
**Siedemnaste Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 8-11 marca 2011**

**ZMĘCZENIE MATERIAŁÓW – PODSTAWY, KIERUNKI
BADAŃ, OCENA STANU USZKODZENIA**

Zbigniew L. Kowalewski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa
Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
zkowalew@ippt.gov.pl, zbigniew.kowalewski@its.waw.pl

1. Wprowadzenie

Proces zmęczenia rozwijający się w materiałach konstrukcyjnych pod wpływem długotrwałych obciążeń cyklicznych jest ciągle istotnym problemem współczesnej techniki. Naprężenia zmieniające się oscylacyjnie powodują skrócenie czasu eksploatacji elementów konstrukcyjnych, ponieważ ich zniszczenie może nastąpić przy naprężeniach o wartościach znacznie niższych od statycznej wytrzymałości materiału, z którego są wykonane. Takie obniżenie wytrzymałości materiału nazywane jest ogólnie wytrzymałością zmęczeniową, którą definiuje się w następujący sposób:

Zmęczenie materiału jest procesem powstawania i rozwoju uszkodzeń w materiale na skutek wielokrotnych zmiennych (cyklicznych) obciążeń.

Zmęczenie jest powszechną przyczyną przedwczesnego zniszczenia konstrukcji i w związku z tym termin ten oznacza w praktyce skończoną liczbę cykli obciążenia jaką dany materiał jest w stanie przenieść. Istnieje wiele czynników, które mają bezpośredni wpływ na ten limit cykli. Należą do nich między innymi

- charakter obciążeń,
- sekwencja obciążeń,
- czas trwania obciążeń.

Ograniczona i trwała wytrzymałość zmęczeniowa wyznaczana na podstawie standardowej procedury Wöhlera jest jednym z głównych parametrów materiałowych projektowania inżynierskiego, która nie daje jednak żadnych pewnych podstaw do oceny ewolucji procesu rozwoju uszkodzenia pod wpływem obciążeń cyklicznych. W praktyce inżynierskiej zakłada się z konieczności liniowe prawo kumulacji uszkodzeń i na tej podstawie określa się trwałość zmęczeniową elementów konstrukcyjnych dla różnej historii obciążeń cyklicznych. Stanowi to jednak stosunkowo silne założenie, ponieważ najczęściej brak jest jakichkolwiek informacji doświadczalnych potwierdzających zasadność przyjęcia liniowej akumulacji uszkodzeń zmęczeniowych czy też określającej zakres amplitudy naprężeń, dla którego warunek liniowości procesu rozwoju uszkodzeń jest spełniony. Doświadczalne wyznaczenie charakterystyki rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych wymaga stosowania innych procedur badawczych niż tradycyjne sposoby wyznaczania krzywej Wöhlera w postaci amplitudy naprężenia jako funkcji liczby cykli do zniszczenia.

W opracowaniu zostaną szerzej omówione czynniki związane z charakterem obciążeń, ponieważ są one podstawą doświadczalnych metod poznania natury procesu zmęczenia. Przedstawione zostaną ponadto przykładowe nowoczesne metody badawcze ilustrujące aktualne trendy w pracach eksperymentalnych, w których występują obciążenia zmęczeniowe.

2. Podstawy z zakresu prowadzenia badań zmęczeniowych

2.1. Charakterystyka okresowo zmiennych obciążeń

Laboratoryjne badania zmęczenia materiału prowadzone są na nowoczesnych maszynach wytrzymałościowych o napędzie hydraulicznym, które można sterować różnego rodzaju sygnałami: przemieszczeniem, naprężeniem, odkształceniem. W zależności od sygnału sterowania definiuje się parametry charakteryzujące obciążenia zmęczeniowe w standardowej próbie zmęczeniowej. Na przykład w przypadku zastosowania obciążeń zmieniających się w sposób sinusoidalny cykl obciążeń sterowanych sygnałem naprężenia można scharakteryzować następującymi parametrami:

- amplituda cyklu naprężeń

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad (1)$$

- zakres zmian naprężeń

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a, \quad (2)$$

- współczynnik asymetrii cyklu

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (3)$$

- współczynnik stałości obciążenia

$$\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1 + R}{1 - R}, \quad (4)$$

- równanie dla przebiegu naprężeń cyklicznych w funkcji czasu

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a F(t), \quad (5)$$

gdzie

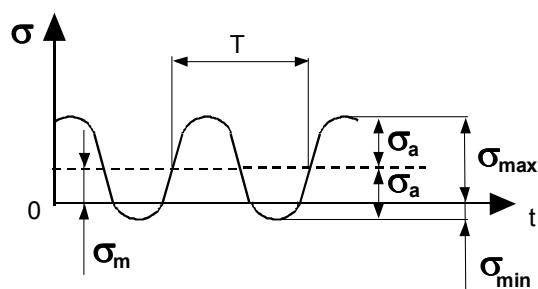
$F(t) = \sin(\omega t + \varphi)$,
 ω - częstość kołowa zmian naprężenia,
 φ - kąt fazy początkowej.

Interpretacja graficzna podstawowych parametrów obciążeń cyklicznych sterowanych sygnałem naprężenia zdefiniowanych zależnościami (1), (2), (3) przedstawiona jest na rys. 1.

W Tabeli 1 zestawiono wartości parametrów cyklu w zależności od wykresu przebiegu obciążeń w czasie.

Tabela 1. Wartości parametrów obciążeń cyklicznie zmiennych przy różnych rodzajach przebiegu cykli

Wykres przebiegu obciążeń w czasie	Nazwa cyklu	Wartości parametrów cyklu
	Cykl jednostronny dodatni	$\sigma_m > 0$ $\sigma_a \neq 0$ $0 < R < 1$ $1 < \chi < +\infty$
	Cykl odzerowo tętniący dodatni	$\sigma_m = \frac{1}{2} \sigma_{\max}$ $\sigma_a = \frac{1}{2} \sigma_{\max}$ $R = 0$
	Cykl dwustronny	$\sigma_m > 0$ $\sigma_a \neq 0$ $-1 < R < 0$ $0 < \chi < 1$
	Cykl wahadłowy	$\sigma_m = 0$ $\sigma_a = \sigma_{\max} = \sigma_{\min} $ $R = -1$ $\chi = 0$
	Cykl dwustronny	$\sigma_m < 0$ $\sigma_a \neq 0$ $-\infty < R < -1$ $-1 < \chi < 0$
	Cykl odzerowo tętniący ujemny	$\sigma_m = \frac{1}{2} \sigma_{\min}$ $\sigma_a = \frac{1}{2} \sigma_{\min} $ $R = \pm\infty$ $\chi = -1$
	Cykl jednostronny ujemny	$\sigma_m < 0$ $\sigma_a \neq 0$ $1 < R < +\infty$ $-\infty < \chi < -1$



Rys. 1. Interpretacja parametrów przy obciążeniach cyklicznie zmiennych sterowanych sygnałem naprężenia

2.2. Miejsca występowania zjawiska zmęczenia i jego efekty

Z procesem zmęczenia można spotkać się zawsze tam, gdzie występują obciążenia o charakterze cyklicznym. Typowe działy przemysłu, w których należy uwzględnić procesy zmęczeniowe to:

- lotnictwo (elementy uskrzydlenia i sterowania samolotów, elementy turbin silników),
- transport samochodowy (zawieszenie, elementy silnika),
- dział maszynowy (narzędzia skrawające),
- energetyka (łopatki turbin, kotły, rurociągi),
- inne działy techniki.

Obciążenia zmęczeniowe prowadzą zarówno do zmian właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych, jak również do zmian całej konstrukcji. Do głównych efektów wywoływanych procesem zmęczenia należy zatem zaliczyć

- zmiany geometryczne danej części konstrukcji,
- zmiany właściwości fizycznych materiału,
- powstanie pęknięć, które mogą doprowadzić do katastroficznego zniszczenia konstrukcji.

2.3. Kierunki badań procesu zmęczenia i ich główne zadania

Badania mające na celu wyjaśnienie zjawiska zmęczenia materiału prowadzone są już od pierwszej połowy XIX wieku. Pierwsze prace w tym zakresie przeprowadził Albert w 1838 roku, natomiast pierwsze prace istotne z naukowego punktu widzenia zrealizował dla wybranych metali A. Wöhler w 1860 roku. Od tego momentu datuje się coraz intensywniejszy rozwój badań przy obciążeniach cyklicznych, który trwa do dnia dzisiejszego. Zwłaszcza w ostatnich latach obserwuje się zwiększone zainteresowanie problemami zmęczeniowymi i jednocześnie ogromny postęp w tej dziedzinie. Wynika to głównie z faktu wzrostu wartości obciążeń i zwiększenia stopnia ich złożoności w wielu eksploatowanych urządzeniach. Wystarczy tylko wymienić postęp w dziedzinie lotnictwa związany ze wzrostem prędkości samolotów i ich masy, czy też postęp w energetyce mierzony na przykład wzrostem temperatury urządzeń produkujących energię elektryczną. Obserwowany postęp techniczny wymusza prowadzenie badań zmęczeniowych na coraz wyższym poziomie, gdyż wielokrotnie od efektów tych badań uzależnione jest bezpieczeństwo ludzi. Współczesne samoloty pasażerskie latają tak długo, jak długo prowadzone są równoległe symulacyjne badania zmęczeniowe, których wyniki pozwalają na bezpieczną eksploatację wykorzystywanych aktualnie maszyn. Wśród badań zjawiska zmęczenia wyraźnie można wyróżnić dwa podstawowe kierunki

- badania prowadzone przez metalurgów i fizyków materiałowych koncentrujące się na próbie poznania mechanizmów rządzących procesem zmęczenia, oraz
- badania teoretyczne i doświadczalne w celu stworzenia teorii fenomenologicznych umożliwiających ilościowy opis zjawiska.

Oba wymienione kierunki rozwijają się aktualnie równolegle. Jednak nawet pobieżne ich omówienie daleko wykracza poza ramy tego opracowania i stąd zainteresowanych tymi zagadnieniami odsyła się do pozycji literaturowych ujętych w spisie umieszczonym na końcu pracy [np. 1-12].

2.4. Zadania badań procesu zmęczenia

Gruntowne poznanie procesu zmęczenia materiałów wymaga wzajemnego sprzężenia analizy teoretycznej i badań doświadczalnych. Oba aspekty analizy wymagają rozwiązania wielu zadań. Od strony praktycznej głównymi zadaniami są:

- (a) określenie istoty mechanizmu inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych w skali mikro aż do wystąpienia zniszczenia elementu;
- (b) ustalenie parametrów zniszczenia oraz opracowanie kryteriów zniszczenia;
- (c) zbadanie trwałości materiału, a następnie opracowanie metod zmęczeniowego obliczania konstrukcji;
- (d) opracowanie metod oceny uszkodzenia materiału.

