

Wiesław CHLADEK, Marek CIEŚLA, Marek PLAŻA

UWAGI DOTYCZĄCE PROBLEMÓW BADANIA ZMĘCZENIA CIEPŁEGO

Streszczenie. W pracy omówiono metody prowadzenia badań zmęczenia cieplnego w jednoosiowym stanie naprężenia na sztywnych konstrukcjach i maszynach serwohydraulicznych. Wyjaśniono przy wykorzystaniu modelowych schematów praktyczne znaczenie i sposoby regulacji wielkości odkształceń mechanicznych w stosunku do wywołujących je odkształceń cieplnych. Różnice pomiędzy charakterystykami cykli termiczno-mechanicznych uzyskiwanych w obydwu metodach zilustrowano za pomocą przykładowych wykresów.

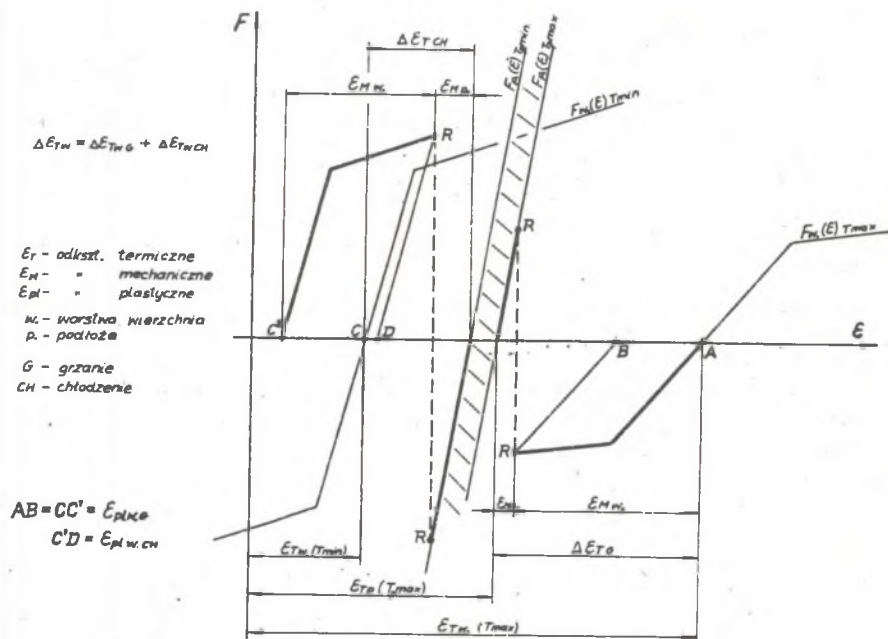
1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych czynników intensyfikujących procesy niszczenia elementów maszyn i urządzeń są wysokie temperatury. Niekorzystne ich działanie przejawia się poprzez przyspieszenie procesów korozyjnych, wywołanie zmian w strukturze materiału oraz obniżenie własności wytrzymałościowych. Zwiększa się także prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń trwałych wywołanych zarówno zewnętrznym polem siłowym, jak i ograniczaniem swobodnej rozszerzalności temperaturowej materiału. Odkształcenia i odpowiadające im naprężenia termiczne, wynikające z uwarunkowań konstrukcyjnych bądź z występowania gradientów temperatury na przekrojach poprzecznych ścianek pracującego elementu, mogą prowadzić do natychmiastowego zniszczenia poprzez wywołanie pęknięcia lub zmian wymiarowych, bądź też poprzez cykliczność procesu prowadzą do zmęczeniowego zniszczenia materiału. Zmęczenie takie określone jako zmęczenie cieplne [1, 2, 3, 5, 6, 7] ma wiele cech wspólnych ze zmęczeniem wywołanym siłami zewnętrznymi i dlatego bywa porównywane z izotermicznymi badaniami w zakresie małej liczby cykli [4, 7], jednakże w większości przypadków można stwierdzić, iż dokładniejsze odwzorowanie zjawisk prowadzących do zniszczenia materiału uzyskamy prowadząc badania zmęczeniowe w zmiennych polach temperaturowych przy wymuszeniu odkształceń i naprężeń mechanicznych odkształceniami cieplnymi.

