

13. ZMĘCZENIE METALI*

13.1. WSTĘP

Jedną z najczęściej obserwowanych form zniszczenia konstrukcji jest zniszczenie zmęczeniowe, niezwykle groźne w skutkach, gdyż zazwyczaj niespodziewane. Zniszczenie to występuje przy poziomie naprężeń znacznie niższym, niż wytrzymałość doraźna, czy też granica plastyczności. Poziom tych naprężeń zależy od gatunku materiału, obróbki cieplnej, stanu powierzchni elementu, procesów technologicznych wytwarzania. Zniszczenie zmęczeniowe może nastąpić nawet przy poziomie naprężeń czterokrotnie mniejszym niż wytrzymałość doraźna.

Poprzez zniszczenie zmęczeniowe rozumiemy zniszczenie, które nastąpiło przy obciążeniach zewnętrznych zmiennych w czasie. Zmiany te mogą być regularne, cykliczne np. w postaci obciążeń o przebiegu sinusoidalnym

$$F(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

gdzie: t jest czasem, ω – częstością kołową zmian obciążenia, a φ kątem fazy początkowej.

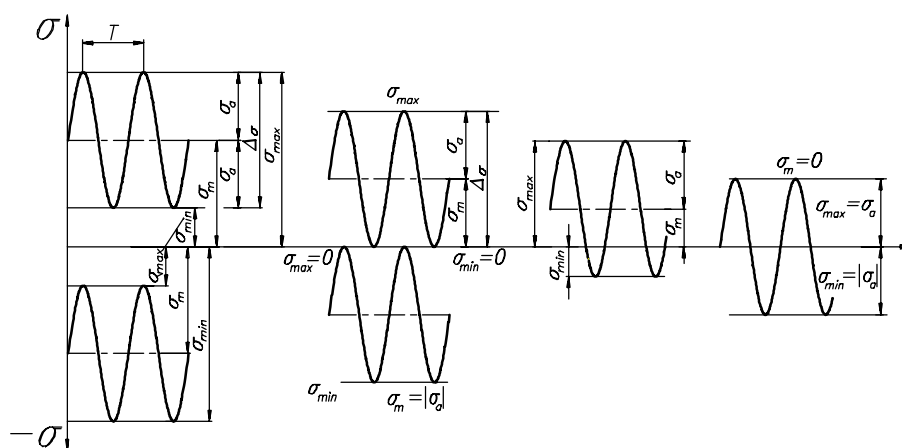
Zniszczenie zmęczeniowe następuje najczęściej w elementach samochodów i pojazdów, samolotów, konstrukcji poddanych podmuchom wiatru, w silnikach, generatorach i szeregu innych konstrukcji. Niezwykle ważnym staje się więc określenie naprężeń, poniżej których zniszczenie zmęczeniowe nie nastąpi lub określenie czasu, w którym istnieje duże prawdopodobieństwo katastrofy przy danym poziomie naprężeń.

Powodem zniszczenia zmęczeniowego mogą być mikrodefekty struktury np.: w formie wtrąceń, mikropęknięć lub pustek powstałych w wyniku procesu technologicznego. Nie są one zazwyczaj wykrywalne tradycyjnymi defektoskopami. Mogą być też defekty powierzchniowe będące skutkiem procesów obróbki powierzchni. W przypadku wyższych nieco obciążeń mikropęknięcia mogą powstać na wskutek wzajemnego oddziaływania defektów struktury typu dyslokacji. Szczegółową analizę mechanizmów inicjacji pęknięć zmęczeniowych podaje w swej monografii S.Kocańda [1] w rozdziałach 2 i 3. Zmęczenie metali rozwinęło się w bieżącym stuleciu w niezależną dziedzinę wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym. Obejmuje swym zakresem inżynierię materiałową, fizykę ciała stałego, mechanikę pękania oraz mechanikę doświadczalną. Każda konstrukcja, która może być poddana naprężeniom zmiennym winna być sprawdzana pod kątem jej wytrzymałości zmęczeniowej. W ostatnich trzech dekadach napisano kilka tysięcy publikacji na temat zmęczenia metali. Jest to ciągle dziedzina otwarta dla nowych odkryć naukowych i szereg problemów nie zostało jeszcze rozwiązanych.

