

# OCENA STOPNIA USZKODZENIA ZMĘCZENIOWEGO STALI DLA ENERGETYKI Z ZASTOSOWANIEM METODY PRĄDÓW WIROWYCH

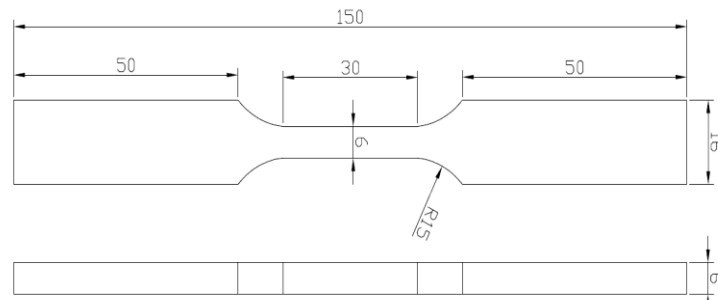
Dominik KUKLA, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, dkukla@ippt.gov.pl  
Marcin CIESIELSKI, Wydział Inżynierii Materiałowej PW, mciesiel@inmat.pw.edu.pl  
Artur JAŚKIEWICZ, Materials Engineering Group sp. z o. o. ajaskiewicz@megroup.pl

## 1. Streszczenie

Badania nad oceną stopnia uszkodzenia zmęczeniowego z wykorzystaniem nieniszczącej metody prądów wirowych (*Eddy current testing – ET*) przeprowadzono dla próbek z żarowytrzymałej stali P91. Próbki poddawane były zmiennym obciążeniom cyklicznym w próbach zmęczeniowych w zakresie amplitudy naprężenia od 320 do 480 MPa. Na podstawie analizy dynamiki rozwoju odkształceń średnich i niesprężystych opracowano parametry opisujące stopień uszkodzenia materiału dla próbek o różnej historii obciążenia. W oparciu o wyznaczoną krzywą Wöhlera oraz ww. parametry przygotowano serię próbek, dla których zatrzymano testy zmęczeniowe uzyskując próbki referencyjne w ustalonym stopniu uszkodzenia. Próbki te poddano nieniszczącej ocenie stopnia degradacji zmęczeniowej na podstawie analizy zmian kąta fazowego sygnału prądowirowego od materiału podanego i nie poddanego obciążeniom cyklicznym oraz na podstawie zmian współrzędnych sygnału wyjściowego (impedancji) podczas skanowania powierzchni zmęczeniowych próbek wzdłuż ich osi głównej. Wyniki wykazały subtelne zmiany kąta fazowego pozwalające na identyfikację stopnia degradacji materiału próbek w końcowej fazie procesu zmęczeniowego, przed inicjacją pęknięcia dominującego.

## 2. METODYKA BADANIA

Badania wykonano na próbkach płaskich pobranych z fragmentu rury z żarowytrzymałej stali P91. Geometria próbki przedstawiona na rys. 1. została opracowana pod kątem badań metodą prądów wirowych.



Rys. 1. Geometria próbek zmęczeniowych do badań metodą ET

Przed przystąpieniem do prób zmęczeniowych przeprowadzono statyczną próbę rozciągania próbki o geometrii pokazanej na rys. 1. w celu opracowania zakresu amplitudy naprężenia dla wykonania testów zmęczenia wysokocyklowego. Wyznaczone wartości  $R_e = 532$  MPa oraz  $R_m = 679$  MPa mieszczą się w zakresie normy PN: 10216-2:2004. Pozostałych 15 próbek poddano zmiennym obciążeniom cyklicznym w zakresie amplitudy naprężenia od 320 do 480 MPa, przy częstotliwości 20Hz.

Na podstawie analizy dynamiki rozwoju odkształceń średnich i niesprężystych monitorowano zmianę stopnia uszkodzenia materiału próbek dla różnych parametrach obciążenia. W oparciu o wyznaczoną krzywą Wöhlera oraz ww. parametry przygotowano serię próbek, dla których zatrzymano próby zmęczeniowe uzyskując próbki referencyjne o określonym stopniu uszkodzenia. Próby zmęczeniowe dla wszystkich próbek referencyjnych były monitorowane pod kątem rozwoju parametru uszkodzenia uzależnionego od rozwoju odkształceń średnich jak i amplitudy odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia. Odpowiedzi materiału próbek na cykliczne obciążenia zmienne zostały sparametryzowane za pomocą odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego ( $\phi$ ) [1] i parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $D$  [2], w różny sposób obrazujących charakter i dynamikę rozwoju odkształcenia w kolejnych cyklach zmęczenia wysokocyklowego.

