

Dominik KUKLA, Lech DIETRICH, Zbigniew KOWALEWSKI, Paweł GRZYWNA*,

*Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

OCENA ROZWOJU USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH W STALACH EKSPLOATOWANYCH W ENERGETYCE.

W pracy dokonano analizy wskaźników rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, opracowanych w oparciu o wyniki testów zmęczeniowych próbek ze stali P91, w stanie dostawy i po 80 000 godzin eksploatacji w warunkach pracy instalacji energetycznej. Wykonano badania zmęczeniowe dla dwóch typów próbek i wyznaczono funkcje zmiany parametrów uszkodzeń w zależności od liczby cykli przy różnych amplitudach naprężenia. Uzyskane wyniki wykorzystano do wyznaczenia klasycznej charakterystyki zmęczeniowej, ale również do wyznaczenia ewolucji uszkodzeń w zależności od liczby cykli. Wyniki wskazały na możliwość jej opisanie przy pomocy dwóch makroskopowych wskaźników rozwoju zmęczenia. Pierwszy z nich to średnie odkształcenie w kolejnych cyklach obciążenia przy stałej amplitudzie naprężenia. Drugim, jest odkształcenie niesprężyste w cyklu obrazujące szerokość pętli histerezy w kolejnych fazach obciążenia o stałej amplitudzie naprężenia. Rozwój uszkodzenia w stali P91 poddanej obciążeniom zmęczeniowym opisano stosując kombinację wyżej wymienionych wskaźników.

Słowa kluczowe: badania zmęczeniowe, ewolucja uszkodzeń, wskaźniki uszkodzenia

1. WPROWADZENIE

Zmęczenie wysokocykliczne jest jednym z głównych typów obciążenia determinujących trwałość i bezpieczeństwo pracy elementów instalacji energetycznych pracujących w warunkach obciążeń mechanicznych (stałych i zmiennych) i wysokiej temperatury. Dlatego też opracowywanych i stosowanych jest szereg procedur i metod ilościowego opisu stopnia uszkodzenia związanego z oddziaływaniem mechanicznych obciążeń cyklicznych, aby umożliwić monitoring rozwoju uszkodzeń eksploatacyjnych i jego dynamikę. W pracy dokonano doświadczalnej analizy rozwoju uszkodzeń na podstawie rejestracji i analizy

* Autor do korespondencji: Tel.: (22) 826 98 00; fax: (22) 826 98 50.
E-mail: dkukla@ippt.gov.pl (D. Kukla)

zmian odpowiedzi materiału w postaci sygnału zmian odkształcenia na wymuszenia cykliczne realizowane przy sterowaniu naprężeniem, w stanie obciążenia jednoosiowego. Program badań obejmował dobór geometrii próbki i jej mocowania w sposób zapobiegający wyboczeniu przy cyklach symetrycznych dla dużej liczby cykli, przy zachowaniu stałej amplitudy naprężenia oraz rejestrację i analizę zmian przebiegu odkształcenia w poszczególnych cyklach obciążenia.

Zachowanie metali pod wpływem obciążeń wysoko cyklicznych, a więc przy amplitudzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału, można podzielić pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń na dwa zasadnicze typy [1]. Pierwszym z nich jest ratcheting generowany lokalnymi odkształceniami wokół defektów mikrostruktury takich, jak: pory, wtrącenia niemetaliczne, czy wydzielenia. Drugi mechanizm jest opisany cykliczną plastycznością związaną z poślizgami dyslokacji na poziomie lokalnych subziaren i ziaren. W obu przypadkach zmiany odkształceń mierzonych dla całej objętości pomiarowej próbki są sumą lokalnych odkształceń rozwijających się wokół defektów w przypadku ratchetingu lub rozwijających się lokalnie poślizgów dla cyklicznej plastyczności. Obciążenia cykliczne powodują uruchomienie różnych mechanizmów inicjacji i rozwoju uszkodzeń. W pierwszej grupie materiałów konstrukcyjnych rozwój uszkodzeń zmęczeniowych rozwija się wokół różnorodnych wad powstałych w procesach wytwórczych takich jak, odlewanie, obróbka plastyczna, obróbka termiczna, oraz podczas eksploatacji (dyfuzja pierwiastków stopowych, koagulacja, przemiany fazowe). W drugiej grupie metalicznych materiałów konstrukcyjnych dominującym mechanizmem są odkształcenia plastyczne powstałe w wyniku nukleacji i ruchu dyslokacji i uruchomienia systemów poślizgów, a cały proces stabilnego rozwoju uszkodzeń rozwija się zgodnie z regułami cyklicznej plastyczności.

