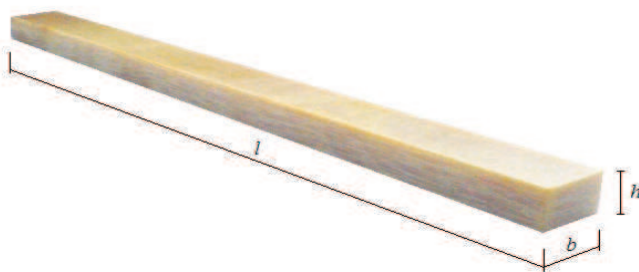


10. Metodyka badań doświadczalnych

10.1. Wykonanie próbek do badań

Do badań wytypowano kompozyt (laminat) epoksydowo-szklany typu TSE-2 produkcji Izoerg Gliwice o grubości 4 i 10 mm. Laminat ten produkowany jest metodą prasowania, co w dużej mierze eliminuje przypadkowe defekty w postaci pęcherzy powietrza, nieciągłości i delaminacji. W celu uzyskania jak największej powtarzalności wyników próbki zostały wycięte z płyt epoksydowo-szklanych w jednym kierunku w stosunku do osnowy włókien. Do badań degradacji cieplnej wycięto próbki z płyty o grubości 10 mm, natomiast do badań zmęczeniowych z płyty o grubości 4 mm. Wszystkie degradowane cieplnie i zmęczeniowo próbki poddawane były badaniom termograficznym i ultradźwiękowym. Dla próbek degradowanych cieplnie określono wytrzymałość na zginanie. Do badań degradacji cieplnej wycięto z kompozytu epoksydowo-szklanego próbki o wymiarach $10 \times 20 \times 250$ mm (rys. 10.1).



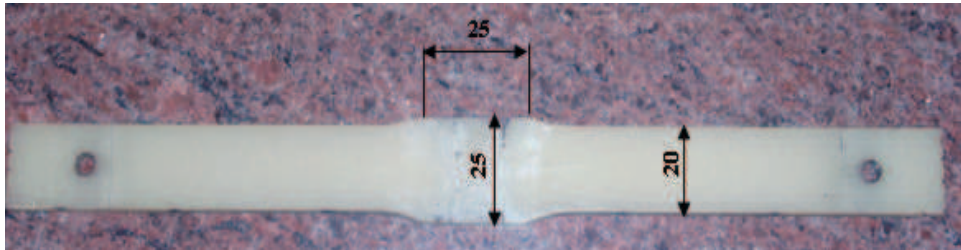
Rysunek 10.1. *Próbka do badań starzeniowych ($l = 250$ mm, $b = 20$ mm, $h = 10$ mm)*

Natomiast do badań degradacji zmęczeniowej wycięto próbki o wymiarach $4 \times 25 \times 250$ mm (rys. 10.2). W trakcie wstępnych badań zmęczeniowych niektóre próbki pękały po około 2 miliony cykli zmęczeniowych, w punkcie nacisku trzpienia gnącego, co uniemożliwiało przeprowadzenie długotrwałych prób zmęczeniowych. Nie zaobserwowano jednak istotnych zmian badanych charakterystyk kompozytu.

W celu uniknięcia działania karbu w środku próbki zmodyfikowano kształt próbek (rys. 10.3). Wszystkie badania zmęczeniowe, a następnie ultradźwiękowe i termowizyjne zamieszczone w niniejszej pracy, wykonano na zmodyfikowanych próbkach.



Rysunek 10.2. Kształt próbek do badań zmęczeniowych przed modyfikacją wymiarów



Rysunek 10.3. Zmodyfikowany kształt i wymiary próbki do badań zmęczeniowych

10.2. Metodyka badań degradacji cieplnej

Badania degradacji cieplnej przeprowadzono w trzech komorach cieplnych z wymuszonym obiegiem powietrza o temperaturach 180, 200 i 220°C. Sposób rozmieszczenia próbek w komorach cieplnych omówiono w rozdziale 9.2. Zgodnie z założonym programem badań przedstawionym w rozdziale 8.1, wyjmowano serie po sześć próbek i poddawano nieniszczącym badaniom ultradźwiękowym i termowizyjnym oraz określano wytrzymałość na zginanie. Niszczące badania wytrzymałościowe (zginanie trójpunktowe) stanowiły podstawę niszczącej metody oceny stopnia degradacji cieplnej próbek i ich wyniki były wykorzystywane do opracowania relacji diagnostycznych. Badania te przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej FPZ-100 firmy Heckert (Niemcy).