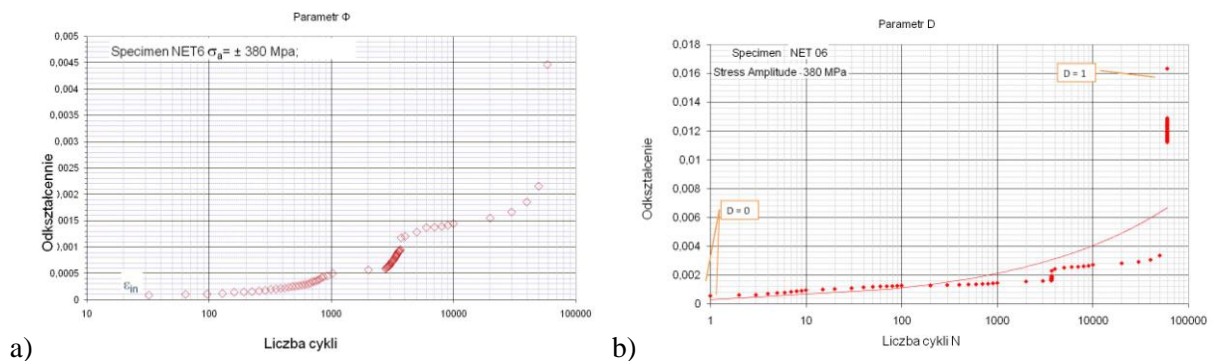
W zależności od wartości amplitudy naprężenia oraz właściwości i mikrostruktury materiału badanej próbki proces uszkodzenia zmęczeniowego może zachodzić z jednej strony według mechanizmu „ratchetingu” i generować przyrost poziomu średniego odkształcenia w kolejnych cyklach, z drugiej strony może dominować cykliczna plastyczność (zwłaszcza dla wysokich wartości amplitudy obciążenia) charakteryzująca się przyrostem odkształcenia niesprężystego oraz poszerzaniem pętli histerezy. Ponieważ w większości przypadków obciążeń cyklicznych mamy do czynienia z kombinacją tych mechanizmów 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. 2 przedstawiono zmiany obu parametrów opisujących rozwój uszkodzenia dla próbki NET 6 obciążanej naprężeniem 380 MPa



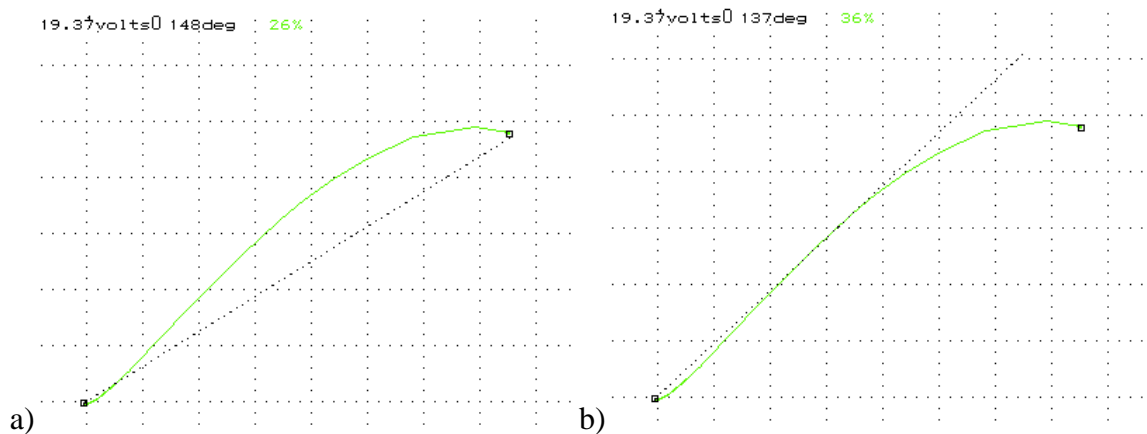
Rys. 2. Przebieg rozwoju uszkodzenia opisany a) współczynnikiem uszkodzenia zmęczeniowego ( $\phi$ ) b) parametrem uszkodzenia zmęczeniowego D