2. Analiza odkształceń cieplnych i mechanicznych w warstwie wierzchniej materiału jako podstawa w badaniach zmęczenia cieplnego

W przypadku doboru materiału na konkretny obiekt pracujący w zmiennych polach temperatur możemy przyjąć, iż jego trwałość będzie funkcją zarówno

uwarunkowań konstrukcyjnych, jak i własności fizycznych i mechanicznych tworzy. Czynniki te decydują o stosunku odkształceń mechanicznych ϵ_M do wywołujących je odkształceń cieplnych ϵ_T . Wzajemne oddziaływanie zmian własności mechanicznych w zależności od temperatury i różnicy temperatury pomiędzy rozważanymi warstwami na wielkość tego stosunku oznaczonego K [6] możemy przedstawić za pomocą opracowanego przez autorów modelowego wykresu przedstawionego na rysunku 1. Własności sprężysto-plastyczne materiału w



Rys. 1. Model odkształceń mechanicznych warstwy wierzchniej i podłoża, powodowanych różnicą temperatur $\Delta T = T_w - T_p$

Fig. 1. Mechanical strains of the top layer and the base caused by the $\Delta T = T_w - T_p$ temperature difference

temperaturach maksymalnej i minimalnej, odpowiadających temperaturom T_{max} i T_{min} powierzchni poddanej bezpośrednio uderom cieplnym, charakteryzują linie $F_w(\epsilon)_{T_{max}}$ i $F_w(\epsilon)_{T_{min}}$, natomiast własności w temperaturach odpo-

władających głębiej położonym warstwom materiału - linie $F_P(\epsilon)_{T_{pmax}}$ i $F_P(\epsilon)_{T_{pmin}}$. Celem uproszczenia rysunku pominięto zmiany modułu Younga w zakresach temperatur $T_{pmin} \div T_{pmax}$. Przyjmując skokową zmianę temperatury pomiędzy warstwą wierzchnią a podłożem znajdujemy różnicę odkształceń cieplnych $\Delta \epsilon_T$ pomiędzy tymi warstwami, która musi zostać skompensowana odkształceniami mechanicznymi. Następnie przyporządkowując na osi ϵ każdej wartości ϵ_T wykresy obrazujące własności mechaniczne każdej z rozważanych warstw w temperaturze T (wywołującej dane odkształcenie ϵ_T) możemy znaleźć dla wyznaczonej różnicy odkształceń $\Delta \epsilon_T = \Delta \epsilon_M$ odkształcenia mechaniczne warstwy wierzchniej ϵ_{Mw} i podłoża ϵ_{Mp} odpowiadające stanowi równowagi. Punkty przecięcia prostej R-R z liniami $F_w(\epsilon)_{T_{max}}$ i $F_P(\epsilon)_{T_{pmax}}$ wyznaczone z warunku $F_w = F_P$ określają wartości szukanych odkształceń powstałych w pierwszym cyklu grzania. Przy przejściu do temperatury T_{min} w półcyklu chłodzenia stan równowagi będzie wyznaczony pomiędzy krzywą $F_w(\epsilon)_{T_{min}}$ przesuniętą z pkt. C do pkt. C' o wartość odpowiadającą odkształceniom plastycznym $CC = BA$ powstałym w czasie grzania a linią $F_P(\epsilon)_{T_{pmin}}$. Widać z przedstawionego modelu, że kształt pętli opisującej zmiany odkształceń i naprężeń w funkcji temperatury zależy od zakresu temperatur cyklu i wartości współczynnika K . Biorąc pod uwagę fakt, iż w większości przypadków do opisu trwałości materiału służą wyrażenia, do których wprowadzamy wielkości wyznaczone na podstawie analizy pętli histerezy charakteryzującej dany cykl obciążeń mechanicznych i cieplnych [3, 6, 7], widzimy, że przed przystąpieniem do badań w jednoosiowym stanie naprężenia należy wyznaczyć właściwą dla danego obiektu wartość tego współczynnika, którą możemy w ogólnym przypadku ująć jako funkcję następujących czynników:

$$K = f[Bi, Fo, \beta(T) E(T), Re(T), \nu, \phi \dots] \dots,$$

gdzie:

- Bi - liczba Biotta,
- Fo - liczba Fouriera,
- β - współczynnik rozszerzalności liniowej,
- Re - granica plastyczności,
- ν - liczba Poissona,
- ϕ - funkcja kształtu obiektu.