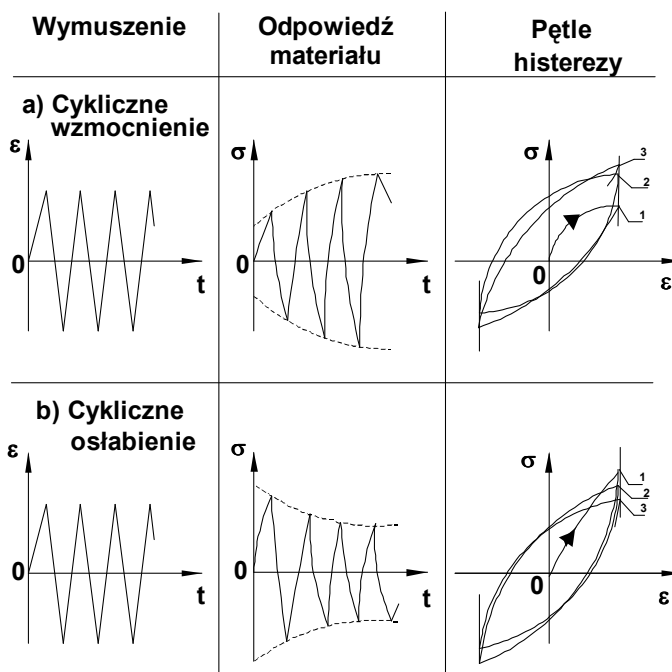
2.5. Opis cyklicznej deformacji metali

W zakresie małej liczby cykli często obciążenia powodują powstanie odkształceń plastycznych (trwałych), które mają decydujący wpływ na zmęczeniowe zachowanie się materiału. W takich sytuacjach podczas cyklicznego obciążenia materiału część energii mechanicznej ulega nieodwracalnemu rozproszeniu. Proces rozpraszania energii związany jest bowiem z powstaniem odkształceń plastycznych w materiale. Wartość energii rozproszonej na jednostkę objętości materiału w ciągu jednego cyklu, określa się na podstawie pola powierzchni objętego pętlą histerezy. Zmiany charakterystycznych wielkości pętli histerezy występujące w każdym cyklu dają możliwość sporządzenia opisu makroskopowych zmian w materiale. Badania najczęściej przeprowadza się przy stałej amplitudzie odkształcenia całkowitego, przy stałej amplitudzie odkształcenia plastycznego lub przy stałej amplitudzie naprężenia, przy czym szczególnie zaleca się stosowanie dwóch pierwszych sposobów, ponieważ badania przy stałej amplitudzie naprężenia, szczególnie przy dużych amplitudach naprężenia, wprowadzają efekt cyklicznego pełzania. Ponadto, w badaniach przy stałej amplitudzie odkształcenia całkowitego lub przy stałej amplitudzie odkształcenia plastycznego uwidacznia się wprost energia odkształcenia, czego nie da się zaobserwować w badaniach sterowanych sygnałem naprężenia. Dodatkowo unika się okresu wstępnego odkształcenia przez zastosowanie pełnej amplitudy odkształcenia już w pierwszym cyklu. W przypadku doświadczeń przy sterowaniu odkształceniem nie występuje wyraźna kumulacja odkształceń i pęknięcie ma na ogół charakter zmęczeniowy, natomiast badania przy stałej amplitudzie naprężenia zależnie od jego wartości mogą prowadzić do pęknięcia zmęczeniowego albo quasistatycznego. Na rys. 2 przedstawiono przykłady uzyskiwania pętli histerezy dla obciążeń cyklicznych o dla stałej wartości amplitudy odkształcenia. Na ich podstawie można zaobserwować typowe efekty deformacji cyklicznej, takie jak:

- osłabienie,
- umocnienie.

W niektórych materiałach naprężenia maksymalne w badaniach przy stałej amplitudzie odkształcenia lub szerokość pętli histerezy w doświadczeniach prowadzonych przy stałej amplitudzie naprężenia są na tyle małe, że można przyjąć iż są w przybliżeniu stałe. Takie materiały nazywane są cyklicznie stabilnymi. Efekty osłabienia w testach wykonywanych przy stałej amplitudzie naprężenia ujawniają się w postaci zwiększenia amplitudy odkształcenia, natomiast efekt wzmocnienia wyraża się zmniejszeniem amplitudy odkształcenia. Prowadząc testy przy dużej liczbie cykli można zauważyć, że po określonej ich liczbie wartość naprężenia ustala się osiągając tak zwane naprężenie nasycenia. W stanie nasycenia odpowiadającym temu naprężeniu kształt histerezy nie ulega dalszej zmianie. W zależności od materiału i parametrów obciążeń cyklicznych stan nasycenia ustala się na ogół

po kilkudziesięciu cyklach, nie później jednak niż po wykonaniu od 1/3 do 1/2 liczby cykli koniecznych do wywołania zniszczenia.

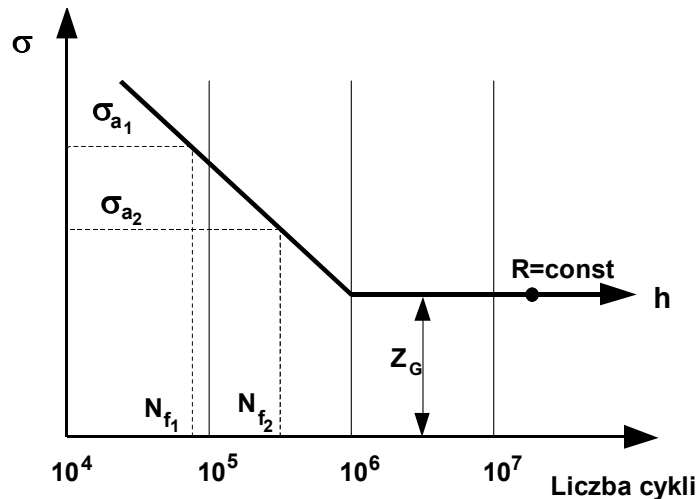


Rys. 2. Efekty deformacji cyklicznej

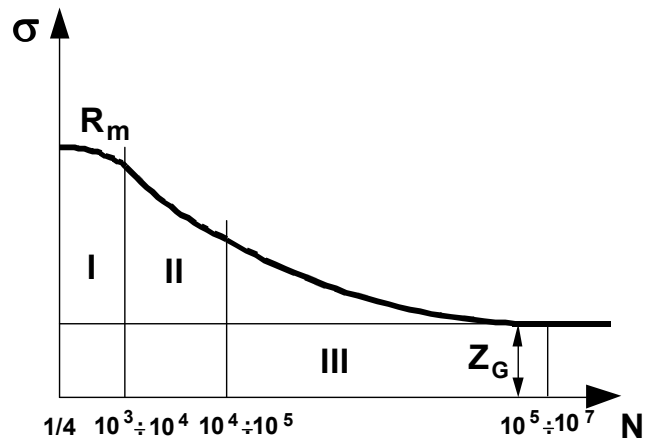
2.6. Zmęczenie wysokocyklowe

Podstawowymi badaniami zmęczeniowymi są testy mające na celu określenie wytrzymałości zmęczeniowej, które wykonuje się dla bardzo dużej liczby cykli. Przez pojęcie wytrzymałości zmęczeniowej należy rozumieć graniczną wartość skrajnego naprężenia okresowo zmiennego, które może być powtórzone bezpiecznie określoną liczbą razy. Liczba cykli konieczna do zniszczenia nazywana jest graniczną liczbą cykli N_g i przyjmuje się, że wynosi ona 10^7 cykli dla stali konstrukcyjnej i innych stopów żelaza oraz 10^8 cykli dla stopów metali nieżelaznych. W przypadku różnych elementów konstrukcyjnych przyjmuje się umowną liczbę cykli granicznych $2 \cdot 10^6$.

Aby określić wytrzymałość zmęczeniową należy zbadać określoną liczbę próbek wzorcowych, które obciąża się różnymi wartościami σ_m , σ_a , aż do ich zniszczenia przy liczbie cykli N_c lub do czasu przekroczenia N_g . Uzyskane punkty nanosi się na wykres w układzie współrzędnych σ - N , otrzymując po ich połączeniu linię krzywą. Jest to tzw. wykres zmęczeniowy Wöhlera, który najczęściej sporządza się we współrzędnych σ - $\lg N$, a rzadziej we współrzędnych σ - N oraz $\lg \sigma$ - $\lg N$. W układzie σ - $\lg N$ wykres zmęczeniowy jest linią prostą łamaną, rys. 3. Otrzymuje się go wykonując próby zmęczenia przy różnych wartościach amplitudy naprężenia. Nanosząc odpowiadające sobie wartości naprężeń i liczby cykli do zniszczenia uzyskujemy pochyłą część wykresu. Jest to obszar ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Ta część wykresu wykorzystywana jest do projektowania elementów przy przewidywanej ograniczonej żywotności. Zmniejszając naprężenie w kolejnych próbkach dochodzi się do takiego naprężenia, które działając na próbkę nie spowoduje jej zniszczenia nawet przy liczbie cykli dążącej do nieskończoności. W taki sposób określona wartość naprężenia, przy ustalonej wartości współczynnika asymetrii obciążeń R , reprezentuje tzw. nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową materiału. W praktyce niemożliwe jest przeprowadzanie prób przy nieskończonej liczbie cykli i dlatego określa się graniczną liczbę cykli, do której prowadzi się próbę zmęczeniową. Jeśli próbka nie ulegnie zniszczeniu przy granicznej liczbie cykli, wówczas naprężenie, przy którym badanie było prowadzone nazywa się praktyczną wytrzymałością zmęczeniową.



Rys. 3. Uproszczony wykres zmęczeniowy Wöhlera



Rys. 4. Pełny wykres Wöhlera w układzie współrzędnych naprężenie nominalne – liczba cykli do zniszczenia

Częściej omawiany wykres przedstawia się w innej postaci określanej mianem pełnego wykresu Wöhlera, w którym początek układu odpowiada $\frac{1}{4}$ cyklu obciążenia. Przyjmuje się, że wartość naprężenia niszczonego przy $\frac{1}{4}$ cykła jest porównywalna z odpowiednią granicą wytrzymałościową przy obciążeniu statycznym. Pełny wykres Wöhlera pokazano na rys. 4. Na wykresie tym zaznaczono następujące charakterystyczne obszary wytrzymałości zmęczeniowej:

- Obszar I (wytrzymałość quasistatyczna) - od $\frac{1}{4}$ do około $10^3 - 10^4$ cykli, w którym pękanie zmęczeniowe materiału ma charakter pękania plastycznego,
- Obszar II (wytrzymałość niskocyklowa lub niskocyklowe zmęczenie) 10^3 do około 10^5 cykli, w którym zmęczenie zachodzi przy dużych naprężeniach i relatywnie dużych odkształceniach plastycznych,
- Obszar III (wytrzymałość wysokocyklowa lub wysokocyklowe zmęczenie) - od 10^5 do 10^7 cykli, w którym pękanie materiału zachodzi przy odkształceniach sprężystych porównywalnych z wielkością odkształcenia plastycznego a nawet je przewyższającymi.

Przy korzystaniu z wykresów zmęczeniowych Wöhlera należy pamiętać o kilku praktycznych uwagach, a mianowicie

- w obszarach II i III zniszczenie materiału jest efektem kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych,
- nie ma wyraźnie zaznaczonych granic pomiędzy wyszczególnionymi obszarami,

- w obliczeniach inżynierskich obszar I dołącza się do obszaru II, traktując je razem jako obszar wytrzymałości niskocyklowej,
- w praktyce, w układzie logarytmicznym dodatkowo cały wykres aproksymuje się dwiema prostymi: jedną przedstawiającą nachyloną gałąź wykresu - obejmującą zakres naprężeń większych od granicy zmęczenia (Z_G) i drugą poziomą - odpowiadającą granicy zmęczenia.

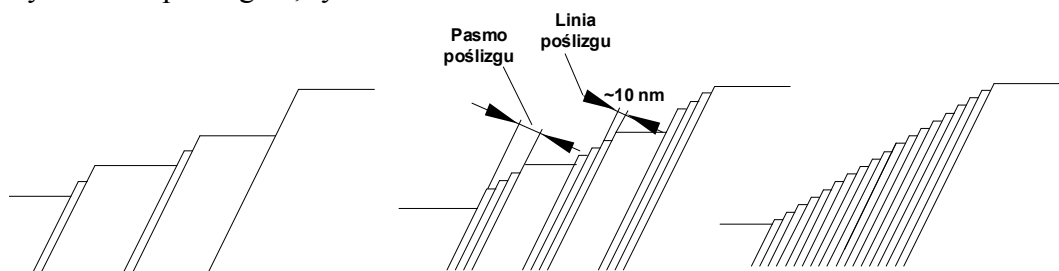
2.6.1. Charakterystyki właściwości zmęczeniowych w zakresie dowolnych obciążeń niesymetrycznych

Bardzo często obciążenia zmęczeniowe mają charakter niesymetryczny. W takich przypadkach do określenia właściwości zmęczeniowych korzysta się z wykresów Smitha lub Haigha. Wykres Smitha przedstawia zależność wytrzymałości zmęczeniowej od wielkości amplitudy naprężeń odniesionej do naprężenia średniego. Do jego budowy niezbędna jest wartość wytrzymałości trwałej opowiadająca wartości naprężenia statycznego, którą materiał może przenosić przez dowolnie długi okres czasu. Naprężenie R_∞ można uważać za granicę wytrzymałości zmęczeniowej przy amplitudzie obciążenia dążącej do zera. Ponieważ wyznaczenie R_∞ jest dość kłopotliwe, w celu uproszczenia procedury budowy wykresu Smitha przyjmuje się zwykle wartość rzędnej wykresu przy $\sigma_a=0$ równą granicy wytrzymałości doraźnej R_m .