* Opracował: Andrzej Neimitz

13.2. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE

Ze względu na ograniczone możliwości czasowe skoncentrujemy się w niniejszym ćwiczeniu na próbie zmęczenia przy sinusoidalnym obciążeniu. Próba ta odgrywa tę samą rolę co próba jednoosiowego rozciągania w wytrzymałości materiału. Podstawowe określenia są przedmiotem normy PN-76/H-04325.



Rys. 13.1. Sinusoidalny przebieg naprężeń zmiennych

$\sigma_{\max}$ – naprężenia maksymalne cyklu

$\sigma_{\min}$ – naprężenia minimalne cyklu

T – okres zmian

$$f = \frac{1}{T} \text{ – częstotliwość} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \text{ – amplituda cyklu}$$

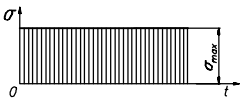
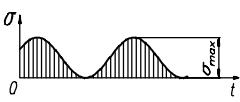
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \text{ – naprężenia średnie cyklu}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \text{ – współczynnik asymetrii cyklu} \quad \sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\kappa = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \text{ – współczynnik stałości obciążenia} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

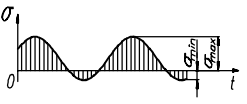
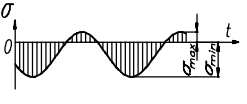
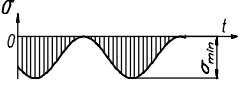
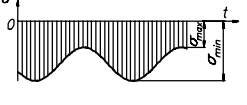
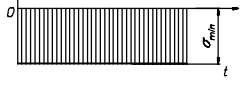
Tabela 13.1

Różne cykle naprężeń zmęczeniowych

Wykres zależności $\sigma = f(t)$	Nazwa cyklu	Naprężenia			Współczynniki		Oznaczenia granic zmęczenia wg PN– 76/H–04325*
		maksymalne i minimalne $\sigma_{\max} \sigma_{\min}$	średnie σ_m	amplituda naprężeń σ_a	amplitudy cyklu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	stałości obciążenia $\kappa = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$	
	naprężenie stałe (dodatnie)	$\sigma_{\max} =$ $= \sigma_{\min} > 0$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$	0	+1	$+\infty$	–
	jednostronny (dodatni)	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} > 0$	> 0	$\neq 0$	$0 < R < 1$	$1 < \kappa < +\infty$	Z_r Z_g Z_s
	odzerowo tetniący (dodatni)	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} = 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{\max}$	$\frac{1}{2} \sigma_{\max}$	0	1	Z_{rj}, Z_{gj} Z_{sj}

* r – przy rozciąganiu, c – przy ściskaniu, g – przy zginaniu, s – przy skręcaniu

Tabela 13.1 cd.

	dwustronny	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$ $\sigma_{\max} > \sigma_{\min} $	> 0	$\neq 0$	$-1 < R < 0$	$0 < \kappa < 1$	Z_r Z_g Z_s
	wahadłowy	$\sigma_{\max} =$ $= -\sigma_{\min} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$	0	$\sigma_{\max} =$ $= \sigma_{\min} $	-1	0	Z_{rc} Z_{gc} Z_{sc}
	dwustronny	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$ $\sigma_{\max} < \sigma_{\min} $	< 0	$\neq 0$	$-\infty < R < -1$	$-1 < \kappa < 0$	Z_c Z_g Z_s
	odzerowo tętniący (ujemny)	$\sigma_{\max} = 0$ $\sigma_{\min} < 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{\min}$	$\frac{1}{2} \sigma_{\min} $	$\pm \infty$	-1	Z_{cj} Z_{gj} Z_{sj}
	jednostronny (ujemny)	$\sigma_{\max} < 0$ $\sigma_{\min} < 0$	< 0	$\neq 0$	$+1 < R < +\infty$	$-\infty < \kappa < -1$	Z_c Z_g Z_s
	napężenie stałe (ujemne)	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} < 0$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$	0	$+1$	$-\infty$	$-$

Z_G – granica zmęczenia lub wytrzymałość zmęczeniowa – jest największym naprężeniem $\sigma_{\max}$ (dla określonego cyklu naprężeń), przy którym element nie ulegnie zniszczeniu.

