

NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH
NATIONAL CENTRE for NUCLEAR RESEARCH

BADANIA MATERIAŁOWE
NA POTRZEBY ELEKTROWNI
I PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO

XX. Seminarium Naukowo – Techniczne

Zakopane, 19-21 czerwca 2013 roku

**SEMINARIUM OBJĘTE HONOROWYM PATRONATEM MINISTRA
GOSPODARKI**

- Komitet programowy:
- Ewa Hajewska – LBM NCBJ, przewodnicząca
 - Jacek Jagielski – NCBJ
 - Jan Pilarczyk – Instytut Spawalnictwa
 - Andrzej Sidło – Ministerstwo Gospodarki
 - Andrzej Strupezowski – NCBJ
 - Marek Walczak – Urząd Dozoru Technicznego
 - Krzysztof Wieteska – NCBJ

Komitet organizacyjny: Seminarium sponsorowane przez

- Waldemar Bilous – LBM NCBJ, przewodniczący
- Jan Wasiak – LBM NCBJ
- Martyna Przyborska – LBM NCBJ
- Tadeusz Wagner – LBM NCBJ
- Mariusz Wierzbicki – LBM NCBJ



OTWOCK – ŚWIERK 2013

MONITOROWANIE ROZWOJU USZKODZENIA ZMĘCZENIOWEGO STALI DLA ENERGETYKI Z WYKORZYSTANIEM METODY PRĄDÓW WIROWYCH

Dominik Kukła

Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej - Warszawa

W pracy podjęto badania nad rozwojem metodyki ilościowej oceny rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego wysokostopowej stali X10CrMoVNb9-1 z wykorzystaniem nieniszczącej techniki diagnostycznej metodą prądów wirowych. Na podstawie opracowanej procedury charakteryzowania stopnia degradacji w wyniku cyklicznych obciążeń zmiennych, w oparciu o pomiary wartości odkształceń średnich oraz odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach obciążenia zdefiniowano Odkształceniowy Współczynnik Uszkodzenia Zmęczeniowego (ϕ), opisujący dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach. Wyznaczone w ten sposób parametry uszkodzenia skorelowano z wynikami pomiarów kąta fazowego sygnału prądowirowego mierzonego na powierzchni części pomiarowych próbek w ustalonych etapach procesu zmęczenia, przy amplitudzie naprężenia w zakresie 360–420 MPa. Na podstawie opracowanych procedur pomiarowych uzyskano wyniki wskazujące na możliwość lokalizacji i identyfikacji uszkodzenia zmęczeniowego we wczesnym etapie jego rozwoju jak również na ilościową ocenę stopnia degradacji w oparciu o nieniszczące techniki diagnostyczne.

1. WPROWADZENIE

Ocena stanu degradacji w elementach konstrukcji stalowych jest zagadnieniem trudnym, odpowiedzialnym oraz niezwykle istotnym z punktu widzenia diagnozowania trwałości eksploatacyjnej konstrukcji. Jednym ze zjawisk wpływających na dynamikę rozwoju uszkodzenia konstrukcji są zmiany stanu naprężeń pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych (zarówno mechanicznych jak i termicznych i środowiskowych) i zmiany mikrostrukturalne nimi wywołane. Podejmowane są liczne starania zmierzające do opracowania nowych technik nieniszczących, które pozwoliłyby szybko i skutecznie ocenić stopień wyeksploatowania konstrukcji w oparciu o ocenę stanu naprężenia, rozszerzając tym samym zakres stosowanych obecnie metod obejmujących, m.in. tensometrię oporową i mechaniczną czy metody rentgenowskie.

W ostatnich latach zostały podjęte próby wykorzystania diagnostyczno – pomiarowej metody prądów wirowych (ET) do nieniszczących pomiarów naprężeń własnych jak i eksploatacyjnych w wierzchnich warstwach niektórych elementów konstrukcyjnych. W badaniach tych wykorzystywane są zaawansowane metody analizy mikrostruktury oraz właściwości wytrzymałościowych z zastosowaniem m.in. mikroskopii świetlnej i elektronowej, badań ultradźwiękowych oraz emisji akustycznej. W nurt tych badań wpisuje się metoda prądów wirowych, za pomocą której możliwy jest nie tylko monitoring zmian stanu naprężenia w elementach obciążanych zmęczeniowo, ale także ocena stopnia uszkodzenia zmęczeniowego.

Prądy wirowe są powszechnie wykorzystywane do diagnostycznych badań defektoskopowych, w których celem jest identyfikacja i lokalizacja nieciągłości, najczęściej w postaci pęknięć eksploatacyjnych w materiałach metalicznych. W realizacji niniejszego projektu została ona wykorzystana na poziomie subtelnych zmian charakterystyki materiału spójnego, bez pęknięć. Dzięki temu wykazano zależność parametrów prądowirowych, takich jak kąt fazowy wzbudzanego w materiale sygnału, nie tylko od zmiany stanu naprężeń

własnych, ale też od innych czynników związanych z procesami degradacji mikrostruktury w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

Rozwój badań z wykorzystaniem techniki prądów wirowych pozwala m. in. na ocenę stanu naprężeń własnych w konstrukcji zbiorników i przewodów rurowych. Badania tego typu służą np. do oceny i wyznaczania miejsc o największym wyężeniu materiału jako obszarów, które należy poddać szczegółowej kontroli podczas pracy instalacji ciśnieniowych. W zakresie pomiaru naprężenia metoda prądów wirowych stosowana jest także do oceny efektu odprężania spoin, do oceny stanu naprężeń w pokrywach turbin pracujących w podwyższonych temperaturach oraz do oceny stanu naprężenia kół kolejowych po obróbce osadzania wciskowego [1]. Pewnym ograniczeniem jest tutaj powierzchniowy charakter metody prądów wirowych, co nie wyklucza aplikowania jej do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego elementów cienkościennych. Badanie stanów podpowierzchniowych jest także wystarczające do określenia maksymalnego wyężenia w obiektach użytkowych [2, 3]. Z tego względu, możliwe jest zastosowanie omawianej metody do weryfikacji stanu naprężenia oraz monitorowania procesów generowanych zmianami tych stanów.

