

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **204561**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **359943**

(51) Int.Cl.
G01N 3/32 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **30.04.2003**

(54) **Sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
02.11.2004 BUP 22/04

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
29.01.2010 WUP 01/10

(73) Uprawniony z patentu:

**Polska Akademia Nauk Instytut
Podstawowych Problemów
Techniki, Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**Grzegorz Socha, Warszawa, PL
Lech Dietrich, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

**Budziński Sławomir, Rzecznik Patentowy,
JAN WIERZCHOŃ & PARTNERZY, BIURO
PATENTÓW I ZNAKÓW TOWAROWYCH**

PL 204561 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, w szczególności określania stopnia uszkodzenia na podstawie analizy nieliniowej odpowiedzi materiału konstrukcyjnego na cykliczne obciążenie.

Obciążenia eksploatacyjne mogą być monotonicznie rosnące, cyklicznie zmienne lub stałe. Obciążenia cyklicznie zmienne prowadzą do zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych, a długotrwałe obciążenia stałe wywołują pełzanie materiałów konstrukcyjnych, przy czym intensywność pełzania zależy od zakresu obciążeń i od temperatury.

Wszystkie rodzaje obciążeń eksploatacyjnych generują uszkodzenia struktury materiału konstrukcyjnego, a rozwój tych uszkodzeń prowadzi do degradacji właściwości mechanicznych materiału, co w konsekwencji może być przyczyną krytycznego zniszczenia elementów maszyn czy konstrukcji inżynierskich. Rozwój uszkodzeń determinuje zatem żywotność maszyn i konstrukcji inżynierskich i jest jednym z najważniejszych czynników, które muszą być brane pod uwagę przy projektowaniu tych obiektów.

W procesie kumulacji uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych można wyróżnić trzy fazy: inicjacja wad struktury materiału, stopniowy wzrost wad struktury i łączenie się ich w pęknięcia oraz tzw. pęknięcie dominujące prowadzące nieuchronnie do zniszczenia elementu konstrukcyjnego.

Mechanizmy uszkodzeń i degradacji właściwości mechanicznych materiałów są różnorodne dla różnych typów i zakresów obciążeń. Zniszczenie materiałów konstrukcyjnych jest wynikiem lokalnych odkształceń plastycznych związanych z ruchem dyslokacji, segregacją pierwiastków i węglików, wydzieleniami i wtrąceniami na granicach ziaren, procesami dyfuzyjnymi, przemianami fazowymi i innymi zmianami strukturalnymi powodującymi spiętrzenia naprężeń i lokalne obszary uplastycznienia, a w konsekwencji inicjującymi rozwój procesu uszkodzeń.

Rozwój uszkodzeń i degradacja cech wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych w trakcie eksploatacji stanowi od lat istotny problem praktyki inżynierskiej. Trudność zmierzenia stopnia uszkodzenia materiału pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych jest związana z brakiem dobrze określonej mierzalnej miary uszkodzenia, z lokalnym charakterem procesu uszkodzeń i z różnymi mechanizmami generacji uszkodzeń związanymi z różnymi rodzajami obciążeń i różnymi warunkami eksploatacyjnymi.

Najbardziej rozpowszechnionymi w praktyce inżynierskiej metodami oceny stopnia uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych są: metoda emisji akustycznej czy analizy drgań, metody magnetyczne, metody elektryczne w tym efektywna metoda prądów wirowych, metody termografii, różne odmiany metod radiologicznych i ultradźwiękowych oraz różne metody optyczne. Większość z tych metod jest wykorzystywana jako narzędzie defektoskopii do wykrywania pęknięć i wad materiałowych.

Znane są różne bezpośrednie i pośrednie doświadczalne sposoby badania rozwoju uszkodzeń materiałów wykorzystujące metody optyczne, obserwacje zmian pola elektrycznego, magnetycznego, temperatury lub właściwości mechanicznych (np. modułu sprężystości, gęstości).

Niektóre z metod badania uszkodzeń opartych o obserwacje zmian właściwości mechanicznych są znane z monografii J. Lemaitre, pt. „Kurs mechaniki uszkodzeń”, Springer-Verlag, Berlin 1996 r. Jednakże nie mają one charakteru uniwersalnego i są dobierane w zależności od badanego okresu rozwoju uszkodzeń. Inne techniki pomiarowe stosuje się do obserwacji propagacji pojedynczej szczeliny, a inne do oceny stopnia uszkodzeń struktury materiału.

Przegląd różnych miar uszkodzenia został ujawniony w artykule L. Yang i A. Fatemi, pt. „Przegląd literatury mechanizmów kumulacji zniszczenia zmęczeniowego i parametrów kwalifikujących”, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 26, Nr 2, 1998 r, str. 89 -100.