Indeks G może być zastąpiony innym w zależności od sposobu obciążenia.

Wykaz oznaczeń podany został w tabeli 13.1.

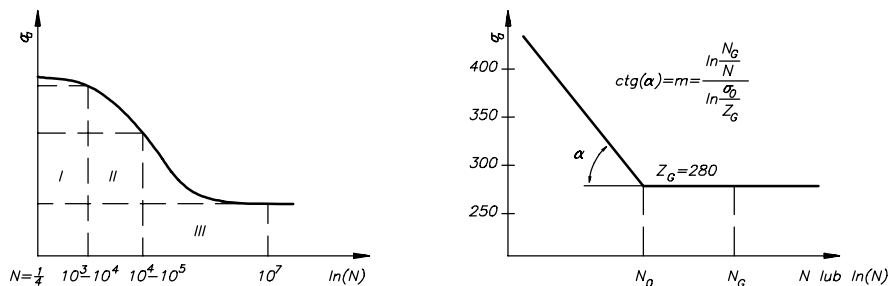
Określenie najwyższych naprężeń, przy których element nie ulegnie zniszczeniu nie jest jednoznaczne. Należy określić liczbę cykli, do której nie zaobserwujemy zniszczenia; przy czym przez zniszczenie rozumiemy zarówno całkowite rozdzielenie elementu na dwie części (co oczywiste) jak również stan materiału, w którym za pomocą metod nieniszczących defektoskopowych stwierdzimy istnienie pęknięć w elemencie. Liczba cykli do zniszczenia N_G nie może być oczywiście równa nieskończoności dlatego też umawiamy się, że wynosi ona:

$N_G = 10 \cdot 10^6$ cykli dla stali konstrukcyjnych i innych stopów żelaza $N_G = 100 \cdot 10^6$ cykli dla stopów metali nieżelaznych.

13.3. WYKRESY ZMĘCZENIOWE WÖHLERA

Wytrzymałość zmęczeniową określa się badając określoną liczbę próbek wzorcowych obciążonych różnymi wartościami σ_a i σ_m aż do ich zniszczenia przy liczbie cykli N_C . Otrzymane punkty pomiarowe nanosi się wykres w układzie współrzędnych $\sigma - N$, uzyskując po ich połączeniu linię krzywą tzw. wykres zmęczeniowy lub wykres Wöhlera. Wykres ten sporządza się najczęściej w układzie $\sigma - \log N$ (czasami $\sigma - N$ lub $\log \sigma - \log N$).

Na rysunku 13.2a przedstawiono pełny wykres Wöhlera zaś na rysunku 13.2b wykres uproszczony.



Rys. 13.2. Wykres Wöhlera: a) pełny, b) uproszczony

Dla materiałów polerowanych i szlifowanych $m = 8 \div 12$, dla elementów z karbem $m = 4 \div 10$, dla materiałów powierzchniowo ulepszonych $m = 16 \div 20$, dla materiałów spawanych $m = 3 \div 4$.

Początek wykresu odpowiada 1/4 cyklu, czyli przyrostowi obciążenia od zera do maksimum, przy czym maksimum jest równe R_m .

Wykres podzielić można na trzy obszary, od 1/4 cyklu do $10^3 - 10^4$ cykli mamy obszar pękania quasi–statycznego (I) od $10^3 \div 10^4$ do $10^4 \div 10^5$ obszar zmęczenia niskocyklowego (II) (wytrzymałości niskocyklowej). Obszar III to obszar wytrzymałości wysokocyklowej $10^5 \div 10^7$ cykli.

W praktyce obszar pierwszy włącza się do analizy wytrzymałości niskocyklowej. W tym obszarze posługujemy się najczęściej zależnościami amplitudy odkształcenia plastycznego ϵ_{apl} (lub całkowitego ϵ_{ac}) od liczby nawrotów N .

Wykres Wöhlera w zakresie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej jest traktowany jako charakterystyka materiału.

