

Parametry uszkodzenia w procesie zmęczenia oraz ich miary

Damage parameters under fatigue and their measures

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 wyniki, istotne z naukowego punktu widzenia, dla wybranych metali otrzymał 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 rozwój w dziedzinie lotnictwa wyrażany wzrostem prędkości samolotów przy jednoczesnym obniżeniu ich masy, czy też postęp w energetyce mierzony na przykład wzrostem temperatury pracy urządzeń produkujących energię elektryczną. Obserwowany postęp techniczny wymusza prowadzenie badań zmęczeniowych na coraz wyższym poziomie, gdyż wielokrotnie od efektów tych testów uzależnione mogą być bezpieczeństwo ludzi. Współczesne samoloty pasażerskie mogą być eksploatowane, o ile prowadzone są równoległe symulacyjne badania zmęczeniowe, których wyniki pozwalają na bezpieczne użytkowanie 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.

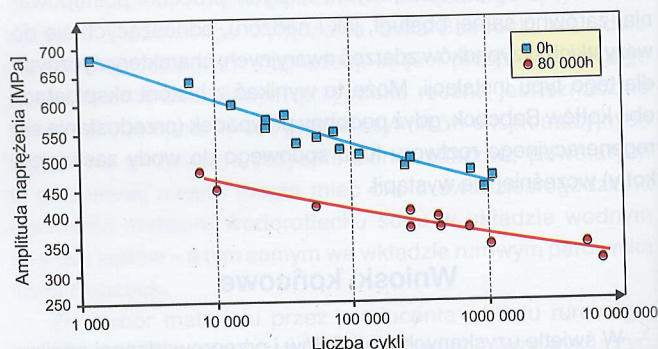
Oba wymienione kierunki rozwijają się obecnie równolegle. Jednak nawet pobieżne ich omówienie daleko wykracza poza ramy tego artykułu i stąd zainteresowanych tymi zagadnieniami odsyła się do pozycji literaturowych ujętych w spisie umieszczonym na końcu pracy [np. 1–14].

Ocena uszkodzenia uszkodzeń zmęczeniowych metodami niszczącymi

W przypadku badań zmęczeniowych testy niszczące dla oszacowania stopnia uszkodzenia można prowadzić porównując wykresy Wöhlera reprezentujące liczbę cykli koniecznych do zniszczenia przy zadanych wartościach amplitudy

naprężenia dla materiału w stanie dostawy i po eksploatacji. Wyniki takich badań ilustruje rysunek 1 dla stali 13HMF. Jak widać, krzywe te wyraźnie się różnią, dając jednocześnie możliwość oceny spadku wytrzymałości zmęczeniowej wskutek zastosowanej historii obciążenia. Niestety taki sposób oceny degradacji materiałów poddawanych zmęczeniu jest za bardzo kosztowny i wymaga stosunkowo dużego nakładu czasu na realizację badań.

Inną możliwością oceny stanu degradacji materiałów poddawanych zmęczeniu może być wykonywanie standardowych prób rozciągania materiału poddanego wcześniej zmęczeniu o różnym stopniu zaawansowania. Podejście takie pozwala zbadać, jak wpływa liczebność cykli w ustalonych warunkach obciążenia na podstawową charakterystykę materiałową i parametry na jej podstawie określane. Zwykle taki program badawczy zawiera w pierwszej części obciążenie zmęczeniowe, które zadawane jest w celu wprowadzenia uszkodzenia, w drugiej z kolei przeprowadzane są próby rozciągania. Badania takie wykonano w IPPT dla stali 13HMF i P91 stosując próbki płaskie. Obciążenie realizowano przy sterowaniu sygnałem naprężenia o amplitudzie 350 MPa (stal P91) i 230 MPa (stal 13HMF) dla liczby cykli od 10 000 do 500 000. Zestawienie przebiegów naprężenie-odkształcenie (rys. 2), dla rozciągania wskazuje na niewielkie różnice między charakterystykami. W efekcie zmiany właściwości mechanicznych stali w postaci umownej granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie są małe. Wynika stąd wniosek, że tego typu metodyka jest stanowczo za mało wrażliwa i w zestawieniu z dużą pracochłonnością i wysokimi kosztami mało efektywna.