Ponieważ sporządzanie i korzystanie z wykresu Smitha jest dość kłopotliwe, często wprowadza się jego modyfikację nazywaną wykresem Haigha. Budowa tego wykresu sprowadza się do naniesienia na osie odpowiednio punktów A i B, z których pierwszy oznacza wytrzymałość zmęczeniową przy obciążeniu wahadłowym, dla którego cykl jest symetryczny, drugi natomiast odpowiada granicy wytrzymałości doraźnej na rozciąganie R_m lub granicy plastyczności R_e . Nanosząc następnie odpowiednie wielkości σ_m , σ_a , uzyskane na drodze doświadczalnej, na przyjęty układ odniesienia otrzymuje się wykres, który dla wielu materiałów reprezentowany jest zbiorem punktów leżących na paraboli. Wykres ten może być wykorzystywany do określania naprężeń dopuszczalnych w przypadku zastosowania obciążeń zmiennych.

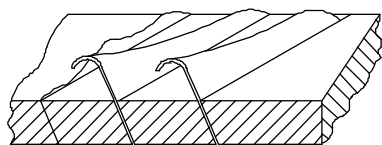
2.7. Podstawowe zjawiska zmęczeniowe

Analiza mikrostrukturalna mechanizmu niszczenia przy obciążeniach cyklicznych wykazała istotny wpływ odkształcenia plastycznego na proces zmęczenia. W początkowym stadium procesu zmęczenia odkształcenia plastyczne ujawniają się w postaci pasm poślizgów złożonych z linii poślizgów, rys. 5.

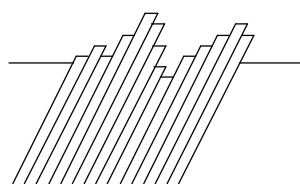


Rys. 5. Schemat tworzenia linii poślizgu i pasm poślizgu podczas cyklicznego obciążania

Pod pojęciem linii poślizgu rozumiemy ślad poślizgu na powierzchni swobodnej, zachodzącego w jednej płaszczyźnie poślizgu. Pasma poślizgów składają się z linii poślizgów zachodzących wzdłuż określonych płaszczyzn i kierunków krystalograficznych jako skutek ruchu dyslokacji. Średnio, szerokość linii poślizgów jest rzędu 10 nm, a wysokość schodków poślizgowych około 100 nm. Na ogół pasma poślizgów mają budowę nieregularną co prowadzi w konsekwencji do powstawania ekstruzji i intruzji. **Ekstruzje** są to wyciśnięcia płatek metali, rys. 6, obserwowane w pasmach poślizgu na powierzchni zmiennie obciążonych elementów. Z kolei **intruzje** są to wciśnięcia lub wgłębienia w pasmach poślizgu, rys. 7.



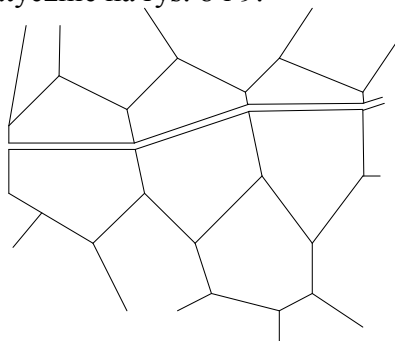
Rys. 6. Ilustracja ekstruzji powstających w procesie zmęczenia metali



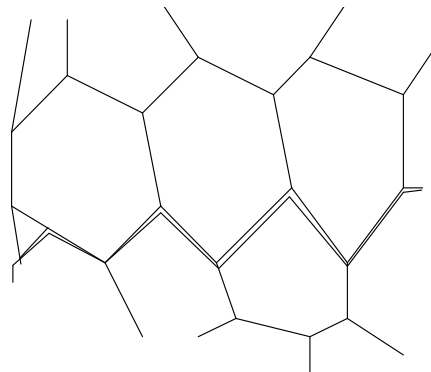
Rys. 7. Ilustracja intruzji powstających w procesie zmęczenia metali

W zależności od rodzaju materiału i zastosowanych warunków obciążenia możemy zaobserwować różny przebieg i geometrię poślizgów.

W pasmach poślizgu następuje inicjacja oraz rozwój mikropęknięć. Przyczynami tego zjawiska jest lokalne spiętrzenie naprężeń, odkształceń i energii w tych pasmach. Innymi przyczynami mikropęknięć mogą być granice subziaren, wtrącenia oraz wydzielania faz wtórnych. Pierwsze pęknięcia materiału pojawiają się jako mikroszczeliny biegnące przez ziarna i mówimy wówczas o pęknięciach transkryystalicznych lub biegnące wzdłuż ziaren – tzw. pęknięcia międzykryystaliczne. Ilustracja obu możliwości spękań przedstawiona jest schematycznie na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Schemat ideowy pęknięć transkryystalicznych

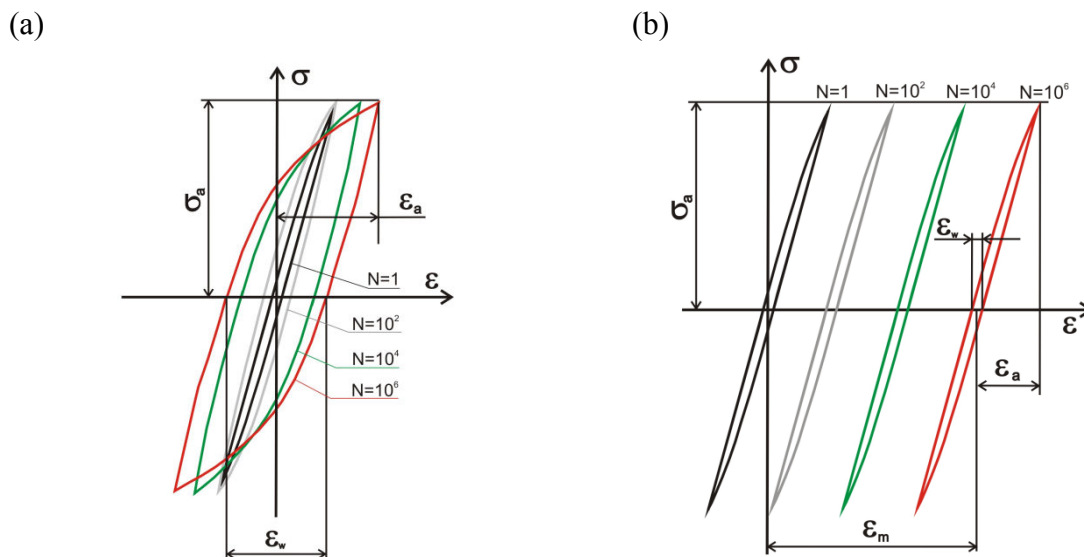


Rys. 9. Schemat ideowy pęknięć międzykryystalicznych

Charakter pęknięć dla konkretnego materiału zależy głównie od parametrów procesu obciążenia. Rozwój pęknięć na granicach ziaren jest bardziej intensywny niż wewnątrz ziaren ze względu na przemieszczanie się dyslokacji ku granicom ziaren, gdzie powstają uskoki i pory. Stosunkowo najczęściej pęknięcia pojawiają się na powierzchni i w warstwie wierzchniej elementu, ponieważ w tych miejscach występuje lokalna koncentracja naprężeń spowodowana wadami w postaci rys, nacięć i innych usterek wytwórczych. W przypadku elementów z umocnioną warstwą wierzchnią pęknięcia na ogół występują w strefie przejściowej od warstwy wierzchniej do rdzenia. Umownie przyjmuje się za początek makropęknięcia szczelinę o długości mieszczącej się w zakresie 0.1 – 0.5 mm. Pęknięcie takie pod wpływem sprzyjających warunków wynikających ze stanu materiału, wielkości amplitud naprężenia i liczby cykli może wzrastać aż do spowodowania zniszczenia elementu. Dotychczas przeprowadzone badania wskazują, że zależnie od materiału i stosowanego obciążenia rozwój mikro-pęknięć obejmuje od 0.05 do około 0.9 całkowitej liczby cykli do zniszczenia. Pod pojęciem zniszczenia zmęczeniowego w klasycznym ujęciu rozumie się całkowitą utratę spójności w przekroju, w którym rozwijało się pęknięcie.

Zachowanie metali w zakresie zmęczenia wysoko-cyklowego, a więc przy amplitudzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału można podzielić na dwa zasadnicze typy pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń. Zachowanie pierwszej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane przez ratcheting, rys 10b, generowany lokalnymi odkształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych defektów mikrostruktury.

Zachowanie drugiej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane cykliczną plastycznością, rys. 10a, generowaną ruchem dyslokacji na poziomie lokalnych ziaren i lokalnymi pasmami poślizgów. W obu przypadkach zmiany odkształceń mierzonych dla całej objętości pomiarowej próbki są sumą lokalnych odkształceń rozwijających się wokół defektów w postaci wtrąceń niemetalicznych i pustek dla pierwszej grupy materiałów lub rozwijających się poślizgów w poszczególnych ziarnach dla drugiej grupy materiałów.



Rys. 10. Pętle histerezy w zależności od mechanizmu rozwoju uszkodzenia dla obciążenia wywołującego wartości naprężenia poniżej granicy plastyczności: (a) cykliczna plastyczność; (b) ratcheting

W badaniach mechanicznych identyfikacja mechanizmów uszkodzeń zmęczeniowych i ocena prędkości ich rozwoju jest realizowana na podstawie zmian odpowiedzi materiału na zadane obciążenie cykliczne w całym okresie jego trwania.

W inżynierii materiałowej wykorzystuje się techniki mikroskopowe i badania nieniszczące do obserwacji zmian mikrostruktury i identyfikacji mechanizmów generacji uszkodzeń. Współczesne skaningowe mikroskopy elektronowe umożliwiają nie tylko obserwacje przy bardzo dużych powiększeniach, ale również są wyposażone w mikrosondy do lokalnej analizy składu chemicznego (system EDX - Energy Dispersive X-Ray) i orientacji krystalograficznej (system EBSD - Electron Back Scatter Diffraction). W praktyce inżynierskiej znacznie wygodniejsze w stosowaniu są metody nieniszczące i z tego względu są częściej stosowane do okresowej oceny stanu degradacji materiału.

Uwzględnienie szczegółowych uwarunkowań i zakresów stosowania poszczególnych metod jednak znacznie ogranicza możliwości ich wykorzystania i stwarza poważne trudności doświadczalnej identyfikacji i analizy ewolucji uszkodzeń zmęczeniowych. Stwarza to konieczność ciągłego doskonalenia istniejących metod badań nieniszczących i poszukiwania nowych technik pomiarowych zdolnych do detekcji i ilościowej oceny uszkodzeń struktury powstałych wskutek rozwoju procesów powodujących zmęczenie materiału i degradację jego właściwości mechanicznych.

Przedstawiony powyżej bardzo skrócony opis wybranych zjawisk zmęczeniowych nie oddaje oczywiście ogromnego bogactwa mechanizmów towarzyszących zmęczeniu materiału i należy go traktować jako wprowadzenie do omawianej tematyki. Należy w tym miejscu wyraźnie zaznaczyć, że mimo znacznego postępu badań doświadczalnych dotyczących zjawiska zmęczenia dotychczasowy stan wiedzy nie daje możliwości zarówno pełnego przedstawienia mechanizmu zniszczenia przy obciążeniach cyklicznych, jak i określenia wpływu mikrostruktury na właściwości zmęczeniowe materiałów konstrukcyjnych. Niezależnie od tych faktów stan aktualnego rozpoznania zagadnień zmęczeniowych umożliwia teoretyczne modelowanie zjawisk zmęczeniowych. Ponieważ występuje duże

bogactwo prac tego typu, rozważania ograniczymy jedynie do wybranych przykładów opisów zmęczenia .