Ważne jest tu określenie granicy zmęczenia dla konkretnych materiałów. Należy jednak pamiętać, że wytrzymałość zmęczeniowa jest bardzo wrażliwa nie tylko na skład chemiczny stopu, ale na cały proces technologiczny, a w szczególności na obróbkę cieplną. W praktyce więc należałoby powtarzać badania dla każdego indywidualnego przypadku oddzielnie. Czasami dla przybliżonej oceny służą empiryczne zależności ustalone pomiędzy granicą zmęczenia, a wytrzymałością doraźną. Służą ku temu odpowiednie wykresy w literaturze. Poniżej przytoczono orientacyjne wartości.

Dla stali węglowych i stopowych normalizowanych i ulepszanych cieplnie $Z_{go} = 0.45R_m$, $Z_{rc} = 0.33R_m$, $Z_{so} = 0.25R_m$, $Z_{rj} = (0.55-0.63)R_m$.

Dla żeliwa szarego $Z_{go} = 0.4R_m$, dla staliwa $Z_{go} = 0.4R_m$, dla stopów aluminium, miedzi i niklu $Z_{go} = 0.35R_m$.

W zakresie wytrzymałości zmęczeniowej niezbędne jest statystyczne opracowanie wyników ze względu na znaczny ich rozrzut. Konwencjonalny wykres Wöhlera odpowiada prawdopodobieństwu zniszczenia próbek równemu 50%.

Różne są metody statystycznego opracowania wyników. Przytoczymy tu jedną z nich. Trwałość próbek w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej ma rozkład logarytmo–normalny. Uporządkujemy logarytmy liczby cykli do zniszczenia w szereg rosnących wartości:

$$\log N_1 \leq \log N_2 \leq \dots \leq \log N_n$$

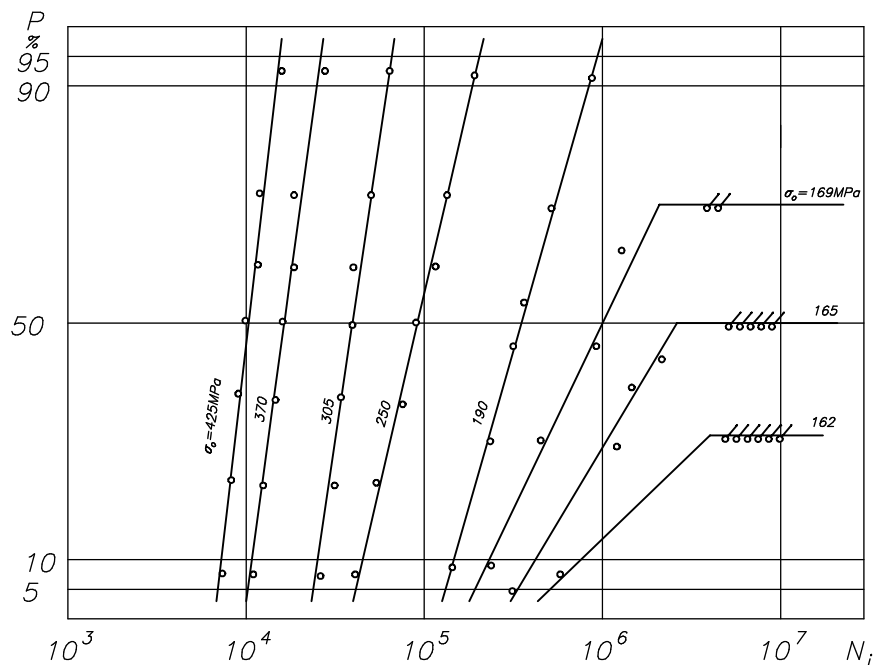
Dobrze jest przyjąć liczbę próbek n przy danym poziomie naprężeń σ_a równą 6–9. Prawdopodobieństwo zniszczenia P obliczymy ze wzoru:

$$P = \frac{i - 0.5}{n} 100\%$$

gdzie i jest liczbą porządkową próby.

Następnie dla każdego σ_a możemy wykreślić wykresy w układzie: $P = f(\ln N_i)$ – rysunek 13.3.