2. MATERIAL I METODYKA BADAŃ

W pracy przeprowadzono badania próbek z materiału pobranego z dwóch rurociągów ze stali P91. Jeden z wycinków pochodził z elementu rurociągu pary świeżej eksploatowanego w czasie 80 000h. Drugi wycinek pochodził z części nieeksploatowanego rurociągu o tej samej średnicy, w stanie dostawy. Oba wycinki poddano badaniom składu chemicznego dla potwierdzenia zgodności ze składem normowym. Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują na zgodność zawartości pierwiastków stopowych obu wycinków z zakresem normowym.

Tabela 1. Zawartość pierwiastków stopowych w próbkach ze stali P91 przed i po eksploatacji oraz wg PN

	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	S	P
P91 „0”	0,12	0,39	8,31	0,82	0,29	0,18	0,15	0,25	0,006	<0,0

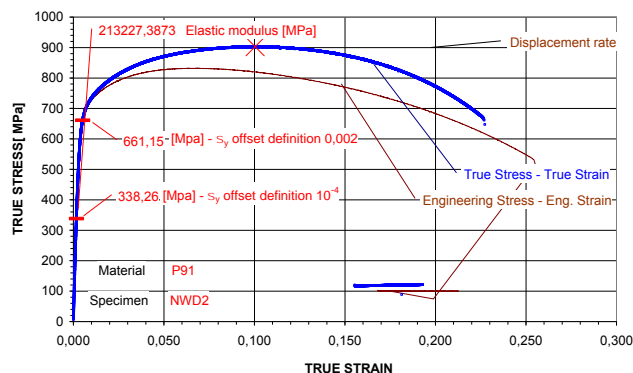
										01
P91 „80 tys h”	0,11	0,43	8,16	0,86	0,24	0,28	0,13	0,15	0,008	0,04 2
PN 10216- 2:2004	0,08- 0,12	0,3- 0,6	8- 9,5	0,85- 1,1	0,18- 0,25	<0,4	<0,3	0,2- 0,5	<0,01	

2.1. Badania wytrzymałościowe

Dla określenia właściwości wytrzymałościowych stali P91 przed i po eksploatacji wykonano statyczną próbę rozciągania dla pięciu próbek. Przykładowy wykres odkształcenia w funkcji naprężenia dla jednej z próbek w stanie „0” (przed eksploatacją) przedstawia rys. 1. Na podstawie tych badań wyznaczono średnie wartości parametrów stali P91 w stanie „0” i w stanie „80 000h” (po eksploatacji), które zestawiono w tabeli 2

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe stali P 91 przed i po eksploatacji oraz według PN

	R _m [MPa]	R _e [MPa]	A [%]
P91 stan „0”	900	661	23
P91 stan „80 000”	675	505	21
PN: 10216-2:2004	630-830	>450	17-19

