

PROBLEMY ZMĘCZENIA CIEPLNEGO METALI

RYSZARD ŻUCHOWSKI

Politechnika Wroclawska

Zmęczenie cieplne jest to proces powstawania i rozwoju uszkodzeń na skutek zmian energii wewnętrznej w materiałach części maszyn i konstrukcji, pod wpływem wielokrotnych cyklicznych lub okresowych zmian temperatury [1]. W wyniku tego procesu mogą powstać pęknięcia lub zmiany geometrii danej części, a także zmiany własności fizycznych materiału. Główne przyczyny zmęczenia cieplnego to okresowe lub cykliczne zmiany temperatury i całkowite lub częściowe (na skutek podatności więzów) ograniczenie swobody odkształceń cieplnych. To ograniczenie może być spowodowane przez czynniki zewnętrzne lub wewnętrzne, a więc ze względu na sposób hamowania odkształceń cieplnych, zmęczenie cieplne można podzielić na dwie grupy [2], a mianowicie:}

- a) zmęczenie cieplne z ograniczeniami zewnętrznymi,
- b) zmęczenie cieplne z ograniczeniami wewnętrznymi.

Zewnętrznymi ograniczeniami swobody odkształceń cieplnych są reakcje więzów, czyli siły przyłożone do powierzchni elementu, który jest przemiennie nagrzewany i chłodzony. Ten sposób obciążenia, zwany także zmęczeniem cieplno-mechanicznym, stosuje się często w laboratoriach jako symulację rzeczywistych procesów obciążenia. W praktyce częściej występuje zmęczenie cieplne spowodowane ograniczeniem swobody odkształceń cieplnych przez czynniki wewnętrzne, takie jak gradient temperatury, anizotropia struktury i różne wartości współczynników rozszerzalności cieplnej sąsiednich ziarn, faz lub składowych kompozytów. Te czynniki mogą wywoływać w elementach konstrukcji naprężenia cieplne samorównoważące się w objętości całego elementu lub jego części.

Na części maszyn i urządzeń pracujących w warunkach cyklicznych lub okresowych zmian temperatury, mogą także oddziaływać:

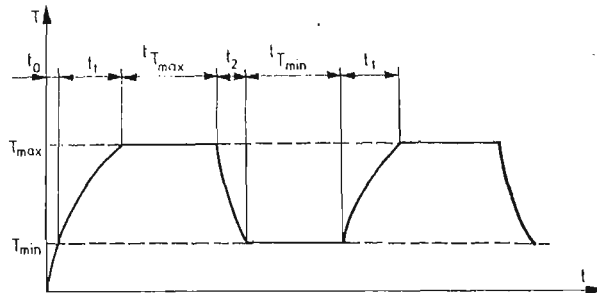
- naprężenia resztkowe (wpływ historii obciążenia),
- środowiska korozyjne,
- strumienie neutronów,
- naprężenia mechaniczne wywołane przez niezależne pola sił.

Uwzględniając także ten ostatni czynnik można wyróżnić cztery warianty zmęczenia cieplnego [1]. Zmęczenie cieplne może zatem wystąpić na skutek wielokrotnych zmian temperatury:

- a) nieobciążonego polem sił elementu o dużych wymiarach, bądź wykonanego z materiału charakteryzującego się dużą anizotropią strukturalną,

- b) elementu, którego swoboda odkształcania została ograniczona przez więzy kinematyczne,
- c) elementu bez więzów kinematycznych obciążonego niezależnie stałym polem sił (zwłaszcza w przypadku materiałów wielofazowych i szybkich zmian temperatury),
- d) elementu obciążonego niezależnie okresowo (lub cyklicznie) zmiennym polem sił.

W różnych częściach maszyn pracujących w warunkach cyklicznych zmian temperatury kształt cyklu cieplnego może być różny. W ogólności cykl cieplny (rys. 1) składa się z nagrzewania do temperatury maksymalnej T_{max} w czasie t_1 , wytrzymywania w temperaturze maksymalnej w czasie t_{Tmax} , chłodzenia do temperatury minimalnej T_{min} w czasie t_2 oraz wytrzymywania w temperaturze minimalnej w czasie t_{Tmin} . W przypadku pierwszego cyklu



Rys. 1. Kształt cyklu cieplnego

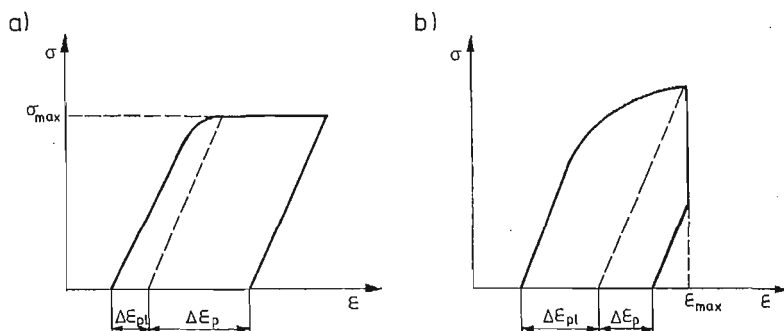
czas nagrzewania wynosi $t_0 + t_1$, przy czym t_0 — czas nagrzewania do temperatury minimalnej cyklu. Szczególnym przypadkiem jest cykl, w którym $t_{Tmax} = t_{Tmin} = 0$. Taki cykl ma kształt zęba piły i określa się go jako cykl piłowy. Do analitycznego opisu cyklicznych zmian temperatury stosuje się często odcinkowo liniową schematyzację cykli (cykle trapezowe lub trójkątne). W przypadku działania niezależnych zmian obciążeń i temperatury wyróżnia się dwa rodzaje cyklu, a mianowicie:

- cykl współfazowy, w którym maksymalnej temperaturze odpowiada maksymalne odkształcenie dodatnie (wydłużenie) elementu,
- cykl przeciwfazowy, w którym maksymalnej temperaturze odpowiada maksymalne odkształcenie ujemne (skrócenie) elementu.

Istotną składową amplitudy odkształcenia w warunkach zmęczenia cieplnego jest odkształcenie niesprężyste, które składa się z odkształcenia plastycznego i odkształcenia powstałego w wyniku pełzania. Warunki pracy urządzeń energetycznych są takie, że poszczególne ich elementy znajdują się przez dłuższy czas w stałej temperaturze pod działaniem stałego obciążenia. Te okresy stabilnej pracy są jednak przedzielone okresami zmian temperatury i obciążenia. W niezbyt wysokiej temperaturze (w której można pominąć wpływ pełzania) za wyłączną przyczyną zniszczenia można uznać odkształcenia plastyczne.

W wysokiej temperaturze natomiast pełzanie jest istotnym czynnikiem, który może spowodować zniszczenie elementu, także w stałej temperaturze przy stałym obciążeniu. Ogólnie przyjmuje się, że odkształcenie plastyczne jest niezależne od czasu, natomiast odkształcenie powstałe w wyniku pełzania zależy od czasu; ma to istotne znaczenie w przypadku sumowania uszkodzeń spowodowanych tymi przyczynami. Na rys. 2 pokazano podział całkowitego odkształcenia trwałego w cyklu na składową plastyczną i składową powstałą w wyniku

pełzania, a — dla cyklu o kontrolowanej amplitudzie naprężenia, b — dla cyklu o kontrolowanej amplitudzie odkształcenia. Rozróżnienie pojęć pełzania i plastyczności w warunkach zmęczenia cieplnego jest często trudne, szczególnie w przypadku cyklu piłowego, w którym brak okresu charakteryzującego się stałymi parametrami. Rozróżnienie tych pojęć jest szczególnie trudne, jeśli uwzględnić fizyczne aspekty odkształcenia. W takim przypadku można przyjąć, że plastyczność jest pewną formą pełzania [1], jak np. pełzanie krótkotrwałe.