Wykres 13.3 przedstawia nam rozkład trwałości zmęczeniowej, można na jego podstawie opracować wykres Wöhlera wybierając np. $P = 50\%$ i nanosząc kolejne punkty z wykresu o wsp. σ_a i N na tworzoną charakterystykę materiału.



Rys. 13.3. Rozkłady trwałości zmęczeniowej obrotowo zginanych próbek z karbem ($\alpha_k=1.65$) z normalizowanej stali 45 [2]

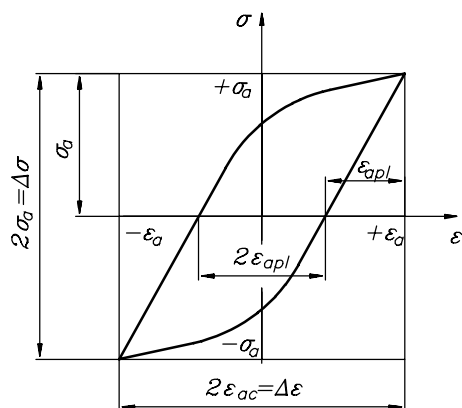
Dla skonstruowania wykresu Wöhlera obliczamy dla każdego σ_a średnią trwałość $\log N$:

$$\overline{\log N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i$$

oraz odchylenie standardowe

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log N_i - \overline{\log N})^2}$$

W badaniach zmęczenia niskocyklowego (rysunek 13.2 obszar II) posługujemy się wielkościami pokazanymi na rysunku 13.4. Zmęczenie niskocyklowe odbywa się przy wysokim poziomie naprężeń. Temu towarzyszą procesowi odkształcenia plastyczne. Mają one swe odbicie w powstającej pętli histerezy będącej miarą dysypowanej w trakcie zmiennych obciążeń energii.



Rys. 13.4. Pętla histerezy w ujęciu schematycznym

gdzie:

- ε_{ac} – amplituda odkształcenia całkowitego,
- ε_{apl} – amplituda odkształcenia plastycznego,
- ε_{as} – amplituda odkształcenia sprężystego,
- ε_n – odkształcenie średnie,
- σ_a – amplituda naprężenia.

Badania prowadzimy bądź przy stałej amplitudzie odkształcenia, bądź przy stałej amplitudzie naprężenia. Obrazują to wykresy na rysunku 13.5 i 13.6.

Z wykresów tych jasno wynika, że materiał poddany cyklicznym obciążeniom zmienia swoje własności. Kolejne pętłe histerezy, które przedstawiają ilość energii dyssypowanej w danym cyklu mają tendencję do zmiany swej wielkości. Niektóre materiały umacniają się w pierwszych cyklach obciążenia inne ulegają osłabieniu.

a)

b)

Rys. 13.5. Układy pętli histerezy dla ulepszonej cieplnie stali 45 (a) i stali 35G2 (b) otrzymane w badaniach dla $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ [1]

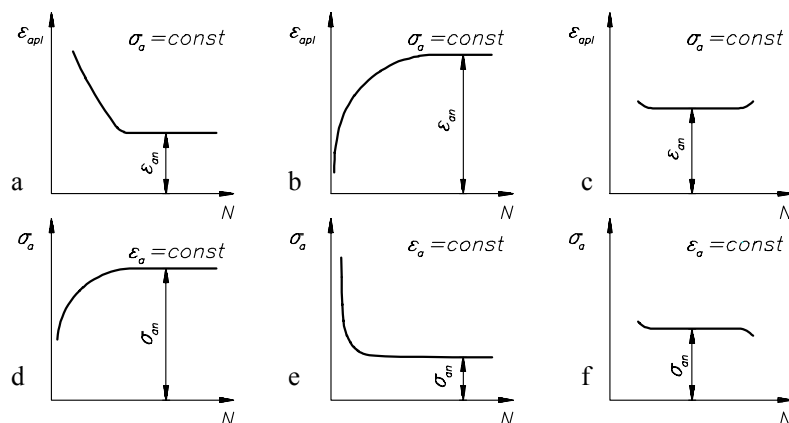
a)

b)

Rys. 13.6. Przebiegi pętli histerezy dla ulepszonej cieplnie stali 45 (a) i stali 20G2 (b) uzyskane w badaniach dla $\sigma_a = \text{const}$ [2]

Są też takie, które nie są wrażliwe na obciążenia cykliczne.