Rys. 1. Krzywe Wöhlera dla stali 13HMF przed (0h) i po eksploatacji (80 000h) [15]

Rodzaj miary uszkodzenia zmęczeniowego		Mechaniczne		Fizyczne		Metalograficzne	
Pęknięcia (długość, kształt, położenie)	Naprzężenia	Odkształcenia	Gęstość	Radiologiczne	Gęstość dyslokacji	Ruch dyslokacji	Segregacja
Holografia optyczna	Temnograficzne	Twardość	Sprężystość	Podatność	Energia odkształcenia	Prądy wrowe	Magnetyczne
							Anihilacja pozytonowa

Podzaje miar uszkodzenia w badaniach zmęczeniowych

Tabela 1

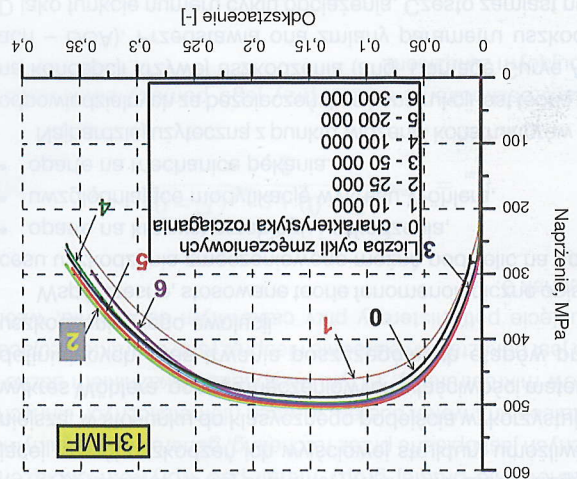
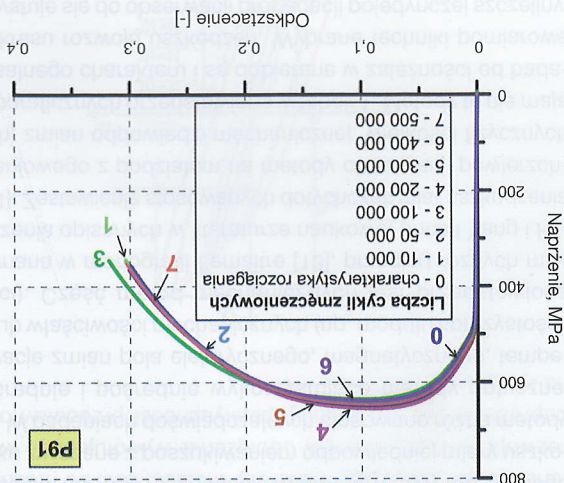
Obciążenie eksploatacyjne może wywołać jego niekontrolowany wzrost prowadzący do zniszczenia konstrukcji. Rozwój procesu zniszczenia zmęczeniowego związany jest z zarodkowaniem i wzrostem mikropeknięć. W pracach teoretycznych dotyczących zniszczenia zmęczeniowego przyjmowano więc miarę uszkodzenia zmęczeniowego związaną z wielkością mikropeknięć występujących w materiale. Najbardziej rozpowszechnioną koncepcją miary uszkodzenia materiału jest gęstość powierzchniowa mikropeknięć w reprezentatywnej jednostce objętości materiału (Kaczanow, 1958 [16]). Parametr uszkodzenia nie jest tu wielkością skalarną, ale zależy od kierunku. W związku z tym, koncepcja Kaczanowa została rozwinięta przez kolejnych badaczy, a w roku 1981 S. Murakami [17] wprowadził jako miarę uszkodzenia materiału tensor drugiego rzędu. Parametr uszkodzenia w tej postaci jest do dziś stosowany przez wielu badaczy. Wada tak zdefiniowanego parametru uszkodzenia jest jednak to, że nie daje się on zmierzyć żadną z znanych obecnie metod ięcego w badanym materiale. Doświadczalne określenie zmian miary uszkodzenia materiału w trakcie eksploatacji konstrukcji lub testów laboratoryjnych jest jednak warunkiem niezbędnym w przypadku przewidywania trwałości zmęczeniowej oraz oceny stopnia ryzyka związanego z dalszą, bezpieczną eksploatacją konstrukcji. W związku z tym, nadal trwają poszukiwania mierzalnej wielkości reprezentującej zniszczenie zmęczeniowe materiałów konstrukcyjnych.