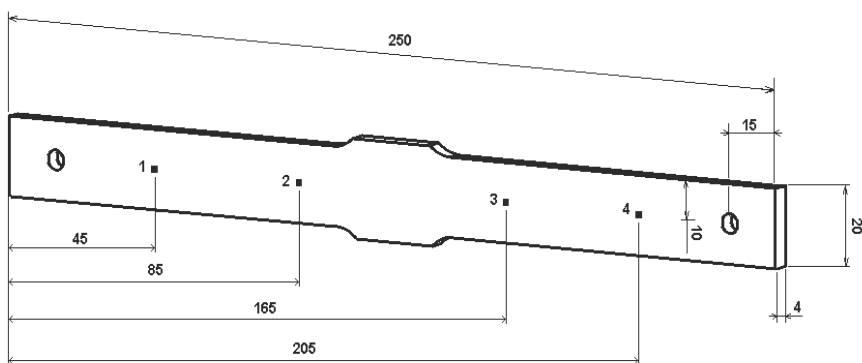
10.3. Metodyka badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe przeprowadzano w temperaturze pokojowej 20°C ±2°C na urządzeniu przedstawionym w rozdziale 9.1. Próbki obciążane były sinusoidalnie ze stałą wartością odkształcenia maksymalnego. Liczba cykli była zliczana przez układ pomiarowy.

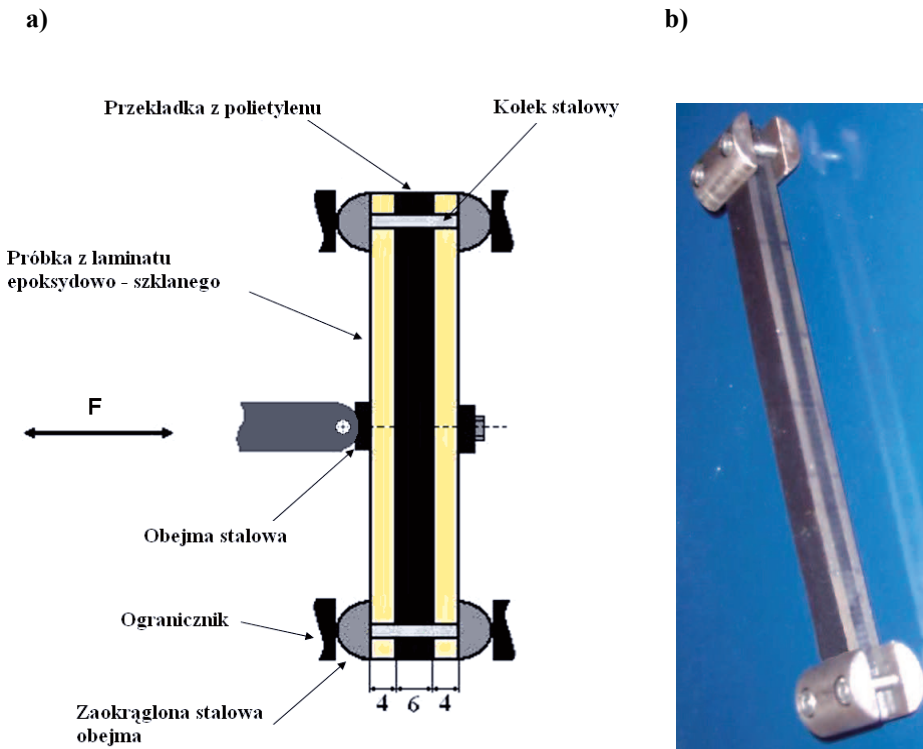
Rejestrowano wartość siły przy wymuszeniu przemieszczeniowym odkształcenia próbki o wartość strzałki ugięcia $f = 3$ mm w jej środkowej części, przy przegubowym podparciu na obu końcach. Odczytu dokonywano przed zamontowaniem próbek na urządzeniu do badań zmęczeniowych oraz każdorazowo po ustalonej liczbie cykli. Odczytywana siła posłużyła do wyznaczenia, w naniesionych punktach pomiarowych (rys. 10.4), naprężeń gnących, które były parametrem służącym do oceny stopnia wyczerpania zdolności nośnych próbek poddanych cyklicznemu zmęczeniu.