Należy stwierdzić, że zachowanie podczas badań zgodności przebiegu cyklu temperaturowego z rzeczywistymi oraz przyjęcie odpowiedniego współczynnika K pozwala stworzyć warunki pozwalające na dokładną analizę przyczyn utraty własności eksploatacyjnych przez badany materiał.

3. Budowa stanowisk do badania zmęczenia cieplnego

Złożoność procesów towarzyszących zmęczeniu cieplnemu stanowi znaczne utrudnienie w jednoznacznej ocenie tego zjawiska, powoduje to dużą różnorodność technik prowadzenia badań zarówno pod względem budowy stanowisk, kształtu próbek, jak i sposobów opracowania wyników. Wykorzystując dane literaturowe i doświadczenia własne opracowano w ramach problemu MR J 22 stanowiska i techniki prowadzenia badań zmęczenia cieplnego zgodnie ze współczesnymi tendencjami rozwoju w tej dziedzinie.

3.1. Sposoby nagrzewania i chłodzenia próbek

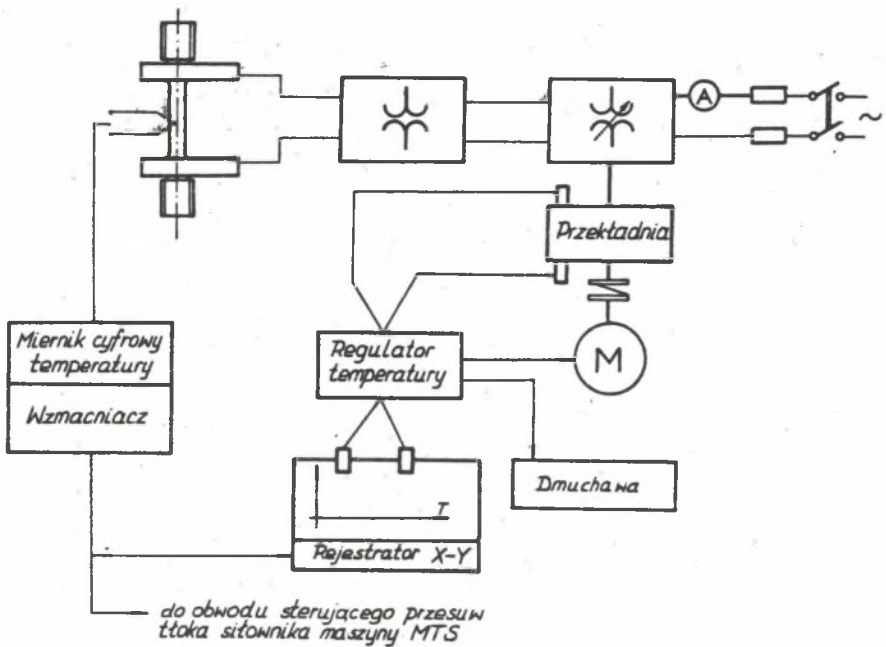
W przypadku omawianych badań istotny wpływ na mechanizmy niszczenia materiału mają charakterystyki przebiegów zmian temperatury w czasie. Decydują one bowiem o sposobie narastania odkształceń i naprężeń, o intensywności procesów utleniania oraz stabilności struktury badanego tworzywa. Ze względu na to, iż badania te wymagają przeważnie realizacji szybkozmiennych pól temperaturowych, najbardziej rozpowszechnionymi sposobami nagrzewania próbek są tu: metoda indukcyjna oraz metoda oporowa polegająca na przepływie prądu o dużym natężeniu przez badaną próbkę.

Podczas przeprowadzanych badań stwierdzono, iż indukcyjne nagrzewanie próbek stwarza szereg niedogodności, do których można zaliczyć:

- trudności w regulacji temperatury w zakresach poniżej 600 K,
- trudności w uzyskaniu równomiernych rozkładów temperatury wzdłuż osi i promienia próbki, związane z koniecznością dostosowania kształtu wzbudnika do cech geometrycznych i materiałowych próbki,
- w przypadku przeprowadzenia badań na maszynie serwohydraulicznej praca nagrzewnicy powoduje zakłócenia w układzie sterowania maszyny.