Z artykułu A. Fatemi i L. Yang, pt. „Teoria kumulacyjnego zniszczenia zmęczeniowego i przewidywania trwałości: Przegląd stanu wiedzy dla materiałów jednorodnych”, International Journal Fatigate, Vol. 20, Nr 1, 1998 r. str. 9 - 34, jest znany sposób definiowania parametru uszkodzenia na podstawie rozwoju nieliniowej odpowiedzi materiału przy cyklicznym obciążaniu o stałej amplitudzie, a zwłaszcza na podstawie pomiaru niesprężystych odkształceń generowanych w cyklu obciążenia.

Sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, według wynalazku polega na tym, że dla umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej próbki wyciętej z uszkodzonego materiału konstrukcyjnego i poddanej cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie naprężenia i o ustalonym poziomie średnim wyznacza się początkową wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta \varepsilon_{ii}^i$ próbki uszkodzonego materiału konstrukcyjnego w co

najmniej jednym cyklu obciążenia. Następnie próbkę wyciętą z nieuszkodzonego materiału konstrukcyjnego poddaje się takiemu samemu cyklicznemu obciążeniu i wyznacza się wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta\varepsilon_0^i$ odpowiadającą początkowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego dla tego samego cyklu obciążeń oraz wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta\varepsilon_f^i$ odpowiadającą końcowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego. Na podstawie wyników tych pomiarów wylicza się wartość parametru $D = (\Delta\varepsilon_u^i - \Delta\varepsilon_0^i) / (\Delta\varepsilon_f^i - \Delta\varepsilon_0^i)$ reprezentującego stopień uszkodzenia materiału w badanym punkcie konstrukcji.

Drugi wariant sposobu określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, według wynalazku polega na tym, że dla umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej próbki wyciętej z uszkodzonego materiału konstrukcyjnego i poddanej cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie odkształcenia i o ustalonym poziomie średnim wyznacza się początkową wartość amplitudy naprężenia $\Delta\sigma_u$ próbki materiału uszkodzonego w co najmniej jednym cyklu obciążenia. Następnie próbkę wyciętą z nieuszkodzonego materiału konstrukcyjnego poddaje się takiemu samemu cyklicznemu obciążeniu i wyznacza się wartość amplitudy naprężeń $\Delta\sigma_0$ próbki odpowiadającą początkowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego dla tego samego cyklu obciążeń oraz wartość amplitudy naprężeń $\Delta\sigma_f$ odpowiadającą końcowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego. Na podstawie wyników tych pomiarów wylicza się wartość parametru $D = (\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_f) / (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_f)$ reprezentującego stopień uszkodzenia materiału w badanym punkcie konstrukcji.

Korzystnie, próbkę materiału uszkodzonego wycina się z najbardziej uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji, w kierunku maksymalnej amplitudy eksploatacyjnego naprężenia głównego.

Korzystnie, próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z takiego fragmentu badanej konstrukcji, dla którego obciążenia eksploatacyjne nie przekroczyły trwałej wytrzymałości zmęczeniowej.

Korzystnie, próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z materiału niepoddawanego obciążeniom eksploatacyjnym, o parametrach identycznych, pod względem składu chemicznego i procesu wytwórczego, do parametrów uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji.

Zaletą sposobu określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego jest możliwość ciągłej rejestracji rozwoju uszkodzeń na każdym etapie ich występowania. Sposób ten umożliwia analizę procesu zniszczenia i degradacji właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w trakcie ich eksploatacji.

Przedmiot wynalazku w przykładach wykonania jest zobrazowany na rysunku, na którym fig. 1A przedstawia przebieg cyklicznego obciążenia osiowego próbki przy stałej amplitudzie naprężenia w funkcji czasu; fig. 1B - przebieg zmian odkształceń próbki materiału w funkcji czasu, fig. 2A - przebieg cyklicznego obciążenia osiowego próbki przy stałej amplitudzie odkształcenia w funkcji czasu, fig. 2B - przebieg zmian naprężeń osiowych próbki materiału w funkcji czasu, fig. 3 - przebieg naprężenia w funkcji odkształcenia w jednym cyklu, fig. 4 - przebieg zmian różnicy odkształceń niesprężystych przy stałej amplitudzie naprężenia, w funkcji liczby cykli, dla próbki wyciętej z materiału bez uszkodzeń eksploatacyjnych, na wykresie w skali podwójnie logarytmicznej, zaś fig. 5 przedstawia przebieg zmian różnicy odkształceń niesprężystych przy stałej amplitudzie naprężenia, w funkcji liczby cykli, dla próbki wyciętej z materiału z uszkodzeniami eksploatacyjnymi, na wykresie w skali podwójnie logarytmicznej.

Ocena stopnia uszkodzeń generowanych obciążeniami eksploatacyjnymi w materiałach konstrukcyjnych, odbywa się na podstawie porównania lokalnie mierzonego (uśrednionego na wybranej płaszczyźnie próbki) rozwoju nieliniowej odpowiedzi materiału z uszkodzeniami i materiału bez uszkodzeń, przy takim samym cyklicznym obciążaniu o stałej amplitudzie naprężenia i ustalonym poziomie średnim. Ta nieliniowa odpowiedź materiału określana jest na podstawie pomiaru zmian odkształcenia niesprężystego w cyklu obciążenia.