Problem degradacji struktury materiałów wywołanej zmiennymi obciążeniami mechanicznymi i termicznymi jest istotny zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa jak i kosztów eksploatacji instalacji przemysłowych. Przykładem takich instalacji mogą być instalacje energetyczne pracujące w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Ciągły tryb pracy tych instalacji stwarza konieczność monitorowania ich stanu i oceny rozwoju zniszczenia. Obecnie stosowane metody diagnostyczne, bazujące głównie na metodach nieniszczących, pozwalają zidentyfikować wady materiałowe w postaci nieciągłości mikrostruktury (pustki, pęknięcia), w ostatnim etapie rozwoju procesu degradacji, bezpośrednio przed utratą spójności. Dlatego ocena stanu technicznego wymaga opracowywania szczegółowych programów kontroli eksploatacyjnej konstrukcji i urządzeń zabezpieczających przed niespodzianymi awariami. Wzbogacenie tego typu programów o możliwość ilościowej oceny stopnia zniszczenia na etapie poprzedzającym powstawanie pęknięć w skali makro, pozwoli zaoszczędzić wielu działań o charakterze profilaktycznym, niezbędnych z punktu widzenia bezpiecznej pracy instalacji. Opracowana metodyka ilościowego opisu uszkodzenia opiera się na założeniu nieliniowej odpowiedzi materiału w kolejnych cyklach obciążenia o stałej amplitudzie naprężenia. Oznacza to zmienną dynamikę rozwoju degradacji w całym procesie zmęczenia, której wzrost intensyfikowany jest w końcowym etapie obciążenia generując lokalne zmiany w rozkładzie naprężenia. Ilościowo zdefiniowana wartość uszkodzenia korelowana ze zmierzonymi wartościami parametrów prądowych pozwala z sposób pośredni ale za to nieniszczących ocenić stopień zdegradowania materiału pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych.

2. MATERIAŁ I ZAKRES BADAŃ

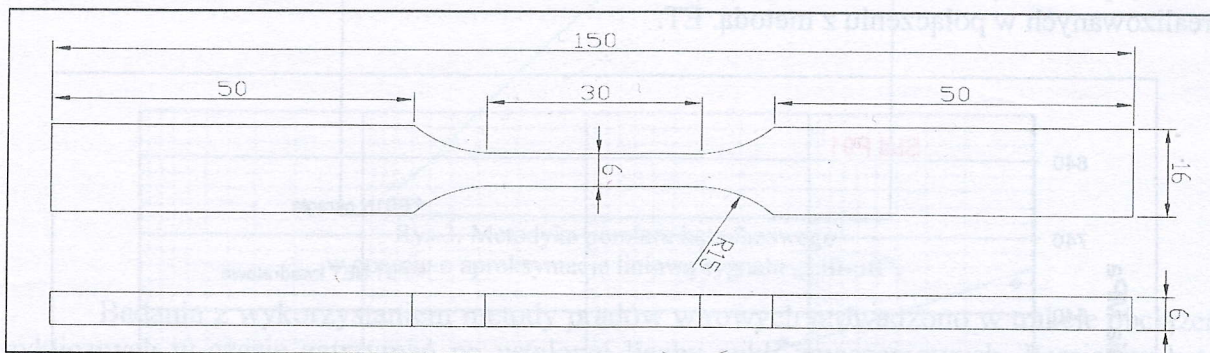
Badania prowadzono na próbkach żarowytrzymałej stali stopowej X10CrMoVNb9-1 (P91), stosowanej w budowie kotłowych przegrzewaczy pary, zbiorników pary, zbiorników ciśnieniowych i rurociągów pary z przeznaczeniem do pracy w zakresie temperatur do 650°C. Próbki do badań pobrano z nowego, nieeksploatowanego rurociągu, a w tablicy 1 zamieszczono wyniki jego analizy chemicznej wskazujące na zgodność zawartości pierwiastków stopowych z zakresem normowym.

Tablica 1. Zawartość pierwiastków stopowych w próbkach ze stali P91 przed i po eksploatacji oraz wg Polskiej Normy

	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	S	P
próbki badane	0,12	0,39	8,31	0,82	0,29	0,18	0,15	0,25	0,006	<0,001
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	

Próbki do badań

Do wykonania badań zmęczeniowych, skorelowanych z badaniami nieniszczącymi metodą prądów wirowych (ET) opracowano geometrię próbek (rys.1.) umożliwiającą pomiar sondą do badań metodą prądów wirowych, przy zachowaniu wydłużonej części pomiarowej celem uniknięcia lokalizacji uszkodzenia w jednym, najmniejszym przekroju próbki. W celu oceny możliwości wykorzystania metody prądów wirowych do oceny stopnia degradacji wykonano początkowo płaskie próbki klepsydryczne, w których kumulacja uszkodzeń zachodzi w przewężeniu próbki i w tym miejscu wykonano pomiary zmian kąta fazowego w kolejnych cyklach obciążenia. Na tej podstawie stwierdzono wpływ stopnia uszkodzenia (zdefiniowanego wstępnie liczbą cykli) na wartość kąta fazowego krzywej oddalenia sygnału prądów wirowych. To z kolei pozwoliło podjąć badania nad możliwością nie tylko identyfikacji, ale i lokalizacji, miejsc o największym stopniu uszkodzenia zmęczeniowego za pomocą pomiaru kąta fazowego sygnału prądowirowego. Dalsze badania prowadzono więc na próbkach o wydłużonej części pomiarowej, o geometrii pokazanej na rys.1, gdzie umiejscowienie kumulacji uszkodzenia uwarunkowane jest nie tylko karbem geometrycznym, ale i strukturalnym. Szerokość części pomiarowej próbek zmęczeniowych badanych z wykorzystaniem metody prądów wirowych zdeterminowana była średnicą najmniejszej dostępnej sondy stykowej do badań metodą ET.



Rys.1. Geometrie próbki do badań zmęczeniowych z wydłużoną częścią pomiarową do lokalizacji uszkodzenia na podstawie zmian parametrów prądowych

Badania zmęczeniowe

Badania zmęczeniowe próbek ze stali X10CrMoVNb9-1 (P91) wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS 858, z zakresem siły osiowej +/- 25 kN i momentu skręcającego +/- 200 Nm wyposażonej w sterownik cyfrowy TestStar II. Maszyna była sterowana przy pomocy oprogramowania MTS TestStar v. 4.0D + TestWare-SX v. 4.0D oraz 790.20 Fatigue Test Application.