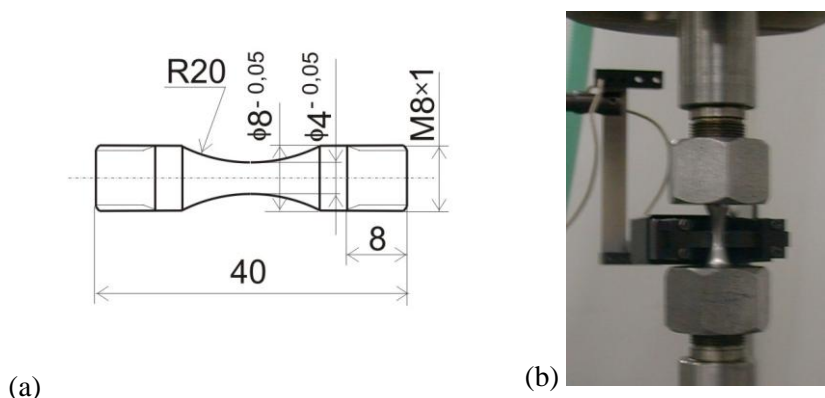


Rys. 1. Krzywa rozciągania próbki ze stali P91 w stanie „0”

2.1. Badania zmęczeniowe

Badania zmęczeniowe przeprowadzono na próbkach klepsydrycznych o przekroju kołowym i średnicy 4 mm w części pomiarowej z wykorzystaniem specjalnego uchwytu zapewniającego osiowe zamocowanie próbki. Do pomiaru

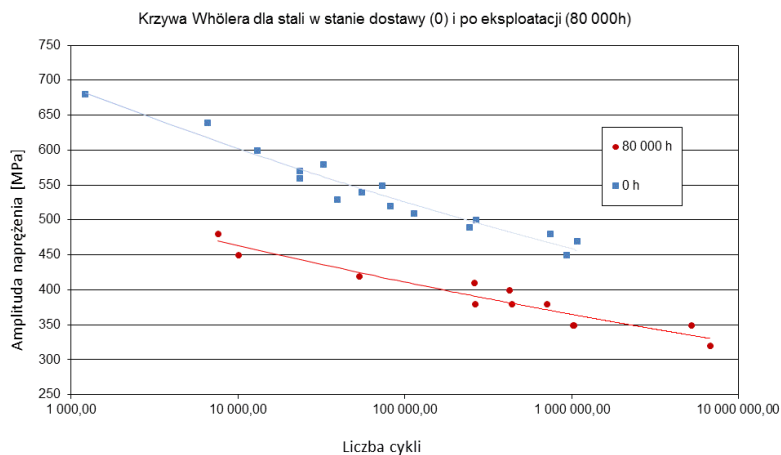
odkształcenia wykorzystano ekstensometr poprzeczny, przy pomocy którego mierzono zmiany średnicy próbki w kolejnych cyklach obciążenia (rys. 2.)



Rys. 2. Szczegóły techniki badań zmęczeniowych, (a) wymiary oraz kształt próbki zmęczeniowej, (b) Uchwyt do osiowania próbek z ekstensometrem

Na podstawie wyznaczonych w próbie rozciągania wartości umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ określono zakres obciążeń zmęczeniowych dla próbek przed i po eksploatacji. Badania zmęczeniowe przeprowadzono w zakresie amplitudy naprężeń od 400 do 680 MPa dla próbek w stanie dostawy oraz 350-480 MPa dla próbek po eksploatacji. Obciążenie realizowano w modzie sterowania siłą z utrzymywaniem zerowej jej wartości średniej w cyklu i stałej dla danej próbki wartości amplitudy naprężenia. Łącznie badaniom zmęczeniowym poddano 28 próbek.

Pomiary odkształcenia w wybranych cyklach zmian obciążenia umożliwiły ocenę rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego i wyznaczenie standardowej krzywej Wöhlera dla obu stanów próbki (rys. 3). Krzywa Wöhlera wyznaczona dla próbek z materiału po eksploatacji wskazuje na spadek trwałości zmęczeniowej w szerokim zakresie liczby cykli. Wyraża się to zawężeniem zmian amplitudy naprężenia mniejszej do około 100 MPa. Na podstawie opracowanych krzywych można oszacować stopień obniżenia parametru granicznej wytrzymałości zmęczeniowej w przypadku serii próbek po eksploatacji (około 20 %).