Do badań stopnia uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych wykorzystuje się standardową próbkę klepsydryczną z przewężeniem przekroju poprzecznego w środkowej pomiarowej części próbki, np. według normy ASTM E 466-96 (Norma czynnościowa dla przeprowadzania badań zmęczeniowych przy stałej amplitudzie siły osiowej dla materiałów metalicznych), 1997 r.

Użycie próbki klepsydrycznej zapewnia rozwój procesu uszkodzenia w najmniejszym przekroju próbki, a co za tym idzie lokalny pomiar stopnia uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych. W trakcie badań wykonywany jest lokalny pomiar odkształcenia materiału, za pomocą urządzenia mierzącego zmianę średnicy części pomiarowej próbki, w miejscu gdzie jej powierzchnia przekroju jest najmniejsza. Na podstawie zmian średnicy próbki oblicza się jej odkształcenia poprzeczne, a następnie z wartości współczynnika skurczu poprzecznego (liczby Poisson'a) można wyznaczyć wartość odkształcenia wzdłużnego. Określone w ten sposób odkształcenia mają charakter lokalny, ponieważ dotyczą jednego przekroju próbki, w którym koncentruje się rozwój uszkodzeń. Z drugiej strony, odkształcenia są uśrednione po całym przekroju, ponieważ są wyznaczone na podstawie zmiany średnicy próbki.

Określanie stopnia uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych przeprowadza się za pomocą maszyny wytrzymałościowej, umożliwiającej realizację obciążeń cyklicznych, z zapewnieniem utrzymania stałej wartości zakresu naprężenia lub odkształcenia w cyklu obciążenia. Podczas pomiarów próbka materiału jest zamocowana w maszynie wytrzymałościowej w sposób zapewniający osiowość obu części chwytowych maszyny i uniemożliwiający powstawanie sił bocznych, zarówno w chwili mocowania jak i podczas obciążania.

Pomiary przeprowadza się dla co najmniej dwóch próbek - jednej wyciętej z materiału z uszkodzeniami i drugiej wyciętej z tego samego materiału bez uszkodzeń. Próbkę pierwszą wycina się z najbardziej narażonego na uszkodzenia fragmentu konstrukcji, w kierunku maksymalnej amplitudy naprężenia głównego, generowanego w trakcie eksploatacji. Próbkę drugą wycina się z fragmentu konstrukcji narażonego na minimalne obciążenia eksploatacyjne, a tym samym pozbawionego uszkodzeń, względnie z materiału nowego niepoddanego obciążeniom eksploatacyjnym, przy czym materiał ten musi być identyczny pod względem składu chemicznego i procesu wytwórczego, jak materiał uszkodzony.

Obie próbki mocuje się kolejno na maszynie wytrzymałościowej i poddaje się je takim samym osiowym obciążeniom cyklicznym, o ustalonej wartości amplitudy i poziomie średnim, aż do zniszczenia, to jest do oddzielenia dwóch części próbki. Pomiar może być wykonany przy kontrolowanych naprężeniach, albo przy kontrolowanych odkształceniach.

Przy pierwszym rodzaju badań w maszynie wytrzymałościowej próbka poddawana jest cyklicznemu obciążaniu ze stałą amplitudą i wartością średnią siły osiowej, przeliczanych na stałą wartość naprężenia nominalnego odniesionego do początkowego przekroju próbki i stałą wartością naprężenia średniego. Przebieg tego typu obciążenia jest przedstawiony na fig. 1A w postaci zmian naprężenia osiowego σ w funkcji czasu t . Amplituda naprężenia σ_a i naprężenie średnie σ_m są stałe w trakcie całego pomiaru, przy czym zaleca się prowadzenie badań przy cyklach symetrycznych, dla których $\sigma_m = 0$.

Odpowiedź materiału wyznacza się z rejestrowanego dla wybranych cykli przebiegu zmian odkształceń ϵ próbki w funkcji czasu t (fig. 1B). Odkształcenia $\epsilon = \Delta r/r$ określa się na podstawie pomiarów zmiany średnicy badanej próbki w miejscu jej przewężenia. Amplituda odkształcenia ϵ zwiększa się w kolejnych cyklach obciążenia na skutek rozwoju uszkodzeń struktury materiału.

Pomiary można też wykonywać przy cyklicznym obciążaniu ze stałą amplitudą odkształcenia ϵ_a i stałą wartością odkształcenia średniego ϵ_m , w trakcie całego pomiaru (fig. 2A), przy czym zaleca się prowadzenie pomiarów przy cyklach symetrycznych, dla których $\epsilon_m = 0$.

Odpowiedź materiału wyznacza się z rejestrowanego przebiegu zmian siły osiowej przeliczonej na naprężenia σ , w miejscu przewężenia próbki, w funkcji czasu t (fig. 2A). Amplituda naprężeń osiowych σ maleje w kolejnych cyklach obciążenia na skutek rozwoju uszkodzeń struktury materiału.