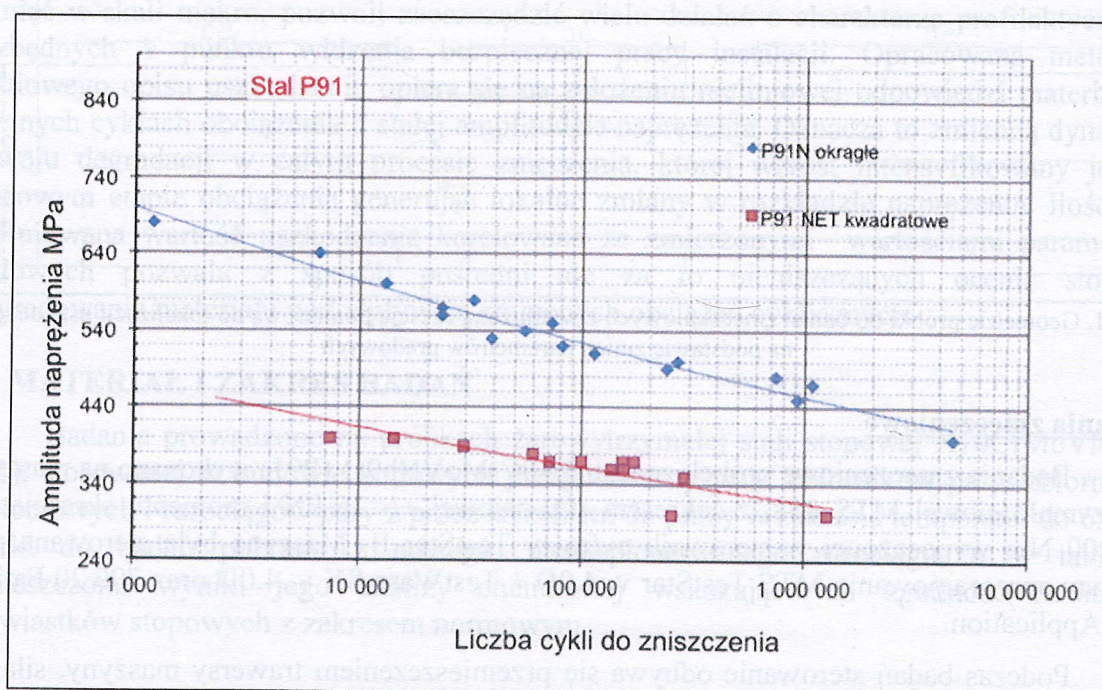
Podczas badań sterowanie odbywa się przemieszczeniem trawersy maszyny, siłą lub odkształceniem próbki odczytywanym z tensometrów elektrooporowych przyklejanych do powierzchni pomiarowej próbki lub ekstensometrów mocowanych na próbce. Możliwe jest również wykorzystanie do sprzężenia zwrotnego sygnału przeliczeniowego takiego jak

naprężenie lub odkształcenie niesprężyste. W przypadku testów zmęczeniowych próbek wykonanych ze stali P91 zastosowane zostało sterowanie siłą, a rejestrowana była odpowiedź materiału na zadane obciążenie w postaci odczytów z ekstensometru mocowanego do powierzchni pomiarowej próbki.

Na podstawie wyznaczonych w próbie rozciągania wartości umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ określono zakres obciążeń zmęczeniowych wynoszący 300 - 420 MPa. Obciążenie realizowano przy sterowaniu siłą i zachowaniu zerowej wartości średniej w cyklu i stałej wartości amplitudy naprężenia dla danej próbki. Zastosowano wahadłowy cykl obciążenia ($\sigma_m=0$) z częstotliwością wynoszącą 20 Hz.

Testy zmęczeniowe próbek do badań nieniszczących były zatrzymywane w różnych etapach rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, ze szczególnym zagęszczeniem w końcowym etapie, gdzie następuje gwałtowny przyrost odkształceń związanych z inicjacją mikropęknięć i tworzeniem się szczeliny dominującej. 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.

W celu weryfikacji wyników badań właściwości zmęczeniowych uzyskanych na próbkach osiowosymetrycznych wykonano serię testów zmęczeniowych dla próbek klepsydrycznych płaskich. Uzyskany wynik pokazał jak silnie geometria próbki wpływa na otrzymywane wartości parametrów wytrzymałościowych. Jak widać na rys.2., gdzie przedstawiono obie opracowane charakterystyki zmęczeniowe, wartości amplitudy naprężenia, przy której następuje uszkodzenie próbki po danej liczbie cykli, są dla próbek o przekroju okrągłym blisko 50% większe niż w przypadku próbek o przekroju kwadratowym. Różnica ta jest niemal stała w zakresie od 0 do 10 mln cykli. Wyniki tych badań pozwoliły na weryfikację parametrów zatrzymywanych testów zmęczeniowych realizowanych w połączeniu z metodą ET.

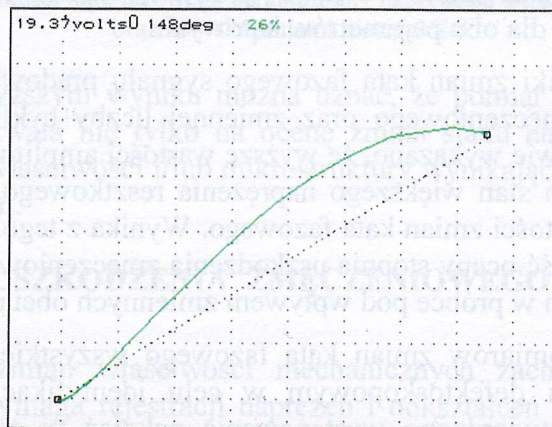


Rys.2. Krzywe Wohlera dla próbek ze stali P91 w stanie dostawy o różnej geometrii