Obserwowany spadek siły (naprężeń) był miarą degradacji zmęczeniowej badanego kompozytu. Zginanie prowadzono z częstotliwością 70 cykli maszyny na minutę (1,167 Hz). Przy tej częstotliwości próbki nie ulegały nagrzewaniu w wyniku dyssypacji energii. Wyższe wartości częstotliwości odkształcenia prowadziły do nadmiernego nagrzewania. Próby zmęczeniowe prowadzono do ponad 14 milionów cykli. Próbki okresowo poddawano nieniszczącym badaniom ultradźwiękowym i termograficznym.

Przed przystąpieniem do badań zmęczeniowych na próbkach naniesiono cztery punkty pomiarowe w odpowiednich odległościach od środka próbki (rys. 10.4) oraz dokonano pomiaru grubości w tych punktach. W próbkach wykonano również odpowiednie otwory montażowe potrzebne do łączenia, za pomocą kołka, ze sobą dwóch próbek wraz z przekładką polietylenową. Zginaniu w maszynie zmęczeniowej poddawany był pakiet składający się z dwóch próbek (4 mm) i przekładki z polietylenu dużej gęstości (6 mm), co przedstawiono na rysunku 10.5. Rozwiązanie to miało na celu uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu naprężeń normalnych na przekroju próbek podczas zginania niż przy zginaniu pojedynczych próbek w badaniach wstępnych.

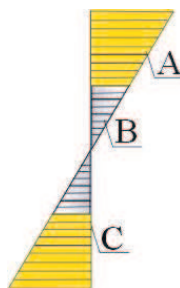


Rysunek 10.4. Wymiary próbki i odległości zaznaczonych punktów pomiarowych



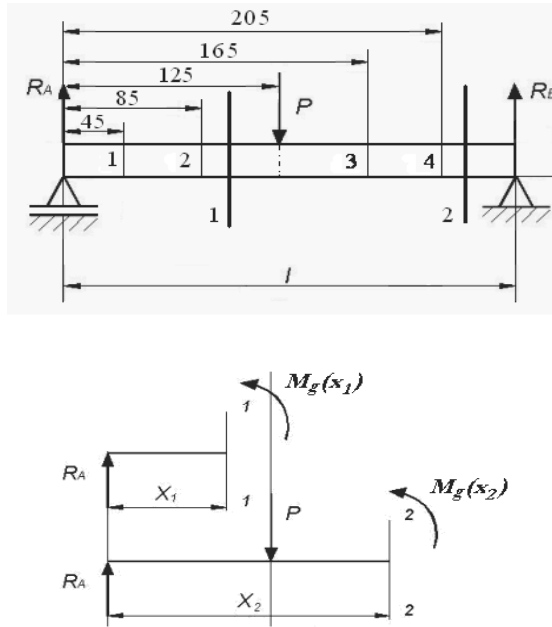
Rysunek 10.5. Schemat zamocowania próbek w uchwytach maszyny zmęczeniowej (a), zdjęcie pakietu próbek z przekładką polietylenową (b)

Rozkład naprężeń w próbkach badawczych z przekładką polietylenową w zmodyfikowanym układzie mocowania przedstawiono na rysunku 10.6.



Rysunek 10.6. Rozkład naprężeń w badanych próbkach i przekładce: A,B – rozkład naprężeń w próbkach badawczych, C – rozkład naprężeń w przekładce

Przyjmując, że próbka była obciążona w sposób pokazany na rysunku 10.7, momenty gnące dla poszczególnych punktów pomiarowych wyznaczono z zależności (10.1 i 10.2). Siłę P , obciążającą próbkę, mierzono za pomocą tensometrycznego układu pomiarowego (rozdział 9.1). Naprężenia gnące wyznaczono, korzystając z zależności (10.4).



