151 \cdot V^2 + 39317 \cdot V - 58,39$	$R^2 = 0,9744$
200°C	$R_g = -394459 \cdot V^2 + 27802 \cdot V + 36,292$	$R^2 = 0,972$
220°C	$R_g = -213045 \cdot V^2 + 20885 \cdot V + 80,809$	$R^2 = 0,9988$

Rysunek 12.7. Współzależność wytrzymałości na zginanie i prędkości wzrostu temperatury wyznaczona dla próbek degradowanych cieplnie

Ponieważ w rzeczywistych warunkach eksploatacji kompozytów w podwyższonych temperaturach nie jest znana wartość temperatury i może się ona zmieniać w czasie, należy opracować sposób oceny stopnia degradacji cieplnej na podstawie wyników badań termograficznych niezależny od temperatury starzenia. Na rysunkach 12.9 i 12.10 przedstawiono takie relacje diagnostyczne dla kompozytu TSE-2 wiążące wyniki badań

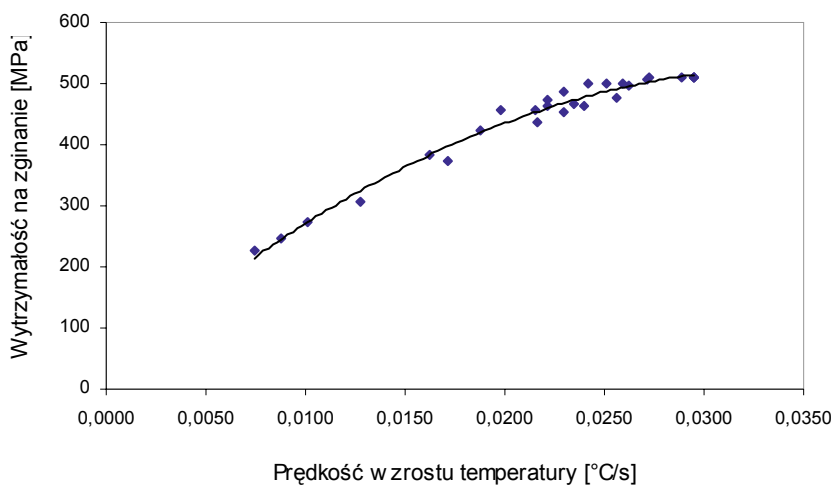
niszczących z wynikami nieniszczących badań termograficznych. Przedstawione relacje diagnostyczne pozwalają na jednoznaczne określenie zmiany wytrzymałości na zginanie, będącej miarą stopnia degradacji wytrzymałościowej, na podstawie wyników badań termograficznych, w tym przypadku na podstawie prędkości wzrostu temperatury oraz czasu stabilizacji temperatury na powierzchni badanego kompozytu po stronie przeciwnej do nagrzewanej. Dla obu relacji uzyskano wysokie współczynniki determinacji i tak dla zależności $R_g(v)$ $R^2 = 0.9788$ natomiast dla $R_g(ts)$ $R^2 = 0.9396$. Relacja wiążąca wytrzymałość na zginanie z prędkością wzrostu temperatury jest bardziej jednoznaczna, gdyż cechuje ją wyższy współczynnik korelacji i monotoniczność w całym badanym zakresie.



180°C	$R_g = -0,018 \cdot ts^2 + 5,0245 \cdot ts + 162,64$	$R^2 = 0,9292$
200°C	$R_g = -0,0198 \cdot ts^2 + 5,0494 \cdot ts + 186,55$	$R^2 = 0,9656$
220°C	$R_g = -0,03 \cdot ts^2 + 7,7342 \cdot ts + 14,844$	$R^2 = 0,9886$

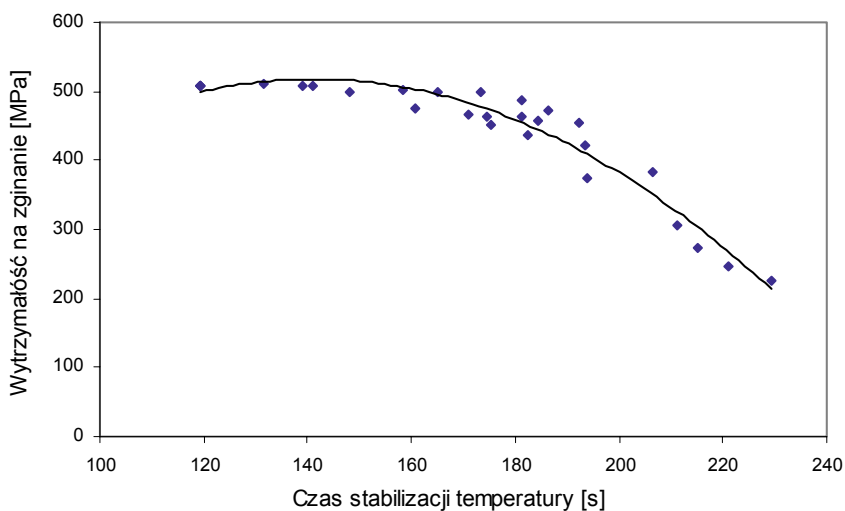
Rysunek 12.8. Współzależność wytrzymałości na zginanie i czasu stabilizacji temperatury wyznaczona dla próbek degradowanych cieplnie.