Ze względu na wymienione wady metody indukcyjnej wykonano układ do nagrzewania próbek poprzez bezpośredni przepływ prądu [3] pokazany na rysunku 2. Zastosowano tu płynne włączenie i wyłączenie prądu przez nastawczy transformator uruchamiany silnikiem elektrycznym, co pozwoliło wyeliminować zakłócenia w układzie rejestracyjnym i sterowania przy nagłym włączeniu prądu. W celu zwiększenia dokładności nastawienie ekstremalnych temperatur cyklu T_{\max} i T_{\min} dokonywano za pomocą wyłączników magnetycznych mocowanych na rejestratorze X-Y.

Zmianę kształtu cyklu temperaturowego możemy uzyskiwać poprzez zmianę przekładni autotransformatora oraz dobór szybkości chłodzenia. Najprostsze metody regulacji intensywności chłodzenia próbki polegają na zwiększaniu lub zmniejszaniu ilości ciepła odprowadzanego przez uchwyty i klemy bądź też nadmuchiwanie powietrza na zewnętrzną powierzchnię próbki. Łączy się to jednak z powstawaniem nierównomiernych rozkładów temperatur zarówno wzdłuż osi, jak i promienia próbki. O wiele bardziej dokładne są metody polegające na wymuszaniu przepływu medium chłodzącego przez środek próbki, wymaga to



Rys. 2. Schemat układu do oporowego nagrzewania poprzez bezpośredni przepływ prądu przez badaną próbkę

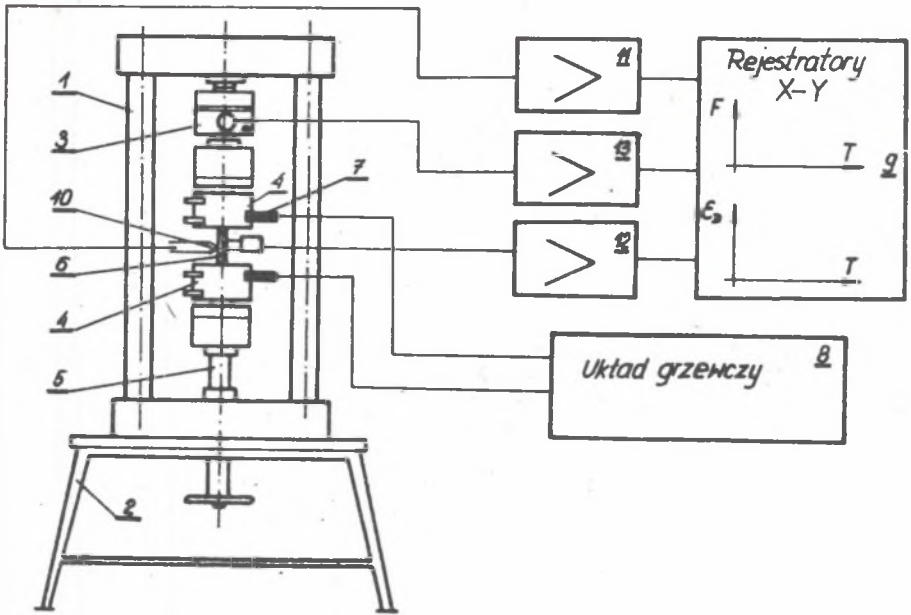
Fig. 2. Circuit for resistance heating, by direct current flow through the sample

jednak stosowania uchwytów o specjalnej konstrukcji [3] oraz cienkościennych próbek rurowych.

3.2. Sposoby kształtowania wielkości odkształceń mechanicznych

Odształcenia mechaniczne w badaniach zmęczenia cieplnego w jednoosiowym stanie naprężenia wywołane są ograniczeniem swobodnej rozszerzalności liniowej próbki. Proces ten w przypadku przeprowadzania badań na maszynach serwohydraulicznych może być kontrolowany całkowicie, natomiast w przypadku sztywnych konstrukcji mamy do czynienia z ograniczonymi możliwościami jego regulacji [1].