Rys. 3. Krzywe Wöhlera dla materiału przed i po eksploatacji

Degradacja właściwości wytrzymałościowych opisana za pomocą prób zmęczeniowych widoczna jest nie tylko w przebiegu krzywej Wöhlera, ale także w zmianie dynamiki rozwoju zarówno poziomu odkształcenia średniego jak i odkształcenia plastycznego pod wpływem obciążeń zmiennych dla wszystkich zastosowanych wartości amplitudy naprężenia. Zmiany te zostały sparаметryzowane za pomocą odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego (ϕ) i parametru uszkodzenia zmęczeniowego D [2], w różny sposób obrazujących charakter i dynamikę rozwoju odkształcenia w kolejnych cyklach zmęczenia wysokocyklowego.

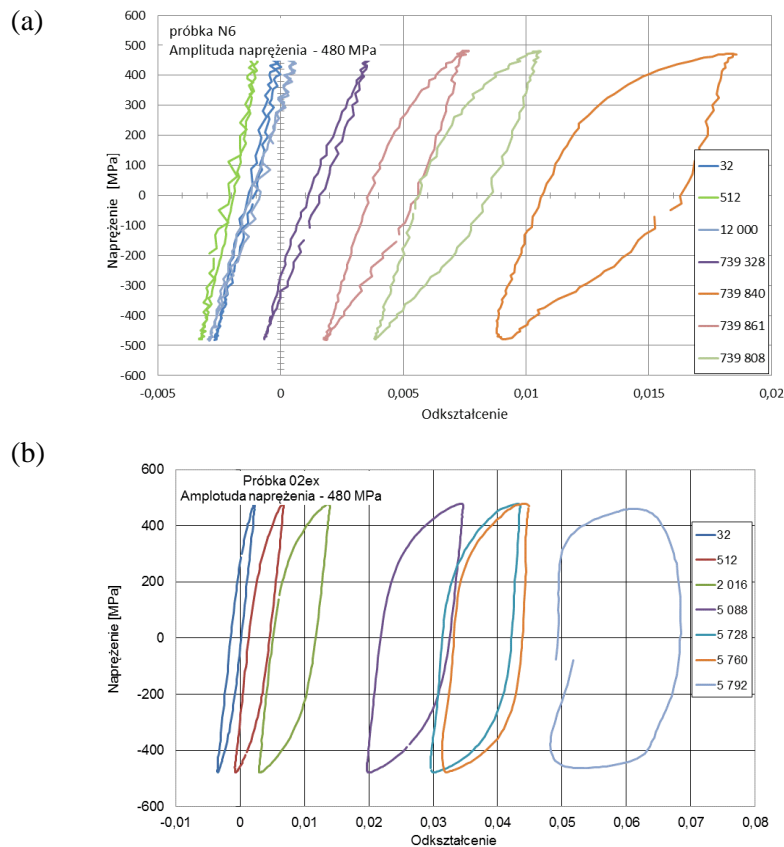
W zależności od wartości amplitudy naprężenia oraz mikrostruktury materiału badanej próbki proces uszkodzenia zmęczeniowego może zachodzić według dwóch, wcześniej już omówionych mechanizmów. Z jednej strony może to być ratcheting determinujący przyrost poziomu średniego odkształcenia w kolejnych cyklach, z drugiej natomiast cykliczna plastyczność dominująca przy wysokich wartościach amplitudy obciążenia i charakteryzująca się przyrostem odkształcenia niesprężystego oraz poszerzaniem pętli histerezy. Ponieważ w większości przypadków obciążeń cyklicznych mamy do czynienia z kombinacją tych mechanizmów (rys. 4.), jako parametr opisujący rozwój uszkodzenia przyjęto sumę odkształcenia średniego i niesprężystego, zdefiniowaną jako odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego i wyrażonego wzorem

$$\phi = \varepsilon_a + \varepsilon_m \quad (2.1.)$$

Zmiany odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego wykorzystano do wyznaczenia ewolucji parametru uszkodzenia D w większym stopniu opisującego dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach. Parametr uszkodzenia zmęczeniowego D , określony jest zależnością:

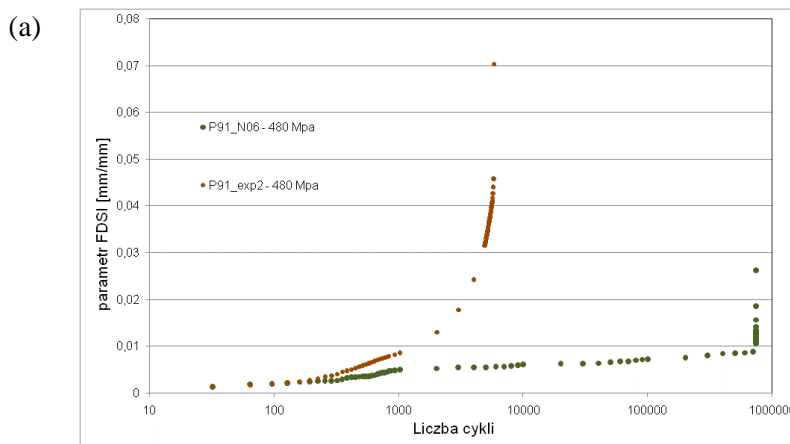
$$D = \frac{\varepsilon_c - (\varepsilon_c)_{\min}}{(\varepsilon_c)_{\max} - (\varepsilon_c)_{\min}} \quad (2.2.)$$

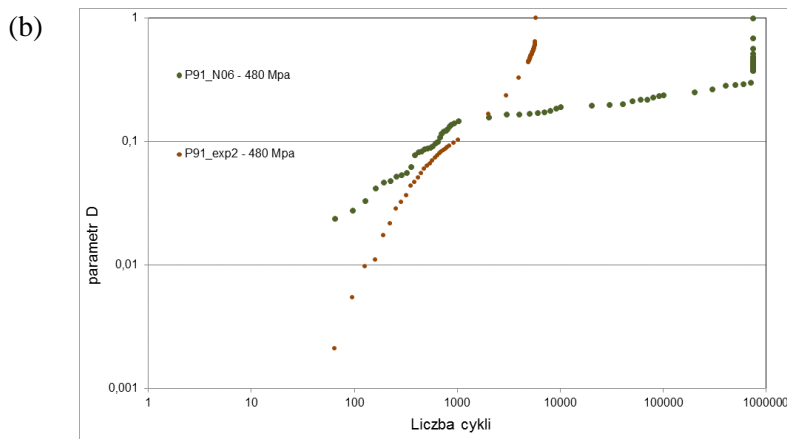
Na rys. 4. gdzie przedstawiono rozwój odkształceń w wybranych cyklach przy obciążeniu 480 MPa, dla próbki przed i po eksploatacji widoczna jest różnica w proporcji odkształceń średnich i niesprężystych związana z degradacją właściwości próbki po eksploatacji.



Rys. 4. Rozwój odkształcenia w wybranych cyklach dla amplitudy 480 MPa, dla próbki przed (a) i po eksploatacji (b)