W badaniach zmęczeniowych poszukiwano relacji statystycznie istotnych, wiążących stopień wyczerpania własności wytrzymałościowych z wynikami badań termograficznych kompozytu TSE-2. W badaniach termograficznych określano czas stabilizacji temperatury, a w badaniach degradacji zmęczeniowej wyznaczano względny spadek naprężeń w zginanych próbkach przy stałej strzałce ugięcia. Na rysunku 12.11 przedstawiono współzależności względnego spadku naprężeń od czasu stabilizacji temperatury, wyznaczonej na podstawie badań termograficznych, dla punktów pomiarowych 2 i 3 oraz 1 i 4.



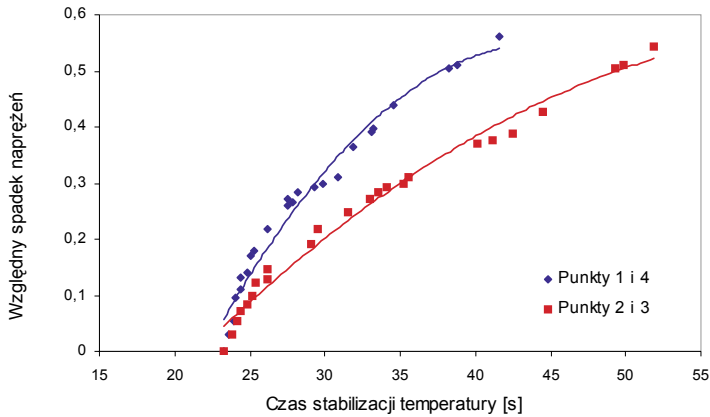
$$R_g = -413320 \cdot V^2 + 28836 \cdot V + 23,92 \quad R^2 = 0,9788$$

Rysunek 12.9. Diagnostyczna współzależność wytrzymałości na zginanie i prędkości wzrostu temperatury wyznaczona dla próbek starzonych cieplnie w trzech różnych temperaturach



$$R_g = -0,0393 \cdot t_s^2 + 11,088 \cdot t_s - 265,02 \quad R^2 = 0,9396$$

Rysunek 12.10. Diagnostyczna współzależność wytrzymałości na zginanie i czasu stabilizacji temperatury wyznaczona dla próbek starzonych cieplnie w trzech różnych temperaturach

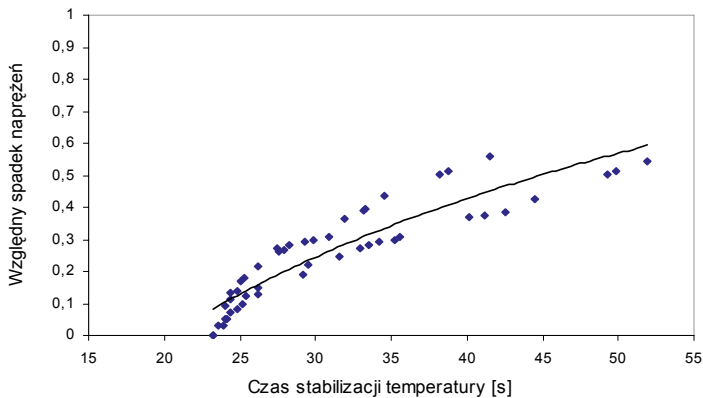


$$\text{Punkty 1 i 4} \quad \Delta\sigma/\sigma = -0,0011x^2 + 0,0974x - 1,6142 \quad R^2 = 0,9705$$

$$\text{Punkty 2 i 3} \quad \Delta\sigma/\sigma = -0,0003x^2 + 0,0392x - 0,7044 \quad R^2 = 0,9848$$

Rysunek 12.11. Współzależność względnego spadku naprężeń i czasu stabilizacji temperatury dla punktów pomiarowych 2,3 oraz 1,4

Tak jak w poprzednim przypadku, wyznaczono jedną wspólną relację diagnostyczną wiążącą względny spadek naprężeń określony w badaniach zmęczeniowych ze zmianą czasu stabilizacji temperatury, określoną w nieniszczących badaniach termograficznych. Na rysunku 12.12 przedstawiono wyznaczoną relację diagnostyczną dla kompozytu TSE-2 wiążącą wyniki badań zmęczeniowych z wynikami badań termograficznych.



$$\Delta\sigma/\sigma = 0,634\text{Ln}(ts) - 1,9114 \quad R^2 = 0,8472$$

Rysunek 12.12. Współzależność względnego spadku naprężeń i czasu stabilizacji temperatury dla kompozytu TSE-2

Przedstawiona na rysunku 12.12 relacja diagnostyczna pozwala na jednoznaczne określenie zmiany względnego spadku naprężeń, będących miarą stopnia degradacji wytrzymałościowej, na podstawie wyników badań termograficznych, w tym przypadku na podstawie czasu stabilizacji temperatury na powierzchni badanego kompozytu po stronie przeciwnej do nagrzewanej. Relacja wiążąca obie wielkości jest wzajemnie jednoznaczna, lecz cechuje ją stosunkowo duży rozrzut wyników, stąd niski współczynnik determinacji wynoszący 0,8472.