Zarejestrowane zmiany naprężenia i odkształcenia w postaci parametrycznej, jako wykresy $\sigma = \sigma(t)$ i $\epsilon = \epsilon(t)$, umożliwiają wyznaczenie zależności $\sigma = \sigma(\epsilon)$ w wybranych cyklach obciążenia. Na fig. 3 jest przedstawiony, przykładowo, wykres zależności $\sigma = \sigma(\epsilon)$ dla jednego cyklu obciążenia. Z tego wykresu wyznacza się różnicę odkształceń $\Delta\epsilon$ w danym cyklu i odpowiadającą jej różnicę odkształceń niesprężystych $\Delta\epsilon^I$ dla pierwszego sposobu obciążania ze stałą amplitudą naprężenia, zaś w przypadku drugiego sposobu obciążania wyznacza się różnicę naprężeń $\Delta\sigma$ w danym cyklu.

Różnice odkształceń niesprężystych $\Delta\epsilon^I$ (w przypadku pierwszego sposobu obciążania ze stałą amplitudą naprężenia) oraz różnice naprężeń $\Delta\sigma$ w danym cyklu (w przypadku drugiego sposobu obciążania ze stałą amplitudą odkształcenia), przedstawia się na wykresach w skali podwójnie logarytmicznej, w funkcji kolejnych cykli.

Na fig. 4 jest przedstawiony charakterystyczny przebieg zmian różnicy odkształceń niesprężystych $\log \Delta\epsilon^I$ w funkcji kolejnych cykli $\log N$, dla próbki wyciętej z materiału nowego, a więc bez uszko-

dzeń powstałych w wyniku obciążeń eksploatacyjnych, dla pierwszego rodzaju obciążeń cyklicznych przy stałej amplitudzie naprężenia.

Na fig. 5 jest przedstawiony charakterystyczny przebieg zmian różnicy odkształceń niesprężystych $\log \Delta \varepsilon^i$ w funkcji kolejnych cykli $\log N$ dla próbki wyciętej z materiału z uszkodzeniami powstałymi pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, a więc wyciętej z najbardziej narażonego na uszkodzenia fragmentu konstrukcji, dla pierwszego rodzaju obciążeń cyklicznych przy stałej amplitudzie naprężenia.

Wyznaczenie na podstawie wykonanych pomiarów przebiegów zmian różnicy odkształceń niesprężystych $\Delta \varepsilon^i$ dla próbki wyciętej z materiału bez uszkodzeń powstałych w wyniku obciążeń eksploatacyjnych i dla próbki wyciętej z materiału z uszkodzeniami powstałymi pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych dla pierwszego rodzaju obciążeń cyklicznych przy stałej amplitudzie naprężenia, umożliwi wyznaczenie wartości parametru D reprezentującego stopień uszkodzenia materiału dla badanego miejsca konstrukcji. Wartość tego parametru, zwanego parametrem uszkodzenia wylicza się z zależności:

$$D = \frac{\Delta \varepsilon_u^i - \Delta \varepsilon_0^i}{\Delta \varepsilon_f^i - \Delta \varepsilon_0^i} \quad (1)$$

W podanym wzorze $\Delta \varepsilon_u^i$ (fig. 5) oznacza początkową wartość różnicy odkształceń niesprężystych w cyklu dla próbki wyciętej z materiału z uszkodzeniami powstałymi pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, wyznaczoną w pierwszych cyklach obciążenia, $\Delta \varepsilon_0^i$ (fig. 4) oznacza początkową wartość różnicy odkształceń niesprężystych w cyklu dla próbki z materiału nieuszkodzonego, wyznaczoną w początkowej fazie cyklicznego obciążania, przed osiągnięciem liczby cykli N_0 , przy której rozpoczyna się faza stabilnego rozwoju uszkodzeń związana ze wzrostem prędkości uszkodzeń, zaś $\Delta \varepsilon_f^i$ (fig. 4) oznacza końcową wartość różnicy odkształceń niesprężystych wyznaczoną w końcowej fazie cyklicznego obciążania przy liczbie cykli N_f , przy której kończy się faza stabilnego rozwoju uszkodzeń, a następuje gwałtowny wzrost prędkości uszkodzeń związany z powstaniem w materiale szczeliny dominującej, który to moment jest traktowany jako moment zniszczenia materiału konstrukcyjnego. Wartość $\Delta \varepsilon_0^i$ odpowiada początkowi okresu stabilnego rozwoju uszkodzeń obserwowanego od cyklu N_0 , zdefiniowanego przez wyraźną zmianę prędkości wzrostu uszkodzeń (fig. 4). Wartość $\Delta \varepsilon_f^i$ odpowiada końcowi okresu stabilnego rozwoju uszkodzeń obserwowanego od cyklu N_f , zdefiniowanego przez drugą wyraźną zmianę prędkości wzrostu uszkodzeń (fig. 4). Gwałtowne zwiększenie prędkości wzrostu uszkodzeń, po przekroczeniu liczby cykli N_f , wynika z utworzenia się jednej dominującej szczeliny, która nieuchronnie prowadzi do krytycznego zniszczenia badanego fragmentu konstrukcji.