Efekt ten jest wyraźniejszy przy porównaniu przebiegu zmian zdefiniowanych wcześniej parametrów opisujących proces uszkodzenia dla obu rodzajów próbek. Zmiany parametru ϕ dla próbek po eksploatacji, dla całego zakresu wartości amplitudy naprężenia umożliwiają porównanie ze stanem „0” (400 – 480 MPa). Wskazują one od samego początku obciążenia na większą dynamikę rozwoju uszkodzenia, rosnącą potęgowo, a także pokazują znacznie wyższy stopień odkształcenia (zarówno średniego jak i niesprężystego w cyklu) niż w przypadku próbki z materiału w stanie dostawy (rys. 5a). Taki wynik sugeruje pojawienie się znacznego odkształcenia trwałego materiału pod wpływem eksploatacji, co może być związane z procesami dyfuzyjnymi w warunkach pracy rurociągu. W przypadku próbek z materiału nieeksploatowanego przyrost odkształcenia jest mniejszy i ma charakter niemal liniowy w funkcji czasu, aż do ostatniego etapu rozwoju pęknięcia, kiedy to odkształcenie wzrasta gwałtownie i następuje dekohezja. Na wykresie podwójnie logarytmicznym (rys. 5b) pokazującym zmiany parametru D dla amplitudy naprężenia 480 MPa można zauważyć okresową liniowość (względem czasu) wzrostu uszkodzenia. Jednak dynamika tego wzrostu wyrażona wartością kąta nachylenia krzywej jest znacznie większa w przypadku próbki z materiału eksploatowanego. Na uwagę zasługuje także fakt, że największy wzrost parametru uszkodzenia, zarówno dla próbki w stanie dostaw, jaki i dla po eksploatacji, można przypisać pierwszemu tysiącowi cykli (ten sam efekt widoczny jest dla amplitudy 400MPa), kiedy to szybkość wzrostu spada, ustalając się na stałym poziomie. Poziom ten utrzymuje się do momentu utworzenia pęknięcia, co skutkuje kolejnym gwałtownym wzrostem wartości parametru uszkodzenia aż do utraty spójności próbki.



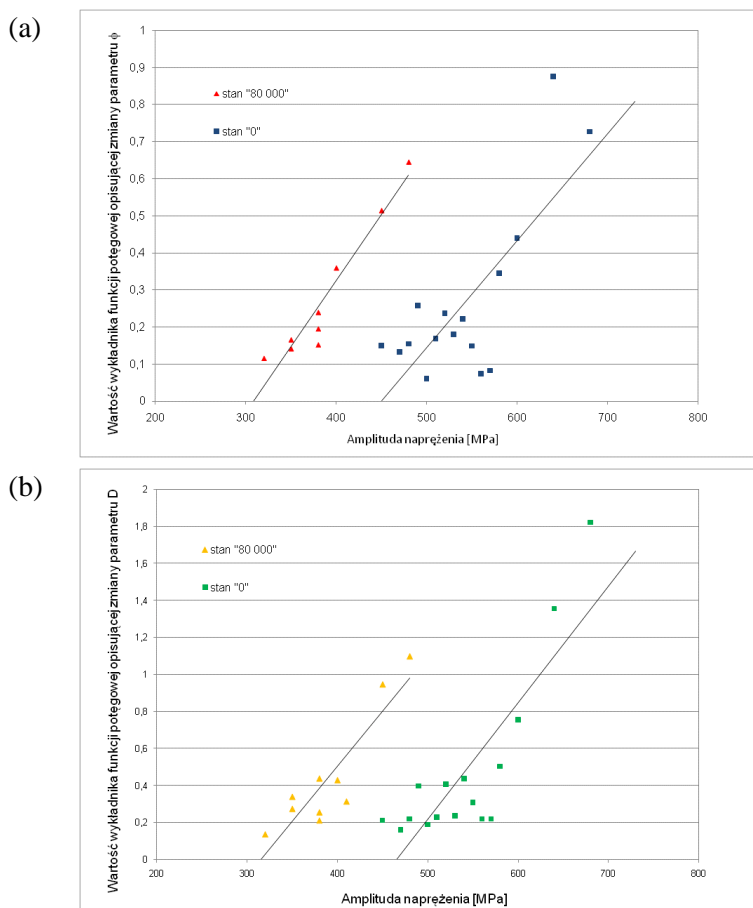


Rys. 5. Zmiany rozwoju procesu uszkodzenia zmęczeniowego materiału przed i po eksploatacji dla amplitudy naprężenia 480 MPa wyrażone (a) odkształceniowym współczynnikiem uszkodzenia zmęczeniowego ϕ oraz (b) parametrem uszkodzeń zmęczeniowych D.