Prowadząc badania na sztywnym stanowisku, którego schemat pokazano na rysunku 3, stwierdzono, iż czynnikami, pozwalającymi zmieniać w stosunkowo prosty sposób stosunek $\varepsilon_M/\varepsilon_T$ w części pomiarowej próbki, są: przebiegi



Rys. 3. Sztywne stanowisko do badania zmęczenia cieplnego

1 - rama, 2 - st0jak, 3 - czujnik siły, 4 - uchwyty, 5 - śruba, 6 - próbka, 7 - odprowadzenie prądu, 8 - układ grzewczy, 9 - rejestratory, 10 - termopara, 11, 12, 13 - wzmacniacze

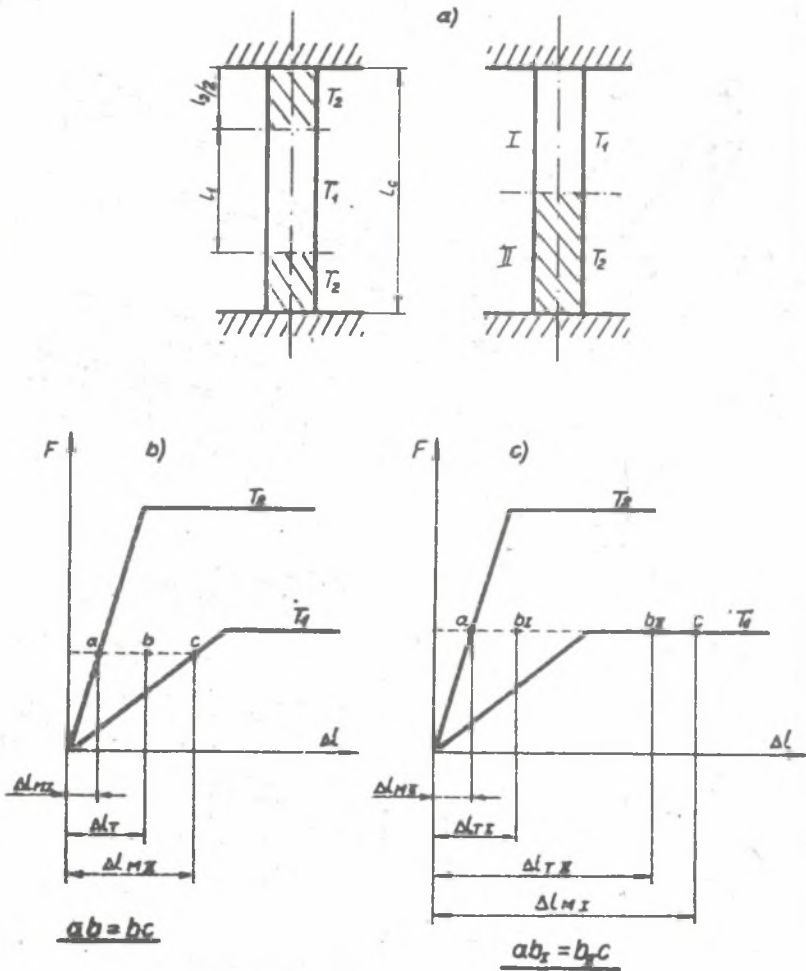
Fig. 3. Stiff loading frames for thermal fatigue tests

1 - load frame, 2 - table, 3 - load cell, 4 - grips, 5 - bolt, 6 - specimen, 7, 8 - circuit for heating, 9 - X-Y recorders, 10 - thermo couple, 11, 12, 13 - amplifiers

cyklu temperaturowego, rozkład temperatur wzdłuż osi próbki oraz sztywność układu próbka-konstrukcja nośna [1, 2, 3]. O możliwościach zmian cyklu temperaturowego decyduje charakterystyka podzespołu grzewczego, natomiast sztywność układu zmieniamy poprzez odpowiedni dobór długości całkowitej próbki przy ograniczaniu części pomiarowej próbki (o stałej temperaturze) bazą czujnika. Mierzymy więc czujnikiem efekty sumarycznego oddziaływania odkształceń cieplnych i mechanicznych części próbki znajdujących się poza czujnikiem oraz konstrukcji nośnej na odkształcenia części pomiarowej.