Rysunek 10.7. Schemat obciążenia próbki w badaniach zmęczeniowych

Momenty gnące wyznaczono z następujących zależności:

$$M_g(x_1) = R_a \cdot x_1, \quad (10.1)$$

$$M_g(x_2) = R_a \cdot x_2 - P(x_2 - \frac{l}{2}), \quad (10.2)$$

$$R_a = R_b = \frac{1}{2} P, \quad (10.3)$$

gdzie: $M_g(x_1)$ – momenty gnące w pierwszym przedziale [Nmm],

$M_g(x_2)$ – momenty gnące w drugim przedziale [Nmm],

R_a, R_b – reakcje podporowe, [N],

P – siła działająca na próbkę, [N],

l – długość próbki, [mm],

x_1, x_2 – ramiona, na których działa siła w odpowiednim przedziale, [mm].

Maksymalne naprężenia gnące wyznaczono, korzystając z zależności:

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_z}, \quad (10.4)$$

gdzie: σ_g – naprężenie gnące, [MPa],

M_g - moment gnący, [Nmm],

W_z – wskaźnik wytrzymałości na zginanie, [mm³].

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie określa zależność:

$$W_z = \frac{bh^2}{6}, \quad (10.5)$$

gdzie: b – szerokość próbki, [mm],

h – grubość próbki, [mm].

10.4. Metodyka badań własności kompozytów epoksydowo-szklanych degradowanych cieplnie i zmęczeniowo metodą ultradźwiękową

W badaniach ultradźwiękowych określano prędkość propagacji oraz tłumienie fali ultradźwiękowej. Wszystkie próbki, zarówno degradowane cieplnie, jak i zmęczeniowo poddane były badaniom ultradźwiękowym przed rozpoczęciem procesów degradacji. Próbki poddane badaniom zmęczeniowym badano również po określonej liczbie cykli zmęczeniowych.

Przed przystąpieniem do badań ultradźwiękowych dokonano korekcji głowicy, tzn. wyskalowano jej parametry w taki sposób, aby pomiar grubości dokonany za pomocą

suwmiarki zgadzał się z grubością mierzoną metodą ultradźwiękową. Badanie ultradźwiękowe polegało na przykładaniu głowicy w zaznaczonych punktach pomiarowych i odczycie czasu przejścia fali ultradźwiękowej oraz amplitud kolejnych ech dna próbki. W celu poprawy kontaktu głowicy ultradźwiękowej z powierzchnią próbki użyto środka sprzęgającego w postaci żelu.

Wielkości badane posłużyły do wyznaczenia prędkości propagacji fali ultradźwiękowej oraz współczynnika tłumienia.

Prędkość propagacji fali ultradźwiękowej wyznaczano z zależności:

$$c_h = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot h}{\tau_h}, \quad (10.6)$$

gdzie: c_h – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej na grubości próbki, [m/s],

h – grubość próbki, [mm],

τ_h – czas przejścia fali ultradźwiękowej, [μ s].

Współczynnik tłumienia wyznaczono z następującej zależności:

$$\alpha = \frac{\Delta W}{2 \cdot 10^{-3} \cdot h}, \quad (10.7)$$

gdzie: α – współczynnik tłumienia fali ultradźwiękowej, [dB/m],

ΔW – różnica wzmocnień dwóch kolejnych ech, [dB],

h – grubość próbki, [mm].

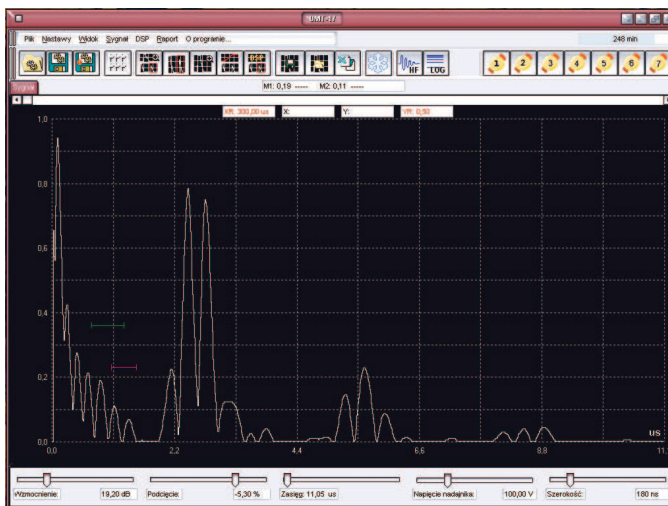
Badania przeprowadzano w celu sprawdzenia związku między zmianami powstającymi w laminacie podczas cyklicznego zmęczenia i degradacji cieplnej a jego własnościami akustycznymi. Ponieważ naprężenia gnące w punktach odpowiednio I i IV i oraz II i III są zbliżone, podawano jeden uśredniony wynik z pary punktów. Dla próbek poddanych zmęczeniu określono w całym zakresie badań prędkość propagacji i tłumienie fali ultradźwiękowej, natomiast w przypadku próbek degradowanych cieplnie opracowano tylko prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. W badaniach nie uwzględniono tłumienia, z uwagi na to, że tylko w początkowej fazie degradacji cieplnej pomiar był wiarygodny - ze wzrostem temperatury pomiar tłumienia utrudniony był postępującą delaminacją i rozwarstwieniem kompozytu.