Monitorując rozwój degradacji z wykorzystaniem parametrów uszkodzenia testy zmęczeniowe dla próbek do badań nieniszczących były zatrzymywane w ostatnim zakresie trwałości zmęczeniowej, gdzie następuje gwałtowny przyrost odkształceń związanych z inicjacją mikropęknięć i tworzeniem się szczeliny dominującej (rys. 2.). Uzyskane w ten sposób próbki miały wysoki poziom skumulowanych odkształceń a jednocześnie nie uległy dekohezji i nadawały się do badań nieniszczących. W niektórych przypadkach nastąpiły pęknięcia próbek, które zostały zidentyfikowane i zlokalizowane dzięki możliwościom metody ET.

Próby oceny stopnia uszkodzenia próbek pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych dokonano na aparacie MIZ 27 Si firmy ZETEC przy zastosowaniu sond ołówkowych o zakresie częstotliwości od 5 kHz do 1 MHz. Zakres częstotliwości wynikał z możliwości zastosowania jedynie sond o małej średnicy, umożliwiających pomiar w części pomiarowej próbek o szerokości 6 mm. Parametry pomiarów (wzmocnienie, napięcie) dobrane były pod kątem optymalnego zobrazowania zmian kąta fazowego (procedura A) oraz zmian współrzędnych punktu opisującego chwilowe wartości impedancji (procedura B) :

#### A. Ocena zmian kąta fazowego przy efekcie oddalenia (lift off)

Wartość kąta fazowego sygnału prądowirogo zależy od właściwości elektrycznych i magnetycznych a w szczególności, od przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej. Subtelne zmiany tych parametrów wywołane zmianą stanu naprężeń, lokalną zmianą składu, czy gęstości wpływają na wartość kąta fazowego. Dlatego też podjęto próby oceny zmian kąta fazowego w funkcji uszkodzenia zmęczeniowego determinowanego amplitudą naprężenia i liczbą cykli. Pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych w materiale próbki zachodzą zmiany możliwe do ilościowej oceny z wykorzystaniem prądów wirowych. Pomiaru kąta fazowego dokonano z wykorzystaniem oprogramowania dostępnego w aparacie firmy ZETEC (rys. 2.). Mierzono kąt krzywej oddalenia dla próbki przed testem zmęczeniowym oraz po zatrzymaniu próbki dla różnych parametrów zmęczenia (amplituda naprężenia, liczba cykli). Dla każdego stanu próbki dokonywano pomiaru kąta nachylenia, względem krzywej lift-off (linia pozioma skierowana w lewo), prostej łączącej dwa, skrajne punkty krzywej oddalenia aproksymując liniowo sygnał (a) oraz kąt prostej, stycznej do krzywej oddalenia. Taka procedura pomiarowa została opracowana ze względu na zakrzywienie krzywej lift-off przy pomiarach dla wyższych częstotliwości. W takim wypadku lepsze wyniki daje pomiar kąta stycznego (do krzywej lift-off) obrazujący zmiany właściwości bliżej powierzchni.



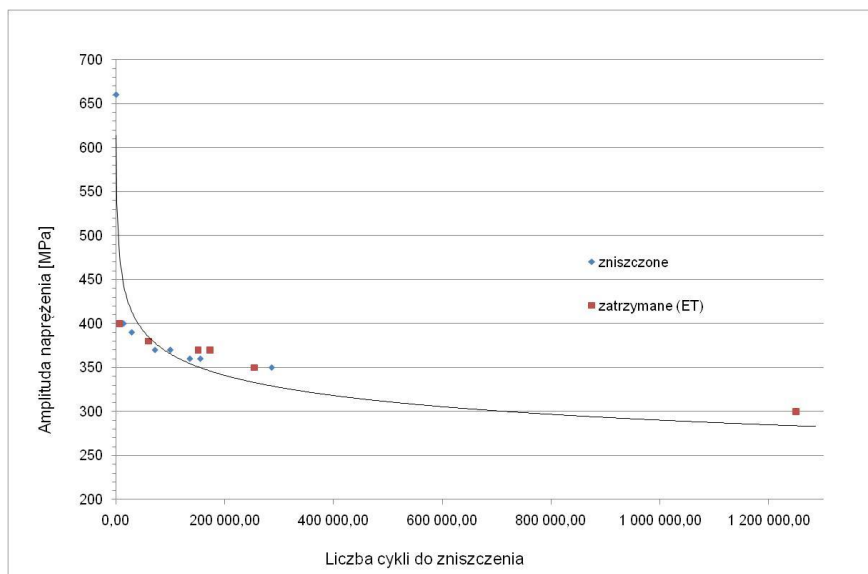
Rys. 2. Metodyka pomiaru kąta fazowego a) aproksymacja liniowa sygnału b) kąt styczny do sygnału