Istotą procesu zniszczenia zmęczeniowego są zmiany zachodzące w strukturze materiału wywołane naprężeniami eksploatacyjnymi: ruch defektów sieci krystalicznej (poślizg dyslokacji, migracja wakansów), koncentracja tych defektów w miejscach, gdzie napotykają one przeszkody uniemożliwiające dalsze przeszczenie (granice ziaren, wtrącenia), formowanie tak zwanych trwałych pasm poślizgu (ang. Persistent Slip Band), a także inne procesy, takie jak na przykład transformacje fazowe wywołane naprężeniami lub temperaturą oraz procesy dyfuzyjne. Ostatcznym efektem wspomnianych zjawisk jest zarodkowanie i wzrost mikropeknięć, a w końcowej fazie procesu zniszczenia uformowane w materiale pęknięcia dominującego. Pęknięcia takie rozwija się następnie w elemencie konstrukcji aż do momentu, gdy osiągnie wielkość krytyczną. Po osiągnięciu krytycznej wielkości pęknięcia,

Wskaźniki i miary uszkodzenia zmęczeniowego

Obydwa wymienione wyżej podejścia mają zbyt wiele wad, aby mogły być powszechnie stosowane. Dlatego też stale prowadzone są poszukiwania nowych rozwiązań, które dawałyby lepszą ocenę stanu zaawansowania uszkodzenia zmęczeniowego. Aby ten efekt uzyskać, należy odpowiednio zdefiniować parametr uszkodzenia oparty na mierzalnych wskaźnikach jego rozwoju. Wybrane pozycje omówiono w następnym rozdziale artykułu.

Rys. 2. Charakterystyki stali 13HMF i P91 w stanie dostawy porównane z ich charakterystykami po różnej liczbie cykli zmęczeniowych



Badania rozwoju uszkodzeń materiałów były od samego początku związane z poszukiwaniem odpowiedniej miary uszkodzenia. W badaniach doświadczalnych stosowano różne metody bezpośrednio i pośrednio wykorzystujące metody optyczne, obserwacje zmian pola elektrycznego, magnetycznego, temperatury lub właściwości mechanicznych (np. modułu sprężystości, gęstości). Część metod mechanicznych jest przedstawiona i porównana w monografii Lemaitre [13], przegląd różnych miar uszkodzenia opisanych w literaturze naukowej podali Yang i Fatami [14]. Zestawienie stosowanych dotychczas miar uszkodzenia zmęczeniowego z podziałem na metody obserwacji powierzchniowych, zmian odpowiedzi mechanicznej, wielkości fizycznych i metalograficznych przedstawiono w tabeli 1. Metody te nie mają uniwersalnego charakteru i są dobierane w zależności od badanego okresu rozwoju uszkodzeń. Wybrane techniki pomiarowe wykorzystuje się do obserwacji propagacji pojedynczej szczeliny, a inne do oceny stopnia uszkodzeń struktury materiału.