W wyniku ultradźwiękowych badań degradacji cieplnej i zmęczeniowej oraz badań niszczących uzyskano następujące zależności:

- prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych,
- współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej od liczby cykli zmęczeniowych,
- prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od czasu degradacji cieplnej,
- prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od wytrzymałości na zginanie próbek degradowanych cieplnie.

W trakcie badań zmęczeniowych zaobserwowano, że siła konieczna do uzyskania stałego ugięcia próbki maleje z czasem przebiegu procesu zmęczenia (liczbą cykli), czyli następował spadek naprężeń w zginanych próbkach. Było to spowodowane stopniową degradacją zmęczeniową badanych próbek kompozytowych.

Na rysunku 10.8. przedstawiono przykładowy diagram uzyskany w badaniach ultradźwiękowych.



Rysunek 10.8. Przykładowy diagram uzyskany w czasie badań ultradźwiękowych

10.5. Metodyka badań własności kompozytów epoksydowo-szklanych degradowanych cieplnie i zmęczeniowo metodą termowizyjną

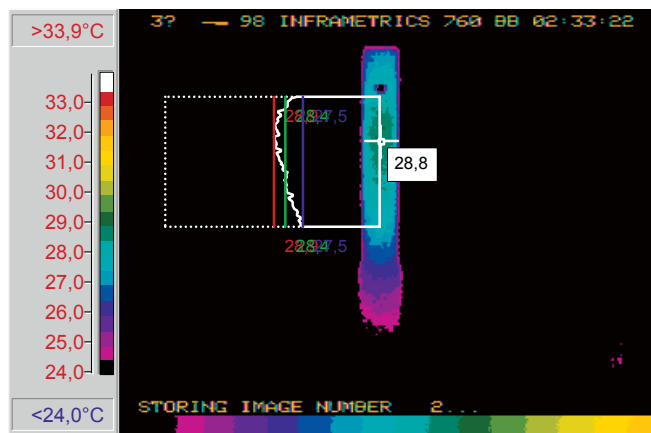
Pomiar metodą termograficzną zaczynał się od nagrzania promiennika w celu ustabilizowania jego temperatury. Okres stabilizacji temperatury promiennika wyniósł około

15 minut. Następnie zakładano próbki w uchwycie mocującym, który umieszczono w polu ekspozycji działania promiennika.

Próbki malowano czarną matową farbą. Czas nagrzewania próbek był taki sam dla każdego pomiaru i wynosił 8,0 sekund dla próbek starzonych cieplnie i 4,0 sekundy dla próbek degradowanych zmęczeniowo. Różnica czasów nagrzewania wynikała z różnych grubości próbek. Czas oraz odległość promiennika od nagrzewanej powierzchni wyznaczono eksperymentalnie, zwiększając stopniowo czas nagrzewania przy ustalonej odległości promiennika, aż do chwili uzyskania odpowiedniego kontrastu temperatur. Na stanowisku rejestrowane były obrazy termowizyjne, na podstawie których uzyskano charakterystyki czasowo-temperaturowe poddawane następnie analizie.