Określenie stopnia uszkodzenia materiału jest związane z przedziałem stabilnego wzrostu uszkodzeń dla liczby cykli $N_f > N > N_0$. Wartość parametru uszkodzenia D określa stopień degradacji materiału konstrukcyjnego w skali od 0 do 1, przy czym 0 odpowiada materiałowi nieuszkodzonemu, a 1 odpowiada materiałowi zniszczonemu.

Stopień uszkodzenia można też wyznaczyć na podstawie wyników pomiarów według drugiego schematu obciążenia przy stałej amplitudzie odkształcenia ε_a (fig. 2). Odpowiedź materiału będzie wówczas określona w naprężeniach σ . W miarę rozwoju uszkodzenia materiału różnica naprężeń σ_a w jednym cyklu będzie malała pod wpływem pojawiających się w materiale wad strukturalnych. Jakkolwiek procedura badawcza będzie w tym przypadku analogiczna do opisanej, to we wzorze (1) wartości różnic amplitud odkształcenia niesprężystego $\Delta \varepsilon$ zajmą wartości różnic amplitud naprężenia $\Delta \sigma$:

$$D = \frac{\Delta \sigma_u - \Delta \sigma_f}{\Delta \sigma_0 - \Delta \sigma_f} \quad (2)$$

W podanym wzorze $\Delta \sigma_u$ oznacza początkową wartość różnicy naprężeń w cyklu obciążenia dla próbki wyciętej z materiału z uszkodzeniami powstałymi pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, $\Delta \sigma_0$ oznacza początkową wartość różnicy naprężeń w cyklu obciążenia dla próbki z materiału nieuszkodzonego wyznaczoną w początkowej fazie cyklicznego obciążania przed osiągnięciem liczby cykli N_0 , przy której rozpoczyna się faza stabilnego rozwoju uszkodzeń związana ze wzrostem prędkości uszkodzeń, zaś $\Delta \sigma_f$ oznacza końcową wartość różnicy naprężeń wyznaczoną w końcowej fazie cyklicznego obciążania przy liczbie cykli N_f , przy której kończy się faza stabilnego rozwoju uszkodzeń, co objawia się gwał-

townym wzrostem prędkości uszkodzeń związanym z powstaniem w materiale szczeliny dominującej, który to moment jest traktowany jako moment zniszczenia materiału konstrukcyjnego.

Reasumując, parametr uszkodzenia jest definiowany na podstawie pomiaru odkształceń niesprężystych próbki lub zmiany naprężeń próbki przy cyklicznym obciążaniu o stałej amplitudzie. Odkształcenia niesprężyste są związane z lokalnymi obszarami plastycznymi wokół wad struktury i pęknięć.

Przyjęcie jako miary uszkodzenia lokalnych odkształceń niesprężystych w jednym cyklu obciążenia 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 pęknięcia i wady struktury. Miara ta umożliwi również kwalifikację i ocenę wpływu różnorodnych mechanizmów i zmian strukturalnych na rozwój uszkodzeń prowadzących do zniszczenia. Punktem wyjścia takiej kwalifikacji jest stwierdzenie, że zmiany strukturalne prowadzące do powstania lokalnych odkształceń trwałych (niesprężystych) inicjują powstanie wad i pęknięć prowadzących do rozwoju procesu zniszczenia materiału.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, w którym umieszczoną w maszynie wytrzymałościowej próbkę poddaje się cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie naprężenia i o ustalonym poziomie średnim, **znamienny tym**, że dla umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej próbki wyciętej z uszkodzonego materiału konstrukcyjnego i poddanej cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie naprężenia i o ustalonym poziomie średnim wyznacza się początkową wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta\varepsilon_u^i$ próbki uszkodzonego materiału konstrukcyjnego w co najmniej jednym cyklu obciążenia, następnie w maszynie wytrzymałościowej umieszcza się próbkę wyciętą z nieuszkodzonego materiału konstrukcyjnego poddaje się takiemu samemu cyklicznemu obciążeniu i wyznacza się wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta\varepsilon_0^i$ odpowiadającą początkowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego dla tego samego cyklu obciążeń oraz wartość amplitudy odkształcenia niesprężystego $\Delta\varepsilon_f^i$ odpowiadającą końcowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego, po czym, na podstawie wyników tych pomiarów, wylicza się wartość parametru $D = (\Delta\varepsilon_u^i - \Delta\varepsilon_0^i) / (\Delta\varepsilon_f^i - \Delta\varepsilon_0^i)$ reprezentującego stopień uszkodzenia zmęczeniowego materiału w badanym punkcie konstrukcji.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że próbkę materiału uszkodzonego wycina się z najbardziej uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji, w kierunku maksymalnej amplitudy eksploatacyjnego naprężenia głównego.