Na rysunku 13.7. przedstawiono schematycznie zachowanie się materiałów pod wpływem cyklicznych obciążeń.



Rys. 13.7. Schematyczne przedstawienie zachowania się materiałów badanych dla $\sigma_a = \text{const}$ i $\epsilon_{\text{apl}} = \text{const}$, wskazujące na umocnienie (a, d), osłabienie (b, e) i stabilność (c, f)

Omawiane przebiegi zmęczeniowego, czy cyklicznego odkształcenia się metali w układzie $\log \sigma_a$, $\log \epsilon_{\text{apl}}$ są zazwyczaj liniami prostymi. Wynika to z potęgowego charakteru związku pomiędzy naprężeniami i odkształceniami:

$$\sigma_a = K'(\epsilon_{\text{apl}})^{n'}$$

gdzie n' jest wykładnikiem umocnienia różnym od wykładnika n przy statycznym obciążeniu. Zmienia się on dla różnych materiałów w zakresie $n' \in (0.05 \div 0.3)$, przy czym powyższe równanie jest również słuszne dla wysokocyklicznego zmęczenia.

Przykładowe przebiegi wykresów odkształcenia od naprężenia przy obciążeniu zmiennym przedstawiono na rysunku 13.8.

Najprostsza zależność pomiędzy amplitudą naprężenia σ_a , a liczbą nawrotów do zniszczenia N_f ma postać:

$$\sigma_a = \sigma_f(2N_f)^b$$

gdzie: σ_f jest współczynnikiem wytrzymałości zmęczeniowej, b zaś wykładnikiem wytrzymałości zmęczeniowej. Często wartość b mieści się w przedziale od -0.05 do -0.15 i maleje ze spadkiem wytrzymałości materiału. Wykładnik ten można powiązać z poznanymi już wielkościami wzorem:

$$b = -\frac{n'}{1 + 5n'}$$

Podano tylko jeden z wielu postulowanych wzorów celem ilustracji problemu.

Rys. 13.8. Przebiegi wykresów odkształcenia od naprężenia przy obciążeniu zmiennym 1 i statycznym 2 na tle ustabilizowanych pętli histerezy dla stali: CrNiMo (a) i 35G2 (b) [1]

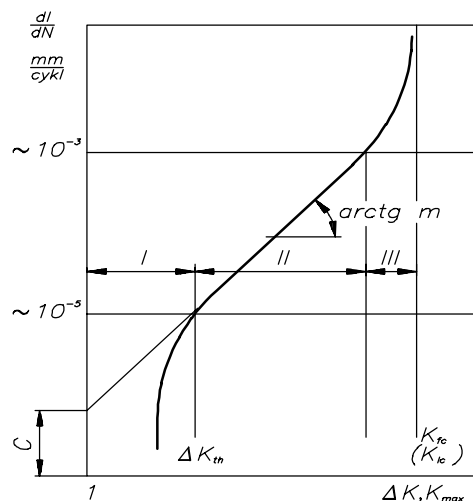
13.4. PRĘDKOŚĆ ROZWOJU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH

Niezwykle ważnym z praktycznego punktu widzenia jest określenie prędkości rozwoju pęknięć zmęczeniowych, aby w porę można było zapobiec katastrofie. W sposób bardzo ogólny prędkość tę można zapisać w następujący sposób:

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma, a, c, R, \text{parametry geometryczne})$$

gdzie c jest stałą materiałową, a – aktualną długością pęknięcia, R – asymetrią cyklu.

Związki funkcyjne w powyższej postaci tworzone były empirycznie i pojawiły się w wielorakiej formie. Ponieważ jednak stan naprężenia przed wierzchołkiem pęknięcia może być dość jednoznacznie charakteryzowany przez współczynnik intensywności naprężeń K , to w ostatnich latach pojawiło się wiele zależności, które sugerują przewidywanie prędkości wzrostu pęknięć przy użyciu wielkości zdefiniowanych przez mechanikę pękania. Najczęściej używa się zakresu $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ lub średniej wartości K_m . Wykres prędkości pękania posiada charakterystyczny kształt (rys.13.9.)



