

Kierunki rozwoju badań wytrzymałościowych

1. Wstęp

Obserwowany ogromny postęp w dziedzinie współczesnych badań wytrzymałościowych materiałów i konstrukcji związany jest przede wszystkim z rozwojem mikroprocesorowego sterowania wieloparametrowych, nieliniowych przebiegów doświadczalnych i ciągłym zwiększaniem precyzji pomiarów koniecznych do bieżącego sterowania pracy maszyny na zasadzie pętli sprzężenia zwrotnego. Szybkość tego postępu uzależniona jest również od rozwoju mechaniki ciał stałych i unowocześniania metod analizy stanu naprężenia i odkształcenia. Podstawą efektywnego projektowania elementów konstrukcji, maszyn i procesów obróbki plastycznej jest dokładna analiza deformacji sprężysto-plastycznych, do czego niezbędna jest znajomość zachowania się materiałów konstrukcyjnych w tym zakresie przy obciążeniach wywołujących złożone stany naprężenia i przy uwzględnieniu historii deformacji.

Współczesna analiza deformacji wykonywana w fazie projektowania elementów konstrukcyjnych lub procesów technologicznych obróbki plastycznej wymaga znajomości nie tylko podstawowych właściwości mechanicznych, takich jak:

- ★ moduły sprężystości określające sprężystość,
- ★ granica plastyczności lub granica wytrzymałości doraźnej określające wytrzymałość,
- ★ wydłużenie i przewężenie określające ciągliwość,
- ★ energia w próbie Charpy'ego określająca udurowość,
- ★ granica wytrzymałości zmęczeniowej określana z krzywej Wöhlera,
- ★ odporność na długotrwałe obciążenia określana na podstawie próby pełzania, ale również i innych danych wyznaczanych doświadczalnie w zależności od potrzeb. Wymienić tu należy:
 - ◀ charakterystykę naprężenie-odkształcenie przy obciążeniach statycznych, dynamicznych lub cyklicznych,
 - ◀ prędkość wzrostu szczeliny,
 - ◀ odporność na pękanie określaną na podstawie wyznaczania: krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia (K_{IC}), lub krytycznej wartości całki Rice'a (J_{IC}), względnie krytycznego rozwarcia szczeliny zmęczeniowej (δ_C).

Komplet danych do analizy deformacji należy jeszcze uzupełnić podając postać warunku plastyczności i prawa wzmocnienia, które określa się na podstawie badań realizowanych w warunkach obciążeń złożonych.

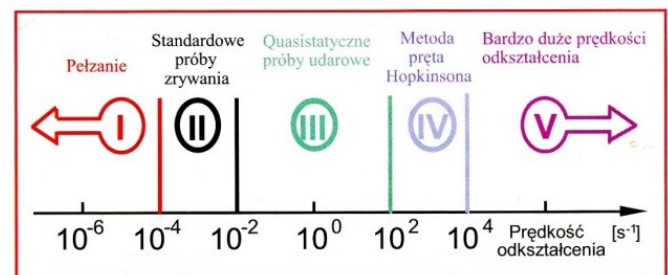
Większa część wymienionych wyżej badań ma charakter badań podstawowych, których procedury są określone w normach krajowych, jak i międzynarodowych. Do grupy badań, które nie mają jeszcze formy znormalizowanej, pomimo faktu ich wykonywania od wielu lat przez liczne ośrodki naukowe na świecie, należą badania właściwości mechanicznych materiałów w warunkach złożonego stanu naprężenia.

Zakres badań prowadzonych w ramach wytrzymałości materiałów ulega ciąglemu powiększaniu. Początkowo uwaga badaczy była skupiona na testach w zakresie sprężystym i plastycznym. Badania te dotyczyły ustalenia warunku uplastycznienia, wyznaczenia kształtu i rozmiarów powierzchni plastyczności. Ich zakres stopniowo ulegał rozszerzaniu obejmując prawa plastycznego płynięcia i hipotezy wzmocnienia, a następnie ocenę wpływu różnych czynników na wa-

runek plastyczności i jego ewolucję. Stale rosnące wymagania co do parametrów wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych, związane z postępowym technicznym powodującym wzrost wartości obciążeń konstrukcji i maszyn, wzrost stopnia złożoności tych obciążeń oraz fakt stałego podnoszenia temperatur pracy wielu elementów konstrukcyjnych, doprowadziły po powstaniu zupełnie nowych kierunków badań wytrzymałościowych. Należą do nich badania przy obciążeniach statycznych w celu określenia parametrów zjawiska pełzania, badania przy obciążeniach cyklicznych w celu rozpoznania procesu zmęczenia oraz badania rozwoju uszkodzenia obciążonych elementów, określane go na podstawie parametrów mechaniki pęknięcia.

Istotnym źródłem postępu w badaniach wytrzymałościowych jest rozwój technik i urządzeń badawczych. Poważne badania wytrzymałościowe prowadzone już były od początku XIX wieku, ale dopiero zaprojektowanie i wykonanie pierwszego tensometru elektrooporowego w 1938 roku (*Simonds i Ruge*) zrewolucjonizowało tę dyscyplinę naukową. Drugim, nie mniej istotnym krokiem naprzód było zastosowanie zdobyczy elektroniki w układach sterowania maszyn wytrzymałościowych. Zaowocowało to powstaniem maszyn pracujących w pętli sprzężenia zwrotnego, w której badana próbka jest częścią układu sterowania. Pierwszy prototyp takiej maszyny powstał w Stanach Zjednoczonych w 1953 roku, by w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia maszyny tego typu znalazły się w powszechnej sprzedaży prowadzonej przez czołowych producentów akcesoriów do prowadzenia badań wytrzymałościowych. Kolejnym znaczącym osiągnięciem było zastosowanie w roku 1972 specjalizowanego układu elektronicznego do zbierania i przetwarzania danych doświadczalnych w maszynach wytrzymałościowych. Wyposażenie jednej maszyny w dwa układy elektroniczne do sterowania i przetwarzania danych doświadczalnych można traktować jako początek współczesnych maszyn wytrzymałościowych. Jak widać, historia rozwoju tych urządzeń jest krótka w zestawieniu z historią badań wytrzymałościowych.

Współczesne maszyny wytrzymałościowe stwarzają zupełnie nowe możliwości poznania właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych. Zapewniają one nie tylko poprawę jakości badań i znaczne ułatwienie ich realizacji, ale głównie pozwalają na pełniejsze i dokładniejsze poznanie procesów zachodzących w materiałach poddanych różnym typom obciążeń w specjalnie symulowanych warunkach. Stanowi to bazę dla rozwoju współczesnych i przyszłych doświadczalnych badań parametrów mechanicznych materiałów.



Rys. 1. Widmo prędkości odkształcenia dla różnych technik badań wytrzymałościowych

Uzyskanie maksymalnie szerokiego zakresu prędkości odkształcenia sprawia poważne trudności techniczne, bowiem zakres możliwych prędkości może zawierać się w wielu rzędach dziesiątych, licząc w s^{-1} . Dla zilustrowania tego zagadnienia posłużono się widmem prędkości odkształcenia przedstawionym na rys. 1.

Ponieważ wpływ prędkości odkształcenia na naprężenie plastycznego płynięcia przejawia się zwykle w postaci monotonicznie rosnącej funkcji prędkości odkształcenia, stąd nie jest obojętne na jakim poziomie prędkości odkształcenia założono istnienie krzywej statycznej. Zwykle za taką wartość przyjmuje się $\dot{\epsilon}_{stat} = 1 \cdot 10^{-4} s^{-1}$. Mając tak zdefiniowany poziom odniesienia, można na przedstawionym widmie prędkości odkształcenia rozróżnić następujące zakresy, które wynikają ze stosowanej techniki eksperymentalnej:

- I – $\dot{\epsilon} < 1 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ – zakres pełzania metali,
- II – $1 \cdot 10^{-4} s^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^{-2} s^{-1}$ – zakres normalnych prób statycznych na standardowych maszynach i próbkach,
- III – $1 \cdot 10^{-2} s^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2 s^{-1}$ – zakres prób quasi-statycznych z użyciem takich urządzeń jak młoty spadowe, młoty Charpy'ego, młoty rotacyjne,
- IV – $1 \cdot 10^2 s^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^4 s^{-1}$ – zakres prób dynamicznych dla dużych prędkości odkształcenia,
- V – $\dot{\epsilon} > 10^4 s^{-1}$ – zakres prób dynamicznych wymagających specjalizowanych stanowisk badawczych.

Przedstawione zakresy na widmie prędkości stanowią niezwykle szeroki przedział, bo dwanaście rzędów dziesiątych. Wyznaczenie powierzchni $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_T)$ w takim przedziale stanowi poważny problem eksperymentalny.

2. Badania w zakresie bardzo małych prędkości odkształcenia

Obciążenia eksploatacyjne wielu elementów konstrukcyjnych oraz urządzeń mają często charakter długoterminowy i realizowane są wielokrotnie w podwyższonych temperaturach. Warunki takie sprzyjają rozwojowi zjawiska pełzania klasycznie definiowanego jako procesu zachodzącego przy stałym obciążeniu, o wartości gwarantującej naprężenia mieszczące się zazwyczaj w obszarze obowiązywania prawa Hooke'a, oraz podwyższonej temperaturze. Typowa krzywa pełzania zawiera trzy wyraźne zakresy. W pierwszym prędkość odkształcenia stopniowo maleje, w drugim przyjmuje ustaloną stałą wartość, natomiast w trzecim prędkość ta stopniowo ulega zwiększeniu uzyskując w końcu tego etapu procesu nieskończoną wartość, czemu odpowiada utrata spójności materiału. W niektórych sytuacjach kształt krzywej pełzania może odbiegać od klasycznego jej przebiegu. Głównie ma to miejsce wtedy, gdy wartość naprężenia jest większa od granicy plastyczności.

2.1. Kategorie badań procesu pełzania

Różnorodność badań pełzania sprawia, że można dokonać wielu ich klasyfikacji.

Często spotyka się podział badań w zależności od okresu, którego dotyczą, a więc:

- badania pierwszego stadium pełzania, przebiegające przy malejącej prędkości odkształcenia,
- badania drugiego stadium pełzania, charakteryzującego się stałą prędkością pełzania,
- badania trzeciego stadium pełzania, prowadzącego do zniszczenia materiału.

Najbardziej jednak ogólną klasyfikacją badań pełzania jest ich podział na badania wykonywane na poziomie makroskopowym oraz badania realizowane na poziomie mikroskopowym.

Niezależnie od podziału badań pełzania na makroskopowe i mikroskopowe, głównym ich celem jest określenie takich parametrów procesu, jak ustalona prędkość pełzania, czas do zniszczenia, długotrwałość typowych okresów pełzania oraz kształt krzywej pełzania. Na wymienione charakterystyczne parametry procesu pełzania ma wpływ wiele

różnych czynników i stąd można wyszczególnić kilka rodzajów badań zarówno w grupie badań o charakterze makroskopowym, jak i mikroskopowym.