### Ocena zmian współrzędnych impedancji

Do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego z wykorzystaniem metody prądów wirowych podjęto także próby analizy zmian położenia plamki impedancyjnej (współrzędne geometryczne) w czasie skanowania próbki po wykonanym teście zmęczeniowym, wzdłuż osi głównej. W wyniku procesów kumulacji uszkodzenia w części przewężonej podczas obciążenia wysokocyklowego w mikrostrukturze materiału zachodzą zmiany wpływające na zmiany wartości przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej. Zmiany te próbowano opisać poprzez analizę zmian współrzędnych położenia plamki impedancyjnej w części chwytowej próbki (stan „0”) w stosunku do położenia plamki w części pomiarowej, o największym indeksie uszkodzenia.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie wyników badań zmęczeniowych dla próbek poddanych obciążeniu do zniszczenia, wyznaczono standardową krzywą Wöhlera przedstawioną na rys. 3.



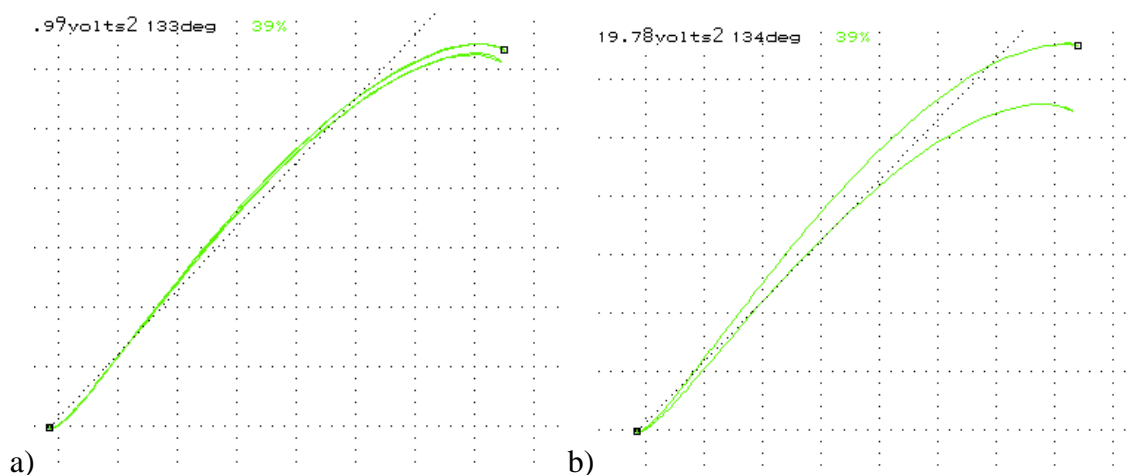
Rys. 3. Krzywa Wöhlera dla stali P91 wyznaczona na podstawie wyników próbek męczonych do zniszczenia oraz wyniki próbek zatrzymanych

Na wykresie naniesiono także punkty odpowiadające próbkom referencyjnym, dla których próby zmęczeniowe zostały zatrzymane przed pęknięciem. Szczegółowe informacje o parametrach wykonanych prób zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie próbek zmęczeniowych

Nazwa próbki	Amplituda naprężenia [MPa]	Liczba cykli	Status próbki
P_91_NET_01	660	576,00	przełom
P_91_NET_02	350	254 618,00	zatrzymana, pęknięta
P_91_NET_03	400	14 208,00	przełom
P_91_NET_04	370	151 504,00	zatrzymana
P_91_NET_05	300	1 250 033,00	zatrzymana
P_91_NET_06	380	59 825,00	zatrzymana
P_91_NET_07	350	286 264,00	przełom
P_91_NET_08	400	7 336,00	zatrzymana
P_91_NET_09	390	29 257,00	przełom
P_91_NET_10	380	60 000,00	zatrzymana, pęknięta
P_91_NET_11	370	173 195,00	zatrzymana, pęknięta
P_91_NET_12	360	155 257,00	przełom
P_91_NET_13	370	99 915,00	przełom
P_91_NET_14	370	71 953,00	przełom
P_91_NET_15	360	135 936,00	przełom