Mechanizm ten można wyjaśnić za pomocą modelowych wykresów przedstawionych na rysunku 4, które sporządzono przy następujących upraszczających założeniach:

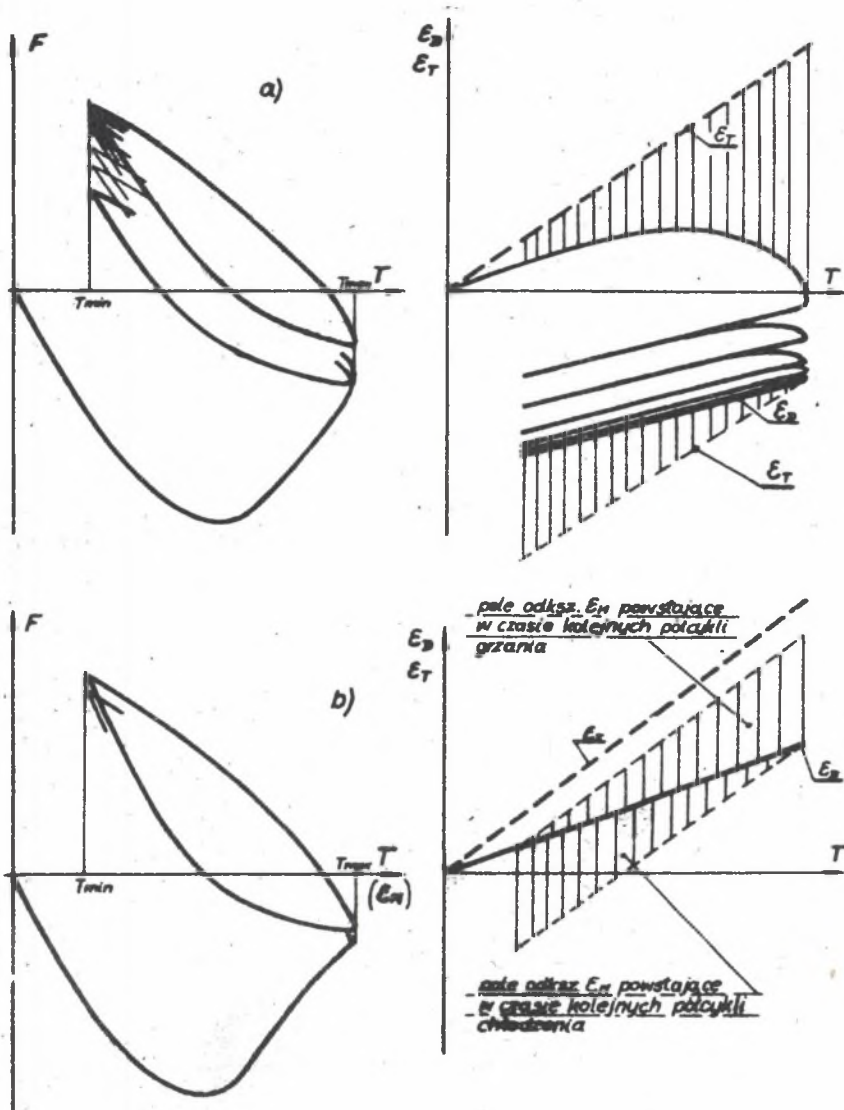
- pomijamy odkształcenia konstrukcji nośnej,
- zakładamy skokową różnicę temperatury pomiędzy częścią środkową próbki o długości l_1 a jej końcami o sumarycznej długości $l_2 = l_c - l_1$, przy czym modelujemy wzajemne oddziaływania tych części układem szeregowym (rysunek 4a),



Rys. 4. Model obrazujący wpływ rozkładów temperatury wzdłuż osi próbki na wielkość odkształceń mechanicznych w strefach o różnych temperaturach
 Fig. 4. Model showing the influence of temperature decomposition along the specimen axis upon the value of mechanical strains in the different temperature zones

- zakładamy, iż temperatura części środkowej $T_1 > T_2$,
- przyjmujemy, iż współczynnik rozszerzalności liniowej β jest stały w rozważanym zakresie temperatur, a co za tym idzie:

$$\Delta l_{T_1} = l_1 \beta \Delta T, \quad l_{T_2} = l_2 \beta \Delta T_2.$$



Rys. 5. Przykładowe wykresy $F(T)$, $\epsilon_T(T)$, $\epsilon_D(T)$ uzyskane podczas badania żeliwa szarego