Wśród badań makroskopowych stosunkowo najczęściej wykonywane są próby pełzania mające na celu określenie przebiegu krzywych pełzania w zależności od poziomu naprężenia lub temperatury. Tego typu testy mają charakter badań wykonywanych na skalę przemysłową, ponieważ wiążą się z wyborem danego materiału na konkretną konstrukcję. Ich celem jest zatem ustalenie parametrów pełzania wybranych materiałów z punktu widzenia określonych z góry warunków pracy konstrukcji, które sprzyjają rozwojowi procesu pełzania.

Osobną grupę badań stanowią testy przeprowadzane w celu określenia wpływu wartości i kierunku wstępnej deformacji plastycznej na parametry pełzania. Zagadnienie to ma istotne znaczenie z uwagi na powszechnie stosowane procesy technologiczne do wyrobu półfabrykatów w postaci blach, prętów, odkuwek itp., w trakcie których zadawana jest wstępna deformacja plastyczna, mająca wpływ na czas eksploatacji konstrukcji.

Dużą grupę badań poświęconych procesowi pełzania stanowią testy określające wpływ techniki pomiarowej na wiarygodność otrzymywanych wyników.

Wśród testów pełzania o charakterze mikroskopowym można wyróżnić co najmniej dwie duże grupy badań:

- ▲ badania identyfikujące mechanizmy deformacyjne i mechanizmy uszkodzenia, oraz
- ▲ badania wpływu czynników o charakterze mikroskopowym, takich jak wielkość ziarna, skład chemiczny czy też rodzaj struktury materiału, na zachowanie materiału przy pełzaniu.

Przebieg procesu pełzania metali uzależniony jest od czynników makroskopowych, jak i mikroskopowych. Wśród pierwszych można wymienić wartość i rodzaj realizowanego stanu naprężenia, wartość i rodzaj wstępnej deformacji wywołanej procesem pełzania, temperaturę, wśród drugich natomiast wielkość ziarna, rodzaj struktury mikroskopowej.

Proces pełzania materiałów konstrukcyjnych istotnie wpływa na stan techniczny wielu urządzeń stosowanych w przedsiębiorstwach związanych z przemysłem energetycznym, lotniczym, chemicznym i wielu innych, ponieważ może ograniczać czas eksploatacji zarówno poszczególnych elementów konstrukcyjnych, jak też całych urządzeń. Pełzanie powoduje bowiem rozwój wad materiałowych, który w końcowym ich przebiegu ma gwałtowny charakter doprowadzający do zniszczenia.

Problem rozwoju uszkodzeń wywołanych procesem pełzania, mającym bezpośredni wpływ na żywotność materiału, badany jest już od wielu lat niezależnie metodami niszczącymi [1–7] (np.: próby pełzania, badania powierzchni plastyczności) i nieniszczącymi [8–13] (np.: metodami ultradźwiękowymi, magnetycznymi, rentgenowskimi, prądów wirowych i wieloma innymi). W obu dziedzinach badawczych można zaobserwować ogromny postęp wyrażający się istotnym zwiększeniem precyzji pomiarów i w efekcie dużym wzrostem skutecznego wykrywania wad materiałowych wynikających z eksploatacji wyrobów narażonych na ekstremalne warunki pracy.

Pomimo niewątpliwego postępu w obu typach metod badawczych w dalszym ciągu nie ma jeszcze narzędzia, które gwarantowałyby uniknięcie awarii i katastrof w przemyśle energetycznym, lotniczym i chemicznym wywołanych niekontrolowanym rozwojem uszkodzeń materiałów. Klasyczne niszczące metody badań procesu pełzania dają możliwość doświadczalnego określenia parametrów makroskopowych zjawiska, nie dając jednak istotnych informacji dotyczących stanu uszkodzenia badanych materiałów. Z kolei metody nieniszczące dostarczają informacji o stanie uszkodzenia w konkretnej chwili jego zaawansowania, natomiast nie dają praktycznie odpowiedzi, jak długo można by jeszcze bezpiecznie eksploatować dany element lub urządzenie. Z tego punktu widzenia narzuca się powiązanie możliwości obu rodzajów technik badawczych idące w kierunku skorelowania ich parametrów. I właśnie ten aspekt stanowi nowość we współczesnych badaniach procesu pełzania.

3. Badania w zakresie małych i średnich prędkości odkształcenia

W tej klasie badań wyróżnić można wiele rodzajów prac doświadczalnych, ponieważ typowe współczesne maszyny wytrzymałościowe pracują zwłaszcza w zakresie małych i średnich prędkości odkształcenia. Badania te obejmują wykonywanie standardowych prób wytrzymałościowych przy rozciąganiu i ściskaniu. Próby takie przeprowadza się przy obciążeniach monotonicznie narastających. Ponadto, wspomniani zakres obejmuje badania zmęczeniowe prowadzone przy obciążeniach cyklicznych oraz badania wykonywane w celu określenia parametrów mechaniki pękania. Szerzej omówione zostaną w tym opracowaniu badania zmęczeniowe oraz sprzężone z nimi badania dla potrzeb mechaniki pękania. W tej grupie badań wymienić należy również badania prowadzone w złożonym stanie naprężenia.

3.1. Zmęczenie materiałów

W dotychczas przedstawionych przypadkach analizy wytrzymałościowej były rozpatrywane współczesne kierunki badań, w których obciążenia przykładane do elementów konstrukcyjnych miały charakter obciążeń stałych. W praktyce jednak obciążenia te często są zmienne. W wielu przypadkach zmiany wartości obciążeń odbywają się również w sposób cykliczny, to jest powtarzają się wielokrotnie. Stosunkowo najczęściej można w urządzeniach technicznych spotkać obciążenia wywołujące naprężenia zmienne w sposób sinusoidalny lub zbliżony do niego. 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. Takie obniżenie wytrzymałości materiału nazywane jest ogólnie wytrzymałością zmęczeniową.

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.

3.1.1. 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 artykułu.

3.1.2. 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.

3.1.3. 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.

Dotychczasowe badania pozwoliły 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.

3.1.4. Zmęczenie wysokocyklowe

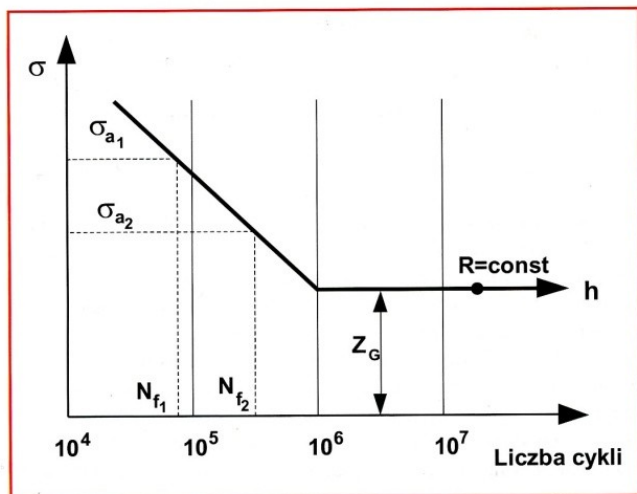
Podstawowymi badaniami zmęczeniowymi są testy mające na celu określenie wytrzymałości zmęczeniowej, które wykonuje się dla bardzo dużej liczby cykli. Przez pojęcie wytrzymałości zmęczeniowej należy rozumieć graniczną wartość skrajnego naprężenia okresowo zmiennego, które może być powtórzone bezpiecznie 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. 2.

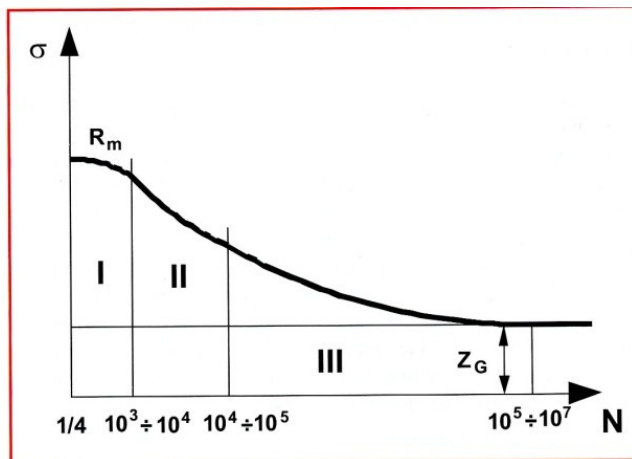
Otrzymuje się go wykonując próby zmęczenia przy różnych wartościach amplitudy naprężenia. Nanosząc odpowiadające sobie wartości naprężeń i liczby cykli do zniszczenia uzyskujemy pochyłą część wykresu. Jest to obszar ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Ta część wykresu wykorzystywana jest do projektowania 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.

Częściej omawiany wykres przedstawia się w innej postaci określonej mianem pełnego wykresu Wöhlera, w którym początek układu odpowiada $1/4$ cyklu obciążenia. Przyjmuje się, że wartość naprężenia niszczonego przy $1/4$ cyklu jest porównywalna z odpowiednią granicą wytrzymałościową przy obciążeniu statycznym. Pełny wykres Wöhlera pokazano na rys. 3. Na wykresie tym zaznaczono następujące charakterystyczne obszary wytrzymałości zmęczeniowej:

- ★ Obszar I (wytrzymałość quasistatyczna) – od $1/4$ do około $10^3 - 10^4$ cykli, w którym pękanie zmęczeniowe materiału ma charakter pękania plastycznego,



Rys. 2. Uproszczony wykres zmęczeniowy Wöhlera



Rys. 3. Pełny wykres Wöhlera w układzie współrzędnych naprężenie nominalne – liczba cykli do zniszczenia

- ★ Obszar II (wytrzymałość niskocyklowa lub niskocyklowe zmęczenie) 10^4 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.

3.1.5. Przykładowe badania dotyczące badań rozwoju uszkodzenia wskutek zmęczenia

3.1.5.1. 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 metody optyczne, obserwacje zmian pola elektrycznego, magnetycznego, temperatury lub właściwości mechanicznych (np. modułu sprężystości, gęstości). Część metod mechanicznych jest szczegółowo omówiona w monografii Lemaitre'a [14], natomiast przegląd różnych miar uszkodzenia opisanych w literaturze naukowej podali Yang i Fatemi [15].

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.