2.8. Przykładowe opisy zmęczenia materiału

Wśród zależności wykorzystywanych do obliczania żywotności zmęczeniowej można wyróżnić związki naprężeniowe i odkształceniowe. Klasycznym przykładem opisu naprężeniowego jest związek pomiędzy amplitudą naprężenia rzeczywistego, a liczbą cykli do zniszczenia, zaproponowany przez Morrowa [10] w następującej postaci:

$$\Delta\sigma/2 = \sigma'_f (2N_f)^b \quad , \quad (6)$$

gdzie

- σ'_f - współczynnik,
- b – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia (półcykli).

Zależność (6) stosowana jest stosunkowo najczęściej w zakresie zmęczenia zachodzącego dla liczby cykli $5 \cdot 10^4$, ponieważ powyżej tej wartości wykładnik b nie jest już wielkością stałą, lecz funkcją liczby cykli.

Opisy odkształceniowe trwałości zmęczeniowej buduje się na tych samych obserwacjach wykorzystywanych w opisie naprężeniowym, to jest w oparciu o liniową zależność pomiędzy amplitudą odkształcenia (sprężystego lub plastycznego) a żywotnością w logarytmicznym układzie współrzędnych. Z uwagi na fakt, że składowa amplitudy odkształcenia sprężystego w stanie jednoosiowego naprężenia wynosi $\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_e/2 = (\Delta\sigma'/2E)$, dzieląc równanie (6) przez moduł Younga E otrzymujemy

$$\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_e/2 = (\sigma'_f/E)(2N_f)^b \quad . \quad (7)$$

W przypadku wysoko-cyklowego zmęczenia, gdy $\Delta\varepsilon^p=0$, zależności (6) i (7) są sobie równoważne. Dla niskocyklowego zmęczenia zachodzącego przy $\Delta\varepsilon_p > \Delta\varepsilon_e$, Manson [11] i Coffin [12] niezależnie zaproponowali opis trwałości zmęczeniowej w zależności od amplitudy odkształcenia plastycznego

$$\Delta\varepsilon_p/2 = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad , \quad (8)$$

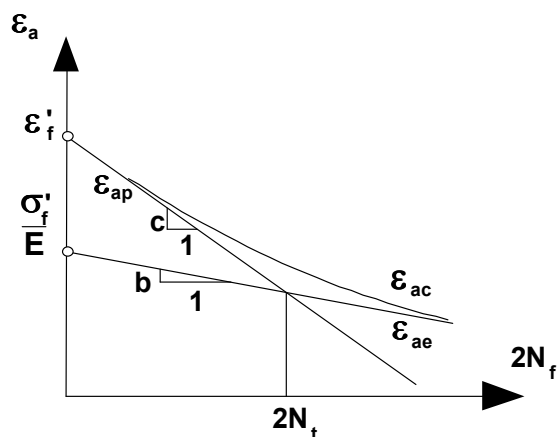
gdzie

- ε'_f - współczynnik cyklicznego odkształcenia,
- c - wykładnik odkształcenia zmęczeniowego.

Przez dodanie składowych: sprężystej i plastycznej amplitudy odkształcenia wyrażonych wzorami (7) i (8) otrzymamy opis trwałości w zależności od amplitudy odkształcenia całkowitego

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = (\sigma'_f/E)(2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad . \quad (9)$$

Sposób wyznaczania współczynników występujących w równaniu (9) przedstawiono w normie PN-84/H-04334. Wykładnik cyklicznego odkształcenia c we wzorze (9) zmienia się w przedziale od -0.4 do -0.8 ze średnią wartością dla większości metali równą -0.57 . Interpretacja graficzna równania (9) przedstawiona jest na rys. 11.



Rys. 11. Wykres zmiany odkształceń całkowitych (ϵ_c), sprężystych (ϵ_{ae}) i plastycznych (ϵ_{ap}) w zależności od liczby nawrotów obciążenia

Składowa plastyczna zaznacza się najwyraźniej w zakresie małej liczby cykli, natomiast w miarę wzrostu liczebności cykli dominować zaczyna składowa sprężysta odkształcenia. Należy podkreślić, że krzywe odkształcenia w funkcji liczby cykli do zniszczenia mają w zależności od materiału bardzo różny przebieg, ale zawsze zbliżają się asymptotycznie w zakresie małej liczby cykli do prostej wytyczonej przez wartości ϵ_{ap} , a w zakresie dużej liczby cykli - do prostej wytyczonej przez wartości ϵ_{ae} . Strefę w otoczeniu punktu przecięcia obu prostych, punkt $2N_t$, nazywamy strefą przejściową od wytrzymałości zmęczeniowej niskocyklicznej do wysokocyklicznej.

Opis trwałości zmęczeniowej oparty na odkształceniach całkowitych stał się bardzo popularny i znalazł zastosowanie również w ocenie trwałości zmęczeniowej elementów z korbami.

3. Wybrane przykłady współczesnych badań zmęczeniowych

3.1. Przykładowe badania dotyczące badań rozwoju uszkodzenia wskutek zmęczenia

3.1.1. Problem definicji miary rozwoju uszkodzenia

Dobrze określona miara uszkodzeń struktury materiału wywołanych cyklicznymi obciążeniami eksploatacyjnymi ma kluczowe znaczenie dla monitorowania tego procesu w badaniach laboratoryjnych i w warunkach eksploatacyjnych, umożliwiając dostatecznie wczesne wykrywanie niebezpiecznych stanów materiału. Mierzalna miara uszkodzeń gwarantuje obserwację zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń cyklicznych, dzięki czemu możliwe jest doskonalenie przewidywania trwałości zmęczeniowej i zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Badania rozwoju uszkodzeń materiałów były od samego początku związane z poszukiwaniem odpowiedniej miary uszkodzenia. W badaniach doświadczalnych stosowano różne metody bezpośrednie i pośrednie wykorzystujące techniki optyczne, obserwacje zmian pola elektrycznego, magnetycznego, temperatury lub właściwości mechanicznych (np. modułu sprężystości, gęstości). Część metod mechanicznych jest szczegółowo omówiona w monografii Lemaitre'a [13], natomiast przegląd różnych miar uszkodzenia opisanych w literaturze naukowej podali Yang i Fatemi [14].

Miary te umożliwiają co najwyżej względną ocenę zmian generowanych obciążeniami cyklicznymi i nie pozwalają na ocenę stanu uszkodzeń struktury materiału elementu konstrukcyjnego po określonym czasie eksploatacji.

Bardzo ciekawą propozycją miary rozwoju uszkodzenia jest przyjęcie zmiany nieliniowej odpowiedzi materiału przy cyklicznych obciążeniach. Przyjęcie lokalnych odkształceń niesprężystych w jednym cyklu obciążenia jako miary uszkodzenia jest zgodne z lokalnym charakterem procesu uszkodzenia oraz z przeświadczeniem, wynikającym z dotychczasowej wiedzy, że rozwój procesu zniszczenia zmęczeniowego związany jest z odkształceniami plastycznymi generującymi wady struktury i pęknięcia. Miara ta umożliwia również

kwifikację i ocenę wpływu różnorodnych mechanizmów i zmian strukturalnych na rozwój uszkodzeń prowadzących do zniszczenia.

Propozycja definiowania parametru uszkodzenia na podstawie pomiaru niesprężystych odkształceń generowanych w cyklu obciążenia jest obiecującą techniką potwierdzoną w badaniach doświadczalnych [5, 6]. Odkształcenia niesprężyste związane są z lokalnymi obszarami plastycznymi wokół wad i pęknięć i są mierzalne od początku drugiego okresu powstawania i stabilnego wzrostu uszkodzeń. Technika ta umożliwi ciągłą rejestrację rozwoju uszkodzeń w całym zakresie żywotności próbki i stanowi dobre narzędzie analizy procesu zniszczenia i degradacji właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w trakcie eksploatacji.

3.1.2. Badania uszkodzenia wskutek obciążeń cyklicznych

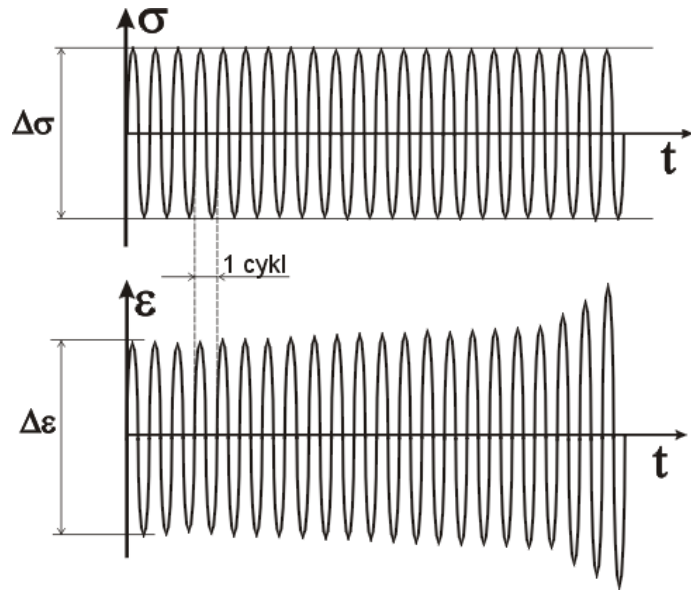
Jak już wcześniej wspomniano, na podstawie wykonanych badań [5, 6] potwierdzono, że miarą zniszczenia zmęczeniowego w badaniach niszczących próbek o określonym kształcie, wyciętych z badanego materiału, może być zmiana nieliniowej odpowiedzi materiału w kolejnych cyklach obciążenia o stałej amplitudzie naprężenia. Badania te nie tylko umożliwiają nowe i pełniejsze, w porównaniu do tradycyjnej krzywej Wöhlera, scharakteryzowanie cech zmęczeniowych materiałów konstrukcyjnych, ale także dają podstawę usprawnienia metodologii oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji.

Wspomniany pomiar niesprężystych odkształceń w kolejnych cyklach obciążania przeprowadzono na małych próbkach klepsydrycznych o średnicy najmniejszego przekroju równej 4 mm, zamocowanych w specjalnie zaprojektowanym uchwycie zapewniającym osiowe przenoszenie obciążeń z maszyny wytrzymałościowej i umożliwiającym obciążanie przy symetrycznych cyklach rozciągania i ściskania. Mierzono zmianę średnicy próbki w trakcie cyklu obciążania o stałej amplitudzie naprężenia, a rejestracja tych zmian jako funkcji liczby cykli umożliwiła śledzenie rozwoju uszkodzeń. Pomiar zmian średnicy daje w rezultacie sumaryczną ocenę rozwoju uszkodzeń w całym, najmniejszym przekroju próbki. Sposób mocowania próbki, zmiany obciążeń i odpowiedzi materiału w odkształceniach przeliczonych z mierzonych zmian średnicy przedstawiono na rys. 12-13. Wykresy naprężenia jako funkcji odkształcenia w cyklu początkowym i cyklu n-tym z zaznaczoną wartością odkształcenia niesprężystego w tym cyklu pokazano już wcześniej na rys. 10. Zmierzone wartości odkształceń niesprężystych przedstawione jako funkcje bieżącej liczby cykli układają się dla wielu materiałów wyraźnie wzdłuż linii charakterystycznych dla trzech zakresów żywotności próbki, krótkiego zakresu bez przyrostów odkształceń niesprężystych, najdłuższego zakresu stabilnego wzrostu odkształceń niesprężystych i krótkiego zakresu gwałtownego wzrostu odkształceń niesprężystych bezpośrednio poprzedzającego zniszczenie próbki, rys. 14. Wyniki przedstawione na rys. 14 dotyczą stali chromowej (Cr 2,16%) z dodatkiem molibdenu i manganu (Mo 1%, Mn 0,58%), która jest stosowana w systemach instalacji ciśnieniowych pracujących w podwyższonej temperaturze. Badania [6] wykonano dla następujących wartości amplitudy naprężenia: 450, 475, 500, 525, 550 MPa, przy czym dla badanego materiału granica plastyczności wynosi 500 MPa. Dzięki przedstawieniu wyników badań w skali podwójnie logarytmicznej możliwe jest wyznaczenie przy pomocy techniki ekstrapolacji powrotnej dwóch linii: linii reprezentującej moment zarodkowania mikropęknięć, oraz linii odpowiadającej momentowi powstania dominującej szczeliny zmęczeniowej. Wspomniane linie rozdzielają trzy obszary o różnej prędkości procesu zniszczenia zmęczeniowego:

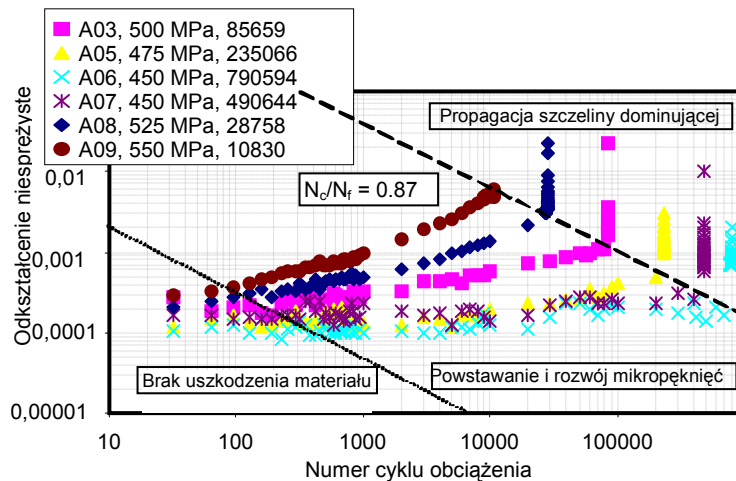
- obszar sprężystej deformacji materiału bez uszkodzeń – brak mikropęknięć, stała szerokość pętli histerezy wywołana tarciem wewnętrznym materiału,
- obszar inicjacji i stabilnego wzrostu mikropęknięć – w materiale następuje inicjacja wielu mikropęknięć oraz ich stabilny wzrost (wartość odkształceń niesprężystych rośnie z umiarkowaną prędkością),
- obszar propagacji dominującego pęknięcia zmęczeniowego – po połączeniu się kilku mikropęknięć i utworzeniu dominującego pęknięcia zmęczeniowego następuje propagacja tego pęknięcia w materiale próbki (prędkość przyrostu odkształceń niesprężystych wzrasta gwałtownie).



Rys. 12. Fotografia próbki, sposobu zamocowania i miejsca pomiaru zmiany średnicy



Rys. 13. Schemat zmiany obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie naprężenia i odpowiedź materiału w odkształceniach przeliczonych ze zmiany średnicy



Rys. 14. Odkształcenia niesprężyste stali 10H2M w funkcji numeru cyklu obciążenia zmęczeniowego [6]

Na podstawie analizy danych przedstawionych w opisany powyżej sposób, można określić, jaka część czasu eksploatacji konstrukcji przypada na poszczególne etapy procesu rozwoju zniszczenia zmęczeniowego. Dla badanych materiałów [5, 6] zarodkowanie mikropęknięć zajmuje od 0 do 2% czasu eksploatacji w zależności od amplitudy naprężenia (a więc następuje bardzo szybko). Natomiast utworzenie dominującej szczeliny zmęczeniowej następuje po około 85% czasu eksploatacji (dlatego jej wykrycie jest zazwyczaj możliwe dopiero w końcowej fazie procesu zniszczenia konstrukcji). Możliwość wczesnego wykrycia uszkodzenia zmęczeniowego w oparciu o pomiary odkształceń niesprężystych umożliwia zatem radykalne zwiększenie marginesu bezpieczeństwa w trakcie eksploatacji konstrukcji, jako że monitorowanie postępów uszkodzenia jest możliwe już po około 2% czasu eksploatacji.

Zaletą przedstawionego sposobu badań procesu zniszczenia jest możliwość śledzenia różnych faz powstawania i rozwoju uszkodzeń naturalnych, a nie tylko sztucznie inicjowanych. Dane doświadczalne umożliwiają określenie zależności aproksymujących rozwój uszkodzenia w poszczególnych jego fazach, jak i granice poszczególnych obszarów. Technika ta jest spójna z innymi sposobami oceny właściwości wytrzymałościowych materiałów, dając wartości graniczne zgodne z danymi krzywej Wöhlera, czy wytrzymałości doraźnej wyznaczonej z krzywej jednoosiowego rozciągania.

Omawiana technika pomiaru stwarza możliwość rozszerzenia badań na inne, złożone stany naprężeń i ocenę wpływu parametrów obciążenia na zmianę charakterystyki zmęczeniowej materiału. Podstawową zaletą przyjętego sposobu analizowania rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w badaniach laboratoryjnych jest możliwość precyzyjnej oceny i kalibracji nieniszczących metod monitorowania rozwoju procesu zmęczenia w elementach konstrukcyjnych w trakcie ich eksploatacji.

3.1.3. Interdyscyplinarne badania zmęczeniowe

Próby zmęczeniowe należą do kategorii badań o charakterze niszczącym i stąd cechuje je z jednej strony stosunkowo wysoki koszt, a z drugiej brak możliwości ich zastosowania w aktywnie pracujących elementach konstrukcji. Poprawy tej sytuacji można oczekiwać przez wypracowanie metodyki korelowania parametrów otrzymywanych z badań zmęczeniowych z parametrami metod nieniszczących.

Jednym z szybko rozwijających się trendów w badaniach wytrzymałościowych jest opracowywanie systemu procedur badawczych i kryteriów charakteryzowania rozwoju degradacji właściwości eksploatacyjnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych na przykład w energetyce, lotnictwie, czy też aeronautyce oraz prognozowania pozostałego czasu bezpiecznego użytkowania elementów, względnie całych ich zespołów.

W obecnej chwili w praktyce inżynierskiej nie ma metody umożliwiającej pewną ocenę stanu uszkodzenia materiałów w różnych etapach eksploatacyjnych. Każda z metod niszczących i nieniszczących oceny stopnia uszkodzenia ma swoje zalety oraz wady. Metody niszczące z przyczyn technicznych nie zawsze mogą być zastosowane, ponieważ wiąże się to z koniecznością pobrania próbek z pracujących elementów konstrukcji. Metody te dają jednak stosunkowo precyzyjną odpowiedź na pytanie, gdzie pojawi się zniszczenie i kiedy można się jego spodziewać. Z kolei metody nieniszczące można stosować do oceny uszkodzenia bezpośrednio w rzeczywistych konstrukcjach. Są one w stanie wykryć uszkodzenia, ale nie dają precyzyjnej odpowiedzi, kiedy nastąpi pęknięcie i w jakiej fazie zaawansowania jest proces uszkodzenia przy pełzaniu, czy też zmęczeniu. W celu ograniczenia wad obu grup metod badawczych stosowanych do oceny stanu uszkodzenia materiałów uzasadnione wydaje się prowadzenie badań, których zasadniczym celem byłoby opracowanie metody oceny stanu uszkodzenia na podstawie wzajemnej korelacji parametrów otrzymanych różnymi metodami. Znając zatem parametry wyznaczone jedną metodą można by określić wynikające z korelacji parametry drugiej metody, dając tym samym kompletną wiedzę o stanie uszkodzenia. Prowadząc dodatkowo badania mikrostrukturalne można pokazać, jak wyznaczone parametry mechaniczne i wybrane parametry metod nieniszczących korelują z ewolucją struktury materiału. Cele i założenia takiego podejścia są ściśle związane z bezpieczeństwem eksploatacji wielu urządzeń i instalacji oraz ze zmniejszeniem zagrożenia wynikającego z poszerzania eksploatacyjnych parametrów pracy tych instalacji. Zagadnienia te są bardzo ważne dla praktyki inżynierskiej, a dotychczasowe wyniki i rozwinięcie metody wczesnego wykrywania i monitorowania uszkodzenia na podstawie obserwacji zmian na przykład nieliniowej odpowiedzi materiału przy cyklicznym obciążaniu o stałej amplitudzie wskazują na realną możliwość rozwiązania tego problemu.

Wymiernym efektem aplikacyjnym tego rodzaju badań może być eliminacja postojów inspekcyjnych dla wykonania obecnie stosowanych badań kwalifikacyjnych. Z kolei efektem naukowym takiego podejścia do badań wytrzymałościowych może być systemowe rozwiązanie pozwalające zobiektywizować ocenę stanu technicznego materiałów wielu odpowiedzialnych za bezpieczeństwo pracy elementów konstrukcyjnych poprzez wykonanie badań w warunkach rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych.

Stosunkowo nowy kierunek współczesnych badań wytrzymałościowych stanowią działania zmierzające do opracowania systemu oceny stopnia degradacji materiałów zachodzącej pod wpływem długotrwałych obciążeń eksploatacyjnych na podstawie zmian lokalizacji

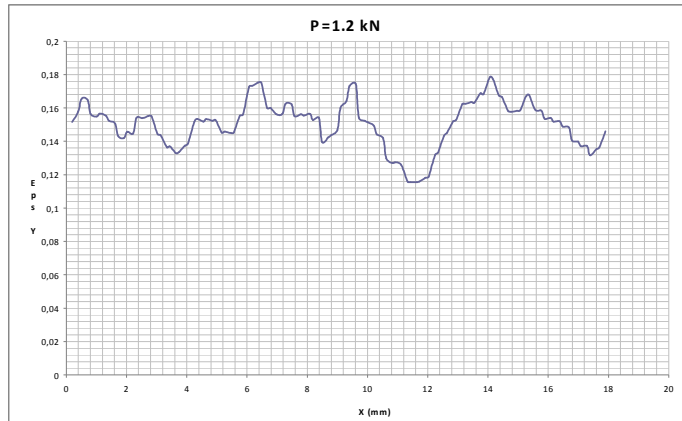
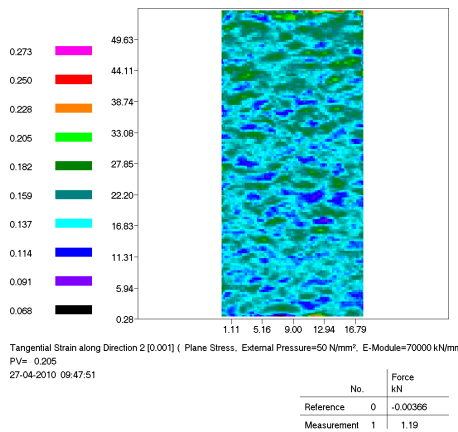
deformacji uwidocznionych na polowych rozkładach składowych przemieszczeń w wybranym obszarze elementu konstrukcyjnego. Spodziewanym efektem prowadzonych prac jest zwykle opracowanie prototypu stanowiska badawczego wraz z szeregiem procedur diagnostycznych. Zastosowanie takiego rozwiązania opartego na nieinwazyjnej metodzie umożliwi monitorowanie stanu instalacji technicznych bez konieczności ich zatrzymywania. Proces rozwoju uszkodzeń struktury materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych prowadzący do zmęczenia materiału jest procesem lokalnym rozwijającym się w miejscach osłabionych defektami strukturalnymi, np. spiętrzenia dyslokacyjne, pustki czy wtrącenia i wydzielania niemetaliczne, czy w miejscach największych naprężeń będących sumą obciążeń zewnętrznych, naprężeń własnych ukształtowanych w procesie wytwórczym i naprężeń powstałych jako efekt spiętrzenia karbów geometrycznych i strukturalnych. Rozwój uszkodzeń jest więc związany z lokalnymi zmianami odkształceń, a ich uwidocznienie stwarza możliwość monitorowania i wczesnego wykrycia degradacji zmęczeniowej materiałów i elementów konstrukcyjnych. Zalety wykorzystania metod optycznych dających polowy obraz rozkładu deformacji przy zastosowaniu Cyfrowej Korelacji Obrazu (Digital Image Correlation - DIC) lub Elektronicznej Interferometrii Plamkowej (Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI) związane są z możliwością identyfikowania zmian w strukturze materiału na poziomie mikroskali, co z kolei pozwala na stosunkowo wczesne zidentyfikowanie procesu degradacji przed etapem jej dynamicznego rozwoju.