Rys. 2. Podział całkowitego odkształcenia trwałego $\Delta\epsilon_t$ na składowe: $\Delta\epsilon_{p1}$ — składowa plastyczna, $\Delta\epsilon_p$ — składowa powstała w wyniku pełzania

Ze zjawiskiem zmęczenia cieplnego można spotkać się w wielu konstrukcjach, np. w energetyce (kotły, rurociągi, pary, przegrzewacze, części reaktorów jądrowych itp.), przemyśle hutniczym (walce, kokile, wlewnice), maszynowym (narzędzia skrawające), przemyśle lotniczym i okrętowym (łopatki turbin, części silników) i w wielu innych. Zmęczeniu cieplnemu poświęca się wiele uwagi w krajach o wysokim poziomie techniki i światowe piśmiennictwo w tej dziedzinie jest bardzo bogate. Szersze omówienie problemów zmęczenia cieplnego można również znaleźć w pracach krajowych [1, 4 - 6]. Zjawisko zmęczenia cieplnego nie jest jeszcze w pełni poznane. Badania w tej dziedzinie obejmują następujące zadania wymagające rozwiązań teoretycznych i doświadczalnego sprawdzenia, a mianowicie:

- a) poznanie istoty i przebiegu zjawiska, aż do zniszczenia elementu,
- b) ustalenie kryteriów zniszczenia,
- c) określenie trwałości,
- d) opracowanie metod oceny trwałości i stopnia uszkodzenia materiału,
- e) opracowanie metod obliczeń wytrzymałościowych.

Wymiana doświadczeń między użytkownikami urządzeń, w których zjawisko zmęczenia cieplnego występuje, a badaczami tego zjawiska może przyczynić się do rozwiązania powyższych zadań.

W niniejszej pracy omówiono w skrócie podstawowe problemy zmęczenia cieplnego, a mianowicie: mechanizm zniszczenia oraz ważniejsze kryteria zniszczenia i metody oceny trwałości.

1. Mechanizm zniszczenia

Zmęczenie cieplne jest zjawiskiem złożonym, wymagającym dalszych badań. Wyniki uzyskane do tej pory sugerują jednak, że zjawisko to ma wiele cech wspólnych z pełzaniem

i zmęczeniem mechanicznym. Obniżenie temperatury i zwiększenie prędkości jej zmian zbliża charakter procesu zmęczenia cieplnego do zmęczenia mechanicznego w temperaturze pokojowej, działania przeciwne, a także brak symetrii cyklu cieplnego, są natomiast przyczyną pojawienia się zjawisk charakterystycznych dla pełzania. Zmęczenie cieplne może więc być traktowane jako wynik nakładania się procesów odkształcania cyklicznego (zmęczenia) i pełzania, choć nie można tu stosować superpozycji prostej. Takie podejście, aczkolwiek przybliżone, gdyż nie uwzględnia w pełni wzajemnych wpływów obu składowych procesów zmęczenia cieplnego, jest jednak uzasadnione, ponieważ umożliwia zastosowanie metodologii wykorzystywanej do opisu lepiej poznanych procesów, takich jak pełzania i zmęczenie mechaniczne.

Wszystkie skutki cyklicznych zmian temperatury znane współczesnej technice można podzielić na cztery grupy [3], a mianowicie:

- a) nieodwracalne zmiany geometrii elementów, związane z gromadzeniem jednoimiennych odkształceń trwałych, czego skutkiem może być również zniszczenie przyrostowe,
- b) utrata spójności w skali makroskopowej materiałów o małej plastyczności, w wyniku nagłych zmian temperatury — udar (szok) cieplny,
- c) zniszczenie elementów w wyniku różnoimiennych naprężeń cieplnych (uplastycznienie przeciwwzrotne),
- d) zmiany prędkości odkształcania (pełzania) i wytrzymałości długotrwałej.

Skutki cyklicznych zmian temperatury zależą od materiału i od parametrów cyklu cieplnego. Inaczej zachowują się materiały o małej plastyczności, które pękają krucho, jeśli naprężenia cieplne przekroczą wartość krytyczną, a inaczej materiały sprężysto-plastyczne mające tzw. zapas plastyczności. Konstrukcja wykonana z takich materiałów może nie ulec zniszczeniu, gdy naprężenia w najbardziej niebezpiecznych punktach przekroczą wartość krytyczną. Przy określonych parametrach procesu obciążenia konstrukcja może przystosować się do warunków eksploatacji pod wpływem naprężeń resztkowych powstałych w różnych elementach konstrukcji w początkowych cyklach obciążenia (przystosowanie plastyczne). Warunki bezpiecznej pracy można określić w takim przypadku za pomocą teorii przystosowania plastycznego [1, 7, 8].

Obecny stan wiedzy nie pozwala na przedstawienie pełnego uogólnionego modelu mechanizmu zniszczenia w procesie zmęczenia cieplnego, można jednak wyróżnić wiele cech charakterystycznych dla tego procesu. Niejednorodność struktury i obecność różnego rodzaju defektów ułatwiają powstanie uszkodzeń w materiale podczas odkształcania. W początkowym okresie cyklicznego obciążania zachodzą jednocześnie procesy umocnienia i osłabienia. Odkształcenia powstałe po pierwszym cyklu cieplnym rozwijają się intensywnie powodując pojawienie się substruktury [1], która jest jedną z przyczyn odkształcania plastycznego wewnątrz ziarn. Rozwój odkształceń plastycznych i gromadzenia się wszelkiego rodzaju uszkodzeń prowadzi do powstania mikropęknięć. Mikropęknięcia pojawiają się wewnątrz ziarn lub na ich granicach, w zależności od parametrów procesu obciążania. Główne miejsca powstawania mikropęknięć wewnątrz ziarn to granice subziarn i bliźniaków. Podczas zmęczenia cieplnego w wysokich temperaturach mikropęknięcia pojawiają się najczęściej na granicach ziarn. Znane są dwa główne rodzaje takich mikropęknięć: wnątkowy (rys. 3) i klinowy (rys. 4), podobnie jak w procesie pełzania. W powstaniu mikropęknięć



Rys. 3. Pęknięcia typu wnętrkowego (stal H23N18) — pełzanie w temperaturze 1123 K, naprężenie $\sigma = 60$ MPa, pow. 50X



Rys. 4. Pęknięcia typu klinowego u zbiegu granic trzech ziarn (stal H23N18) — zmęczenie cieplne w zakresie zmian temperatury $573 \leq T \leq 1173$ K, naprężenie $\sigma = 60$ MPa, pow. 150X

podczas zmęczenia cieplnego szczególnie istotna jest rola wakansów, których koncentrację zwiększają cykliczne zmiany temperatury.