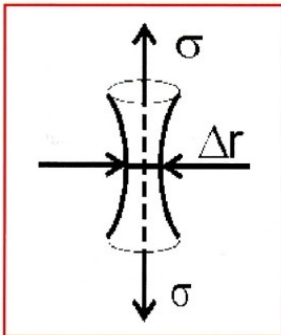
Bardzo ciekawą propozycją miary rozwoju uszkodzenia jest przyjęcie zmiany nieliniowej odpowiedzi materiału przy cyklicznych obciążeniach. Przyjęcie lokalnych odkształceń niesprężystych w jednym cyklu obciążenia jako miary uszkodzenia jest zgodne z lokalnym charakterem procesu uszkodzenia oraz z przeświadczeniem,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

[16,17]. Odształcenia 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 umożliwiła 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.

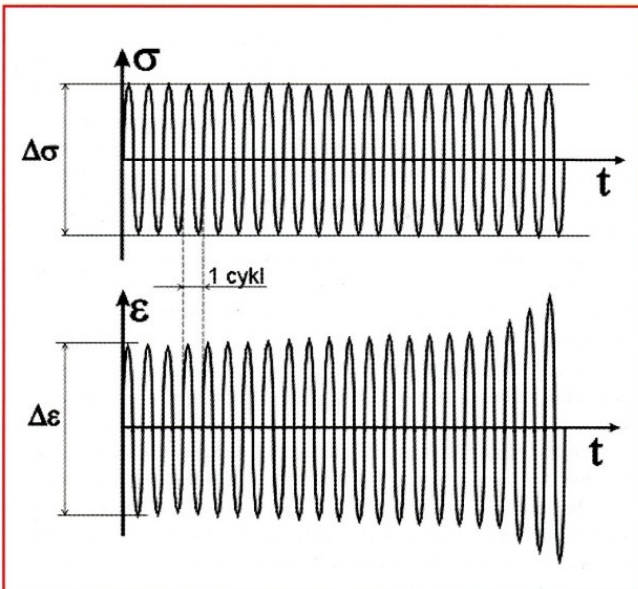
3.1.5.2. Badania uszkodzenia wskutek obciążeń cyklicznych

Na podstawie wykonanych badań [17] stwierdza się, 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.

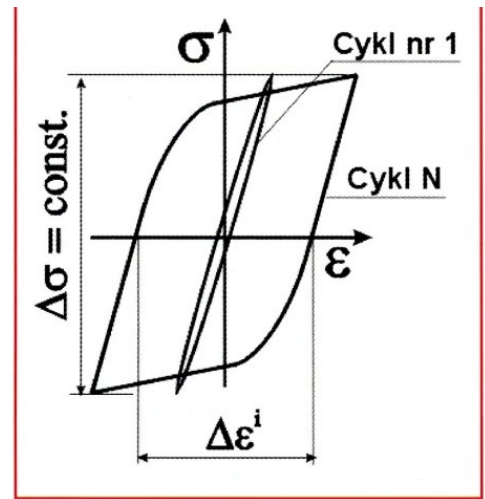


Rys. 4. Schemat idealny próbki, sposobu przyłożenia obciążeń cyklicznych i miejsca pomiaru zmiany średnicy

Wspomniany pomiar niesprężystych odształceń w kolejnych cyklach obciążania przeprowadzano na małych próbkach klepsydrycznych o średnicy najmniejszego przekroju równej 4 mm, zamocowanych w specjalnie zaprojektowanym uchwycie zapewniającym osiowe przeniesienie obciążeń z maszyny wytrzymałościowej i umożliwiającym obciążanie przy symetrycznych cyklach rozciągania i ściskania. Mierzono zmianę średnicy próbki w trakcie cyklu obciążania o stałej am-



Rys. 5. Schemat zmiany obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie naprężenia i odpowiedź materialu w odształceniach przeliczonych ze zmiany średnicy



Rys. 6. Pętłe histerezy w cyklu nr 1 i w cyklu N-tym

plitudzie 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. Kształt próbki, zmiany obciążeń i odpowiedzi materiału w odształceniach przeliczonych z mierzonych zmian średnicy i wykresy naprężenia jako funkcji odształceń w cyklu początkowym i cyklu n-tym z zaznaczoną wartością odształcenia niesprężystego w tym cyklu przedstawiono na rys. 4-6.

Zmierzone wartości odształceń 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 odształceń niesprężystych, najdłuższego zakresu stabilnego wzrostu odształceń niesprężystych i krótkiego zakresu gwałtownego wzrostu odształceń niesprężystych bezpośrednio poprzedzającego zniszczenie próbki.

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 tarcie wewnętrzne materiału,
- ♦ obszar inicjacji i stabilnego wzrostu mikropęknięć – w materiale następuje inicjacja wielu mikropęknięć oraz ich stabilny wzrost (wartość odształceń 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 odształceń niesprężystych wzrasta gwałtownie).

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 [17] 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 odształceń 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.

3.1.5.3. Określanie parametrów mechaniki pęknięcia

Rzeczywistość badań zmęczeniowych wymusiła konieczność poszukiwania nowych parametrów mechanicznych do oceny przydatności materiałów konstrukcyjnych w przypadkach ich pracy przy obciążeniach cyklicznych z uwzględnieniem występujących w nich wad materiałowych, stanowiących koncentraty naprężeń, których nie ujmuje klasyczna wytrzymałość materiałów. Należą do nich takie parametry mechaniki pęknięcia, jak współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , krytyczne rozwarcie wierzchołkowe szczeliny δ_c oraz krytyczna wartość całki Rice'a J_c . Określanie ich jest trudne i wymaga stosowania specjalistycznej aparatury oraz spełnienia wielu rygorystycznych warunków.

Odporność na pęknięcie materiałów jest wyznaczana tylko dla przypadku jednoosiowego rozrywania próbek z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową, tj. dla tzw. I sposobu obciążania. Nie ma metod wyznaczania odporności na pęknięcie materiału dla sposobów II i III, to jest odpowiednio dla ścinania wzdłużnego i poprzecznego. Tylko w przypadku ciał kruchych, których zachowanie opisuje model liniowo-sprężysty istnieją rozwiązania pozwalające uzyskać wysoki stopień dokładności oszacowania wytrzymałości elementów.

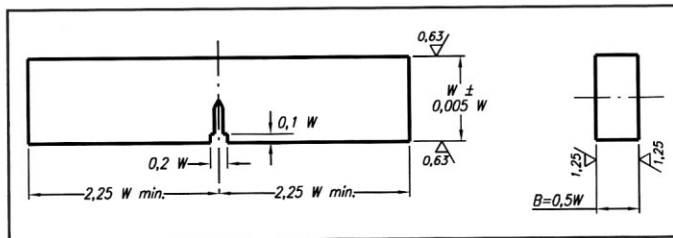
Aktualnie stosowane są zaawansowane procedury oceny niezawodności odpowiedzialnych konstrukcji (energetyka jądrowa, transport, platformy wiertnicze), które opierają się na wiedzy dostarczanej przez mechanikę pęknięcia. Istnieją narodowe zalecenia sposobów oceny wytrzymałości i niezawodności elementów zawierających stwierdzone lub przypuszczalnie istniejące wady typu pęknięcia (USA – API 579, Japonia – WES 2805, Wielka Brytania – BS 7910 i BS PD 6493, Francja – A 16 i RSE-M). Trwają prace nad doskonaleniem metod oceny wytrzymałości i bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji i stworzeniem ujednoczonych i technicznie uzasadnionych zaleceń dla konstruktorów i użytkowników (Europejski Program *Structural Integrity Assessment Procedures*). Obszerne omówienie głównych osiągnięć tego programu jest przedstawione w pracy Neimitza [18].

Wyznaczanie K_{IC}

Na rys. 7 pokazano kształt próbki do wyznaczania K_{IC} w próbie zginania według normy ASTM 399-70T, *Tentative Method of Test for Fracture Toughness of Metallic Materials*, 1970 [19]. Zasadnicze znaczenie dla uzyskania wiarygodnego wyniku ma ściśle przestrzeganie wymagań normy w stosunku do wymiarów próbki i sposobu obciążania. Próbki mają nacięte karby przedłużone pęknięciami wyprowadzonymi z karbów przez obciążenie zmęczeniowe. Norma precyzuje wymagania w stosunku do geometrii karbu oraz długości i orientacji pęknięcia zmęczeniowego. Pęknięcie nie może być krótsze niż 1,3 mm.

Wymagania te są tak sformułowane, aby próba była przeprowadzona w płaskim stanie odkształcenia. Zakłada się, że płaski stan odkształcenia wystąpi w próbce, jeśli jej grubość B spełnia następujący warunek:

$$B > 2,5(K_{IC}/R_0)^2. \quad (1)$$



Rys. 7. Próбка do wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia (K_{IC} , J_c , δ_c): w próbie trójpunktowego zginania

Spełnienie powyższego warunku można stwierdzić dopiero po wykonaniu pomiarów i obliczeniu wartości K_{IC} , którą należy wykorzystać właśnie we wzorze (1).

Warunek ten nie jest spełniony w przypadku próbek o grubości mniejszej od 6,5 mm. Przy wyznaczaniu współczynnika koncentracji naprężeń K_{IC} w cienkich blachach proponowane są specjalne procedury [20, 21]. Odporność na pęknięcie próbek nie spełniających warunku płaskiego stanu odkształcenia można wyznaczyć przez pomiar krytycznego rozwarcia wierzchołkowego szczeliny δ_c (opisany w dalszej części pracy).

W czasie obciążania próbek mierzone są przyrosty rozwarcia między krawędziami karbu i wyznacza się zależność obciążenie – rozwarcie $P - V$. Zależność ta jest początkowo liniowa, a przy większych rozwarciach może mieć odmienny przebieg. Dla różnych wariantów przebiegu zależności obciążenie – rozwarcie norma precyzuje sposób wyznaczania krytycznej wartości obciążenia próbki, po przekroczeniu której do narastania rozwarcia wystarcza już mniejsza siła. Na podstawie wyznaczonej krytycznej wartości siły obciążającej próbkę P_c oblicza się naprężenie σ w materiale próbki z dala od krawędzi pęknięcia (w normie są gotowe wzory dla znormalizowanych próbek oraz znanych wymiarów karbu i pęknięcia) i ze wzoru (2)

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad [N/m^{3/2}], \quad (2)$$

oblicza się wartość współczynnika intensywności naprężeń dla ciała idealnie sprężystego przy krytycznym obciążeniu próbki.