Niezależnie od historii obciążenia próbki zwiększona dynamika rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w początkowej fazie procesu, wskazuje jak istotne jest ograniczanie liczby zatrzymań technologicznych i remontowych pracy instalacji i konstrukcji, ponieważ determinują one trwałość poszczególnych jej elementów. Każde wznowienie pracy wpływa na uruchomienie innych mechanizmów degradacji, które znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiału i elementów z niego wykonanych.

Dla wszystkich próbek poddanych testom zmęczeniowym wyznaczono przebiegi zmian współczynników uszkodzenia w funkcji czasu. Określono też równania krzywych opisujących zmiany tych parametrów w funkcji liczby cykli i na tej podstawie wykreślono krzywą opisującą zmiany ich wykładników w funkcji amplitudy naprężenia (rys. 6). Na tej podstawie wyznaczono trwałość zmęczeniową, która stanowi naprężenie w punkcie przecięcia liniowej aproksymacji wyników z osią odciętych dla zerowej wartości wykładnika potęgowego. Wartości te są dla obu rozpatrywanych parametrów bardzo zbliżone i potwierdzają trwałość oszacowaną na podstawie krzywej Wöhlera (320 MPa dla stanu „80 000” oraz 460 MPa dla stanu „0”). Różnica polega na uzyskaniu tych wartości i wynika z faktu, że o ile krzywe Wöhlera przedstawiają wartości amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli do zniszczenia, to trwałość wynikająca z aproksymacji wartości wykładników opiera się na przebiegu zmęczenia próbek od pierwszego do ostatniego cyklu obciążenia. Uwzględnia, zatem wszystkie etapy procesy uszkodzenia zmęczeniowego i tym samym eliminuje z wyniku końcowego błędy związane np. z lokalizacją wad stanowiących karb struktural-

ny w przekroju krytycznym (przewężeniu). Pewną niedogodnością tej metody jest jednak konieczność rejestracji zmiany odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia oraz Dość istotny wysiłek analityczny.



Rys. 6. Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej na podstawie aproksymacji liniowej wartości wykładników krzywych opisujących zmiany odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego ϕ (a) i parametru uszkodzenia zmęczeniowego D (b)

3. WNIOSKI

Proces eksploatacji rurociągu pary świeżej w czasie 80 000 godzin wpłynęła na obniżenie parametru granicznej wytrzymałości zmęczeniowej o ok. 20 %, na co wskazuje nie tylko analiza porównawcza krzywych Wöhlera, ale także wyniki aproksymacji liniowej wartości wykładników krzywych opisujących

zmiany wyznaczonych parametrów uszkodzenia zmęczeniowego. Ponadto stwierdzono zwiększenie wartości trwałego odkształcenia materiału pod wpływem eksploatacji, co może być związane z procesami dyfuzyjnymi w warunkach pracy rurociągu. Analiza rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego i jego dynamika, zwłaszcza w pierwszym okresie zmęczenia, wskazuje jak istotny jest wpływ wyłączeń (technologicznych i remontowych) instalacji na trwałość poszczególnych jej elementów. Każde wznowienie pracy wpływa na uruchomienie innych mechanizmów degradacji, które znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiałów i elementów z nich wykonanych.

4. ADNOTACJE

Praca została zrealizowana w ramach projektu N N507 329536 pod tytułem „Opracowanie podstaw metody ilościowej oceny stopnia zniszczenia zmęczeniowego materiałów dla energetyki z zastosowaniem metody prądów wirowych” oraz projektu N N501 078435 pod tytułem „Opracowanie metodyki monitorowania rozwoju uszkodzeń oraz ich lokalizacji w stalach niskostopowych i stopach aluminium”

LITERATURA

1. George W. Woodruff, **Micromechanical Modeling of High Cycle Fatigue Processes**, 2007 ASM/TMS Symposium on Computational Materials Design GE Global Research, August 20-21, 2007.
2. G. Socha, Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *Int. J. Fatigue*, 25, 2003, 139-147.