Charakter pęknięć (śródkrystaliczne, międzykrystaliczne) zależy od parametrów procesu obciążania, czyli od zakresu zmian odkształcenia i kształtu cyklu. W przypadku, gdy zakres zmian odkształcenia jest mały, złom ma charakter zbliżony do złomu zmęczeniowe-

go, pęknięcia rozwijają się wewnątrz ziarn. Zwiększenie zakresu zmian odkształcenia powoduje pojawienie się pęknięć o charakterze mieszanym, a dalsze zwiększenie zakresu zmian odkształcenia powoduje powstanie pęknięć wyłącznie międzykrystalicznych [9]. Zwiększenie czasu wytrzymywania elementu w maksymalnej temperaturze cyklu upodabnia charakter pęknięć do pęknięć powstałych podczas pełzania, a więc międzykrystalicznych. Rozwój uszkodzeń na granicach ziarn jest bardziej intensywny niż wewnątrz ziarn na skutek przemieszczania się dyslokacji ku granicom ziarn, gdzie powstają uskoki, pory i wydzielenia węglików. Podstawowym mechanizmem zniszczenia międzykrystalicznego jest przemieszczanie się ziarn względem siebie.

2. Kryteria zniszczenia

Za zniszczenie elementu można uważać złom, powstanie pęknięć lub takie zmiany cech geometrycznych elementu albo zmiany własności mechanicznych materiału, które uniemożliwiają dalsze użytkowanie elementu. Dopuszczenie do złomu w skali makroskopowej w urządzeniach energetycznych jest niewskazane. Za kryterium zniszczenia przyjmuje się więc w praktyce powstanie pęknięć o określonych wymiarach [10 - 13], krytyczne zmiany geometrii elementu [14] lub krytyczne zmiany własności fizycznych materiału [15 - 17]. Takie kryteria nie są na ogół porównywalne ze względu na szczególne warunki badań, bądź też warunki pracy danego elementu. Za kryterium zniszczenia najwygodniej byłoby zatem przyjąć taką wielkość, która umożliwiłaby ocenę stanu materiału niezależnie od parametrów procesu obciążania, dlatego poszukuje się nadal optymalnego kryterium zniszczenia.

Proces rozwoju uszkodzenia materiału opisuje się zwykle wprowadzając pewną ilościową miarę uszkodzenia [18]. Pochodna uszkodzenia u względem czasu jest prędkością rozwoju uszkodzenia i w ogólności zależy od rodzaju materiału, naprężenia i temperatury oraz zakresu i prędkości ich zmian. Przyjmując, że w chwili początkowej materiał jest w stanie nieszkodzonym, warunek zniszczenia można przedstawić w postaci równania

$$u = \int_0^{t_z} \dot{u} dt = u_z, \quad (1)$$

w którym t_z — czas do zniszczenia, u_z — krytyczna wartość uszkodzenia odpowiadająca zniszczeniu. Krytyczna wartość uszkodzenia u_z nie powinna być zależna od parametrów procesu obciążenia, a więc kryterium zniszczenia w uogólnionej postaci można wyrazić równaniem

$$u_z = \text{const}. \quad (2)$$

Wybór właściwego parametru u jest trudnym i nadal nie w pełni rozwiązany zadaniem. Jako miarę uszkodzenia przyjmuje się najczęściej odkształcenie lub energię rozproszoną w jednostce objętości materiału. W zależności od wyboru miary uszkodzenia kryteria zniszczenia dzielą się na odkształceniowe i energetyczne, jest to jednak podział umowny. W warunkach zmęczenia cieplnego, które można w przybliżeniu uznać za wynik nakładania się procesów zmęczenia mechanicznego i pełzania, wykorzystuje się kryteria zniszczenia stosowane w analizie tych obu procesów.

2.1. Odształceniowe kryteria zniszczenia. Podstawą tych kryteriów jest koncepcja tzw. zapasu plastyczności materiału. W myśl tej koncepcji przyjmuje się, że przekroczenie krytycznej wartości odkształcenia całkowitego lub jego plastycznej składowej spowoduje zniszczenie elementu. Najbardziej znanym kryterium odkształceniowym jest kryterium Mansona-Coffina [19, 20].

$$N_z^k \Delta \varepsilon_{pl} = C_1, \quad (3)$$

w której N_z — liczba cykli do złomu, $\Delta \varepsilon_{pl}$ — plastyczna składowa odkształcenia (szerokość pętli histerezy), k , C_1 — stałe materiałowe (przy czym powszechnie przyjmuje się $k = 0,5$). Przydatność tego kryterium została potwierdzona w praktyce przez wielu badaczy, w warunkach zmęczenia cieplnego. Stałe materiałowe k i C_1 zależą jednak od parametrów cyklu cieplnego i w warunkach zmęczenia cieplnego należy stosować zmodyfikowaną postać kryterium (3) zaproponowaną w pracy [21].

$$N_z^{k_1} \Delta \varepsilon_{pl} F(T) = C_2. \quad (4)$$

W zależności tej

$$F(T) = \left(-\frac{Q}{T_m} \right) \left[1 + C_3 \Delta T \exp \left(-\frac{Q}{T_m} \right) \right],$$

ΔT — zakres zmian temperatury w cyklu, T_m — średnia temperatura cyklu, k_1 , C_2 , C_3 , Q — stałe materiałowe, pozostałe oznaczenia jak w zależności (3). Autorzy pracy [21] potwierdzili doświadczalnie słuszność kryterium (4) dla trzech gatunków stali żaroodpornych.

HOFF w pracy [22] sformułował zależność między trwałością t_z w warunkach pełzania a prędkością pełzania ustalonego V_u dla złomu lepkiego

$$t_z V_u = C_4, \quad (5)$$

gdzie C_4 — stała materiałowa.

MONKMAN i GRANT [23] na podstawie analizy wyników badań wielu stopów w warunkach pełzania ustalili doświadczalną zależność wiążącą trwałość t_z i prędkością pełzania ustalonego V_u

$$t_z V_u^m = C_5, \quad (6)$$

gdzie m i C_5 — stałe materiałowe (przy czym $m \leq 1$).

Kryterium zniszczenia (6) może być stosowane w warunkach cyklicznych zmian temperatury, co stwierdzono na podstawie badań trzech gatunków stali żaroodpornych (H23N18, 50H17H17, 15HM) [24]. DOBEŠ i MILIČKA [25] stwierdzili podczas weryfikacji kryterium Monkmana-Granta (6), że znaczne rozproszenie wyników można istotnie zredukować, jeśli przyjmie się zmodyfikowaną postać tego kryterium

$$\frac{t_z}{\varepsilon_z} V_u^n = C_6, \quad (7)$$

gdzie ε_z — rzeczywiste odkształcenie zerwania, n i C_6 — stałe pozostałe oznaczenia jak w zależnościach (5) i (6).

Jako kryterium zniszczenia przyjmuje się także całkowite odkształcenie trwałe nagromadzone w procesie obciążania [18].

$$\sum_{N=1}^{N=N_z} \Delta \varepsilon_{tN} = C_7 \quad (8)$$

gdzie $\Delta \varepsilon_{tN}$ — przyrost odkształcenia trwałego w jednym cyklu, C_7 — stała, N_z — liczba cykli do złomu. Przydatność tego kryterium w warunkach zmęczenia cieplnego jest jednak ograniczona, gdyż jak wykazały badania wartość stałej C_7 zależy od parametrów cyklu cieplnego, a przede wszystkim od temperatury maksymalnej cyklu [24].