Badania metodą prądów wirowych

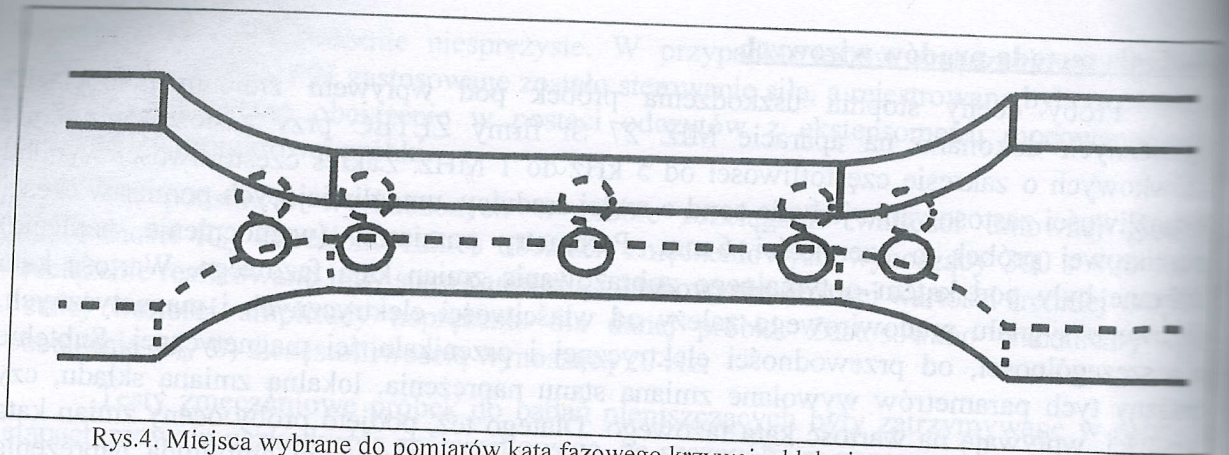
Próby oceny stopnia uszkodzenia próbek pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych dokonano na aparacie MIZ 27 Si firmy ZETEC przy zastosowaniu sond ołówkowych o zakresie częstotliwości od 5 kHz do 1 MHz. Zakres częstotliwości wynikał z możliwości zastosowania jedynie sond o małej średnicy, umożliwiającymi pomiar w części pomiarowej próbek o szerokości 6 mm. Parametry pomiarów (wzmocnienie, napięcie) dobrane były pod kątem optymalnego zobrazowania zmian kąta fazowego. Wartość kąta fazowego sygnału prądowiowego zależy od właściwości elektrycznych i magnetycznych, a w szczególności, od przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej. Subtelne zmiany tych parametrów wywołane zmianą stanu naprężenia, 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.3). 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), stycznej do krzywej oddalenia.



Rys.3. Metodyka pomiaru kąta fazowego w oparciu o aproksymację liniową sygnału „Lift-off”.

Badania z wykorzystaniem metody prądów wirowych prowadzono w trakcie obciążeń cyklicznych w czasie zatrzymań po ustalonej liczbie cykli zmęczeniowych. Pomiarów kąta fazowego dokonywano w pięciu miejscach na każdej z dwóch stron próbki, według schematu na rys.4. Dzięki temu wartość kąta fazowego pochodzącą od sygnału z trzech miejsc części pomiarowej, gdzie koncentrują się odkształcenia można korelować z wartością kąta w miejscach o zerowej (w przybliżeniu) wartości odkształceń. Pomiar kąta w części pomiarowej realizowany był w miejscach, gdzie dochodziło do pęknięcia próbek, tzn. w części środkowej oraz w miejscach przewężenia (z obu stron próbki).

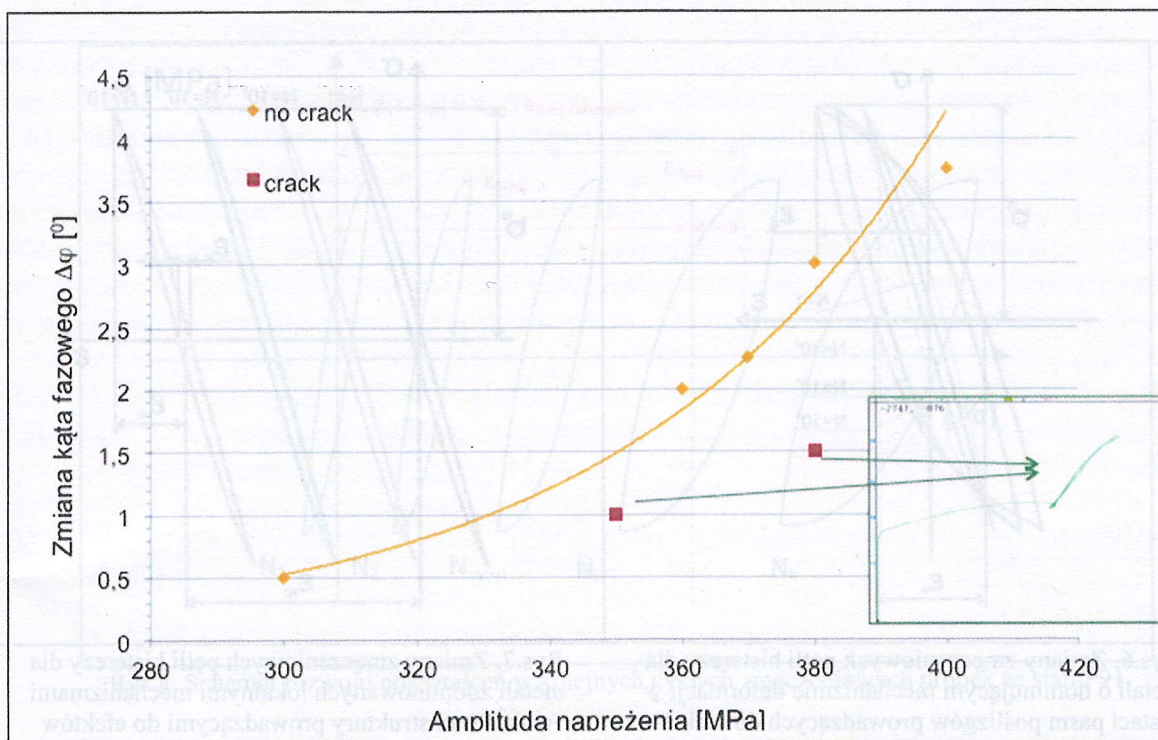


Rys.4. Miejsca wybrane do pomiarów kąta fazowego krzywej oddalenia sygnału prądowirowego

Na podstawie wykonanych prób oceny stopnia zniszczenia zmęczeniowego próbek ze stali P91 za pomocą techniki prądów wirowych można zauważyć, że proces zmęczenia w warunkach obciążeń wysokocyklowych powoduje nieznaczne, ale zauważalne zmiany kąta fazowego sygnału prądowirowego dla sygnału typu 'lift-off'. Zmiany te są największe dla najwyższej amplitudy obciążenia (400 MPa) i wynoszą około 3,5 dla zmian kąta prostej aproksymującej sieczną i około 4,0 dla 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 około 0,5 dla obu parametrów kątowych.