Metoda cyfrowej korelacji obrazów wykorzystuje zdjęcia zrobione w tym samym czasie przez dwie kamery cyfrowe i jest mniej wrażliwa na sztywne przesunięcia i drgania obiektu niż ESPI. Sposób ten jest obecnie w coraz szerszym stopniu wykorzystywany do pomiaru rozkładów składowych przemieszczeń/odkształceń w warunkach laboratoryjnych i podobnie jak metoda ESPI nie był dotychczas stosowany do wykrywania i lokalizacji uszkodzeń eksploatacyjnych tworzących się w elementach konstrukcji i maszyn pod wpływem zmęczenia lub pełzania. Fizyczne zasady i warunki metody cyfrowej korelacji obrazów wskazują na jej łatwiejsze dostosowanie do monitorowania elementów konstrukcyjnych w ich naturalnym otoczeniu przemysłowym i stąd coraz częściej podejmowane są próby jej wykorzystania do oceny rozwoju uszkodzeń elementów maszyn i konstrukcji w ich rzeczywistych warunkach pracy.

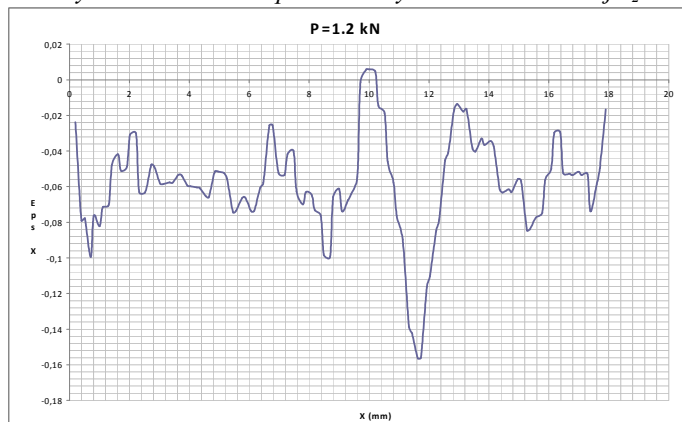
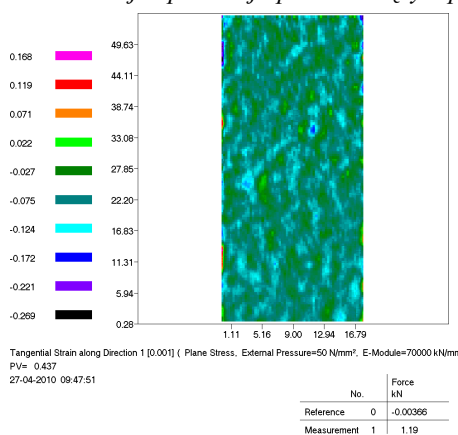
Metoda ESPI stanowi synergiczny efekt kilku przełomowych osiągnięć technologicznych, a mianowicie z jednej strony wynalezienia: (a) lasera w latach sześćdziesiątych XX wieku, (b) przetworników i czujników sygnałów świetlnych (kamery CCD) pod koniec lat siedemdziesiątych co wyeliminowało długotrwały, pracochłonny i relatywnie drogi proces wykrywania i rejestracji takich sygnałów za pomocą kliszy światłoczułej (było to w pewnym okresie powodem silnego ograniczenia stosowania holograficznych metod pomiarowych), a z drugiej gwałtownego rozwoju komputerów osobistych zapoczątkowanego w latach osiemdziesiątych XX wieku co pozwala na szybkie, bieżące przetwarzanie znacznych ilości zbieranych danych. Przełomowy moment, decydujący o zaakceptowaniu i obecnym gwałtownym rozwoju metody ESPI i pokrewnych bezkontaktowych, nieniszczących wysokoczułych optycznych metod pomiarowych jako pomiarowego narzędzia badawczego, nastąpił w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku, kiedy to zdołano połączyć i wykorzystać trzy wcześniej wspomniane przełomy technologiczne. W ten sposób zbudowano system pomiarowy wyposażony w niezbędne, ale dość złożone, specjalizowane oprogramowanie zawierające zaawansowane algorytmy przetwarzania obrazów cyfrowych, które umożliwiają uzyskiwanie ilościowych wyników pomiarowych.

Oprogramowanie komputerowe wymienionych wyżej zestawów umożliwia obliczenie na podstawie rozkładów przemieszczenia rozkładu składowych odkształceń i ewentualnie składowych naprężeń przy założeniu sprężystego zakresu pomiarów i spełnienia warunków płaskiego stanu naprężeń lub odkształceń. Zestaw ESPI przeznaczony jest do pomiarów statycznych i wymaga zatrzymania obciążania próbki na czas wykonania niezbędnej serii zdjęć, co wymaga około 3 sekund, ale oferuje bardzo dobrą rozdzielczość określenia odkształceń rzędu 10^{-6} . Zestaw DIC daje możliwości pomiarów w zakresie dynamicznym o szybkościach uzależnianych od zastosowanych dwóch kamer cyfrowych z nieco gorszą rozdzielczością wyznaczania składowych odkształceń rzędu 5×10^{-4} .

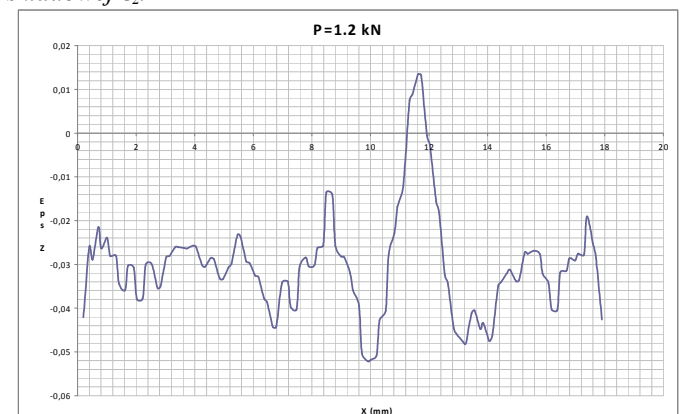
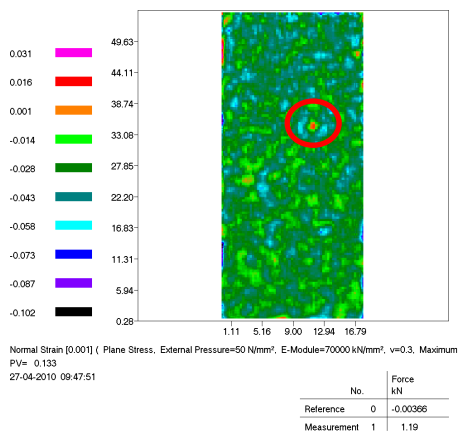
Dobłą ilustracją możliwości pomiarowych ESPI są poniższe rysunki prezentujące trzy składowe odkształcenia w kierunku rozciągania próbki pokrywającym się z osią y, w kierunku poprzecznym x i w kierunku z pokrywającym się z grubością próbki [15].



Rys. 15, Mapa rozkładu składowej odkształceń w kierunku y (rozciągania) na powierzchni próbki prostopadłościenniej o przekroju 18×4 mm przy obciążeniu 1,2 kN z uwidocznionym rozkładem poprzecznym tej składowej w przekroju przechodzącym przez czerwony obszar w środku próbki na rys. 17 dla składowej ε_y .



Rys. 16, Mapa rozkładu składowej odkształceń w kierunku x (poprzecznym do rozciągania) na powierzchni próbki prostopadłościenniej o przekroju 18×4 mm przy obciążeniu 1,2 kN z uwidocznionym rozkładem poprzecznym tej składowej w przekroju przechodzącym przez czerwony obszar w środku próbki na rys. 17 dla składowej ε_x .



Rys. 17, Mapa rozkładu składowej odkształceń w kierunku z (zmiana grubości) na powierzchni próbki prostopadłościenniej o przekroju 18×4 mm przy obciążeniu 1,2 kN z uwidocznionym rozkładem poprzecznym tej składowej w przekroju przechodzącym przez czerwony obszar w środku próbki dla składowej ε_z .

Próbka wykonana była z głowicy silnika samochodowego odlanej ze stopu aluminium o symbolu $AlSi7MgCu0.5$. Głowice były odlewane według standardowej procedury zapewniającej odgazowanie, a wskaźnik średniej porowatości określany jako *high* wynosił

6%. Początkowe wady, a zwłaszcza wady duże bądź zgrupowane blisko brzegów są inicjatorami i decydują o rozwoju procesu uszkodzeń zmęczeniowych.

Obserwując rozkłady na rysunkach 15-17 powstaje istotny problem poprawności uśredniania składowych odkształceń po objętości, jednorodnej geometrycznie próbki nie tylko w odniesieniu do procesów zmęczenia i pełzania, ale również w odniesieniu do zagadnień modelowania zachowania się tego materiałów przy monotonicznym czy cyklicznym obciążaniu.

W tej grupie materiałów konstrukcyjnych rozwój uszkodzeń zmęczeniowych i degradacja przy pełzaniu rozwijają się wokół różnorodnych wad, głównie w postaci pustek powstałych w procesach wytwórczych takich jak odlewanie. Istotnym czynnikiem inicjacji i rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych jest obok gęstości i rozłożenie wad w objętości badanej próbki również rozmiar i lokalizacja wad pojedynczych. Rozwój lokalnych odkształceń wokół wad struktury prowadzi do ratchetingu, a więc przyrostowego narastania w każdym kolejnym cyklu obciążenia składowej odkształcenia o kierunku zgodnym z kierunkiem działającego naprężenia, rys. 10b.

3.2. Przykładowe wyniki badań przy obciążeniach niskocyklicznych

3.2.1. Efekty wywoływane obciążeniami niskocyklicznymi przy zmiennych blokowo amplitudach naprężenia

Wiele uwagi w badaniach procesu zmęczenia poświęca się obserwacji efektów w zakresie obciążeń niskocyklicznych przy kombinacji różnych sekwencji obciążenia. Przykładem takich badań są testy przeprowadzone w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki dla lekkich stopów aluminium wykorzystywanych na pokrywy głowic silników spalinowych.

Testy niskocyklicznego zmęczenia wykonano na próbkach cylindrycznych o geometrii pokazanej na rys. 18. W badaniach stosowano symetryczne obciążenia „rozciąganie – ściskanie”, które sterowano sygnałem odkształcenia [16-20]. Dla każdej próbki program zawierał trzy bloki po sto cykli o różnej amplitudzie odkształcenia: ± 0.002 (1), ± 0.0035 (2) oraz ± 0.005 (3), rys. 19. W badaniach przyjęto trzy różne kombinacje bloków obciążenia cyklicznego, a mianowicie ± 0.002 , ± 0.0035 , ± 0.005 (123), ± 0.0035 , ± 0.005 , ± 0.002 (231) oraz ± 0.005 , ± 0.002 , ± 0.0035 (312). Próby wykonano przy dwóch prędkościach odkształcenia $0.001[1/s]$ oraz $0.01[1/s]$.