2.2. Energetyczne kryteria zniszczenia. Określenie związku między trwałością a energią rozproszoną w jednostce objętości materiału w jednym cyklu, na podstawie pomiarów pętli histerezy, jest jednym ze sposobów ustalenia kryterium zniszczenia. Inny sposób polega na uwzględnieniu termodynamicznych własności materiału i założeniu podobieństwa między zniszczeniem spójności materiału w wyniku działania naprężenia a stopieniem.

FELTNER i MORROW [26] sformułowali hipotezę, według której miarą zniszczenia w procesie zmęczenia jest całkowita wartość energii nagromadzonej w jednostce objętości materiału. Według tej hipotezy zniszczenie nastąpi wtedy, gdy wartość tej energii osiągnie wartość energii właściwej potrzebnej dla zerwania próbki w statycznej próbie rozciągania.

$$N_z \Delta E_N = C_8, \quad (9)$$

gdzie ΔE_N — energia właściwa nagromadzona w materiale w jednym cyklu, N_z — liczba cykli do złomu, C_8 — stała równa energii właściwej nagromadzonej w materiale w statycznej próbie rozciągania. Kryterium Feltnera i Morrowa (9) zostało potwierdzone doświadczalnie przez różnych badaczy, inni jednak stwierdzili, że nie może być ono stosowane. Według hipotezy MARTINA [27] za miarę zniszczenia należy przyjąć tylko tę część energii właściwej, która jest związana z umocnieniem:

$$N_z \Delta E_{NU} = C_9 \quad (10)$$

ΔE_{NU} — część energii właściwej (związanej z umocnieniem) nagromadzonej w jednym cyklu cieplnym, C_9 — stała, N_z — jak w zależności (9). Kryterium Martina (10) zostało potwierdzone doświadczalnie w warunkach zmęczenia cieplnego [3].

IVANOVA [28] za podstawę swej hipotezy przyjęła analogię między zniszczeniem spójności elementu a stopieniem materiału. Przyjęła ona również niezależność energii koniecznej do zniszczenia spójności materiału od sposobu jej dostarczenia. Kryterium zniszczenia zaproponowane przez Ivanovą ma postać

$$\overline{\Delta E}_\sigma (N_z - N_i) = C_{10}, \quad (11)$$

gdzie $\overline{\Delta E}_\sigma$ — średnia wartość energii właściwej rozproszona w jednym cyklu przy maksymalnym naprężeniu σ , N_i — liczba cykli, po której zaczynają się pojawiać submikroskopowe pęknięcia przy danym naprężeniu, C_{10} — stała równa utajonemu ciepłu topnienia, N_z — liczba cykli do złomu.

2.3. Kryteria zniszczenia oparte na sumowaniu uszkodzeń zmęczeniowych i powstałych w wyniku pełzania. Kryterium zniszczenia w warunkach cyklicznych zmian obciążeń lub temperatury wywołujących odkształcenia plastyczne i odkształcenia spowodowane przez pełzanie można zapisać w postaci

$$u = F(u_c, u_p). \quad (12)$$

W zależności tej $u = 1/N_z$ — całkowite uszkodzenie materiału w jednym cyklu, $u_c = 1/N_0$ — stopień uszkodzenia materiału w jednym cyklu pod wpływem cyklicznych zmian odkształcenia (bez uwzględnienia pełzania), $u_p = \int_0^t (dt/t_{zp})$ — stopień uszkodzenia spowodo-

wany przez pełzanie w czasie Δt , Δt — czas trwania jednego cyklu, t_{zp} — czas potrzebny do zniszczenia w warunkach pełzania w stałej temperaturze przy stałym obciążeniu. Postać funkcji $F(u_c, u_p)$, zależy od sposobu sumowania uszkodzeń. Najczęściej jest stosowana hipoteza liniowego sumowania uszkodzeń

$$D_c + D_p = 1, \quad (13)$$

gdzie:

$$D_c = \frac{N_z}{N_0}, \quad D_p = k \cdot \frac{t_z}{t_{zp}},$$

N_z — liczba cykli do złomu, N_0 — liczba cykli do złomu pod wpływem cyklicznych zmian odkształcenia (bez pełzania), t_z — czas do złomu, k — współczynnik kształtu cyklu (dla cyklu trójkątnego $k = 0,3$), powstałe oznaczenia jak w zależności (12). Zaletą tej hipotezy jest jej prostota, jednak wielu badaczy kwestionuje jej przydatność proponując różne sposoby nieliniowego sumowania uszkodzeń. Hipotezę liniowego sumowania uszkodzeń można przyjmować w przypadku szybkich zmian obciążeń (temperatury) bez przetrzymywania w ekstremalnych parametrach cyklu (cykl piłowy). W przypadku cyklu z przetrzymywaniem pod maksymalnym obciążeniem należy stosować nieliniowe sumowanie uszkodzeń; liniowe sumowanie uszkodzeń jest możliwe również w tym ostatnim przypadku, jeśli sumowania uszkodzeń dokonuje się po odkształceniach, a nie po czasie. Taki sposób zaproponowali SZNEJDROWICZ i GUSSIENKOV podając następujące kryterium zniszczenia [29].

$$2^m \int_0^{N_z} \frac{\varepsilon_n^m(t)}{\varepsilon_z^m(t)} dN + \int_0^{\varepsilon_z} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_z(t)} = 1, \quad (14)$$

w którym $\varepsilon_n(t)$ — zależne od czasu odkształcenie trwałe (szerokość pętli histerezy w połowie cyklu), $\varepsilon_z(t)$ — zależne od czasu rzeczywiste odkształcenie zerwania, $m = 1/k$, gdzie k — wykładnik w zależności (3), N_z — liczba cykli do złomu.

2.4. Stosowanie kryteriów zniszczenia w złożonym stanie naprężenia. W rzeczywistych konstrukcjach w każdej nieskończonej małej objętości materiału panuje na ogół przestrzenny stan naprężenia. Próby sformułowania warunku wytrzymałości, czyli kryterium zniszczenia, w przestrzennym stanie naprężenia były podejmowane wielokrotnie. Za parametry stanu granicznego przyjmuje się niezmienniki tensora stanu naprężenia lub odkształcenia. Jako kryterium zniszczenia można przyjmować warunek Hubera — Misesa lub Treski — Guesta. Autorzy pracy [30] twierdzą, że prawidłowo sformułowane kryterium zniszczenia w przypadku przestrzennego stanu naprężenia w warunkach zmęczenia cieplnego powinno w przypadku jednoosiowego stanu naprężenia dać się sprowadzić do kryterium zniszczenia Mansona-Coffina (3). W przypadku złożonego (przestrzennego) stanu naprężenia kryterium zniszczenia wyraża równanie

$$N_z = C_{11} \Delta e_i^{-k_1} \quad (15)$$

w którym Δe_i — zakres zmian intensywności odkształcenia plastycznego, k_1 , C_{11} — stałe, N_z — liczba cykli do złomu. Słuszność tego kryterium potwierdzono doświadczalnie.