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z takiego fragmentu badanej konstrukcji, dla którego obciążenia eksploatacyjne nie przekroczyły trwałej wytrzymałości zmęczeniowej.

4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z materiału niepoddawanego obciążeniom eksploatacyjnym, o parametrach identycznych, pod względem składu chemicznego i procesu wytwórczego, do parametrów uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji.

5. Sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, w którym umieszczoną w maszynie wytrzymałościowej próbkę poddaje się cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie odkształcenia i o ustalonym poziomie średnim, **znamienny tym**, że dla umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej próbki wyciętej z uszkodzonego materiału konstrukcyjnego i poddanej cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie odkształcenia i o ustalonym poziomie średnim wyznacza się początkową wartość amplitudy naprężenia $\Delta\sigma_u$ próbki materiału uszkodzonego w co najmniej jednym cyklu obciążenia, następnie próbkę wyciętą z nieuszkodzonego materiału konstrukcyjnego poddaje się takiemu samemu cyklicznemu obciążeniu i wyznacza się wartość amplitudy naprężeń $\Delta\sigma_0$ próbki odpowiadającą początkowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego dla tego samego cyklu obciążeń oraz wartość amplitudy naprężeń $\Delta\sigma_f$ odpowiadającą końcowi okresu stabilnego wzrostu uszkodzenia zmęczeniowego próbki z materiału nieuszkodzonego, po czym, na podstawie wyników tych pomiarów,

wylicza się wartość parametru $D = (\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_f) / (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_f)$ reprezentującego stopień uszkodzenia zmęczeniowego materiału w badanym punkcie konstrukcji.

6. Sposób według zastrz. 5, **znamienny tym**, że próbką materiału uszkodzonego wycina się z najbardziej uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji, w kierunku maksymalnej amplitudy eksploatacyjnego naprężenia głównego.

7. Sposób według zastrz. 5, **znamienny tym**, że próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z takiego fragmentu badanej konstrukcji, dla którego obciążenia eksploatacyjne nie przekroczyły trwałej wytrzymałości zmęczeniowej

8. Sposób według zastrz. 5, **znamienny tym**, że próbkę materiału nieuszkodzonego wycina się z materiału niepoddanego obciążeniom eksploatacyjnym, o parametrach identycznych, pod względem składu chemicznego i procesu wytwórczego, do parametrów uszkodzonego fragmentu badanej konstrukcji.