a - na sztywnym stanowisku, b - na maszynie serwohydraulicznej

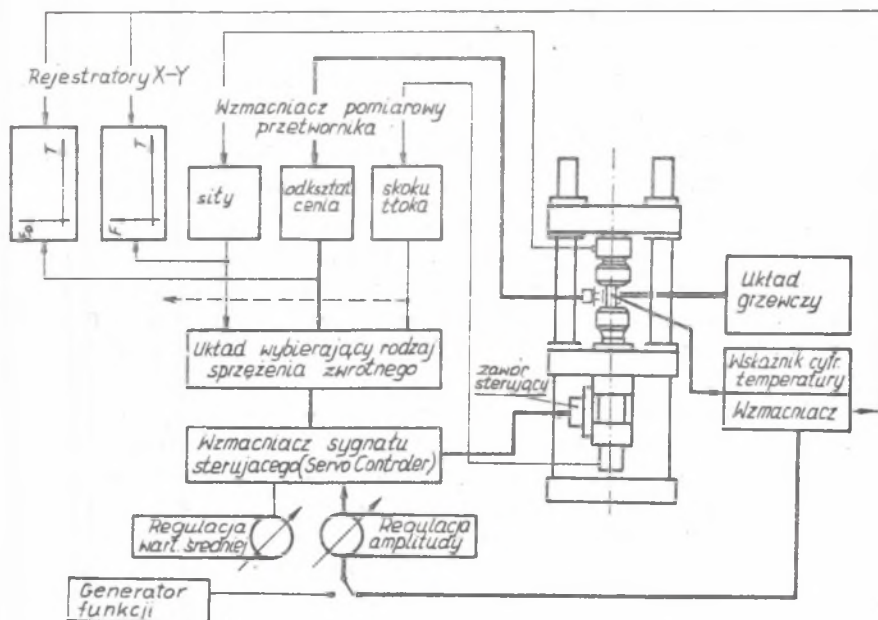
Fig. 5. Diagrams $F(T)$, $\epsilon_T(T)$, $\epsilon_D(T)$ obtained during the investigation of the grey cast iron

a - on stiff loading frame, b - on servohydraulic system

Przedstawiając własności mechaniczne materiału próbki w temperaturach T_1 i T_2 modelami sprężysto-plastycznymi i wiedząc, iż wartość siły osiowej w obydwu częściach próbki jest taka sama, możemy graficznie wyznaczyć dla danych wartości Δl , T odpowiednie odkształcenia mechaniczne korzystając z warunków $\Delta l_{M_1} + \Delta l_{M_2} = \Delta l_{T_1} + \Delta l_{T_2}$. Na rysunku 4b przedstawiono odkształcenia mechaniczne wyznaczone przy założeniu równych wartości wydłużeń termicznych $\Delta l_{T_1} = \Delta l_{T_2}$. Zwiększając wartość wydłużenia termicznego Δl_{T_2} (poprzez zwiększenie długości części próbki o temperaturze T_2), możemy doprowadzić do znacznej koncentracji odkształceń trwałych w części próbki o temperaturze T_1 (rysunek 4c). Trzeba tu jednak zaznaczyć, iż uzyskiwane tą drogą zakresy zmian współczynnika K zależą w dużej mierze od własności wytrzymałościowych materiału w temperaturach pomiędzy T_{\max} i T_{\min} .

W celu wyznaczenia wartości odkształceń mechanicznych i odpowiadających im naprężeń w danym cyklu temperaturowym rejestrujemy w trakcie próby zarówno zmiany siły, jak i wartości ϵ_D (mierzone czujnikiem tensometrycznym) w funkcji temperatury. Przykładowe wykresy $F(T)$ i $\epsilon_D(T)$ otrzymane na sztywnym stanowisku dla żeliwa szarego przedstawiono na rysunku 5a. Przy zależności $\epsilon_D(T)$ wrysowano dylatogram $\epsilon_T(T)$ otrzymany przez rejestrację odkształceń cieplnych próbki ϕ 10 mm grzanej i chłodzonej w zakresie temperatur od 473 do 973 K przy całkowitej swobodzie odkształceń.