W pracy [31] stwierdzono, że w warunkach zmęczenia cieplnego trwałość elementów znajdujących się w przestrzennym stanie naprężenia może być przewidywana na podstawie wyników badań w jednoosiowym stanie naprężenia przy uwzględnieniu warunków brzo-

wych, jeśli porównamy zakres zmian odkształcenia w jednoosiowym stanie naprężenia z zakresem zmian intensywności odkształcenia w złożonym stanie naprężenia

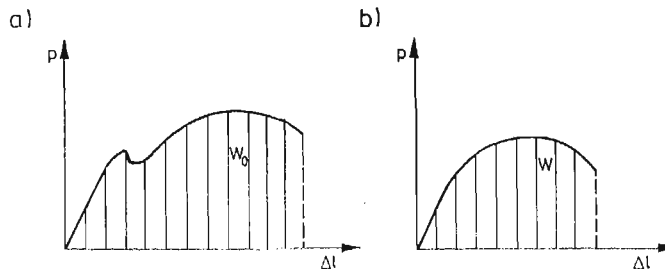
Autorzy pracy [32] stwierdzają, że w przestrzennym stanie naprężenia można stosować zmodyfikowane kryterium Martina

$$N_z^* = N_z \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{a1}} \right)^{\frac{(p+1)(1+m)}{p(1-m)}}, \quad (16)$$

w którym N_z^* — liczba cykli do złomu w płaskim lub przestrzennym stanie naprężenia, N_z — liczba cykli do złomu w jednoosiowym stanie naprężenia, ε_a — amplituda odkształcenia w jednoosiowym stanie naprężenia, ε_{a1} — amplituda intensywności odkształcenia w złożonym stanie naprężenia, p, m — stałe charakteryzujące plastyczność materiału.

2.5. Praca właściwa odkształcenia jako kryterium zniszczenia. Przyjęcie koncepcji stałej pojemności energetycznej materiału będącej podstawą wszystkich energetycznych kryteriów zniszczenia prowadzi do wniosku, że każdy proces obciążania powodujący rozproszenie energii, musi po pewnym czasie doprowadzić do osiągnięcia przez dany materiał krytycznego stopnia uszkodzenia na skutek gromadzenia energii rozproszonej w materiale [1]. Prędkość rozwoju uszkodzenia, a więc gromadzenia energii w materiale, zależy od parametrów procesu obciążania i od stanu materiału, ale całkowita energia właściwa nagromadzona w materiale powodująca uszkodzenie podczas dowolnego procesu obciążania do chwili złomu jest wartością stałą i może być uważana za stałą materiałową [16]. Tej całkowitej energii powodującej uszkodzenie materiału nie należy utożsamiać z całkowitą energią rozproszoną w procesie obciążania (której miarą jest suma pól pętli histerezy w przypadku zmęczenia), gdyż ta ostatnia zależy od liczby cykli do złomu [26].

W pracach autora [15 - 17] zaproponowano kryterium zniszczenia. Według tego kryterium za miarę uszkodzenia można przyjąć zmiany pracy właściwej odkształcenia, czyli powierzchni pod krzywą rozciągania, uzyskanej podczas statycznego rozciągania w temperaturze pokojowej próbek poddanych uprzednio obciążeniu przez określony czas lub do określonej liczby cykli. Analiza wyników badań próbek wykonanych z różnych gatunków stali żarowytrzymałych wykazała, że praca odkształcenia W potrzebna do zerwania próbki obciążanej do określonej liczby cykli jest mniejsza niż praca odkształcenia W_0 uzyskana podczas rozciągania próbek uprzednio nieobciążanych (rys. 5). Różnica ta jest spowodowana przez uszkodzenie materiału w procesie pierwotnego obciążania i jest na ogół tym większa im dłuższy był okres pierwotnego obciążania, chociaż dla materiałów cyklicznie umacnia-



Rys. 5. Wykresy rozciągania; a — próbki uprzednio nieobciążonej, b — próbki obciążanej do określonej liczby cykli

jących się spotyka się przypadki niemonotonicznych zmian pracy odkształcenia [33]. Dzieląc pracę odkształcenia przez objętość próbki uzyskuje się pracę właściwą odkształcenia (zerwania) W_s . Zakładając proporcjonalność pracy właściwej odkształcenia i energii właściwej zużytej na uszkodzenie jednostki objętości materiału można uważać, że różnica

$$W_{os} - W_s = W_{NS} \quad (17)$$

jest miarą uszkodzenia materiału, gdzie W_{os} jest pracą właściwą odkształcenia uzyskaną dla próbek uprzednio nieobciążanych. Aby umożliwić porównanie stopnia uszkodzenia różnych materiałów wprowadzono względną wartość pracy właściwej odkształcenia [1, 15]

$$\frac{W_{NS}}{W_{os}} = \frac{W_{os} - W_s}{W_{os}} = D_w, \quad (18)$$

którą nazwano uszkodzeniem.

Zniszczenie próbki nastąpi wtedy, gdy energia nagromadzona w jednostce objętości materiału osiągnie krytyczną wartość, a więc praca właściwa potrzebna do zerwania takiej zniszczonej próbki będzie równa zero. Podstawiając zatem $W_s = 0$ do zależności (18) uzyska się

$$D_w = 1 \quad (19)$$

Równanie (19) stanowi proponowane kryterium zniszczenia. Kryterium to zostało potwierdzone doświadczalnie dla jednoosiowego i płaskiego stanu naprężenia [15, 16, 34, 35].

3. Metody oceny trwałości

Trwałość jest miarą wytrzymałości materiału na długotrwałe działanie obciążeń, czyli miarą zdolności materiału danego elementu konstrukcyjnego do wytrzymania określonej liczby cykli bez zniszczenia. Trwałość w warunkach zmęczenia cieplnego jest funkcją wielu czynników, takich jak

- a) temperatura maksymalna,
- b) kształt cyklu cieplnego,
- c) warunki brzegowe,
- d) skład chemiczny i struktura materiału,
- e) własności fizyczne materiału,
- f) ośrodek, w którym znajduje się dany element.

Wpływ tych czynników na trwałość omówiono w pracy [1].

Charakter procesu rozwoju uszkodzeń w warunkach zmęczenia cieplnego jest złożony i do chwili obecnej nie w pełni poznany. Brak również kryterium zniszczenia, którego przydatność byłaby jednoznacznie potwierdzona w szerokim zakresie zmian parametrów procesu obciążania. Podstawowym warunkiem prawidłowej oceny trwałości na podstawie wyników badań laboratoryjnych jest warunek podobieństwa prowadzonych badań do rzeczywistych procesów obciążania. Z tego względu są podejmowane próby opracowania różnych metod oceny trwałości, które umożliwiłyby prognozowanie trwałości elementu w warunkach zmęczenia cieplnego na podstawie wyników rutynowych badań wytrzymałościowych.

3.1. Ocena trwałości na podstawie wyników badań zmęczenia izotermicznego. Jednym z prostszych sposobów oceny trwałości w warunkach zmęczenia cieplnego jest ocena na podstawie zależności ustalonych dla zmęczenia izotermicznego. Trwałość określa się w takim przypadku z zależności Mansona-Coffina (3), a badania prowadzi się w średniej lub maksymalnej temperaturze cyklu. W pracy [36] są rozważane warunki w jakich wyniki uzyskane podczas izotermicznego zmęczenia mogą być stosowane do oceny trwałości w procesie zmęczenia cieplnego. Czynniki, które muszą być w tych warunkach wzięte pod uwagę są: częstość cyklicznego obciążenia, lokalne odkształcenia, koncentracja naprężeń i nakładanie się naprężeń resztkowych oraz pochodzących od obciążeń statycznych. Analizując wyniki badań autor pracy [36] dochodzi do wniosku, że liczba cykli do zniszczenia zwiększa się ze wzrostem częstości obciążania, zatem prowadząc badania przy częstościach niższych niż rzeczywiste można określić trwałość elementu z wystarczającym zapasem bezpieczeństwa. Wpływ zmian temperatury podczas cyklu jest istotny przede wszystkim dla metali o sieci heksagonalnej, zaś dla metali o sieci regularnej wytrzymałość materiału na zmęczenie cieplne powinna być bliska wytrzymałości zmęczeniowej w stałej temperaturze równej temperaturze maksymalnej cyklu. Zwiększenie średniej temperatury cyklu prowadzi do zmniejszenia trwałości elementu. Wpływ naprężeń resztkowych można pominąć, jeśli średnie odkształcenie w cyklu jest dostatecznie małe w porównaniu z odkształceniem zerwania podczas statycznego rozciągania. Wpływ naprężenia średniego można uwzględnić, jeśli w zależności Mansona zamiast wytrzymałości na rozciąganie R_m podstawimy różnicę $(R_m - \sigma_m)$, w której σ_m — naprężenie średnie w cyklu [9]. Zależność Mansona przyjmie w tym przypadku postać