Rysunki

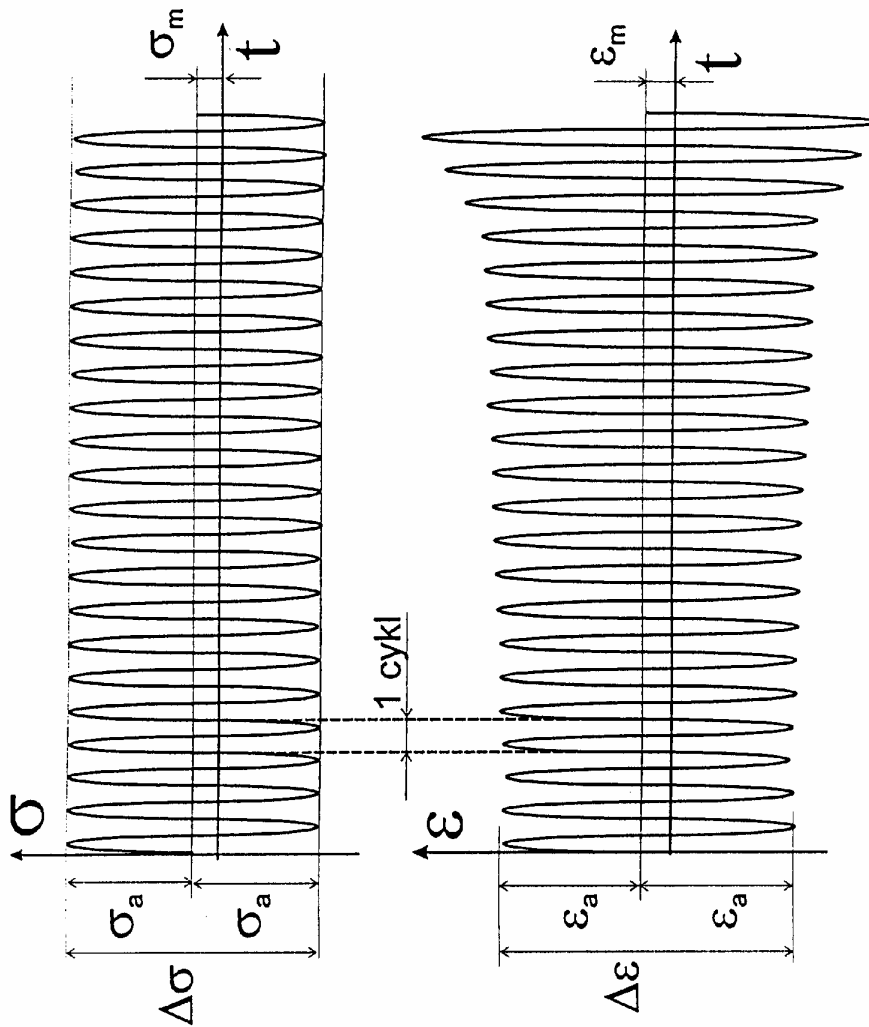


Fig. 1A

Fig. 1B

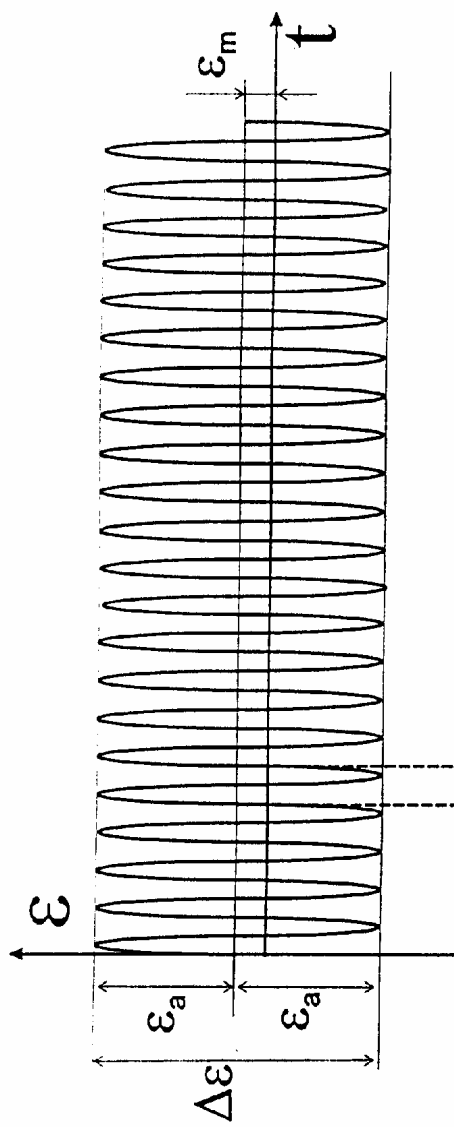


Fig. 2A

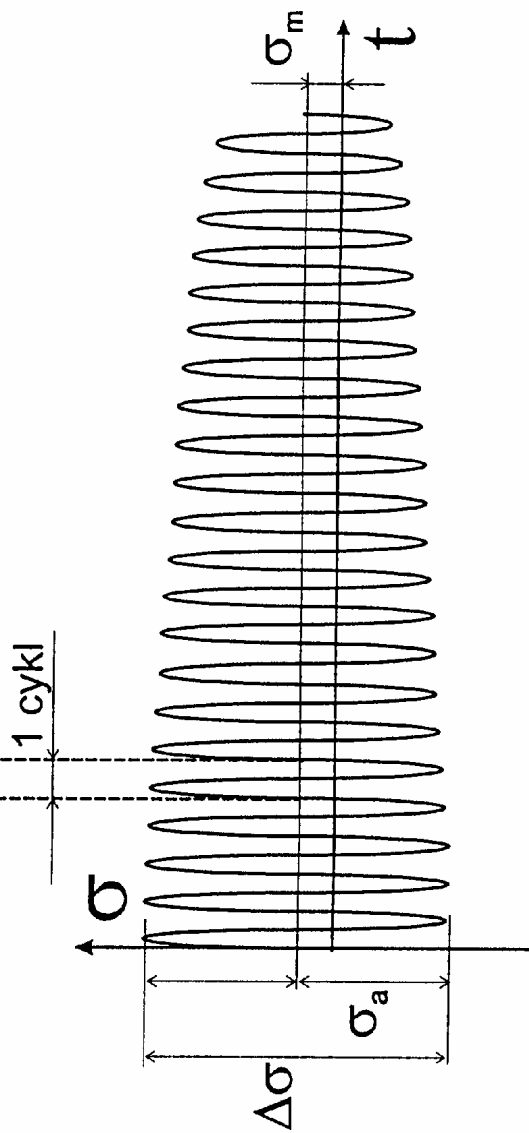