Zestawienie stosowanych w literaturze naukowej miar uszkodzenia struktury materiału przedstawione w tabeli 1, wskazuje na aktualność problemu i różnorodność poszukiwań miary przydatnej nie tylko w badaniach naukowych, ale przede wszystkim w praktyce inżynierskiej. Część z tych miar ma bezpośredni związek z metodami defektoskopii i jest dostosowana głównie do wykrywania pustek i pęknięć (metody powierzchniowe, część metod fizycznych, jak na przykład techniki ultradźwiękowe). Wśród metod najbardziej rozpowszechnionych w zastosowaniach inżynierskich można wymienić metody emisji akustycznej czy analizy drgań, metody magnetyczne i metody elektryczne, w tym efektywną, jak na przykład metoda prądów wirowych, metody termografii, różne odmiany metod radiologicznych i ultradźwiękowych. Ponadto, powszechnie stosuje się metody optyczne zarówno do bezpośredniej obserwacji pęknięć oraz wad, jak i wizualizacji pola odkształceń na powierzchniach badanych elementów. Każda z tych metod ma inny zakres zastosowań i dotyczy różnych etapów procesu rozwoju uszkodzeń i zniszczenia oraz innych schematów obciążania i tym samym innych mechanizmów generowania się uszkodzeń. Sposoby te zaliczyć należy do metod pośrednich, w których ocenia się wpływ uszkodzeń struktury materiału na jego właściwości w określonym zakresie. Miary te umożliwiają co najwyżej względną ocenę zmian w materiale generowanych obciążeniami cyklicznymi i nie pozwalają na ocenę stanu uszkodzeń struktury materiału elementu konstrukcyjnego po określonym czasie eksploatacji.

Dobrze określona miara uszkodzeń struktury materiału wywołanych cyklicznymi obciążeniami eksploatacyjnymi ma kluczowe znaczenie dla monitorowania tego procesu w badaniach laboratoryjnych i w warunkach eksploatacyjnych oraz umożliwia dostatecznie wczesne wykrywanie niebezpiecznych stanów materiału. Właściwa, a przede wszystkim mierzalna miara uszkodzeń umożliwi obserwację zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń cyklicznych, dzięki czemu możliwe będzie doskonalenie przewidywania trwałości zmęczeniowej i zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Wyniki dotychczasowe opublikowane już w kilku renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym [5, 6, 18-23], potwierdzają poprawność przyjętej metodyki badań procesu uszkodzeń struktury materiału pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, dotyczącej śledzenia zmian parametrów odpowiedzialnych za cykliczną plastyczność oraz ratcheting.

Wyznaczenie nowej charakterystyki materiałów uwzględniającej rozwój uszkodzeń ich wyjściowej struktury umożliwia pełniejszą, w stosunku do klasycznego podejścia wykorzystującego wykres Wöhlera, ocenę zmęczeniowych właściwości materiałów, definiujących czas trwania poszczególnych etapów procesu uszkodzenia i jego ewolucji.

Współczesne, stosowane teorie fenomenologiczne opisu procesu uszkodzenia zmęczeniowego można podzielić na opisy:

- oparte na krzywej przebiegu uszkodzenia,
- uwzględniające modyfikację wykresu Wöhlera,
- oparte na mechanice pęknięcia.

Najbardziej użyteczną z punktu widzenia konstruktorów i służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo konstrukcji jest teoria oparta na koncepcji krzywej uszkodzenia (ang. Damage Curve Approach – DCA). Przedstawia ona zmiany parametru uszkodzenia D jako funkcję numeru cyklu obciążenia. Często zamiast numeru cyklu obciążenia na osi rzędnych umieszcza się iloraz liczby cykli wykonanych przy danej amplitudzie obciążenia do liczby cykli powodujących zniszczenie materiału przy tej amplitudzie. Koncepcja krzywej przebiegu zniszczenia może być bezpiecznie stosowana w praktyce inżynierskiej tylko wtedy, gdy parametr D będzie wielkością mierzalną.