$$\Delta \varepsilon = \frac{3,5(R_m - \sigma_m)}{E} N_z^{-0,12} + \left(\ln \frac{1}{1 - \Psi} \right)^{0,6} N_z^{-0,6}, \quad (20)$$

gdzie $\Delta \varepsilon$ — zakres zmian odkształcenia całkowitego, E — moduł Younga, Ψ — przewężenie względne, N_z — liczba cykli do złomu.

3.2. Ocena trwałości na podstawie wyników uzyskanych podczas pełzania. W przypadku, gdy udział pełzania jest dominujący stosuje się różne metody, w których przyjmuje się podobieństwo mechanizmów zniszczenia podczas zmęczenia cieplnego i podczas pełzania. Taką metodę zaproponowali TAIRA i OHNAMI w pracy [37]. Przyjęli oni, że trwałość w warunkach cyklicznie zmiennej temperatury $T(t)$ jest taka sama jak podczas pełzania w stałej temperaturze równoważnej. Założyli również, że proces gromadzenia uszkodzeń można w obu analizowanych przypadkach opisać tym samym równaniem. Wychodząc z tych założeń wyznaczyli stałą temperaturę równoważną T_r z zależności

$$T_r = - \frac{Q}{\ln \left\{ \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \exp \left[- \frac{Q}{T(t)} \right] dt \right\}}, \quad (21)$$

w której Q — energia aktywacji, Δt — czas trwania cyklu, t — czas.

BOČEK [38] zaproponował metodę pozwalającą obliczyć trwałość w warunkach cyklicznych zmian temperatury T i naprężenia σ od czasu t na podstawie parametrów, które można wyznaczyć podczas statycznego obciążania. Trwałość wyznacza się według tej metody z zależności

$$\frac{2N_z}{b} \int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \frac{d\sigma}{t_z[\sigma(t)]_{T=const}} + \frac{2N_z}{c} \int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{dT}{t_z[T(t)]_{\sigma=const}} = 1, \quad (22)$$

w której N_z — liczba cykli do złomu, t_z — trwałość

$$b = \frac{d\sigma}{dt}, \quad c = \frac{dT}{dt}.$$

W pracy [39] zaproponowano modyfikację metody Tary i Ohnami'ego. Modyfikacja polega na przyjęciu zależności energii aktywacji od temperatury i naprężenia. Autorzy przyjęli, że trwałość t_{zp} w warunkach pełzania w stałej temperaturze równoważnej T_r ,

$$t_{zp} = t_0 \exp \left[m \frac{U_0 - B\sigma_0 T_r^n}{RT_r} \right] \quad (23)$$

jest równa trwałości t_{zz} w warunkach cyklicznych zmian temperatury $T(t)$.

$$t_{zz} = \frac{t_0 \Delta t}{\int_0^{\Delta t} \exp \left\{ m \frac{B\sigma_0 [T(t)]^n - U_0}{RT(t)} \right\} dt}. \quad (24)$$

W zależnościach (23) i (24) B , t_0 , U_0 , m , R — stałe, Δt — czas trwania cyklu, σ_0 — naprężenie początkowe. Temperaturę równoważną T_r — wyznacza się z równania

$$\frac{mB\sigma_0}{R} T_r^n + T_r \ln \frac{\Delta t}{\int_0^{\Delta t} \exp \left\{ m \frac{B\sigma_0 [T(t)]^n - U_0}{RT(t)} \right\} dt} - \frac{mU_0}{R} = 0. \quad (25)$$

Trwałość wyznacza się z zależności Monkmana — Granta (6), przy czym prędkość odkształcania V_u określa się w próbie pełzania przeprowadzonej w temperaturze równoważnej T_r . Metoda ta została potwierdzona doświadczalnie na próbkach wykonanych ze stali H23N18 [39].

3.3. Ocena trwałości na podstawie kształtu pętli histerezy. W przypadku, gdy udział pełzania w rozwoju uszkodzeń jest porównywalny z udziałem cyklicznych zmian odkształcania oceny trwałości dokonuje się na podstawie kształtu pętli histerezy i przyjętego kryterium zniszczenia. Jeżeli przyjmie się kryterium zaproponowane przez Udouchi'ego i Wadę (4), to do oceny trwałości wystarczy określić szerokość pętli histerezy, natomiast w przypadku przyjęcia kryterium Martina (10) potrzebna jest znajomość kształtu pętli histerezy w stanie nasycenia procesu zmęczenia (stabilizacja kształtu pętli). Sposób określenia kształtu pętli histerezy oraz energii związanej z umocnieniem podano w pracach [3, 32].

W pracy [40] zaproponowano metodę oceny trwałości elementów pracujących w warunkach cyklicznych zmian temperatury, która polega na podziale zakresu zmian odkształcania trwałego w cyklu na odkształcania plastyczne i powstałe w wyniku pełzania. Trwałość wyznacza się z zależności

$$\sum_i \frac{F_i}{N_{zi}} = \frac{1}{N_z}, \quad (26)$$

w której F_i — stosunek danego rodzaju odkształcania do całkowitego odkształcania w cyklu,

N_{zi} — liczba cykli do złomu w przypadku danego (jednego tylko) rodzaju odkształcenia w cyklu, i — liczba rodzajów odkształcenia, N_z — liczba cykli do złomu w warunkach cyklicznych zmian temperatury.

Do prognozowania trwałości wykorzystuje się również specjalne programy na maszyny cyfrowe. W pracy [41] podano schemat blokowy takiego programu. Za pomocą tego programu oblicza się trwałość oraz uszkodzenie. Szczególną cechą programu jest ocena trwałości według kilku kryteriów zniszczenia. Trwałość obliczoną za pomocą tego programu porównano z wynikami badań laboratoryjnych różnych materiałów i stwierdzono dużą zgodność. Podczas prognozowania trwałości na maszynach cyfrowych można stosować modele matematyczne. Modele takie mogą uwzględniać różne cechy materiału, takie jak wzmocnienie izotropowe lub efekt Bauschingera. Najczęściej stosuje się stosunkowo proste modele dwuparametrowe. Nie uwzględniają one jednak zmian temperatury i wykorzystywane są do opisu zmęczenia izotermicznego.