Próbki zatrzymane przed końcem testów zmęczeniowych poddano badaniom testom z wykorzystaniem metody prądów wirowych. Metoda oceny na podstawie zmian współrzędnych impedancji (B) została odrzucona ponieważ dynamika zmian czynników składowych impedancji nie pozwoliły na uzyskanie wyników możliwych do interpretacji. Oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego przeprowadzono więc z wykorzystaniem pomiaru zmian kąta fazowego. Przykładowe wyniki pokazana na rys. 4, a wszystkie wyniki pomiarów 6 próbek zestawiono w tabeli 2.



Rys. 4. Przykładowe zmiany kąta fazowego dla próbki przed i po teście zmęczeniowym dla częstotliwości 700 KHz dla próbki NET 05 (a) oraz NET 08 (b)

Tabela.1 Zmiany kąta fazowego oraz kąta styczego dla próbek o różnej historii obciążenia dla częstotliwości 500 kHz

Próbka	Kąt fazowy - aproksymacji		Kąt fazowy - styczny		uśredniona różnica kątów
	Przed testem	Po teście	Przed testem	Po teście	
NET 02	142,5	141,5	132	131	1
NET 05	142,5	142	132	131,5	0,5
NET 06 –	142	139	132	129	3
NET 08	141,5	138	132	128	3,75
NET 10	142,5	141	132	130,5	1,5
NET 11	142,5	140,5	132	129,5	2,25

Na podstawie wykonanych prób oceny stopnia zniszczenia zmęczeniowego próbek ze stali P91 można zauważyć, że proces zmęczenia w warunkach obciążeń wysokocyklowych powoduje nieznaczne ale zauważalne zmiany kąta fazowego sygnału prądowirowego. Zmiany te są największe dla najwyższej amplitudy obciążenia (400 MPa) i wynoszą  $3,5^{\circ}$  dla zmian kąta względem prostej aproksymującej i  $4^{\circ}$  dla kąta prostej stycznej. Najmniejsze zmiany zarejestrowano na próbce poddanej zmęczeniu pod obciążeniem 300 MPa (najniższa zastosowana wartość amplitudy naprężenia), gdzie różnice w kącie pomiędzy stanem początkowym i stanem po teście wynosiły  $0,5^{\circ}$  dla obu parametrów kątowych.

Różnice w wartości zmierzonego kąta dla próbek NET 06 oraz NET 10, które poddane były takiemu samemu obciążeniu (380MPa) w tym samym czasie (ok. 60 000cykli) mogą wynikać z faktu pęknięcia próbki NET 10, co spowodowało częściową relaksację naprężeń, których stan wpływa na parametry sygnału prądów wirowych.

### 3. WNIOSKI

Metoda prądów wirowych stosowana powszechnie w defektoskopii może być także z stosowana w zakresie oceny stanu materiału po pracy w warunkach cyklicznych obciążeń zmiennych oraz monitorowania rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w końcowym etapie rozwoju. Wymaga to jednak opracowania procedur pomiarowo-badawczych z systemem wzorcowania i kalibracji, które pozwolą na identyfikację i analizę subtelných zmian sygnału prądowirowego wywołanych obciążeniami zmęczeniowymi. Ponieważ charakter prądów wirowych wzbudzanych w materiale zależy także od zmian zachodzących po wpływie temperatury, należy także rozważyć wykorzystanie tej metody do oceny stopnia degradacji materiałów instalacji i konstrukcji pracujących w warunkach obciążeń mechanicznych jak i cieplnych.

### LITERATURA

1. D. Kukla, L. Dietrich, M. Ciesielski „Ocena stopnia uszkodzenia eksploatacyjnego materiału rurociągu parowego na podstawie analizy zmian właściwości zmęczeniowych i mikrostruktury”, VI Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 30 maja - 2 czerwca 2011
2. G. Socha, Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, Int. J. Fatigue, 25, 2003, 139-147.