Zachowanie metali w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, a więc przy amplitudzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału, można podzielić na dwa zasadnicze typy pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń.

Zachowanie pierwszej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane cykliczną plastycznością, generowaną ruchem dyslokacji na poziomie lokalnych ziaren i lokalnymi pasmami poślizgów. W tym przypadku wskaźnikiem uszkodzenia jest odkształcenie niesprężyste, charakteryzujące szerokość pętli histerezy przy całkowitym odciążeniu, wzór (1), rysunek 3.

$$\varepsilon_a^{in} = \frac{\varepsilon_{max}(F=0) - \varepsilon_{min}(F=0)}{2} \quad (1)$$

Miarę uszkodzenia można przy jego pomocy zdefiniować następującym związkiem:

$$\varphi_N(\varepsilon_a^{in}) = \sum_1^N |\varepsilon_a^{in}| \quad (2)$$

i stąd parametr uszkodzenia przyjmujący wartości z zakresu $<0;1>$ można wyrazić w postaci:

$$D = \frac{\varphi_N - (\varphi_N)_{min}}{(\varphi_N)_{max} - (\varphi_N)_{min}} \quad (3)$$

gdzie:

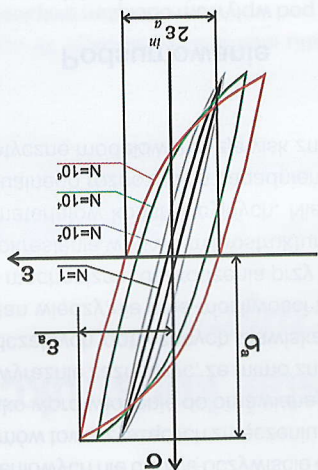
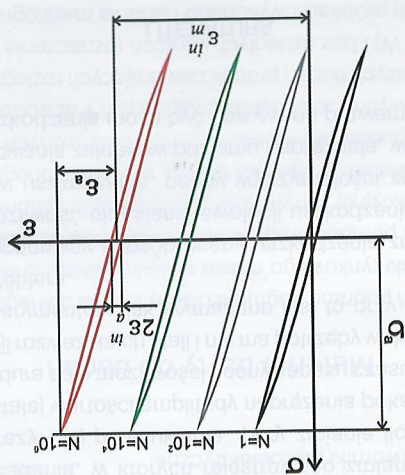
- φ_N – całkowita wartość odkształcenia w rozpatrywanym cyklu obciążenia,
- $(\varphi_N)_{min}$ – całkowita wartość odkształcenia w pierwszym cyklu na początku procesu rozwoju uszkodzenia,
- $(\varphi_N)_{max}$ – całkowita wartość odkształcenia w ostatnim cyklu na końcu procesu rozwoju uszkodzenia.

Definicja parametru uszkodzenia przyjmuje postać wzoru (3), w którym uwzględnia się miarę uszkodzenia określona ze wzoru (6).

$$\Phi = \sum_{m=1}^N \epsilon_m^a + \sum_{m=1}^N \epsilon_m^v = \sum_{m=1}^N \epsilon_m^a \epsilon_m^v \quad (6)$$

W wielu przypadkach za proces uszkodzenia zmęczenia odpowiadający jest więcej niż jeden mechanizm. W realizacji badań zmęczenia na stalach energetycznych proces uszkodzenia zachodzi przy kombinacji cyklicznej plastyczności i ratchetingu. W takiej sytuacji wskaźniki uszkodzenia określić można ze wzorów (1) i (4), natomiast miarę uszkodzenia definiuje się następującym związkiem:

Rys. 5. Pętle histerezy w zależności od mechanizmu rozwoju uszkodzenia dla obciążenia wywołującego wartości naprężenia poniżej granicy plastyczności: (a) cykliczna plastyczność, (b) ratcheting