Wyznaczanie krytycznego rozwarcia wierzchołkowego szczeliny δ_c

Na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia zaproponowano wykorzystanie rozwarcia wierzchołkowego szczeliny (*Crack Tip Opening Displacement*) jako wielkości charakteryzującej pole odkształceń w pobliżu czoła szczeliny i odporności na pęknięcie materiałów konstrukcyjnych, do których nie stosuje się liniowa mechanika pęknięcia. Szczegóły techniki wyznaczania wartości rozwarcia szczeliny omawiają normy: BS 5762 (1979) [22], ASTM E 1290-93 (1997) [23]. Rozwarcie szczeliny δ wyznacza się na podstawie doświadczalnej zależności zmiany siły obciążającej w funkcji przemieszczenia, tj. rozwarcia krawędzi karbu V , którego przedłużeniem jest badane pęknięcie zmęczeniowe. Rozwarcie, przy którym pęknięcie zaczyna się rozwijać nazywane jest krytycznym rozwarciem szczeliny i oznacza się je przez δ_c . Wartość δ_c wyznaczona w sposób zgodny z normą jest niezależna od geometrii próbki i jest miarą odporności materiału próbki na pęknięcie.

W odróżnieniu od K_{IC} pomiar δ_c może być wykonany, gdy próbka nie spełnia warunku płaskiego stanu odkształcenia. Najczęściej stosowany sposób pomiaru opisuje norma brytyjska BS 5762 [22].

Podczas próby zginania rejestruje się zmiany obciążenia próbki P i odpowiadające im przyrosty rozwarcia krawędzi szczeliny na powierzchni próbki V . Zmierzone wartości rozwarcia karbu na powierzchni próbki V pozwalają wyliczyć krytyczne rozwarcie wierzchołkowe szczeliny δ_c . W normie podane są związki analityczne umożliwiające takie obliczenie w zależności od rodzaju próbki. Związki te uzyskano metodą elementów skończonych dla próbek spełniających wymagania normy. Na podstawie wykresu obciążenie P – rozwarcie szczeliny V wyznacza się krytyczną wartość obciążenia P_c przy którym rozpoczął

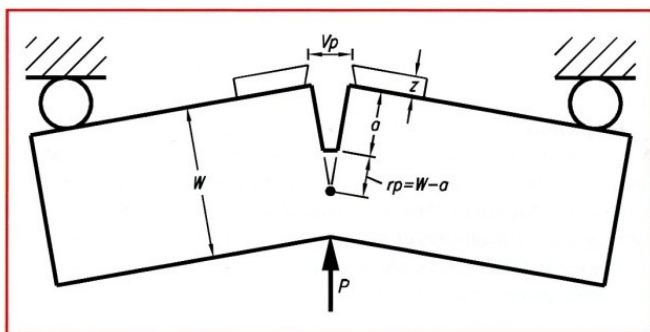
się rozwój istniejącego w próbce pęknięcia zmęczeniowego. Norma opisuje sposób wyznaczania krytycznego momentu próby dla różnych kształtów zależności *obciążenie – przemieszczenie*.

W przypadku trudności wyznaczenia krytycznego momentu na podstawie wykresu, moment startu rozwoju szczeliny wyznacza się na podstawie wskazań metod nieniszczących czułych na długość pęknięcia (np. metoda prądów wirowych, czy metoda spadku potencjału).

Wyznaczanie wartości całki Rice'a J

Wyznaczanie wartości całki J i badanie odporności materiału na pękanie w oparciu o ten parametr należą do trudniejszych zadań doświadczalnej mechaniki pęknięcia.

W stosunkowo prosty sposób można wyznaczyć wartość całki J w przypadku trójpunktowego zginania próbki w kształcie belki z głębokim karbem przedłużonym pęknięciem zmęczeniowym, gdy uzyskuje się pełne uplastycznienie pozostałego przekroju próbki (rys. 8).



Rys. 8. Trójpunktowe zginanie próbki

Przyjmując model sztywno-plastyczny materiału w tym przypadku zależność między całką J , a obciążeniem P i przemieszczeniem linii przyłożenia obciążenia V (przemieszczenie uchwytu) ma postać:

$$J = \frac{2 \int PdV}{Bb} = \frac{2 \int PdV}{B(W-a)} \quad (3)$$

We wzorze tym oznaczenia są następujące: $\int PdV$ – pole powierzchni pod krzywą *siła obciążająca zginaną próbkę – przemieszczenie* (praca wykonana na zgięcie próbki), W – szerokość próbki, B – grubość próbki, $b = W - a$, zaś a – długość pęknięcia.

Zaawansowane sposoby wyznaczania wartości całki J i krytycznej wartości całki J_c są opisane w normach ASTM E 1737-96 *Standard Test Method for J – Integral Characterization of Fracture Toughness* [24], ASTM E 813-89 *Standard Test Method for J_{IC} a Measure of Fracture Toughness* [25]. Wykorzystuje się próbki zawierające karby z wprowadzonymi z dna karbu pęknięciami zmęczeniowymi (takie same jak do określania K_{IC}).

Reasumując, pomiary odporności na pękanie materiałów konstrukcyjnych K_{IC} , δ_c i J_c nie należą do zadań łatwych i wymagają spełnienia wielu bardzo rygorystycznych warunków. Wyniki pomiarów są zwykle obarczone znacznym błędem. Dlatego wiarygodne wartości odporności na pękanie są wartościami średnimi z wielu pomiarów.

Przedstawione metody badawcze umożliwiają określenie odporności na pękanie dla materiałów sprężystych oraz sprężysto-plastycznych.

Podstawowe krytyczne parametry mechaniki pęknięcia (K_{IC} , δ_c i J_c) wykorzystywane do oceny odporności materiałów konstrukcyjnych na pękanie powinny być wyznaczone ściśle według zaleceń normowych. Odnosi się to również do projektowania próbek oraz uchwytów stosowanych do ich obciążania w trakcie badań. Szerzej zagadnienia te prezentowane są w pracy [26].

3.2. Niestandardowe badania wytrzymałościowe

3.2.1. Określanie powierzchni plastyczności

Jednym z kierunków doświadczalnych badań wytrzymałościowych umożliwiającym określenie wybranych parametrów mechanicznych jest koncepcja polegająca na wyznaczaniu powierzchni plastyczności. Podejście to można z powodzeniem stosować w celu zbadania zmian parametrów mechanicznych po realizacji programów badawczych, których celem jest wywołanie wstępnej deformacji testowanych materiałów wskutek obciążeń o charakterze statycznym, monotonicznym, czy cyklicznym. Zadaniem takich programów badawczych jest określenie zmian podstawowych parametrów mechanicznych, takich jak, np. granica sprężystości, granica plastycznego płynięcia, czy też granica proporcjonalności pod wpływem symulowanych obciążeń eksploatacyjnych. Wyniki takich badań stanowią bazę do rozwiązywania podstawowego problemu teoretycznego, polegającego nie tylko na opisie funkcji plastyczności, ale również na opisie ruchu powierzchni plastyczności poprzez stosownie zdefiniowane parametry umocnienia oraz ewolucji dla wprowadzonych parametrów.

Powierzchnia plastyczności oddzielająca zakres sprężystego i plastycznego zachowania się materiału przy złożonych stanach naprężenia stanowi podstawowy element wytrzymałościowej charakterystyki materiałów konstrukcyjnych. Jej kształt i położenie w przestrzeni naprężeń są zależne od rodzaju historii deformacji zastosowanej w okresie użytkowania danego elementu.

Wyznaczanie powierzchni plastyczności przeprowadza się wykozystując jedną z poniższych technik [27]:

- metoda wielu próbek, w której każdą próbkę obciąża się w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń (σ , τ) wzdłuż innej drogi proporcjonalnego przyrostu naprężenia aż do osiągnięcia określonej wartości offsetu plastycznego (odkształcenia trwałego),
- metoda pojedynczej próbki, gdzie jedną próbkę obciążamy w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń (σ , τ) wzdłuż różnych dróg przyrostu naprężenia aż do osiągnięcia określonej wartości offsetu plastycznego, przy czym następuje odciążenie i ponowne obciążenie dla innej kombinacji obciążenia aż do uzyskania uplastycznienia o wartości, jak dla pierwszej rozpatrywanej ścieżki obciążenia.

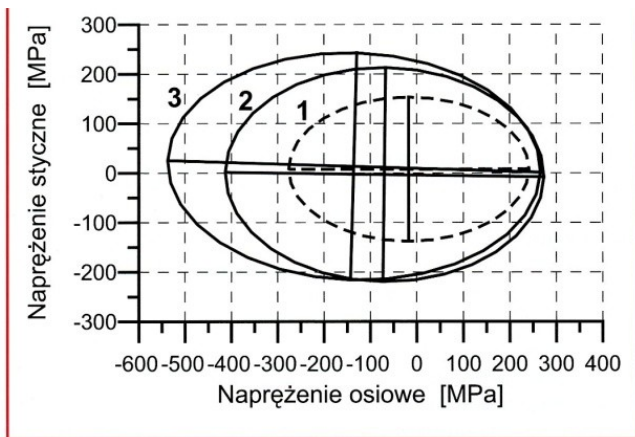
Wymienione metody dają zadowalające i porównywalne wyniki gdy przyjęta miara uplastycznienia jest wystarczająco mała, z reguły poniżej 0.01%.

Koncepcja powierzchni plastyczności może być wykorzystywana do identyfikacji początkowych właściwości materiałów, oceny wpływu wprowadzonej historii deformacji. Równie przydatna jest ona przy analizie zmian właściwości mechanicznych niektórych zagadnień dotyczących obciążeń cyklicznych. Zostanie to zilustrowane na przykładzie badań zrealizowanych na stopie aluminium PA6. Oceny właściwości mechanicznych tego materiału dokonywano w stanie dostawy i wstępnej deformacji plastycznej wywołanej:

- ▲ proporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi (20 cykli przy częstotliwości 0.025Hz),
- ▲ nieproporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi wzdłuż ścieżki o kształcie okręgu (20 cykli przy częstotliwości 0.025Hz).

W obu przypadkach przeprowadzono badania przy jednakowej amplitudzie odkształcenia (0.009). Wstępną deformację materiał wskutek proporcjonalnych obciążeń cyklicznych prowadzono wzdłuż ścieżki rozciąganie-ściskanie, przy czym program tych obciążeń był całkowicie symetryczny względem osi czasu, tzn. wartość bezwzględna maksymalnego obciążenia przy rozciąganiu była równa wartości bezwzględnej obciążenia przy ściskaniu. Jak już powyżej wspomniano, przy obciążeniach cyklicznych nieproporcjonalnych rozpatrywano przypadek ścieżki obciążania, która w dwuwymiarowej przestrzeni odkształceń przyjmowała kształt okręgu.

Rys. 9 pokazuje porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami dla materiału odkształconego cyklicznie drogami obciążeń proporcjonalnych realizowanych przez naprzemienne rozcią-



Rys. 9. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami po cyklach proporcjonalnych i nieproporcjonalnych o amplitudzie odkształcenia 0.009 (1 – początkowa powierzchnia plastyczności; 2 – powierzchnia plastyczności po cyklach proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie; 3 – powierzchnia plastyczności po cyklach kołowych)

ganie i ściskanie oraz drogą nieproporcjonalnych obciążeń po ścieżce kołowej przy amplitudzie odkształcenia 0.009.