3.4. Zastosowanie emisji akustycznej do oceny stopnia uszkodzenia materiału i trwałości elementów. W wyniku badań autora i współpracowników opracowano dwie metody oceny stopnia uszkodzenia materiału w warunkach cyklicznych zmian temperatury wykorzystujące zjawisko emisji akustycznej [42 - 44]. Metody te umożliwiają ocenę stopnia uszkodzenia i prognozowanie trwałości na podstawie badań zmian emisji akustycznej podczas rozciągania próbek, wykonanych z elementów po określonym czasie eksploatacji [42, 43] oraz na podstawie zmian emisji akustycznej mierzonej podczas procesu obciążania [44].

Pośredni sposób oceny stopnia uszkodzenia polega na pomiarze emisji akustycznej podczas rozciągania (w temperaturze pokojowej) próbek wykonanych z elementów po różnych okresach eksploatacji i porównaniu tej emisji z emisją akustyczną uzyskaną podczas rozciągania próbek z materiału uprzednio nieobciążonego. Analiza wyników badań wykazała, że wartość względnej skumulowanej liczby impulsów AE/\overline{AE}_0 zmienia się w funkcji stopnia zużycia próbki N/\overline{N}_z (rys. 6). Stwierdzono, że zmiana ta ma charakter liniowy

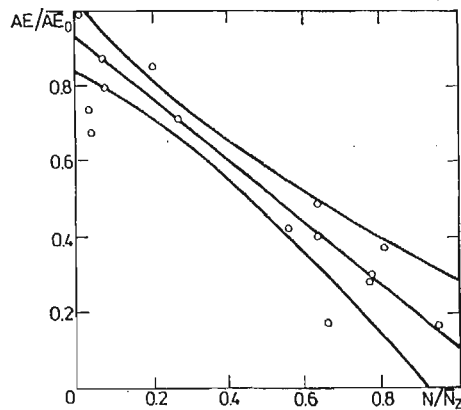
$$\frac{AE}{\overline{AE}_0} = 0,92 + 0,82 \frac{N}{\overline{N}_z}, \quad (27)$$

gdzie AE — skumulowana liczba impulsów emisji akustycznej uzyskana dla próbki uprzednio obciążanej do określonej liczby cykli N , \overline{AE}_0 — średnia wartość skumulowanej liczby impulsów emisji akustycznej uzyskana dla próbek uprzednio nieobciążanych, \overline{N}_z — średnia wartość liczby cykli do złomu.

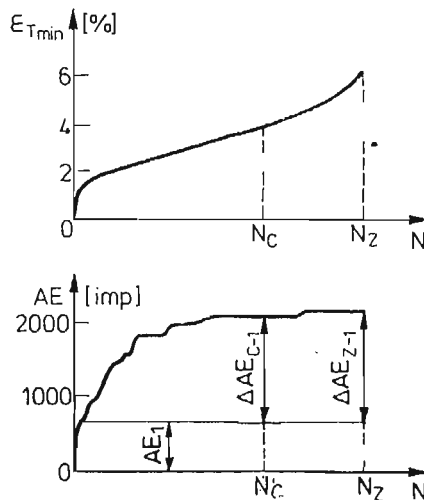
Zmiany emisji akustycznej uzyskane podczas próby rozciągania są wprost proporcjonalne do zmian pracy właściwej odkształcenia uzyskanych podczas tych badań [42] mogą być zatem przyjęte za miarę stopnia uszkodzenia materiału podczas pierwotnego obciążania (eksploatacji). Mogą być one również wykorzystane do prognozowania trwałości elementów.

Na rys. 7 pokazano zmiany odkształcenia średniego (wydłużenia) próbki i skumulowanej liczby impulsów w funkcji liczby cykli uzyskane podczas obciążania w warunkach cyklicznych zmian temperatury próbek wykonanych ze stali 15HM [44].

Porównanie skumulowanej liczby impulsów w chwili złomu z jej trwałością wykazało, że skumulowana liczba impulsów zależy również od indywidualnych cech danej próbki,



Rys. 6. Zależność względnych zmian emisji akustycznej $\frac{AE}{AE_0}$ od stopnia zużycia próbki $\frac{N}{N_z}$ (stal 15 HM), wraz z 95% przedziałem ufności [42]



Rys. 7. Zmiany odkształcenia średniego próbki ϵ_{Tmin} i skumulowanej liczby impulsów emisji akustycznej AE w funkcji liczby cykli N , stal 15 HM, 473 \rightarrow 853 K; $\sigma = 255$ MPa

co znacznie zwiększa rozproszenie wyników. Jeśli jednak pominiemy emisję akustyczną w pierwszym cyklu, a za zniszczenie przyjmiemy wejście próbki w stan przyspieszonego odkształcania po osiągnięciu N_c cykli, to taka zredukowana wartość skumulowanej liczby impulsów ΔAE_{c-1} zmienia się liniowo ze zmianą liczby cykli N_c dla badanej stali

$$AE_{c-1} = 660 + 5N_c \quad (28)$$

Prawdopodobieństwo istnienia tej korelacji wynosi 0,999, a więc zależność (28) może być wykorzystana do oceny trwałości.

Literatura

1. ŻUCHOWSKI R., *Zmęczenie cieplne metali i elementów konstrukcji*, Prace Naukowe Inst. Mater. i Mech. Tech. Pol. Wr., Nr 43, Monografie Nr 15, Wrocław 1981.
2. SPERA D. A., *What is thermal fatigue? Thermal Fatigue of Materials and Components*, ASTM STP 612, 1976, s. 3 - 9.
3. ПИСАРЕНКО Г. С., МОЖАРОВСКИЙ Н. С., АНТИПОВ Е. А., *Сопротивление жаропрочных материалов нестационарным силовым и температурным воздействиям*, Наукова Думка, Киев 1974.
4. ŻUCHOWSKI R., *Zagadnienia zmęczenia cieplnego*. VII Krajowa Konferencja Wytrzymałości i Badania Materiałów, Sekcja I, Gdańsk 1977 s. 1 - 19.
5. ŻUCHOWSKI R., *O badaniach zmęczenia cieplnego metali*. Zesz. Nauk. Pol. Śl., Hutnictwo, 1979 nr 609, seria: Hutnictwo, zesz. 19 s. 317 - 329.
6. WEROŃSKI A., *Zmęczenie cieplne metali*, WNT, Warszawa 1983.
7. GOCHFELD D. A., *Teoria przystosowania się konstrukcji sprężysto-plastycznych i jej niektóre zastosowania*, Termoplastyczność, Ossolineum 1975, s. 283 - 348.
8. KÖNIG J. A., *Zagadnienia dostosowywania się konstrukcji sprężysto-plastycznych*, Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1965.
9. ДУЛЬБЕНЕВ П. А., КОТОВ П. Я., *Термическая исталость металлов*, Машиностроение, Москва 1980.
10. DAWSON R. A. T., ELDER W. J., HILL G. J., PRICE A. T., *High-strain Fatigue of Austenitic Steels*. Int. Conf. on Termal and High-strain Fatigue, London 1967, The Institute of Metals s. 239.
11. ŻMIHORSKI E., ŻÓŁCIAK T., *Wytrzymałość stali stopowych na zmęczenie cieplne*. Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła, 1973, 3, s. 2 - 8.
12. ŻMIHORSKI E., KOWALSKI W., ŻÓŁCIAK T., *Własności stali narzędziowych do pracy na gorąco i wytyczne ich do obróbki cieplnej*, Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła, 1975, 14 s. 36 - 40.
13. WEROŃSKI A., *Zmęczenie cieplne metali.*, Przegląd Mechaniczny 1975, 17 - 18, s. 520 - 527.
14. ДАВИДЕКОВ Н. Н., ЛИХАЧЕВ В. А., *Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии*, Машгиз, Москва 1962.
15. ŻUCHOWSKI R., *Specific Strain Work as a Measure of Material Damage.*, Trans. 7th Inter. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Chicago 1983, North-Holland, Amsterdam 1983, v. L., s. 39 - 46, L1/6.
16. ŻUCHOWSKI R., *Specific Strain Work as a Failure Criterion*, 24 Polish Solid Body Conference, Jachranka 1983, IPPT PAN, Abstracts, s. 253 - 254.
17. ŻUCHOWSKI R., *Ocena stopnia uszkodzenia materialu na podstawie zmian własności fizycznych.*, Dozór Techniczny 18, 1984, 3, s. 97 - 101.
18. ФЕДОРОВ В. В., *Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел*. ФАН, Ташкент 1979.
19. MANSON S. S., *Behaviour of materials under conditions of thermal stress*, NACA TN — 2933, 1953.
20. COFFIN L. F., *A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metals*, Trans. ASME, 76, August 1954, 6 s. 931 - 949.
21. UDOUCHI T., WADA T., *Thermal Effect on Low-cycle Fatigue Strength of Steel*, Thermal Stress and Thermal Fatigue. Proc. Inter. Conf. Gloucestershire, England 1969, Butterworth 1971 s. 109 - 123.
22. HOFF N. J., *The Necking and the Rupture of Rods Subjected to Constant Tensile Loads.*, Trans. ASME, E. J. Appl. Mech., 1953, 1 s. 105 - 108.
23. MONKMAN F. C., GRANT N. J., *An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep-rupture Tests, Deformation and Fracture at Elevated Temperatures*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1965, s. 91 - 103.
24. BUBA N., *Doświadczalna weryfikacja kryteriów zniszczenia w procesie zmęczenia cieplnego metali*. Rozprawa doktorska. Raport IMiMT PWr 1983, seria: Preprinty nr 8.
25. DOBEŠ F., MILIČKA K., *The Relation Between Minimum Creep Rate and Time to Fracture*. Metal Science 10, 1976, 11 s. 382 - 384.
26. FELTNER C. E., MORROW J. D., *Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Failure*. Trans. ASME, Journal of Basic Engineering 83, D, 1961, 1 s. 15 - 22.