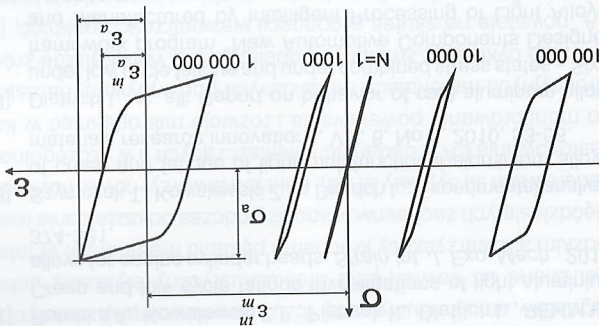
teratów. Ewolucja pętli histerezy w zależności od mechanizmu naprężenia poniżej granicy plastyczności przedstawiona jest na rysunku 5.

a)

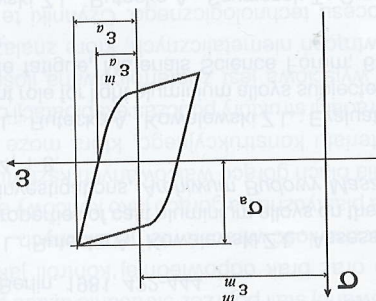
b)

W obu przypadkach zmiany odształceń mierzonych dla całej objętości pomiarowej próbki są sumą lokalnych odształceń rozwijających się wokół defektów w postaci wtrąceń niemetalicznych i pustek dla pierwszej grupy materiałów lub rozwijających się poszczególnych ziarnach dla drugiej grupy ma-

Rys. 4. Warianty przesuwania się pętli histerezy



Rys. 3. Ilustracja odształceniowych wskaźników uszkodzenia podczas procesu zmęczenia



ujmienie, rysunek 4.

! stąd parametr uszkodzenia przyjmujący wartości z zakresu <0;1> można wyrazić w postaci wzoru o strukturze związku (3). Znak wartości bezwzględnej we wzorach (2) i (5) wynika z faktu, że pętli histerezy w kolejnych cyklach mogą przemieszczać się zarówno w kierunku odształceń zorientowanych dodatnio lub

$$\Phi = \sum_{m=1}^N \epsilon_m^a \epsilon_m^v \quad (5)$$

następującym związkiem: Miarę uszkodzenia można przy jego pomocy zdefiniować

$$\epsilon_m^a = \frac{\epsilon_{\max}^a (F=0) + \epsilon_{\min}^a (F=0)}{2} \quad (4)$$

Zachowanie drugiej grupy metali pod wpływem obciążenia przesuwanie pętli histerezy przy całkowitym oddziałyaniu, wzór (4), rysunek 3. dzenia jest odształcenie średnie niesprężyste, charakteryzujące defektów mikrostruktury. W tym przypadku wskaźnikiem uszkodzenia jest odształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych cyklicznych jest opisane przez ratcheting, generowany lokalnymi

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

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

Podsumowanie

W artykule przedstawiono alternatywne sposoby oceny uszkodzenia materiałów poddawanych obciążeniom zmęczeniowym. Badania, w których rejestrowano zmiany szerokości pętli histerezy i jej przesuwanie przy zmianie liczby cykli dla ustalonej stałej wartości amplitudy naprężenia pokazały, że tego typu procedura daje możliwości oceny zapasu czasu bezpiecznej eksploatacji rozważanych stali i nie ma potrzeby wykonywania tak wielu eksperymentów, jak wymagane jest to przy wyznaczaniu wykresu Wöhlera.

Zaproponowany sposób oceny uszkodzenia zmęczeniowego daje możliwość określania ewolucji uszkodzenia, określania wskaźników uszkodzenia, oceny wytrzymałości zmęczeniowej oraz znajdowania zakresów poziomu naprężenia, w którym akumulacja uszkodzenia może być opisywana prawem liniowym.