Jak widać, krytyczną formą wstępnej deformacji są nieproporcjonalne obciążenia cykliczne, które wywołują znacznie większy stopień umocnienia w zestawieniu z efektem spowodowanym proporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi. Porównanie zamieszczone na rys. 9 może stanowić formę ilustracji efektu dodatkowego wzmocnienia stopu aluminium obserwowanego dla nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych wzdłuż ścieżki kołowej w stosunku do obciążeń proporcjonalnych o tej samej amplitudzie.

3.2.2. Badania efektów towarzyszących złożonym obciążeniom nisko-cyklicznym

Dotychczas przeprowadzone badania przy obciążeniach cyklicznych wywołujących złożone stany naprężenia wykazały, że stanowią one krytyczną formę obciążeń wielu konstrukcji inżynierskich i dlatego ocena podstawowych parametrów mechanicznych jest w takich przypadkach niezbędnym elementem przebiegu ich projektowania. Typowymi przykładami urządzeń poddawanych działaniu cyklicznych obciążeń złożonych przy jednoczesnym wpływie wysokiej temperatury są łopatki turbin generatorów energii elektrycznej, czy też elementy reaktorów jądrowych. Są to zatem elementy bardzo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy personelu obsługującego oraz osób z bezpośredniego sąsiedztwa. Z tego powodu jednym z ważniejszych problemów analizy poprawności zaprojektowanej konstrukcji jest precyzyjny opis matematyczny zachowania materiału w trakcie deformacji plastycznej wywoływanej przez złożony stan naprężenia. Wyniki prezentowane w wielu pracach [28–35] dowodzą, że nieproporcjonalne cykle odkształcenia realizowane w złożonych stanach naprężenia wywołują efekt dodatkowego wzmocnienia materiału w porównaniu do obciążeń cyklicznych prowadzonych w zakresie cyklicznego rozciągania-ściskania. Po raz pierwszy efekt ten został opisany przez Lambę i Sidebottom'a [28] dla czystej miedzi. Praca tych badaczy stała się inspiracją do kolejnych badań dla innych metali w wielu różnych ośrodkach naukowych na świecie. Badania doświadczalne materiałów prowadzono zarówno w temperaturze pokojowej [np. 29], jak i podwyższonej [np. 30]. Kolejne publikowane prace dotyczące wpływu nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych na podstawowe parametry mechaniczne materiałów stopniowo rozszerzały dotychczasową wiedzę przez uwzględnianie zmian parametrów cyklicznego obciążania. Zbadano między innymi wpływ takich parametrów, jak wielkość amplitudy odkształcenia [31], czy też efekty związane z kształtem drogi

naprężenia przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych w porównaniu do wzmocnienia uzyskiwanego przy obciążeniach realizowanych wzdłuż dróg proporcjonalnych stało się możliwe dzięki rozwojowi badań mikrostrukturalnych. W zespole Doonga i współpracowników [33] wykonano program badań, w którym po realizacji obciążeń cyklicznych wykonywano badania mikrostrukturalne z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego. W przypadku obciążeń proporcjonalnych badania takich materiałów, jak czysta miedź i stale nierdzewne typu 304 i 310 wykazały, że ich mikrografia odpowiada struktrom wynikającym z uaktywniania pojedynczych poślizgów, natomiast przy obciążeniach nieproporcjonalnych struktrom powstającym z działania wielu systemów poślizgu. Na podstawie wymienionych obserwacji większe wzmocnienie materiałów przy obciążeniach nieproporcjonalnych przypisano zmianom podstruktur dyslokacyjnych w zależności od typu obciążenia cyklicznego. W literaturze dotyczącej tego problemu często stwierdza się, że efekt dodatkowego wzmocnienia obserwowanego przy obciążeniach nieproporcjonalnych wywołany jest skutkiem uaktywniania dużo większej liczby systemów poślizgu przy obciążeniach złożonych towarzyszących deformacji po drodze na przykład kołowej niż przy obciążeniach proporcjonalnych.

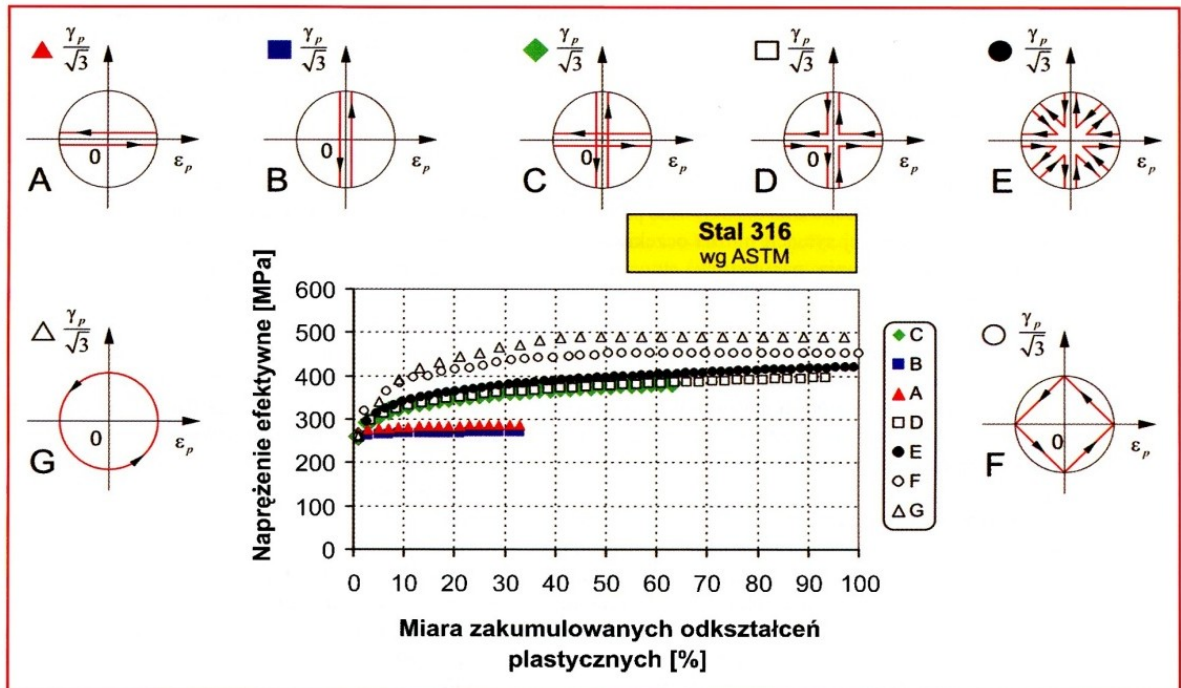
Wpływ kształtu ścieżki obciążenia cyklicznego rozważany był przez zespoły japońskie. Szczególnie interesujące wydają się prace zrealizowane w zespołach kierowanych przez Murakamiego [30,31] i Ohashiego [34]. Grupa Ohashi'ego przeprowadziła badania, w których porównywano właściwości mechaniczne stali nierdzewnej 316 w warunkach proporcjonalnych obciążeń cyklicznych (rozciąganie – ściskanie lub rewersyjne skręcanie) (POC) z właściwościami obserwowanymi przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych (NOC) prowadzonych po ścieżce kołowej lub kwadratowej. Testy prowadzono przy sterowaniu naprężeniem. Zaobserwowano, że umocnienie wskutek obciążeń cyklicznych wyraża się zmniejszeniem amplitudy odkształcenia plastycznego. Ponadto wyniki pokazały, że wzmocnienie na skutek obciążeń cyklicznych po drodze kołowej ma podobną wielkość, jak uzyskiwane dla ścieżki w kształcie kwadratu. Badacze ci analizowali również wyniki z prób cyklicznego rozciągania i ściskania przy wykorzystaniu sygnałów sterujących przebiegiem eksperymentu w kształcie sinusoidy, trójkąta i prostokąta. Z danych tych można wyciągnąć wniosek, że kształt sygnału sterującego nie ma praktycznie wpływu na wielkość umocnienia materiału obserwowanego przy proporcjonalnych obciążeniach cyklicznych. Ponadto można zauważyć, że w przypadku NOC po drodze kołowej wzrost umocnienia materiału w stosunku do krzywej umocnienia materiału rozciąganego jest około dwukrotnie większy niż ten obserwowany przy POC.

Podobne jakościowo wyniki dla stali nierdzewnej 316 otrzymano w zespole Murakamiego. W tym przypadku badania prowadzono przy sterowaniu odkształceniem dla kilku wybranych temperatur z zakresu 20–700°C. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wzmocnienie, określone jako wzrost amplitudy naprężenia w każdym cyklu realizowanych obciążeń po ścieżce kołowej, gwałtownie się rozwijało w początkowych kilku cyklach, a następnie dążyło ono asymptotycznie do stanu nasycenia. Takie zachowanie obserwowano dla wszystkich rozpatrywanych wartości temperatury.

Jednym z efektów towarzyszących działaniu złożonych obciążeń jest umocnienie, bądź osłabienie materiału. Przebieg krzywych cyklicznego wzmocnienia uzależniony jest w znacznym stopniu od typów obciążeń, które można podzielić na takie grupy jak: a) proste obciążenia proporcjonalne (rozciąganie, skręcanie); b) krzyżowe obciążenia proporcjonalne (typ gwiazdowy); oraz c) obciążenia nieproporcjonalne (kwadrat, koło). Decydujący wpływ na cykliczne wzmocnienie materiału mają obciążenia nieproporcjonalne. Spośród dróg nieproporcjonalnych największy efekt cyklicznego wzmocnienia wprowadza obciążenie po drodze kołowej (rys. 10).

W klasyczny sposób efekt dodatkowego wzmocnienia zaprezentowany jest na rys. 11, gdzie porównano amplitudy naprężenia w funkcji numeru cyklu dla obciążeń proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie i obciążeń nieproporcjonalnych po ścieżce kołowej. We wszystkich

Rys. 10. Wpływ kształtu drogi obciążenia na cykliczne wzmocnienie stali 316 [35]



przypadkach testy realizowane były na niezależnych próbkach i dla maksymalnych wartości odkształcenia 0.0065 oraz 0.009. Jak widać z tego diagramu, obciążenia kołowe dają w przypadku badanego materiału dużą nadwyżkę wartości naprężenia przy jednakowej wartości amplitudy odkształcenia w porównaniu do cykli proporcjonalnych (rozciąganie-ściskanie).