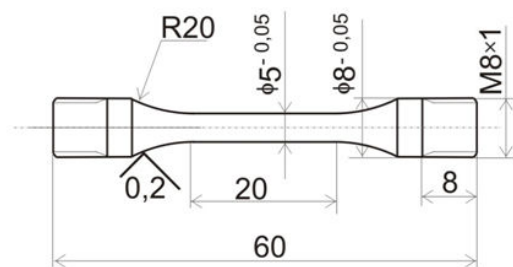


Fig. 18. Próbka stosowana w badaniach zmęczeniowych

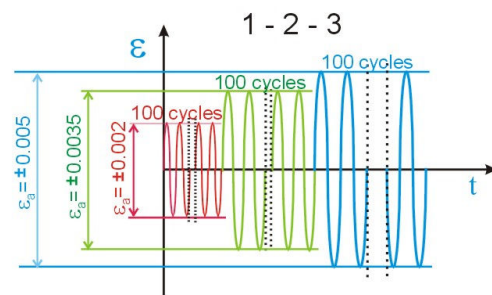
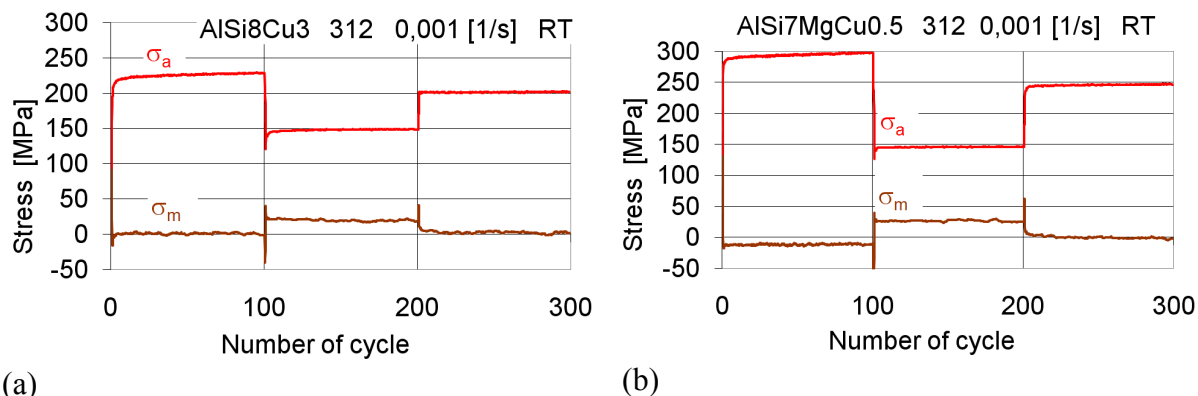


Fig. 19. Program obciążeń zmęczeniowych

Podczas prób LCF realizowanych przy sekwencjach obciążeń oznaczonych jako 312 oraz 231 analizowano wpływ wstępnej deformacji na zachowanie materiału przy kolejnym bloku obciążeń cyklicznych. Efekt był obserwowany wyłącznie przy zmianie wartości amplitudy odkształcenia z wyższej na niższą, np. z $\pm 0,005$ (3) na $\pm 0,002$ (1). Przejawiał się on uzyskiwaniem średniego poziomu naprężenia przy cyklach symetrycznych o wartościach wyższych od zera. Podczas prowadzenia wstępnej deformacji z zastosowaniem obciążeń cyklicznych o wyższej amplitudzie odkształcenia otrzymano izotropową odpowiedź materiału w sensie poziomu średniego naprężenia, natomiast zastosowanie po nim obciążenia cyklicznego o niższej wartości amplitudy odkształcenia prowadziło do odpowiedzi wykazującej cechy anizotropii badanego materiału, wyrażającą się tzw. efektem Bauschingera

(różnica pomiędzy odpowiedzią materiału przy rozciąganiu i ściskaniu występująca w sekwencjach gdy obciążenia te występują po sobie).



Rys. 20. Poziom średni naprężenia (σ_m) oraz amplituda naprężenia (σ_a) dla sekwencji bloków obciążenia 312 dla materiałów w stanie dostawy

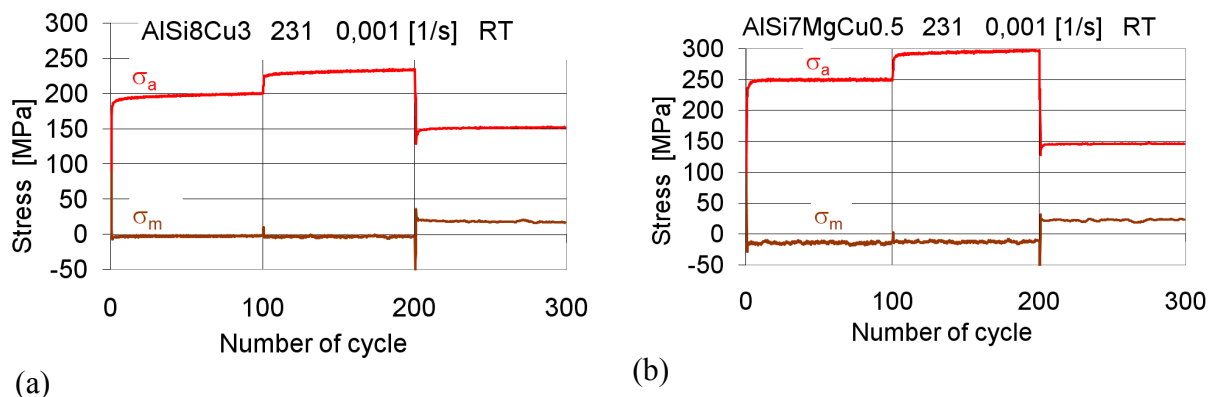


Fig. 21. Poziom średni naprężenia (σ_m) oraz amplituda naprężenia (σ_a) dla sekwencji bloków obciążenia 231 dla materiałów w stanie dostawy

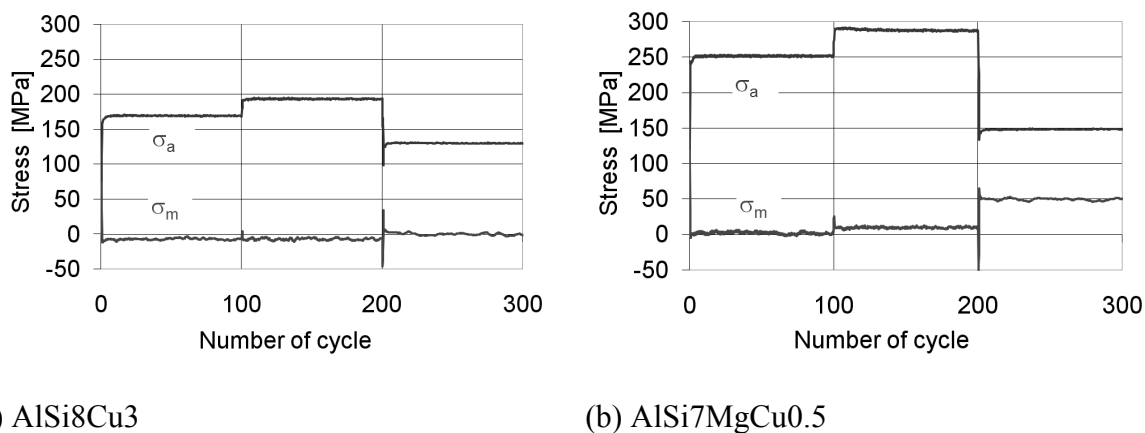


Fig. 22. Poziom średni naprężenia (σ_m) oraz amplituda naprężenia (σ_a) dla sekwencji bloków obciążenia 231 dla materiałów po starzeniu w temperaturze 150°C przez 500h

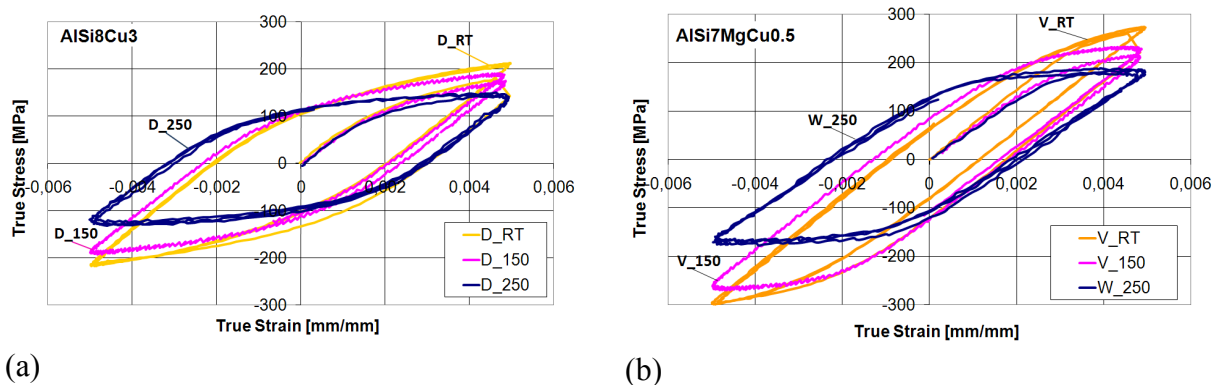
I tak porównanie poziomu średniego dla stopu AISi8Cu3 w stanie dostawy umożliwia określenie wyżej wymienionego efektu podczas badań LCF przeprowadzonych nie tylko w

temperaturze pokojowej (rys. 20a, 21a), ale również dla testów wykonanych przy takich samych sekwencjach obciążenia w temperaturze 150°C [21]. Dla testów przeprowadzonych w temperaturze 250°C efekt ten już jednak nie występował, podobnie, jak dla testów materiału poddawanego wcześniej starzeniu w temperaturze 150°C przez okres 500h, rys.22a.

Biorąc pod uwagę wartości poziomu średniego otrzymane dla stopu AlSi7MgCu0.5 w analogicznych warunkach, jak dla stopu AlSi8Cu3 łatwo zauważyć, że efekt wzrostu poziomu średniego naprężenia miał miejsce nie tylko dla materiału testowanego w pokojowej temperaturze (20b, 21b), ale i dla materiału po starzeniu w temperaturze 150°C przez okres 500h, rys. 22b. Podobnie natomiast, jak dla stopu AlSi8Cu3, efektu nie zaobserwowano w stopie AlSi7MgCu0.5 po starzeniu w następujących warunkach 250°C/50h oraz 250°C/500h [21].

3.2.2. Efekty osłabienia lub wzmocnienia podczas prób LCF [16, 18-21]

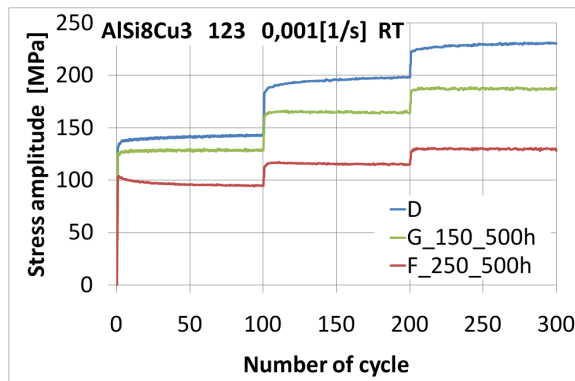
Porównanie pętli histerezy obu materiałów w stanie dostawy dla dwóch pierwszych cykli przeprowadzonych we wszystkich rozpatrywanych temperaturach w sekwencji zmiany amplitudy odkształcenia 312 wykazuje większe wartości naprężenia w przypadku AlSi7MgCu0.5, rys. 23a, b. Na przykład, podczas badań LCF przeprowadzonych w temperaturze pokojowej, naprężenie odpowiadające amplitudzie odkształcenia 0.005 wynosiło 205 MPa dla AlSi8Cu3 (rys. 23a), natomiast w przypadku AlSi7MgCu0.5 osiągnęło wartość 275 MPa (rys.23b). Ponadto, stop AlSi7MgCu0.5 wykazywał anizotropię wyrażającą się przesunięciem naprężeniowej odpowiedzi materiału w kierunku naprężeń ściskających w temperaturze pokojowej, natomiast dla temperatur 150°C i 250°C efekt ten zanikał (rys. 23b). Takie zjawisko identyfikuje występowanie w materiale naprężeń resztkowych. Badania pokazują, że są one eliminowane w wyższej temperaturze (250°C). Dla AlSi7MgCu0.5 testowanego we wszystkich temperaturach stopień wzmocnienia jest większy, a szerokość pętli histerezy jest mniejsza. Cechy te wskazują na większą wytrzymałość tego materiału. Stosunkowo wysoki poziom cyklicznego umacnienia można zaobserwować dla stopu AlSi8Cu3 badanego w temperaturze pokojowej, rys. 23a. Efekt jest znacznie mniej widoczny dla materiału testowanego w temperaturze 150°C, natomiast w przypadku badania przy 250°C można go praktycznie pominąć. Z kolei dla stopu AlSi7MgCu0.5 efekt wzmocnienia można zaobserwować podczas testów w 150°C i 250°C.