LITERATURA

- [1] ASTM Handbook Vol. 19, Fatigue and Fracture, ASM International 1996.
- [2] Szala J.: Hipotezy Sumowania Uszkodzeń Zmęczeniowych, Bydgoszcz, Wydawnictwa Uczelniane ATR, 1998.
- [3] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali, Warszawa, WNT, 1985.
- [4] Jakowluk A.: Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach, Warszawa, WNT, 1993.
- [5] Socha G.: Nowa metoda pomiaru zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych, *Dozór Techniczny*, 2002, 6, 121-124.
- [6] Socha G.: Experimental investigations of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *International Journal of Fatigue*, 2003, Vol. 25/2, 139-147.
- [7] Kowalewski Z.L.: Współczesne badania wytrzymałościowe – kierunki i perspektywy rozwoju, Warszawa, Biuro Gamma, 2008.
- [8] Kowalewski Z.L.: Kierunki i perspektywy rozwoju badań wytrzymałościowych, Warszawa, Wydawnictwo ITS, 2008.
- [9] Szczepiński W. (Ed.): *Experimental methods in mechanics of solids*, Warszawa, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, PWN, Elsevier, 1990.
- [10] Morrow J.D.: Internal friction, damping and cyclic plasticity: cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, *ASTM STP*, 1965, 378, 45-84.
- [11] Manson S.S.: Behavior of materials under conditions of thermal stress, NASA TN-2933, 1953.
- [12] Coffin L.F., Jr: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, *Trans. ASME*, 1954, 76, 931-950.
- [13] Lemaitre J.: A course on damage mechanics, Berlin, Springer-Verlag, 1996.
- [14] Yang L., Fatemi A.: Cumulative fatigue damage mechanisms and quantifying parameters: a literature review, *J. Testing and Evaluation*, 26, 2, 89-100, 1998.
- [15] Dietrich L., Grzywna P., Kukła D.: Material damage prediction in cast aluminum alloy using electronic speckle pattern interferometry, 27th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Wrocław, 22 – 25 wrzesień, 2010.
- [16] Kachanov L.M.: The theory of creep (English translation edited by Kennedy A.J.), Boston Spa, National Lending Library, 1958.
- [17] Murakami S., Ohno E.T.: A continuum theory of creep and creep damage, in: Creep in Structures, Proc. of 3rd IUTAM Symp., Leicester, 1980, Eds: A.R.S. Ponter, D.R. Hayhurst, Springer-Verlag, Berlin, 1981, 422-444.
- [18] Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z.L., Assessment of exploitation properties of cast aluminium alloys on the basis of creep and Icf investigations, *Archiwum Budowy Maszyn*, 2009, Vol. LVI, No 4, 1-8.
- [19] Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z.L.: Evaluation of the heat treatment role for light aluminium alloys subjected to creep and low cycle fatigue, *Materials Science Forum*, 638-642, 2010, 455-460.
- [20] Kowalewski Z.L., Rutecka A., Szymczak T.: Creep and fatigue of composites and light multifunctional aluminium alloys, Proceedings of Plasticity'10: The Sixteenth International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, Editors Akhtar S. Khan & Babak Farrokh, St. Kitts Marriott Resort, January 3-8, 2010, 43-45.
- [21] Rutecka A., Kowalewski Z.L., Pietrzak K., Dietrich L., REHM W.: Creep and low cycle fatigue investigations of light aluminium alloys for engine cylinder heads, *Strain Int. J. Exp. Mech.*, 2011, 374-381.
- [22] Szymczak T., Kowalewski Z.L., Dietrich L.: Experimental analysis of creep and fatigue of light multifunctional aluminium alloys, *materials research innovations*, Vol. 6, No 6, 2010, 53-56.
- [23] Dietrich L. et. al.: Report on behavior of cast aluminum alloys under low cycle fatigue and under combined stress states – Sixth framework program “New Automotive Components Designed and Manufactured by Intelligent Processing of Light Alloys” – NADIA Contract No 026563-2 – IPPT, 2009.