Rys. 13.9. Wykres prędkości pękania da/dN w zależności od zakresu ΔK lub największego $K_{\max}$ współczynnika intensywności naprężeń w układzie logarytmicznym

i dla drugiego okresu propagacji najczęściej stosowany jest wzór Parisa:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m$$

gdzie: c i m są współczynnikami określanymi doświadczalnie np.:

	R_e lub $R_{0.2}$ MPa	R_m MPa	C	m
Stal 18G2A	400	560	2×10^{-12}	3
Stal 09G2	550	650	8×10^{-12}	3
Stal 20G	280	460	2×10^{-11}	3
Stal A533	350	560–700	8×10^{-10}	2.2
Stop aluminium P7	420	510	7×10^{-11}	4

Wzór Parisa nie jest uniwersalny. Literatura sugeruje szereg innych. Bogaty przegląd tych propozycji zawarto w monografii S. Kocańdy [1] lub w [3]. Dla materiałów sprężysto plastycznych gdzie stosowanie WIN przestaje być racjonalne stosuje się inne wielkości zdefiniowane w mechanice pęknięcia, takie jak rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia, czy też całka J .

13.5. PRZEPROWADZENIE ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest ogólne zapoznanie się z metodyką badań zmęczeniowych oraz z podstawowymi pojęciami występującymi w tej dziedzinie wiedzy.

Przeprowadzenie pełnych badań zmęczeniowych w zakresie wytrzymałości od nisko do wysokocyklicznej jest niemożliwe w ramach ćwiczeń ze studentami ze względu na czasochłonność tych prób. Badanie jednej próbki do 10^6 cykli przy częstotliwości 20Hz pochłania ok. 28 godz. Ograniczymy się więc do badań niskocyklowych w zakresie obciążeń powyżej granicy plastyczności. Badać będziemy procesy osłabienia bądź umocnienia cyklicznego materiału. Każda grupa laboratoryjna przeprowadzi badania na tylu próbkach na ile pozwoli czas. Wyniki badań wszystkich grup laboratoryjnych w danym roku posłużą do jednego zbiorczego, podsumowującego opracowania.

- Każda grupa otrzyma kilka próbek ze ściśle określonego materiału (znana będzie granica plastyczności i wytrzymałość doraźna) i o ściśle określonej geometrii. Będą to na ogół próbki cylindryczne z przewężeniem. Po dokonaniu pomiarów geometrii próbek należy określić poziom naprężeń przy którym prowadzone będą badania. Pamiętajmy, że chodzi nam o zakres odkształceń plastycznych.
- Należy zaprogramować na sterowniku maszyny obciążenie próbki. Wybieramy obciążenie o przebiegu sinusoidalnym i sterowanie obciążeniem lub odkształceniem. Prowadzący zajęcia sugerować będzie poziom obciążeń taki, aby zbiór rezultatów z kilku grup pozwolił znaleźć krzywe $\sigma = f(\epsilon_{pl})$ podobne do tych jakie pokazano na rysunkach 13.8.
- Po zarejestrowaniu rezultatów należy przedstawić je w postaci graficznej.

Opracowanie winno zawierać:

- krótki wstęp teoretyczny,
- cel ćwiczenia,
- rysunek próbki wraz z wymiarami,
- gatunek materiału i jego podstawowe własności w zakresie obciążeń monotonicznie rosnących,
- wykresy kolejnych pętli histerezy,
- wykresy podobne do tych z rysunku 13.7,
- wykres ustabilizowanej pętli histerezy przy danym σ_a ,
- tabelę jak poniżej

Nr cyklu	ε_{ac}	σ_a (MPa)	Energia dyssypowana w wybranych cyklach	Liczba cykli do zniszczenia

– parametry krzywej potęgowej $\sigma = f(\varepsilon_{pl})$.

Literatura

1. KOCĄNDA S.: Zmęczeniowe pękanie metali. Warszawa: WNT 1985
2. KOCĄNDA S., SZALA J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Warszawa: PWN 1985
3. NEIMITZ A.: Mechanika Pękania. Warszawa: PWN 1998