Opracowano wyniki zmian kąta fazowego sygnału prądowirowego w zależności od amplitudy naprężenia zmęczeniowego oraz zmiennej liczby cykli przy stałej amplitudzie obciążenia. Na tej podstawie wykazano, że wyższe wartości amplitudy naprężenia generują w próbkach zmęczeniowych stan większego naprężenia resztkowego, co z kolei prowadzi do uzyskania większych wartości zmian kąta fazowego. Wynika z tego, że głównym czynnikiem determinującym możliwość oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego jest poziom naprężeń własnych skumulowanych w próbce pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych.

Po wykonaniu pomiarów zmian kąta fazowego wszystkie próbki zostały poddane standardowym badaniom defektoskopowym w celu identyfikacji i lokalizacji pęknięć. W wyniku tych badań stwierdzono występowanie pęknięć w części pomiarowej dwóch próbek. Dla tych próbek kąt fazowy wykazywał mniejszą wartość w porównaniu z resztą próbek. To potwierdziło przypuszczenie o zależności kąta od stanu naprężeń własnych w próbce, ponieważ można założyć, że pęknięcie spowodowało relaksację próbek. Efekt ten jest przedstawiony na rys.5, gdzie pokazano wyniki pomiarów wielkości kąta dla próbek po testach zmęczeniowych zakończonych przed pęknięciem próbki. Pomiar kąta dał dużą rozbieżność wyników. Jednak po badaniach defektoskopowych powierzchni próbek stwierdzono w dwóch przypadkach pęknięcia w strefie pomiarowej, które wpłynęły na wartość zmierzonego kąta poprzez wywołanie częściowej relaksacji naprężeń resztkowych skumulowanych w wyniku obciążeń cyklicznych.

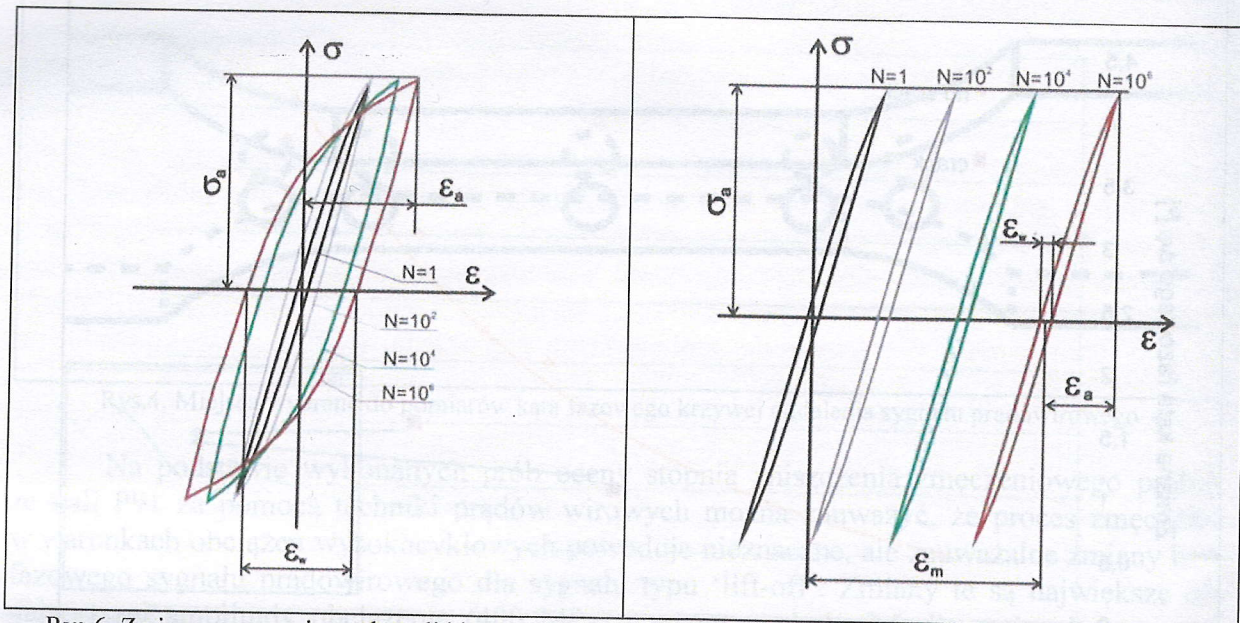


Rys.5. Zależność wielkości kąta fazowego od amplitudy naprężenia dla próbek przed pęknięciem oraz ze wskazaniami nieciągłości

Bazując na powyższym wyniku można uznać, że pomiar kąta fazowego próbek po różnej liczbie cykli pozwala nie tylko na ocenę zmian stanu naprężenia, ale także niesie informację o zmianach właściwości i/lub mikrostruktury wynikających z procesów degradacji wywołanych zmęczeniem.

3. MECHANIZMY USZKODZENIA ZMĘCZENIOWEGO I JEGO ILOŚCIOWY OPIS

Monitorowanie zmian właściwości mechanicznych zachodzących pod wpływem obciążeń cyklicznych wymaga rejestracji naprężeń i odkształceń części pomiarowej próbki w kolejnych cyklach obciążenia. Zachowanie metali w zakresie zmęczenia można podzielić na dwa zasadnicze typy pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń [7]. Zachowanie pierwszej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane cykliczną plastycznością generowaną mikroślizgami poprzedzającymi powstanie pasm ślizgów. Typowym zachowaniem tej grupy metali jest zwiększająca się szerokość pętli histerezy wykresu naprężenia – odkształcenia jak pokazano na rys.6. W kolejnych cyklach zwiększa się odkształcenie niesprężyste odzwierciedlające szerokość pętli histerezy przy utrzymywaniu stałej, równej zero, wartości średnich odkształceń w cyklu. Zwiększanie się odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach jest związane ze zwiększaniem się amplitudy odkształceń i zmniejszaniem się granicy plastyczności w kolejnych cyklach. Każda z tych wielkości – odkształcenie niesprężyste, amplituda odkształcenia i granica plastyczności może być miarą rozwoju uszkodzeń wykorzystaną do wyznaczenia wartości parametru uszkodzeń w kolejnych cyklach obciążenia.