Jak widać, wartość odkształceń mechanicznych $\epsilon_M = \epsilon_T - \epsilon_D$ zmienia się w pierwszych kilkunastu cyklach, przy czym istnieją tu znaczne różnice pomiędzy półcyklem grzania i półcyklem chłodzenia. Przesuwanie się pętli histerezy jest wynikiem stabilizacji rozkładów temperatury w układzie próbka-sztywna konstrukcja nośna. W przypadku przeprowadzania badań na maszynie serwohydraulicznej wprowadzono w miejsce sygnału z generatora funkcji sygnał proporcjonalny do zmian temperatury próbki w sposób pokazany na rysunku 6. Tak więc ruchy siłownika programowane były przebiegiem cyklu temperaturowego w części pomiarowej próbki (odwzorowującej zachowanie warstwy wierzchniej) i w zależności od nastawienia wartości amplitudy odwzorowywały żadaną rozszerzalność termiczną i odkształcenia mechaniczne podłoża. Przedstawione rozwiązanie zapewnia ciągłą kontrolę odkształceń ϵ_D w czasie prób, dzięki temu otrzymujemy stałe co do kształtu pola odkształceń mechanicznych zarówno w półcyklu grzania, jak i chłodzenia (rys. 5b), co stanowi zaletę metody w porównaniu z badanymi na sztywnym stanowisku.



Rys. 6. Schemat maszyny serwohydraulicznej dostosowanej do badań zmęczenia cieplnego

Fig. 6. The scheme of the servohydraulic machine adjusted for thermal fatigue investigations

4. Uwagi końcowe

Realizując próby zmęczenia cieplnego w jednoosiowym stanie naprężenia, należy w przypadku związania badań z konkretnym obiektem przyjąć właściwy dla niego stosunek odkształceń mechanicznych do cieplnych, co wymaga wykorzystania możliwości maszyn serwohydraulicznych. Badania porównawcze, to jest takie, jakimi w większości przypadków interesuje się przemysł, mające na celu wybranie z danej grupy materiałów tworzywa, którego cechy wytrzymałościowe, fizyczne i strukturalne będą najbardziej odpowiednie do pracy w zadanym cyklu temperaturowym, powinny być przeprowadzone na sztywnych stanowiskach. Gwarantuje to wystarczającą dokładność pomiarów przy znacznie niższych nakładach finansowych.

LITERATURA

- [1] Chladek W., Plaza M.: Techniki prowadzenia badań na sztywnych konstrukcjach i maszynach serwohydraulicznych. Inżynieria Materiałowa Nr 4. Katowice 1982.
- [2] Chladek W., Plaza M., Cieśla M.: Metoda badania zmęczenia cieplnego przy wykorzystaniu własności układu próbka-konstrukcja nośna. Inżynieria Materiałowa Nr 1. Katowice 1983.
- [3] Lamber T. i inni: Badania wpływu zmiennych pól temperatur na zjawiska dekohezji oraz utratę własności eksploatacyjnych metali. Sprawozdanie z pracy badawczej MR-J-22. Katowice 1982 (nieopublikowane).
- [4] Okrajni J.: Badania wpływu cyklicznych zmian pól temperatur i zwiąanych z nimi odkształceń cieplnych na trwałość stali austenitycznych. Praca doktorska. Katowice 1982.
- [5] Manson S.S.: Температурные напряжения и мало циклового усталост. Машиностроение. Москва 1974.
- [6] Pisarenko G.S. i inni: Прочност материалов при высоких температурах. Научная Думка. Киев 1966.
- [7] Żuchowski R.: Змечение тепле метали и элементів конструкції. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1981.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Ryszard Żuchowski

Wpłynęło do Redakcji: 1.12.1983 r.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПОВОДУ ПРОБЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАЛОСТНОСТИ

Р е з ю м е

В работе оговорены методы ведения исследований по температурной усталости в одноосиальном состоянии напряжения на примере жестких конструкций и сервогидравлических машин. При использовании модельных схем, выяснено практическое значение и способы регулирования величины механических деформаций по отношению к вызываемым их температурным деформациям. Различия между характеристиками термическо-механических циклов, получаемых двумя методами, иллюстрировано при помощи примерных графиков.

SOME PROBLEMS OF THERMAL FATIQUE INVESTIGATION

S u m m a r y

The paper presents techniques for carrying out fatigue thermal tests on stiff loading frames and servohydraulic systems. Using the model scheme, the importance and means of regulations of the mechanical strains in relation to the thermal strains have been explained. The differences between the characteristics of thermo-mechanical cycles obtained in both methods have been presented in the exemplary diagrams.