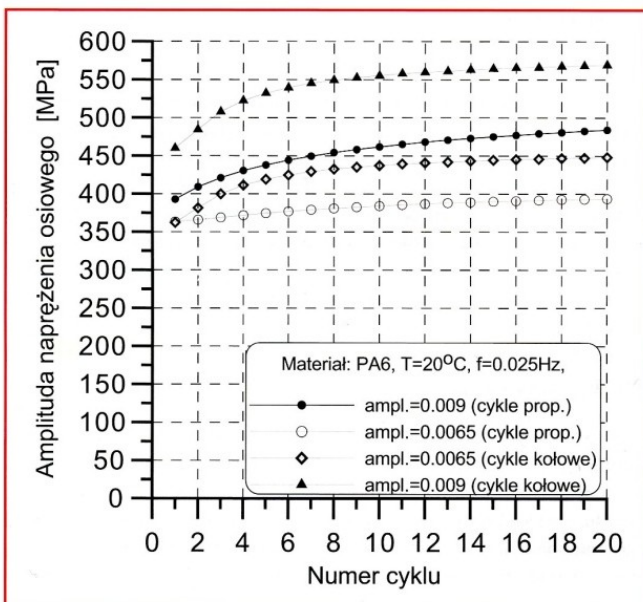
Obciążenia cykliczne mogą istotnie wpływać na przebieg procesów z obciążeniami o charakterze monotonicznie narastającym. Jest to zagadnienie, którym aktualnie zajmuje się wiele ośrodków naukowych, ponieważ dotyczy możliwości modyfikacji procesów technologicznych produkcji półfabrykatów na przykład w postaci prętów. Rezultatem tych badań są często nowe technologie formowania materiałów [np. 36-38]. Większość badań tego typu realizowana jest w zakresie dużych deformacji, rzędu 50%. W niniejszej pracy przedstawione zostaną wy-

brane własne wyniki z zakresu tej tematyki, które dotyczyć jednak będą małych deformacji plastycznych (<1%).

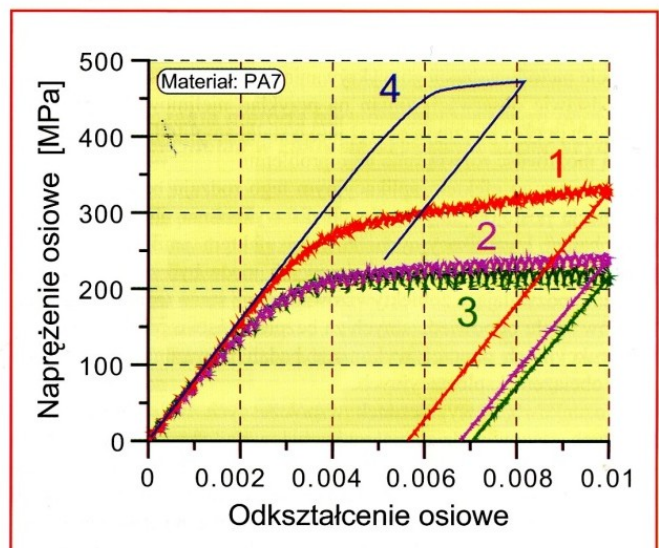
Badaniom poddano stop aluminium PA7 wykorzystywany w lotnictwie. Program badań obejmował wykonanie statycznej próby rozciągania oraz takiej samej próby w obecności cyklicznych obciążeń rewersyjnego skręcania o różnych amplitudach odkształcenia i przy różnych wariantach uruchamiania tych cykli. Wszystkie próby wykonywano w zakresie odkształcenia całkowitego nie przekraczającego wartości 1%.

Na rys. 12 przedstawiono porównanie charakterystyki rozciągania z próby standardowej oraz charakterystyk rozciągania otrzymanych z prób, w których występowały obciążenia cykliczne przy rewersyjnym skręcaniu o różnej amplitudzie odkształcenia [39].

Wyniki przedstawione na rys. 12 wskazują spadek naprężeń osiowych pod wpływem obciążeń cyklicznych zadawanych drogą rewersyjnego skręcania. Stopień spadku naprężenia narasta ze wzrostem wiel-



Rys. 11. Ilustracja efektu dodatkowego wzmocnienia obserwowanego przy porównaniu amplitud naprężenia w funkcji numeru cyklu dla obciążeń cyklicznych proporcjonalnych (rozciąganie-ściskanie) i nieproporcjonalnych (droga kołowa)



Rys. 12. Ilustracja zależności efektu mięknienia materiału przy rozciąganiu od amplitudy cykli skrętnych (1-0.3%, 2-0.7%, 3-0.9%, 4 - standardowa próba rozciągania bez cykli rewersyjnego skręcania) [39]

kości amplitudy obciążeń cyklicznych. Należy jednak zauważyć, że efekt stopniowo dąży do pewnej ustalonej wartości, przy której dalszy wzrost amplitudy odkształcenia nie powoduje jego istotnej zmiany.

3.2.3. Interdyscyplinarne badania wytrzymałościowe

Testy wytrzymałościowe należą do kategorii badań o charakterze niszczącym i stąd cechuje je z jednej strony stosunkowo wysoki koszt, a z drugiej brak możliwości ich zastosowania dla aktywnie pracujących elementów konstrukcji. Poprawy tej sytuacji można oczekiwać przez wypracowanie metodyki korelowania parametrów otrzymywanych z badań wytrzymałościowych z parametrami metod niszczących.

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 niszczących 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 niszczące 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 dodatkowe badania mikrostrukturalne można pokazać, jak wyznaczone parametry mechaniczne i wybrane parametry metod niszczących 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 poszerzenia 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 umożliwia monitorowanie stanu instalacji technicznych bez koniecz-

ności 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 wydzielenia 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 połowy 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, niszczących 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.

3.3. Badania udarności

Stosunkowo najczęściej wykonywanymi badaniami dla zakresu średnich prędkości odkształcenia są testy, których celem jest ocena materiałów pod względem stopnia kruchości. Parametrem charakteryzującym stopień kruchości jest udarność, którą definiuje się jako odporność materiału na działanie obciążeń dynamicznych i wyraża się stosunkiem pracy zużytej na złamanie próbek do powierzchni jej przekroju poprzecznego w miejscu złamania.

Znaczący wpływ na obniżenie odporności na kruche pęknięcie mają wszelkiego rodzaju karby. Przykłady takiego obniżenia spotykamy na co dzień w pracy szklarzy i glazurników, którzy w celu właściwego przycięcia szyby, czy też ukształtowania płytek glazury lub terakoty

nacinają je lekko diamentem. W ten sposób wprowadzają karb, który znacznie ułatwia przełamanie dokładnie w miejscu nacięcia. W przytoczonych przykładach mamy do czynienia z pożądanym zmniejszeniem odporności materiału na kruche pękanie. W większości przypadków działanie karbu obniżającego odporność materiału na kruche pękanie jest efektem niekorzystnym, mogącym prowadzić nawet do poważnych katastrof.

Wśród wielu czynników wpływających na odporność materiału na kruche pękanie należy zwrócić uwagę na czynniki o charakterze mikroskopowym, a więc skład chemiczny, wielkość ziarna. Badania wykazały, że w przypadku stali wzrost zawartości węgla przesuwają progi kruchości ku wyższym temperaturom, a zatem zwiększa prawdopodobieństwo kruchego pęknięcia. Wykazano również, że stałe o mniejszym ziarnie są bardziej odporne na kruche pękanie.

Przedstawione przyczyny zmian odporności materiału na kruche pękanie oraz konieczność zachowania dużego stopnia bezpieczeństwa wielu współczesnych konstrukcji sprawiły, że istnieje wiele metod oceny skłonności materiałów do kruchego pęknięcia. Stosunkowo najbardziej rozpowszechniona i jednocześnie najprostsza w realizacji jest próba udarowego zginania. Szczegóły tej próby opisane są w normie PN-EN 10045-1. Próbę udarności wykonuje się głównie w celu dokonania kontroli zastosowanej obróbki cieplnej, stwierdzenia skłonności materiału do starzenia, kruchości na zimno lub na gorąco. Należy ją przeprowadzać dla materiałów konstrukcyjnych, które w czasie eksploatacji poddawane są obciążeniom udarowym i dynamicznym.

W celu dokonania oceny udarności przeprowadza się próby udarowe w warunkach rozciągania, ściskania, skręcania lub zginania. Powszecznym zastosowaniem ma próba udarowego zginania, którą wykonuje się na próbkach bez karbu. Najczęściej jednak przeprowadza się pewną odmianę tej próby polegającą na zastosowaniu próbek z karbem. Taka odmiana próby udarowej nazywana jest próbą na udarność.

Próba udarności polega na złamaniu jednym uderzeniem spadającego młota wahadłowego, próbki z karbem w środku i podparte obydwo- ma końcami zgodnie z warunkami wyszczególnionymi w normie PN-EN 10045-1. Miarą udarności badanego materiału jest energia zużyta na złamanie próbki wyrażona w dżulach.

Zgodnie z PN-EN 10045-1 zaleca się próbki o przekroju kwadratowym z karbem w kształcie litery „U” lub „V”.

Próby udarności przeprowadza się na młotach wahadłowych typu Charpy, Amsler lub innych przeznaczonych do badań próbek podpartych swobodnie na obu końcach.

Próby udarności można prowadzić także przy użyciu nowoczesnych młotów opadowych.

4. Badania w zakresie wysokich i bardzo wysokich prędkości odkształcenia

4.1. Uwagi wprowadzające

Z dotychczasowych badań doświadczalnych dla większości metali i stopów metali wynika, że różnice w zachowaniu się podczas deformacji quasi-statycznej i dynamicznej są tak wyraźne, że nie można stosować wyników tylko badań quasi-statycznych do analizy zjawisk i rozwiązywania problemów dynamicznych. Badania zachowania się materiałów przy obciążeniach dynamicznych rozwinęły się szczególnie w ostatnich pięćdziesięciu latach. Przyczyną przyspieszonego rozwoju są potrzeby związane z bezpieczeństwem konstrukcji ochronnych oraz konstrukcji w energetyce atomowej, bezpieczeństwem pojazdów samochodowych, z problemami dynamiki zniszczenia materiałów w technice lotniczej, kosmicznej i wojskowej oraz penetracji z dużymi prędkościami w technice wojskowej. Również wysokie prędkości odkształcenia występują w technologicznych procesach obróbki i formowania metali, takich jak toczenie, wyciskanie i tłoczenie wybuchowe.

Dokładne obliczenia z zastosowaniem metod komputerowych mające na celu rozwiązanie wyżej wymienionych problemów wymagają oprócz korzystania z podstawowych praw mechaniki i fizyki również znajomości równań konstytutywnych materiałów. Równania konstytutywne nawet w uproszczonej formie zawierają kilka lub kilkanaście

parametrów, które należy określić doświadczalnie. Określenie tych parametrów dla wysokich prędkości deformacji, powyżej 10^4 s^{-1} , stanowi poważny problem eksperymentalny. Jedną z istniejących przeszkód jest zjawisko lokalizacji odkształcenia w badanej próbce. Zjawisko to występuje szczególnie w próbkach rozciąganych i skręcanych w związku z czym najwyższe prędkości odkształcenia osiągnięte dotychczas w badaniach na rozciąganie i skręcanie wynoszą około 10^4 s^{-1} . Mniej wrażliwe na powstanie lokalizacji odkształcenia są próbki poddane dynamicznemu ścisaniu. W próbce ścisanej lokalizacja odkształcenia w postaci pasm ścinania występuje dopiero przy wysokich, wynoszących około 50% wartościach odkształcenia.