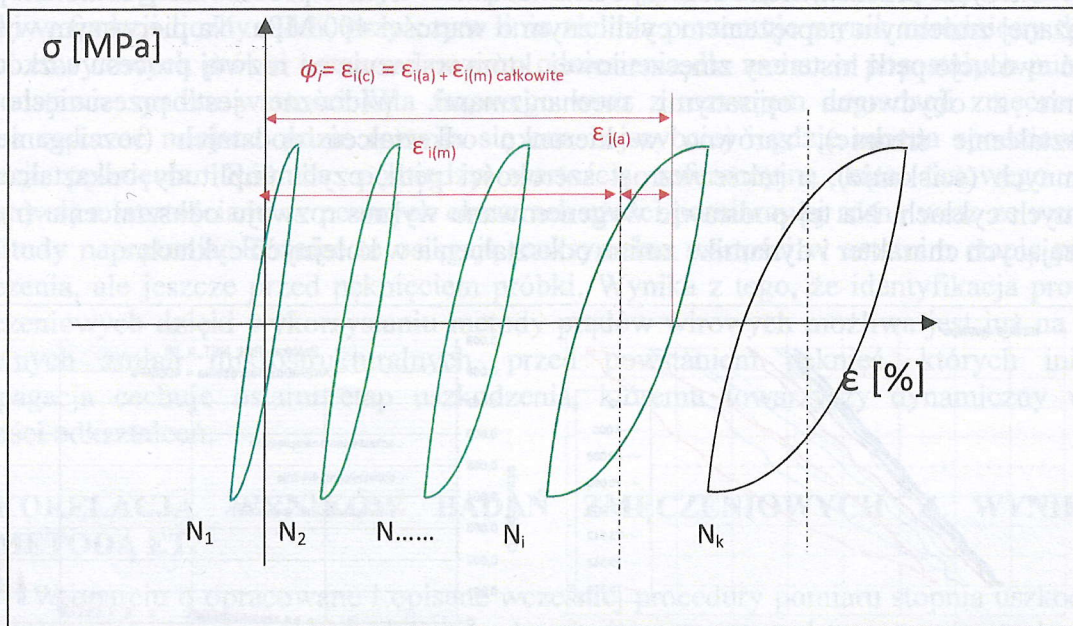


Rys.6. Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy dla metali o dominującym mechanizmie deformacji w postaci pasm poślizgów prowadzących do efektów cyklicznej plastyczności

Rys.7. Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy dla metali zdominowanych lokalnymi mechanizmami wokół wad struktury prowadzącymi do efektów ratchetingu

Zachowanie drugiej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane przez ratcheting generowany lokalnymi odkształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych wad struktury. Zmiana wykresu naprężenie – odkształcenie w kolejnych cyklach jest uwidoczniona na rys.7. Szerokość pętli histerezy i amplituda odkształceń nie zmieniają się w kolejnych cyklach a rośnie tylko średnie odkształcenie w cyklu. Pętla histerezy o stałej szerokości przesuwa się w miarę narastania liczby cykli. Parametr uszkodzenia może być w tym przypadku utożsamiany z wartością średniego odkształcenia w cyklu. Proces rozwoju uszkodzeń jest zdominowany początkowym rozkładem i wielkością wad [6]. Lokalne deformacje wokół wad i twardych wtrąceń niemetalicznych mają niesymetryczny charakter przy zmianie kierunku naprężenia. Globalne zmiany odkształceń w objętości próbki mogą rozwijać się w obu kierunkach. Trwałe odkształcenia w kolejnych cyklach mogą narastać, jak to pokazano na rys.7 lub mogą się zmniejszać, ale mechanizmy wywołujące niesymetryczną odpowiedź materiału przy rozciąganiu i ściskaniu, jak np. mechanizm odspojenia na części twardego wtrącenia, który powoduje lokalne odkształcenia tylko przy naprężeniach rozciągających, powodują znaczne częstsze zwiększanie w kolejnych cyklach odkształceń ratchetingu w porównaniu do mechanizmów powodujących zmniejszanie odkształceń średnich w kolejnych cyklach.

W przypadku stali P91 mamy do czynienia z kombinacją ww. mechanizmów, przy czym ich udział w rozwoju uszkodzenia zależy przede wszystkim od wartości amplitudy naprężenia. Zatem rozwój odkształceń w kolejnych cyklach będzie miał przebieg zbliżony do schematu na rys.8. Efekt końcowy zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju i rozmiaru wad oraz ich rozkładu. Inny będzie rozkład odkształceń wokół pustek jakie występują w stopach odlewniczych, a inny wokół twardych lub spękanych wtrąceń niemetalicznych [7]. Efekty wad początkowych mają decydujący wpływ na zachowanie się metali przy obciążeniach cyklicznych w zakresie zmęczenia nisko i wysoko cyklowego i podejmowane są próby ich opisanie i modelowania [8, 9, 10].



Rys.8. Schemat rozwoju odkształceń w kolejnych cyklach zmęczeniowych próbek ze stali P91

Przy założeniu, że rozwój uszkodzenia zmęczeniowego determinowany jest przyrostem lokalnych odkształceń wymuszonych lokalną koncentracją naprężeń, można opracować metodykę ilościowego opisu stopnia degradacji na podstawie oceny dynamiki rozwoju odkształceń. Możliwość opisu stopnia degradacji właściwości wytrzymałościowych za pomocą prób zmęczeniowych stwarza nie tylko interpretacja przebiegu krzywej Wöhlera, ale także analiza zmian dynamiki rozwoju zarówno w zakresie poziomego odkształcenia średniego jak i odkształcenia plastycznego pod wpływem obciążeń zmiennych dla wszystkich zastosowanych wartości amplitudy naprężenia. Zmiany te zostały sparametryzowane za pomocą odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego (ϕ) [12, 13], 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.8.), jako parametr opisujący rozwój uszkodzenia przyjęto sumę odkształcenia średniego i niesprężystego, zdefiniowaną jako odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego i wyrażonego wzorem:

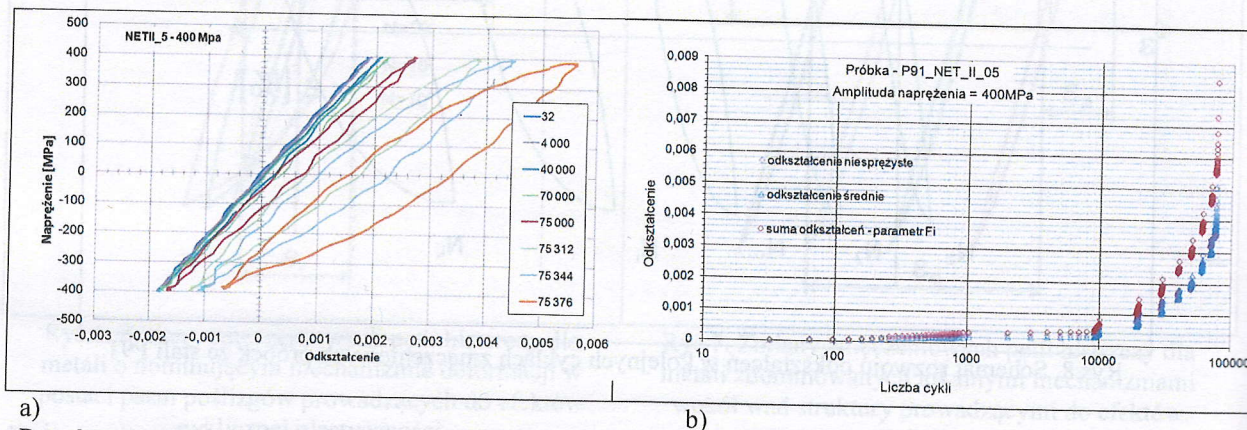
$$\phi = \varepsilon_a + \varepsilon_m$$

gdzie:

ε_w - amplituda szerokości pętli histerezy cyklu, wyrażone wzorem $\varepsilon_w = \frac{\varepsilon_{min}^{F=0} - \varepsilon_{max}^{F=0}}{2}$

ε_m - średnie odkształcenie w cyklu określające położenie pętli histerezy danego cyklu na osi odkształceń, wyrażone wzorem $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{min}^{F=0} + \varepsilon_{max}^{F=0}}{2}$

Na rys.9 przedstawiono rozwój odkształcenia w trakcie procesu zmęczenia dla próbek obciążanej zmiennym naprężeniem cyklicznym o wartości 400 MPa. Na pierwszym wykresie widać ewolucję pętli histerezy zmęczeniowej, która wskazuje na rozwój procesu uszkodzenia zgodnie z obydwojma opisanymi mechanizmami. Widoczne jest przesunięcie pętli (odkształcenie średnie), zarówno w kierunku odkształceń dodatnich (rozciąganie) jak i ujemnych (ściskanie), a także wzrost szerokości pętli, czyli amplitudy odkształcenia w kolejnych cyklach. Na tej podstawie wygenerowano wykres rozwoju odkształcenia (rys.9 b) obrazujących charakter i dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach.

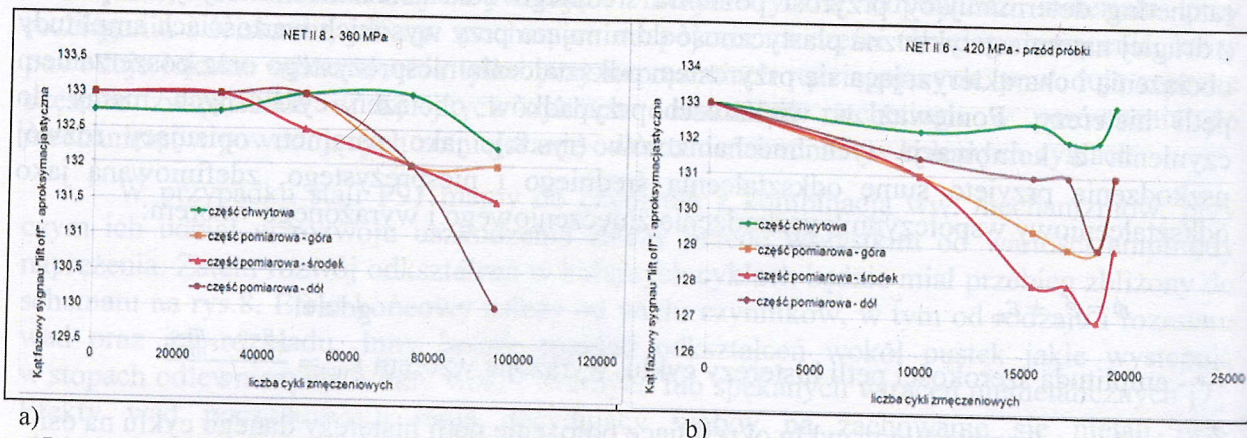


a) b)
Rys. 9. Rozwój odkształceń w postaci: a) pętli histerezy zmęczeniowej i jej ewolucji w wybranych cyklach, b) przyrostu składowych odkształcenia w kolejnych cyklach, dla amplitudy 400 MPa

Na podstawie opisanej procedury zostały wyznaczone odkształceniowe współczynniki uszkodzenia zmęczeniowego dla serii 4. próbek poddanych obciążeniom zmiennym przy amplitudzie 360, 380, 400 i 420 MPa. Uzyskane wyniki skorelowano z wynikami badań nieniszczących.

4. WYNIKI POMIARÓW KĄTA FAZOWEGO SYGNAŁU PRĄDOWIROWEGO

Pomiary kąta fazowego wykonywano podczas prób zmęczeniowych, przy zatrzymaniu obciążenia dla ustalonej liczby cykli. Częstotliwość zatrzymań uzależniona była od amplitudy obciążenia. Wyniki, w postaci zależności kąta fazowego od liczby cykli przedstawiono dla wybranych próbek, na rys.10.

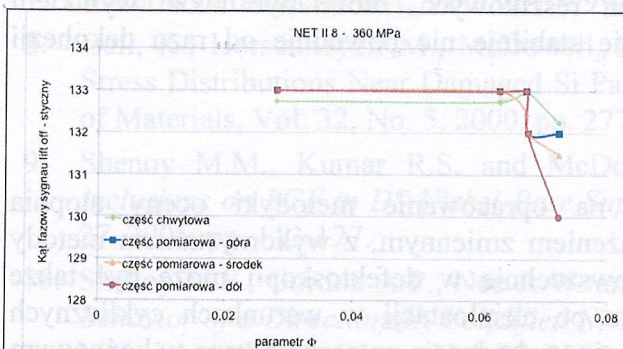


a) b)
Rys.10. Zmiany wartości kąta fazowego w kolejnych cyklach obciążenia amplitudą a) 360 MPa, b) 420 MPa