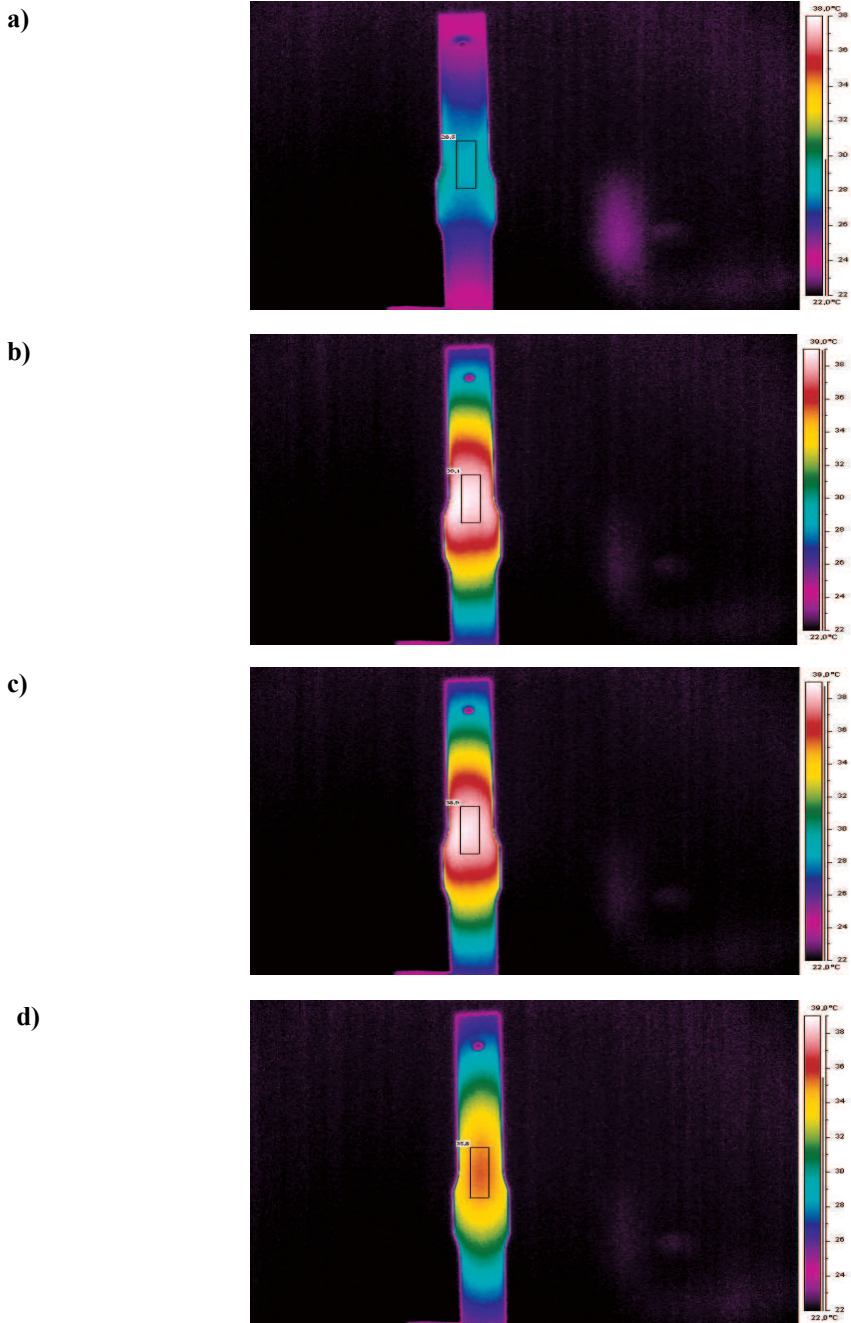
Pomiar rozkładu temperatury za pomocą kamery termowizyjnej rozpoczynał się po zakończeniu procesu nagrzewania próbki od strony przeciwnej. Czas pomiaru wynosił 120 sekund.

Wyniki badań termograficznych opracowano na podstawie sporządzonych wykresów liniowej zależności zakresu zmian temperatury w wybranym punkcie na powierzchni próbki, w funkcji czasu rejestracji. Z zarejestrowanego obrazu termowizyjnego, po każdej sekundzie rejestracji, dokonywano odczytu temperatury w wybranym punkcie na powierzchni próbki. Przykładowy termogram dla wybranej próbki przedstawiono na rysunku 10.9, na którym zaznaczono miejsce pomiaru temperatury, stałe dla wszystkich badanych próbek.