Chociaż eksperymentalne badania na ściskaniu przy obciążeniach uderzeniowych są obecnie łatwiejsze do przeprowadzenia, ze względu na postęp w elektronice i rejestracji szybkozmiennych procesów, nadal jeszcze możliwe jest udoskonalanie urządzenia badawczego zarówno pod względem konstrukcji mechanicznej, jak i techniki pomiaru. Jedną ze stosowanych ostatnio w praktyce modyfikacji jest miniaturyzacja urządzenia badawczego, a szczególnie głównego układu tego urządzenia. Miniaturyzacja daje możliwości nie tylko znacznego zwiększenia prędkości odkształcenia, ale także zmniejszenia efektów bezwładności w kierunku podłużnym i poprzecznym w próbce.

Jedną z najczęściej stosowanych technik doświadczalnych w celu określenia lepko – plastycznych właściwości materiałów dla prędkości od $\sim 5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ do $\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ jest urządzenie Kolsky'ego [40] (1949) nazywane Hopkinson Pressure Bar (HPB). Zmodyfikowana wersja urządzenia Kolsky'ego została zaproponowana przez Lindholma [41] (1964) i jest używana dotychczas w wielu laboratoriach.

Dla uzyskania wyższych od 10^4 s^{-1} prędkości odkształcenia Dharan i Hauser [42] wprowadzili modyfikację układu (HPB) polegającą na usunięciu pręta transmitującego i bezpośrednim uderzeniu pocisku w próbkę opartą o pręt odbierający. Modyfikacja ta umożliwiła zwiększenie prędkości odkształcenia i może być określona jako Direct Impact Compression Test (DICT).

Technika (DICT) w porównaniu z techniką (HPB) rozszerza zakres możliwych do osiągnięcia prędkości odkształcenia. Prędkość pręta pocisku może zawierać się w zakresie od $\sim 1 \text{ m/s}$ do $\sim 150 \text{ m/s}$, co dla próbki o długości $l_0 = 1 \text{ mm}$ daje zakres nominalnej prędkości odkształcenia od 10^3 s^{-1} do $1,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$.

Najwyższe prędkości odkształcenia w zakresie $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \div 10^6 \text{ s}^{-1}$ można osiągnąć techniką „Pressure – Shear Plate Impact Test” (PSPIT) zaproponowaną przez Clifton'a [43]. W doświadczeniu realizowanym tą techniką, próbka o kształcie cienkiej, kołowej płyty, oparta na grubszej, sztywnej płycie i poruszająca się razem z nią uderza czołowo z dużą prędkością o drugą, sztywną płytę. W zależności od tego, czy czoła płyt ustawione są prostopadle, czy skośnie do kierunku ruchu, w próbce powstaje stan ściskania lub też stan ściskania ze ścinaniem.

4.2. Doświadczalna metoda badania plastycznego płynięcia metali i stopów metali w zakresie szybkich i super-szybkich deformacji

Dla uzyskania prędkości odkształcenia wyższej od 10^4 s^{-1} w istniejących, przedstawionych powyżej metodach wprowadzono dwie zmiany w stosunku do podstawowej, zaproponowanej przez Kolskiego w pracy [40] metody pręta Hopkinsona.

Zmiany te są następujące:

- ♦ zastosowano bezpośrednie uderzenie pocisku (w postaci pręta lub płyty) w próbkę,
- ♦ zmniejszono znacznie długość pomiarową (odległość pomiędzy czołami walca lub kołowej płyty) próbek.

I tak, dla uzyskania bardzo wysokich prędkości deformacji około 10^7 s^{-1} badano próbki o długości pomiarowej zaledwie $0,0013 \div 0,002 \text{ mm}$ – świadczy to, że wpływ wymiaru próbek został już praktycznie w całości wykorzystany. Ponadto, na podstawie opinii spotykanych w literaturze należy dodać, że aby wyniki badań były wiarygodne na długości pomiarowej próbki powinno mieścić się przynajmniej 8 ziaren. Jest to warunek ograniczający zmniejszanie wymiarów próbki.

Obydwie wymienione wyżej zmiany, tj. bezpośrednie uderzenie pocisku w próbkę oraz minimalizacja wymiarów, są stosowane w metodzie przedstawionej w [44].

Trzecim czynnikiem mającym wpływ na prędkość odkształcenia próbki jest prędkość uderzenia pocisku w próbkę. Wykorzystanie tej możliwości jest jednak silnie ograniczone warunkiem koniecznym pozostania w stanie sprężystym uderzającego w próbkę pocisku i podpierającego próbkę sprężystego pręta pomiarowego.

Dzięki uderzeniu z odpowiednio dużą prędkością bezpośrednio w próbkę w przedstawionych w pracy [42] badaniach uzyskano prędkość odkształcenia $2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. W badaniach tych pocisk o średnicy znacznie większej od średnicy próbki pozostawał w stanie sprężystym, natomiast zniszczeniu poprzez odkształcenie plastyczne ulegał pręt pomiarowy, podpierający próbkę.

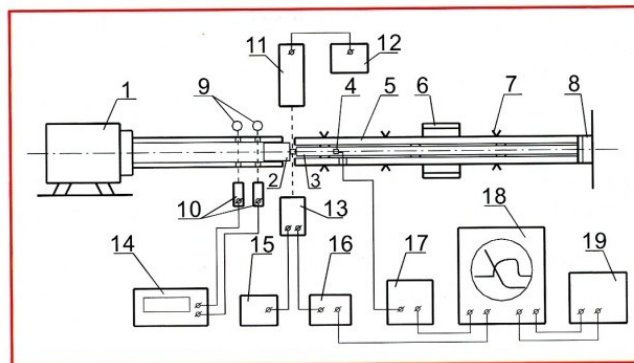
W prezentowanej metodzie przyjęto stosunek średnicy pręta pocisku do średnicy próbki równy 5.5. Zabezpieczono również pręt pomiarowy podpierający próbkę przed zniszczeniem w trakcie doświadczenia przez rozpędzony pocisk. Osiągnięto to poprzez umieszczenie pręta podpierającego w obudowie o odpowiedniej konstrukcji, która utrzymuje pręt w odpowiedniej pozycji, hamuje pręt pocisku i pochłania jego energię kinetyczną. Pręt pomiarowy podpierający próbkę umieszczony w obudowie wraz z układem „laser-fotodiody” do pomiaru prędkości stanowi główne urządzenie, potrzebne do realizacji badań proponowaną metodą. W dotychczas przeprowadzonych badaniach dla wysokich prędkości odkształcenia nie został też właściwie rozwiązany pomiar odkształcenia próbki po uderzeniu przez pocisk. I tak, w pracy [42] w celu określenia odkształcenia próbki przyjęto założenie, że prędkość przemieszczania się uderzonego brzegu próbki ma stałą wartość, równą prędkości pocisku zmierzonej przed zderzeniem z próbką. W innych badaniach [45], stosowano bardzo szybkie kamery ($10^6 \div 10^7$ zdjęć na sekundę) fotografujące obraz ściskanej przez pocisk próbki. W badaniach wykonanych w IPPT PAN [44] dla zmierzenia prędkości uderzonego przez pocisk brzegu próbki zastosowano stosunkowo prosty układ pomiarowy składający się z lasera oraz fotodiody. Światło lasera przechodzi przez szczelinę, której szerokość zmniejsza się o tyle, o ile zmniejsza się długość próbki i jest odbierane przez fotodiody. Układ ten dokładnie wyskalowany pozwala z wystarczającą dokładnością określić średnią prędkość uderzonego brzegu próbki w okresie deformacji próbki przez pocisk.

4.3. Badania na ściskanie w zakresie prędkości odkształcenia $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \div 10^5 \text{ s}^{-1}$

Metodę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona można uznać za podstawową doświadczalną metodę badania lepkoplastycznego zachowania się metali w zakresie prędkości odkształcenia od 500 s^{-1} do 10^4 s^{-1} . Stanowisko takie znajduje się na wyposażeniu laboratorium IPPT PAN. Oprócz głównego układu, którym są dwa sprężyste pręty pomiarowe oraz pręt pocisk, ważną częścią stanowiska jest wyrzutnia pneumatyczna. Wyrzutnia służy do rozpędzania pocisku do prędkości pozwalającej uzyskać odpowiednią prędkość odkształcenia próbki.

Na rys. 13 przedstawiony jest schemat stanowiska zbudowanego także w laboratorium IPPT umożliwiającego badania na ściskanie w zakresie prędkości odkształcenia $500 \text{ s}^{-1} \div 10^5 \text{ s}^{-1}$ metodą bezpośredniego uderzenia pocisku w próbkę. Jak widać na rys. 13, w konstrukcji mechanicznej stanowiska można wyróżnić dwie części: wyrzutnię pneumatyczną i urządzenie główne zawierające sprężysty pręt pomiarowy oraz tuleję oporową. Pocisk, próbka, sprężysty pręt pomiarowy i tuleja oporowa tworzą układ centralny stanowiska badawczego.

Na obu stanowiskach stosowane są pociski o różnych wymiarach zarówno co do średnicy, jak i długości. Powoduje to konieczność stosowania różnych wariantów luf wyrzutni – w zależności od rodzaju badań. I tak, lufa do badań na zmodyfikowanym pręcie Hopkinsona ma średnicę wewnętrzną 22 mm i długość 1300 mm. Natomiast lufa wykonana do badań na urządzeniu przedstawionym na rys. 13 ma średnicę wewnętrzną 11 mm i długość 856 mm. Ponadto, uzyskanie odpowiednio dokładnej pozycji zderzających się elementów (współosiowość i równoległość płaszczyzn czołowych) oraz zmniejszenie trudności



Rys. 13. Schemat stanowiska badawczego, zbudowanego do badań dynamicznych w zakresie prędkości odkształcenia $500 \div 100\,000 \text{ 1/s}$:

1 – wyrzutnia pneumatyczna, 2 – pocisk, 3 – pręt sprężysty, podpierający próbkę, 4 – tensometr elektrooporowy, 5 – tuleja oporowa, 6 – hamownik obwodowy, 7 – podpora, 8 – hamownik podpierający, 9 – diody laserowe nadawcze, 10 – fotodiody, 11 – laser kompaktowy z układem optycznym, 12 – zasilacz stabilizowany lasera, 13 – fotodiody odbiorcza z układem optycznym, 14 – czasomierz, 15 – zasilacz fotodiody odbiorczej, 16 – wzmacniacz sygnału z fotodiody, 17 – wzmacniacz sygnału z tensometrów, 18 – oscyloskop z pamięcią numeryczną, 19 – komputer

obsługi nowego urządzenia wymagało wykonania lufy składającej się z dwu rozłącznych, połączonych gwintem części. Wyrzutnia pneumatyczna z nową lufą daje możliwość rozpędzania pocisków stalowych o średnicy 11 mm i długości $12 \div 50 \text{ mm}$ z prędkością od 10 m/s do ponad 100 m/s.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrane aspekty współczesnych badań wytrzymałościowych. Przeglądu tych badań dokonano w kategoriach uzależnionych od prędkości deformacji. Omówiono zagadnienia związane z badaniami zjawiska pełzania, które zachodzi przy bardzo małych prędkościach odkształcenia i stąd wymaga zupełnie odmiennej aparatury niż sprzęt konieczny do oceny parametrów procesu zmęczenia, czy też do poszukiwań charakterystyk materiałowych w warunkach obciążeń dynamicznych. Dużo miejsca w pracy poświęcono najczęściej wykonywanym testom wytrzymałościowym, które przeprowadza się w zakresie niskich i średnich prędkości odkształcenia.