Fig. 2B

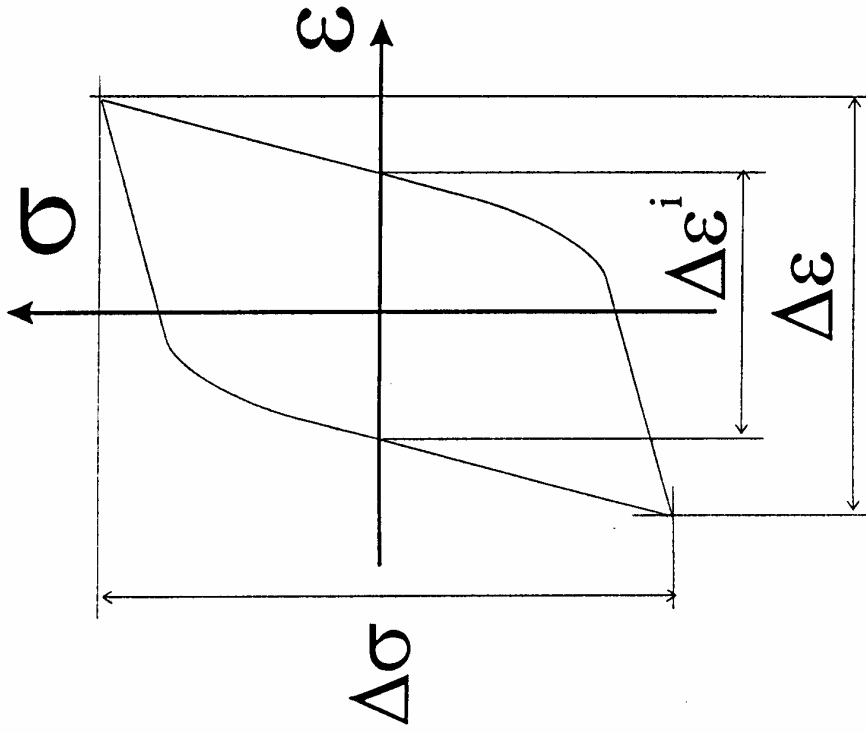


Fig. 3

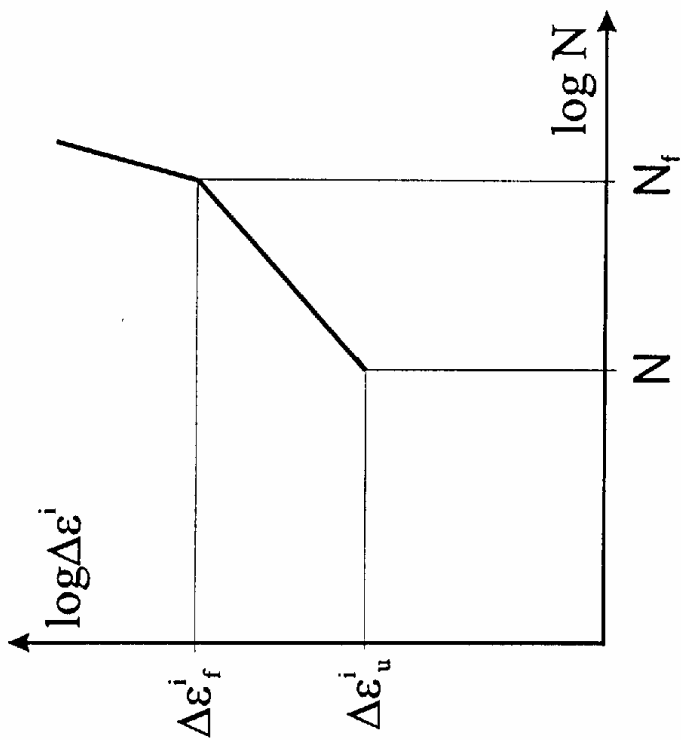


Fig. 5

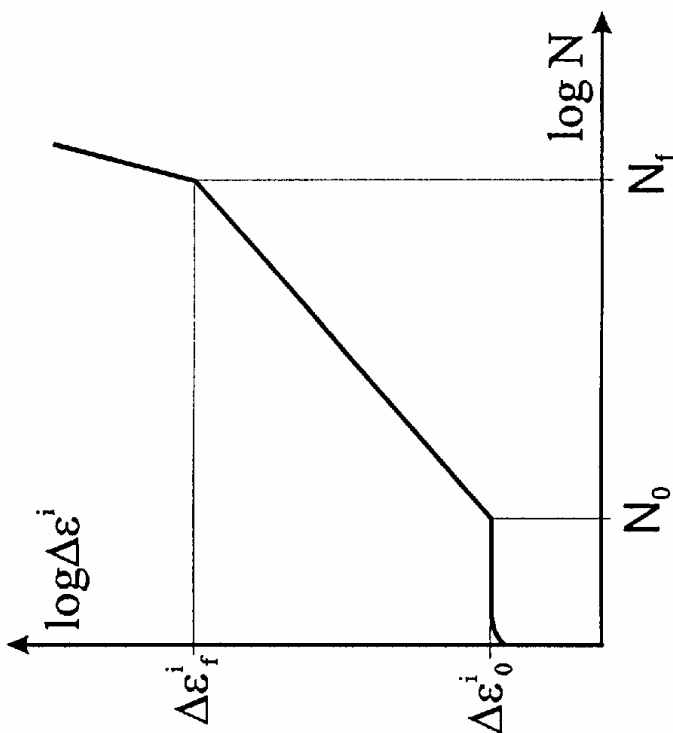


Fig. 4