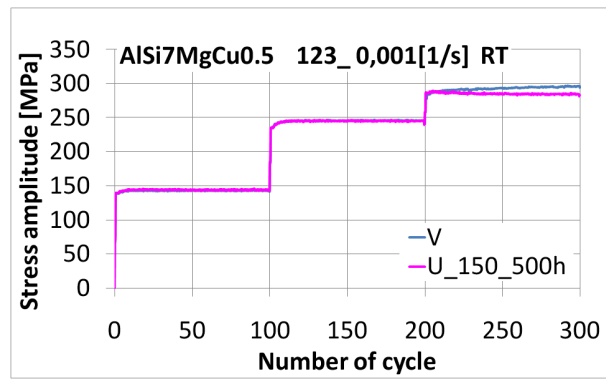
Rys. 23. Pętli histerezy z dwóch pierwszych cykli dla materiałów w stanie dostawy badanych przy sekwencji bloków obciążenia 312 w temperaturze pokojowej oraz 150°C i 250°C (prędkość odkształcenia 0.001 [1/s])

Porównanie wartości amplitudy naprężenia dla obu materiałów w stanie dostawy i po procesie starzenia, otrzymane z prób przy sekwencji zmian wartości amplitudy odkształcenia 123 dla prędkości odkształcenia 0.001 [1/s] przedstawiono na rys. 24-26 odpowiednio dla trzech różnych temperatur. Jak widać (rys. 24), efekt cyklicznego umocnienia miał miejsce w testach LCF w temperaturze pokojowej dla obu materiałów w stanie dostawy i w mniejszym stopniu dla materiału po starzeniu, przy czym w przypadku stopu AlSi8Cu3 umocnienie to było wyraźniejsze. Dla tych samych materiałów testowanych w wyższych temperaturach, zamiast

cyklicznego umocnienia zaobserwowano osłabienie lub stan nasycenia (rys. 25, 26). Wartości amplitudy naprężenia dla stopu AlSi7MgCu0.5 w stanie dostawy i po starzeniu, testowanego w temperaturze pokojowej (rys. 24b), są większe w porównaniu do wartości dla stopu AlSi8Cu3 (rys. 24a). Wyniki badań przeprowadzonych w temperaturze pokojowej i 150°C dla materiału w stanie dostawy i po starzeniu w 150°C przez 500 godzin wskazują na istotny wpływ takiego starzenia na zachowanie AlSi8Cu3. Wyraża się to przez istotnie niższe odpowiedzi naprężeniowe (rys. 24a, 25a). Podobny wynik osiągnięto również dla stopu AlSi7MgCu0.5 w stanie dostawy i po starzeniu w 150°C przez 500 godzin.

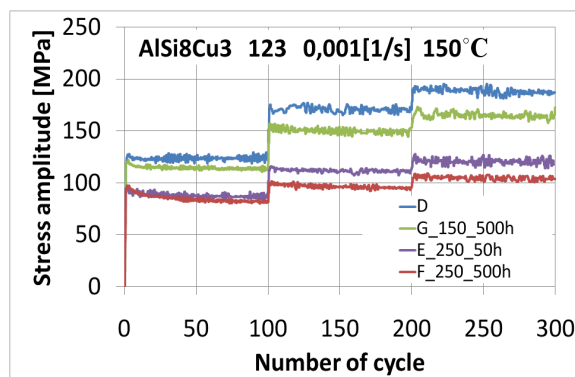


(a)

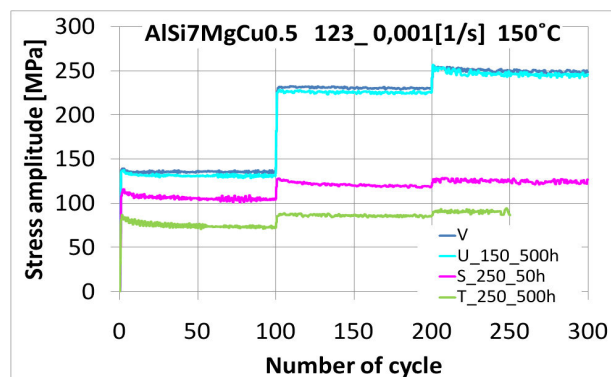


(b)

Rys. 24. Zmiany amplitudy naprężenia badanych materiałów w stanie dostawy i po starzeniu otrzymane z LCF w temperaturze pokojowej i sekwencji bloków obciążenia 123

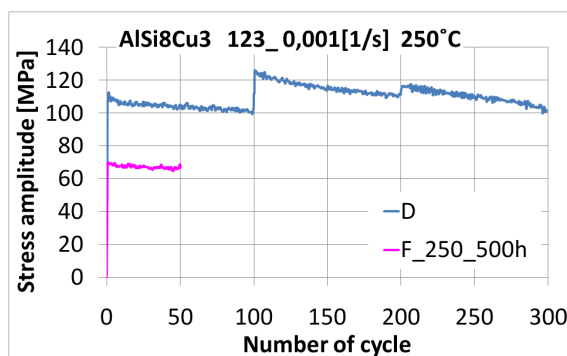


(a)

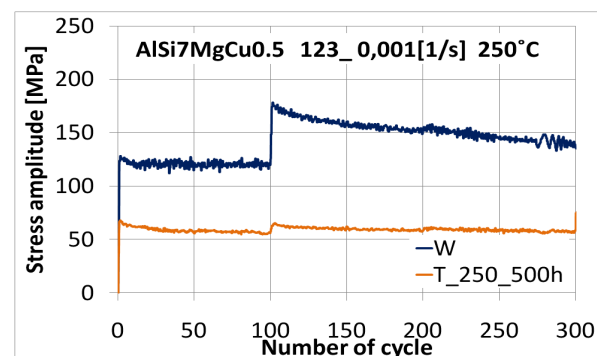


(b)

Rys. 25. Zmiany amplitudy naprężenia badanych materiałów w stanie dostawy i po starzeniu otrzymane z LCF w temperaturze 150°C i sekwencji bloków obciążenia 123



(a)



(b)

Rys. 26. Zmiany amplitudy naprężenia badanych materiałów w stanie dostawy i po starzeniu otrzymane z LCF w temperaturze 250°C i sekwencji bloków obciążenia 123

Natychmiastowy efekt wzmocnienia wskutek wzrostu amplitudy odkształcenia zmniejsza się w wyższych temperaturach i dla materiałów po starzeniu. Najniższe wartości tego typu wzmocnienia zostały uzyskane dla AlSi7MgCu0.5 po starzeniu w 250°C przez 500 godzin i badanego w temperaturze 250°C (rys. 26b). Wyraźnie widać, że starzenie w 250°C ma duży wpływ na zachowanie obu materiałów przy zmianach wartości amplitudy odkształcenia, co wyraża się przez niższą odpowiedź naprężeniową materiałów starzonych w stosunku do materiałów w stanie dostawy (rys. 24a, 25, 26).

4. Podsumowanie

Badania zmęczeniowe ze względu na bogactwo stale pojawiających się nowych zagadnień i dużą ich złożoność są bez wątpienia dziedziną wymagającą integracji środowiska mechaniki, inżynierii materiałowej i specjalistów z zakresu różnych technik nieniszczących, w tym specjalistów zajmujących się optycznymi metodami polowych pomiarów składowych odkształcenia. W zakresie tej tematyki znajdują się ciągle obszary wiedzy nie do końca rozpoznanej, szczególnie w odniesieniu do pojawiających się nowych materiałów, jak na przykład różnego rodzaju kompozytów o matrycy metalowej lub ceramicznej, czy też materiałów gradientowych, stopów z pamięcią kształtu i wielu innych. Zwłaszcza problematyka związana z rozwojem uszkodzeń zmęczeniowych i degradacji właściwości mechanicznych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych wywołujących pełzanie, szoki termiczne jest szczególnie istotna zarówno z poznawczego, jak i inżynierskiego punktu widzenia.

Praca została wykonana w ramach grantu badawczo-rozwojowego NCBiR NR 15-0049-04 .

LITERATURA

1. ASTM Handbook Vol. 19, Fatigue and Fracture, ASM International 1996.
2. Szala J., Hipotezy Sumowania Uszkodzeń Zmęczeniowych, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
3. Kocańda S., Zmęczeniowe Pękanie Metali, WNT, Warszawa 1985.
4. Jakowluk A., Procesy Pełzania i Zmęczenia w Materiałach, WNT, Warszawa 1993.
5. Socha G., Nowa Metoda Pomiaru Zniszczenia Zmęczeniowego Materiałów Konstrukcyjnych, Dozór Techniczny, 121-124, 6/2002.
6. Socha G., Experimental Investigations of Fatigue Cracks Nucleation, Growth and Coalescence in Structural Steel, International Journal of Fatigue, Vol. 25/2, 139-147, 2003.
7. Kowalewski Z.L., Współczesne Badania Wytrzymałościowe – Kierunki i Perspektywy Rozwoju, Biuro Gamma, Warszawa 2008 (198 Stron).
8. Kowalewski Z.L., Kierunki i Perspektywy Rozwoju Badań Wytrzymałościowych, Wydawnictwo ITS, Warszawa, 2008 (227 stron).
9. Szczepiński W. (Ed.), Experimental Methods in Mechanics of Solids, PWN, Elsevier, Warszawa, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1990.
10. Morrow J.D., Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity: Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, ASTM STP, 378, 45-84, 1965.
11. Manson S.S., Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress, NASA TN-2933, 1953.
12. Coffin L.F., Jr, A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, Trans. ASME, 76, 931-950, 1954.
13. Lemaitre J., A Course on Damage Mechanics, Springer-Verlag, Berlin 1996.
14. Yang L., Fatemi A., Cumulative Fatigue Damage Mechanisms and Quantifying Parameters: A Literature Review, J. Testing and Evaluation, 26, 2, 89-100, 1998.
15. Dietrich L., Grzywna P., Kukla D., Material Damage Prediction in Cast Aluminum Alloy Using Elektronic Speckle Pattern Interferometry, 27 Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Wrocław, 22 – 25 wrzesień, 2010.

16. Dietrich L., A. Rutecka, Z.L. Kowalewski, Assessment of Exploitation Properties of Cast Aluminium Alloys on the Basis of Creep and LCF Investigations, *Archiwum Budowy Maszyn*, Vol. LVI, No 4, 2009.
17. Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z.L., Evaluation of the Heat Treatment Role for Light Aluminium Alloys Subjected to Creep and Low Cycle Fatigue, *Materials Science Forum*, 638-642, 2010, 455-460.
18. Kowalewski Z.L., Rutecka A., Szymczak T., Creep and Fatigue of Composites and Light Multifunctional Aluminium Alloys, *Proceedings of Plasticity'10: The Sixteenth International Symposium on Plasticity and Its Current Applications*, Editors Akhtar S. Khan & Babak Farrokh, St. Kitts Marriott Resort, January 3-8, 2010, 43-45.
19. Rutecka A., Kowalewski Z.L., Pietrzak K., Dietrich L., Rehm W., Creep and Low Cycle Fatigue Investigations of Light Aluminium Alloys for Engine Cylinder Heads, *Strain International Journal of Experimental Mechanics*, 2011.
20. Szymczak T., Kowalewski Z.L., Dietrich L., Experimental Analysis of Creep and Fatigue of Light Multifunctional Aluminium Alloys, *Materials Research Innovations*, Vol. 6, No 6, 2010.
21. Dietrich L. i inni, Report on behavior of cast aluminum alloys under low cycle fatigue and under combined stress states – Sixth framework program “New Automotive Components Designed and Manufactured by Intelligent Processing of Light Alloys” – NADIA Contract No 026563-2 – IPPT, 90 str., 2009.