Przetawione przykłady badań pokazują ogromny postęp w dziedzinie badań parametrów wytrzymałościowych. Jednym z głównych wyznaczników tego postępu są nowoczesne maszyny wytrzymałościowe pracujące w pętach sprzężenia zwrotnego i będące całkowicie sterowane za pośrednictwem komputerów. Ważnym elementem wspomnianego postępu jest oprogramowanie tych maszyn. Również i w tym względzie obserwuje się istotny krok naprzód, ponieważ największe światowe firmy produkujące maszyny wytrzymałościowe (Instron, MTS) oferują bardzo bogate oprogramowanie.

Przyczyną tak dynamicznego rozwoju badań wytrzymałościowych wynikają ze stale rosnących wymagań stawianych elementom konstrukcyjnym (wzrost temperatury pracy, wzrost obciążeń i ich złożoności, itp.), jak również z poszukiwania nowych materiałów, takich jak na przykład nanomateriały, różnego rodzaju kompozyty, materiały gradientowe, materiały z pamięcią kształtu, których zastosowanie na szczególnie odpowiedzialne elementy konstrukcyjne wymaga kompleksowych badań wytrzymałościowych.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Kowalewski Z.L.: Doświadczalne metody oceny uszkodzenia materiałów pod wpływem pełzania. Mat. Konf. z Seminarium Szkoleniowego pt. „Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowej obróbki materiałów”, 49-70, Zakopane, 15-17 grudnia 2004.

- [5] Kowalewski Z.L.: Analiza procesu pełzania oraz jego wpływu na zachowanie metali w jednoosiowym i złożonym stanie naprężenia. Prace IPPT 7, 1996.
- [6] Dietrich L., Kowalewski Z.L.: Experimental investigation of an anisotropy in copper subjected to predeformation due to constant and monotonic loadings. *Int. Journal of Plasticity*, vol. 13, No 1/2, 87-109, 1997.
- [7] Kowalewski Z.L.: Degradacja materiałów konstrukcyjnych stymulowana procesem pełzania, *Mat. Konf. z Seminarium Szkoleniowego pt. „Rozwój zniszczenia materiałów i laserowe modyfikowanie materiałów”*. Zakopane, 161-192, 2003.
- [8] Lewińska-Romicka A.: *Badania nieniszczące – Podstawy defektoskopii*. Warszawa, WNT, 2001.
- [9] Sablik M.J., Augustyniak B.: *Magnetic methods of nondestructive evaluation*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. New York, J.G. Webster, J. Wiley&Sons, vol. 12, 1999.
- [10] Augustyniak B.: Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów. *Wyd. Politechniki Gdańskiej. Monografie* 38, 2003.
- [11] Deputat J.: *Nieniszczące metody badania materiałów*. Warszawa. Biuro Gamma 1997.
- [12] Szelażek J.: Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń. *Prace IPPT*, Nr 4/2001.
- [13] Mackiewicz S., Kowalewski Z.L., Szelażek J., Deputat J.: Badania uszkodzenia stali wskutek pełzania na podstawie badań mechanicznych i ultradźwiękowych. *Przegląd Mechaniczny* 7/8, 15-24, 2005.
- [14] Lemaitre J.: *A Course on Damage Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin 1996.
- [15] Yang L., Fatemi A.: Cumulative Fatigue Damage Mechanisms and Quantifying Parameters: A Literature Review, *J. Testing and Evaluation*, 26, 2, 89-100, 1998.
- [16] Socha G.: Nowa metoda pomiaru zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych. *Dozór Techniczny*, 121-124, 6/2002
- [17] Socha G.: Experimental investigations of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel. *International Journal of Fatigue*, 139-147, vol. 25/2, 2003.
- [18] Neimitz A.: Ocena wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia (podstawowe elementy procedur SINTAP), Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
- [19] ASTM 399 – 70T, Tentative Method of Test for Plane – Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1970.
- [20] Agatonovic P.: Die Restfestigkeit bestimmen. *Spannungs-Dehnungs-Annehrung – ein neues Verfahren*. *Materialprüfung*, 41, 24-30, 1999.
- [21] Agatonovic P.: K_I mittels Spannungs-Dehnungs-Annehrung abschätzen. *Materialprüfung*, 41, 77-84, 1999.
- [22] BS 5762: Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, British Standards Institution, London, 1979.
- [23] ASTM E1290-93 Standard Test Method for Crack – Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, *Annual Book of ASTM Standards*, 1997.
- [24] ASTM E 1737 – 96 Standard Test Method for J – Integral Characterization of Fracture Toughness, *Annual Book of ASTM Standards*, 1997.
- [25] ASTM E 813 – 89 Standard Test Method for J_{IC} : A Measure of Fracture Toughness, *Annual Book of ASTM Standards*, 1997.
- [26] Kowalewski Z.L., Deputat J.: Identyfikacja wad materiałowych w ujęciu mechaniki pęknięcia – podstawy teoretyczne. *Dozór Techniczny*, 2005.
- [27] Hecker S.S.: Experimental studies of yield phenomena in biaxially loaded metals, in: *Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects*, The Winter Annual Meeting of The American Society of Mechanical Engineers, New York City, NY, Ed. Stricklin and Saczalski, ASME, AMD, 20, 1-33, 1976.
- [28] Lamba H.S., Sidebottom O.M.: Cyclic plasticity for non-proportional paths. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 100, 96-111, 1978.
- [29] Benallal A., Marquis M.: Constitutive equations for non-proportional cyclic elasto-viscoplasticity. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 109, 326-335, 1987.
- [30] Murakami S., Kawai M., Aoki K., Ohmi Y.: Temperature-dependence of multiaxial non-proportional cyclic behavior of type 316 stainless steel. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 111, 32-39, 1989.
- [31] Murakami S., Kawai M., Ohmi Y.: Effects of amplitude-history and temperature-history on multiaxial cyclic behavior of type 316 stainless steel. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 111, 278-285, 1989.
- [32] Doong S.H., Socie D.F.: Deformations mechanisms of metals under complex non-proportional cyclic loading. *Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loadings*, pages 305-320, London: Mechanical Engineering Publications, 1991.
- [33] Ohashi Y., Kawai M., Kaito T.: Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial non-proportional cyclic stressing at elevated temperature. *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, 107, 101-109, 1985.
- [34] Tanaka E., Murakami S., Ooka M.: Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity. *Acta Mech.*, 57, 167-182, 1985.
- [35] Korbela A., Bochniak W.: The structure based design of metal forming operations. *J. Mater. Proc. Technology*, 53, 229, 1995.
- [36] Bochniak W., Korbela A., Szyndler R.: Innovative solutions for metal forming. *Proc. Inter. Conf. MEFORM 2001 – Herstellung von Rohren und Profilen*, Institut für Metallformung Tagungsband, 239, Freiberg/Riesa 2001.
- [37] Korbela A., Bochniak W.: Method of plastic forming of materials. *U.S. Patent No 5, 737-959*, 1998.
- [38] Kowalewski Z.L.: *Kierunki i perspektywy rozwoju badań wytrzymałościowych*. Wydawnictwo ITS, Warszawa, 2008.
- [39] Kolsky H.: „An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading”. *Proc. Phys. Soc. London*, 62B, 676, 1949.
- [40] Lindholm U.S.: „Some Experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar”. *J. Mech. Phys. Solids*, 12 (5), 317, 1964.
- [41] Dharan, C.K.M., Hauser, F.E.: „Determination of Stress – Strain Characteristic at Very High Strain Rates”, *Experimental Mechanics*, 10, 370, 1970.
- [42] ABOU-SAYED S., CLIFTON R.J., HERMANN L.: The oblique plate impact experiment. *Exp. Mech.*, v. 16, 127, 1976.
- [43] Malinowski J.Z., Dietrich L., Kruszka L., Kowalewski Z.L.: Raport projektu badawczego KBN Nr 7 T07A 02118 pt. Opracowanie doświadczalnej metody badania lepkoplastycznych własności metali w zakresie bardzo wysokich prędkości odkształcenia $10\ 000 < \dot{\epsilon} < 100\ 000\ 1/s$, 2002.
- [44] Gorham, D. A.: „Measurement of Stress-Strain Properties of Strong Metals at Very High Rates of Strain”. *Proc. Conf. On Mech. Prop. At High Rates Strain*, Conf. Ser. No. 47, Oxford, 16, March 1979.

Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane w innych czasopismach ani materiałach konferencji, chyba, że publikacja jest zamawiana przez redakcję. Artykuł przekazany do redakcji nie może być wcześniej opublikowany w całości lub części w innym czasopiśmie, ani równocześnie przekazany do opublikowania w nim. Fakt nadesłania pracy do redakcji uważa się za jednoznaczny z oświadczeniem Autora, że warunek ten jest spełniony.

Przed publikacją Autorzy otrzymają do podpisania umowę z Wydawnictwem SIGMA-NOT Spółka z o.o. o przeniesieniu praw autorskich na wyłączność wydawcy, umowę licencyjną lub umowę o dzieło – do wyboru Autora. Ewentualną rezygnację z honorarium Autor powinien przesłać w formie oświadczenia (z numerem NIP, PESEL i adresem).

Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje powinny stanowić własny dorobek Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania.

Z chwilą otrzymania artykułu przez redakcję następuje przeniesienie praw autorskich na Wydawcę, który ma odtąd prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i zwielokrotniania dowolną techniką, w tym elektroniczną oraz rozpowszechniania dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.

Redakcja nie zwraca materiałów niezamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów i do dokonywania streszczeń. Redakcja nie odpowiada za treść materiałów reklamowych.