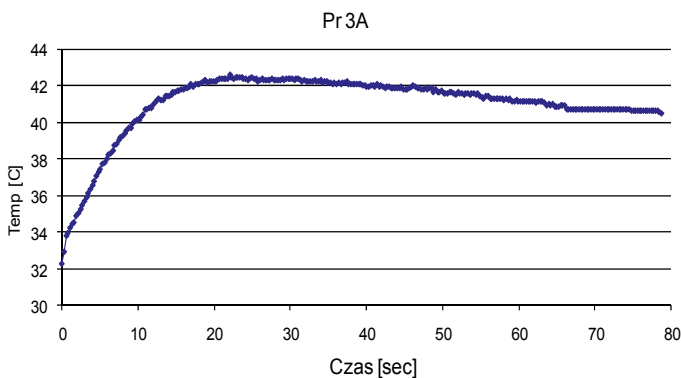
Rysunek 10.9. Termogram z zaznaczonym miejscem pomiaru temperatury

Na stanowisku rejestrowane były obrazy termowizyjne (rys. 10.10), na podstawie których opracowano charakterystyki temperaturowo-czasowo (rys. 10.12).



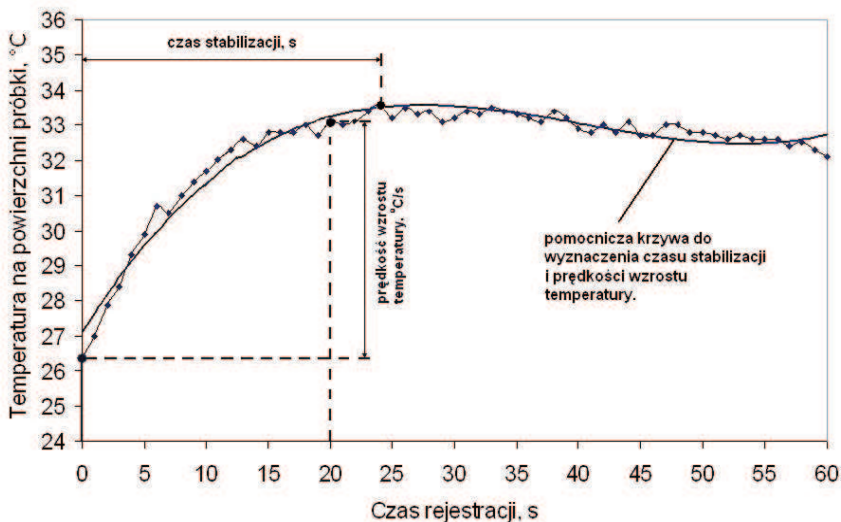
Rysunek 10.10. Termogramy dla próbki po 14 milionach cykli, po 5s (a), 60 (b), 120 (c) i 210s (d)

Na rysunku 10.11 przedstawiono widok przebieg wzrostu temperatury na powierzchni próbki w czasie pomiaru, zarejestrowany kamerą termowizyjną po 14 milionach cykli zmęzeniowych.



Rysunek 10.11. Wykres zależności zarejestrowanej temperatury na powierzchni próbki od czasu. Rejestracja po 14 milionach cykli zmęzeniowych

Na rysunku 10.12 przedstawiono wykres, na podstawie którego opracowano charakterystyki temperaturowo-czasowe.



Rysunek 10.12. Przebieg zmian temperatury w czasie pomiarów termograficznych

W badaniach termowizyjnych analizowano takie cechy temperaturowo-czasowe jak (rys. 10.12):

- czas stabilizacji temperaturowej na powierzchni próbek,
- prędkość wzrostu temperatury na powierzchni próbek.

Prędkość wzrostu temperatury została wyznaczona z następującej zależności:

$$v_w = \frac{T(20s) - T(0s)}{20s}, \quad (10.8)$$

gdzie: v_w – prędkość wzrostu temperatury na powierzchni próbki w wybranym, centralnym punkcie, [°C/s],

$T(20s)$ – temperatura na powierzchni próbki podczas stygnięcia, po 20 s od zakończenia nagrzewania, [°C],

$T(0s)$ – temperatura na powierzchni próbki tuż po zakończeniu nagrzewania, [°C].