27. MARTIN D. E., *An Energy Criterion for Low-cycle Fatigue*, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering 83, D, 1961, December. s. 563 - 571.
28. ИВАНОВА В. С., и др., *Роль дислокации в упрочнении и разрушении металлов*, Москва 1965.
29. ШНЕЙДРОВИЦ Р. М., ГУССЕНКОВ А. П., *Деформационно-кинетические критерии длительной прочности, Исследования малоциклового прочностии при высоких температурах*, Наука, Москва 1975, с. 39 - 61.
30. КОСТЮК А. Г., ТРУХНИЙ А. Д., МИЧУЛИН В. Я., *Критерий прочности материалов при малоциклового исталостии при сложном напряженном состоянии*, Машиноведение 1974, 5, с. 62 - 67.
31. TAIRA S., INOUE T., *Thermal Fatigue under Multiaxial Thermal Stress*, Thermal Stress and Thermal Fatigue, Proc. Inter. Conf. Gloucestershire, England 1969, Butterworth 1971 s. 66 - 80.
32. ПИСАРЕНКО Г. С., МОЖАРОВСКИЙ Н. С., *О разрушении жаропрочных сплавов при термоциклических нагрузках*. Порошковая Металлургия, 1966, 2 с. 69 - 86.
33. ВУКОВСКИ Р. J., *Wplyw czasu eksploatacji na własności stali 15HM*, Przegląd Mechaniczny, 30, 1971 5 s. 141 - 144.
34. ŻUCHOWSKI R., KORUSIEWICZ L., *Experimental Verification of Failure Criterion Based on Specific Strain Work*. Rozprawy Inżynierskie 32, 1984, 4 s. 537 - 544.
35. ŻUCHOWSKI R., ZIĘTKOWSKI L., *Strain Work as a Failure Criterion in Plane Stress State*. Trans. 8th Inter. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussels, 1985, North-Holland-1985 vol. L, paper L4/2, s. 167 - 172.
36. FORREST P. G., *The use of Strain Cycle Tests For Assessing Thermal Fatigue*. Appl. Mater. Res. 1965, 4, October, s. 239 - 246.
37. TAIRA S., OHMAMI M., *Accelerated Stage Creep and Creep Rupture under Temperature Cycling*. Bull JSME, 1962, 5, s. 10 - 15.
38. ВОЇЕК М., *Lifetime and Failure Strain Prediction for Material Subjected to Non-stationary Tensile Loading Conditions; Application to Zircaloy 4*, 5th Conference ASTM 754, 1982. s. 239 - 349.
39. ŻUCHOWSKI R., BUBA N., *Assessment of Durability Under Conditions of Thermal Cycling on the Basis of the Results Obtained in Creep*. Res Mechanica, 5, 1982, 4 s. 317 - 322.
40. HALFORD G. R., MANSON S. S., *Life Prediction of Thermal-fatigue Using Strain Range Partitioning*, Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, 1976, s. 239 - 254.
41. SPERA D. A., COX E. C., *Description of a Computerized Method for Predicting Thermal Life of Metals*. Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, 1976, s. 69 - 85.
42. ŻUCHOWSKI R., KORUSIEWICZ L., *Acoustic Emission as a Measure of Material Damage Under Thermal-Cycling*. Journal of Acoustic Emission 2, 1983, 4 s. 272 - 274.
43. ŻUCHOWSKI R., KORUSIEWICZ L., PSZONKAA., *Acoustic Emission Application to the Evaluation of Material Damage Degree Under Thermal Cycling*, 8th Congress on Material Testing, Budapest 1982, Lectures, vol. 3 s. 1185 - 1189.
44. ŻUCHOWSKI R., KORUSIEWICZ L., *Application of Acoustic Emission to the Assessment of Damage in Steel in Thermal Cycling Conditions*. Res Mechanica, 6, 1983, 3 s. 161 - 166.

Р е з ю м е

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В работе представлены важнейшие проблемы термоциклирования металлов. Обсуждено протекание явления в феноменологическом и физическом аспектах и приведены различные критерии разрушения элементов, работающих в циклических условиях изменений нагрузок и температуры, а также во время изотермической ползучести. Обсуждена пригодность этих критериев в условиях термоциклирования, а также приведён критерий, предложенный автором, в котором используются изменения удельной работы для оценки степени повреждения материала. Обсуждены различные методы оценки долговечности и степени повреждения материала, в том числе также методы, предложенные автором, использующие результаты испытаний ползучести, а также измерения акустической эмиссии.

S u m m a r y

PROBLEMS OF THERMAL FATIGUE OF METALS

The main problems of thermal fatigue of metals are presented in the paper. Physical and phenomenological aspects of the phenomenon are discussed as well as the different failure criteria of structural components operating under thermal and mechanical fatigue and isothermal creep conditions. Validity and application conditions of these criteria are also discussed as well as the failure criterion proposed by the author. The failure criterion is based on specific strain work. The paper also provided information on the methods for assessment of both the durability and the damage of structural components including the methods proposed by the author based on creep test results as well as acoustic emission measurement.

Praca wpłynęła do redakcji dnia 20 września 1985 roku.