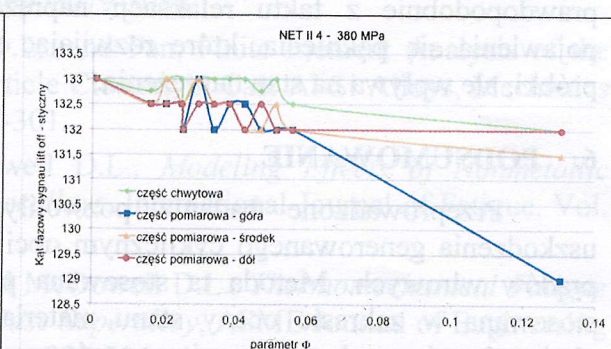
Poszczególne linie na wykresie przedstawiają zmianę kąta w różnych miejscach próbki w funkcji liczby cykli, przy czym linia zielona prezentuje wynik uśredniony dla obu części chwytowych próbki i stanowi poziom odniesienia dla zmian w pozostałych punktach. Na podstawie spadku wartości kąta fazowego wraz z rozwojem degradacji zmęczeniowej można wskazać miejsca, gdzie rozwija się ona najszybciej i gdzie można spodziewać się inicjacji pęknięcia. Różnice pomiędzy wartością referencyjną kąta fazowego (część chwytowa) a wartościami w pewnych obszarach części pomiarowej rosną wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia. Różnice te osiągają maksymalne wartości w ostatnim etapie procesu zmęczenia, ale jeszcze przed pęknięciem próbki. Wynika z tego, że identyfikacja procesów zmęczeniowych dzięki wykorzystaniu metody prądów wirowych możliwa jest już na etapie subtelnych zmian mikrostrukturalnych, przed powstaniem pęknięć, których inicjacja i propagacja cechuje ostatni etap uszkodzenia, któremu towarzyszy dynamiczny wzrost wartości odkształceń.

5. KORELACJA WYNIKÓW BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH Z WYNIKAMI METODĄ ET.

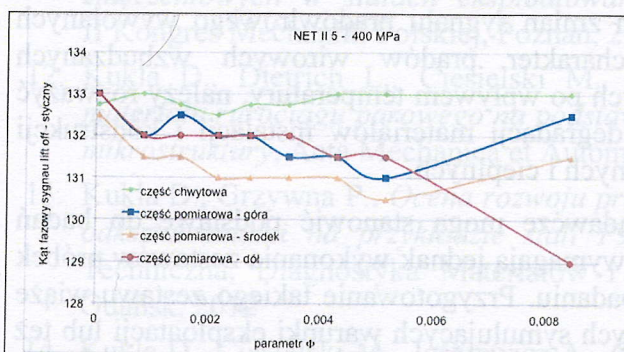
W oparciu o opracowane i opisane wcześniej procedury pomiaru stopnia uszkodzenia w dowolnym etapie jego rozwoju dokonano korelacji wyznaczonych parametrów uszkodzenia z wynikami nieniszczącymi. Na rys.11 - 14 przedstawiono zależność kąta fazowego sygnału prądowiowego od stopnia uszkodzenia wygenerowanego w próbach zmęczeniowych opisanego parametrem odkształceniowym.



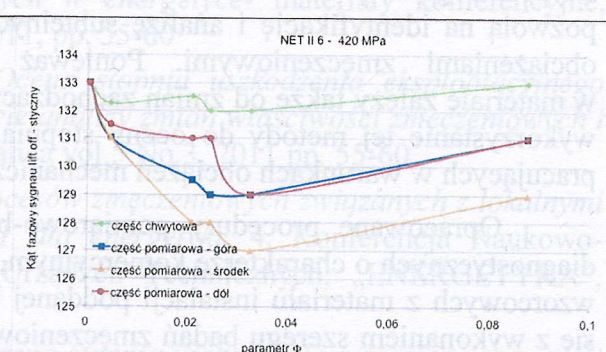
Rys.11. Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru ϕ dla amplitudy 360MPa



Rys.12. Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru ϕ dla amplitudy 380MPa

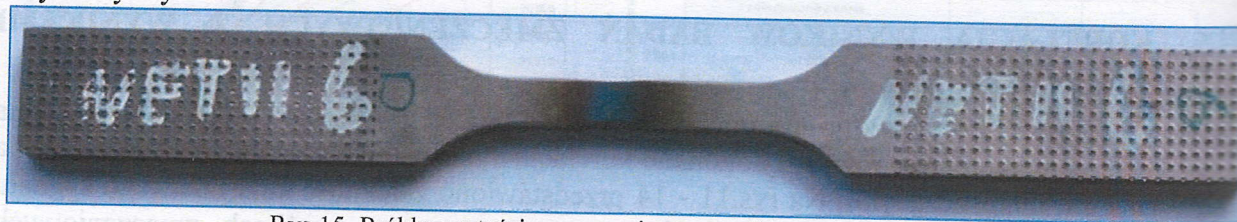


Rys.13. Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru ϕ dla amplitudy 400MPa



Rys.14. Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru ϕ dla amplitudy 420MPa

We wszystkich czterech próbkach widoczna jest zmiana wartości kąta fazowego, w wybranych punktach części pomiarowych próbek, przy czym zmiany te intensyfikują się w końcowym etapie testu zmęczeniowego. Wielkość tych zmian zależy także od wartości amplitudy i zmienia się od 3. stopni różnicy pomiędzy częścią referencyjną i pomiarową dla amplitudy 360 MPa do 6. stopni dla amplitudy 420 MPa. Najniższe wartości kąta cechują miejsca o potencjalnie największej, lokalnej koncentracji naprężenia zmierzonej w ostatnim pomiarze poprzedzającym pęknięcie. Wyjątek stanowi próbka nr 6 (rys.14), dla której po spadkach wartości kąta mierzonych w kolejnych 4. pomiarach, ostatni pomiar poprzedzający pęknięcie wskazuje na wyższe wartości i zaburzenie niemal liniowej tendencji spadkowej. Wy tłumaczeniem tego wyniku może być fakt przegrzania próbki w końcowym etapie testu z uwagi na stosunkowo wysoką amplitudę naprężenia w połączeniu z dużą częstotliwością obciążeń. Efekt ten widoczny jest na zdjęciu próbki nr 6 na rys.15. Przegrzanie materiału doprowadziło do relaksacji skumulowanych w procesie zmęczenia naprężeń i wpłynęło na uzyskany wynik.



Rys.15. Próbką po teście zmęczeniowym z efektem przegrzania

Zjawisko wzrostu wartości kąta fazowego przy ostatnim pomiarze, wynikające prawdopodobnie z faktu relaksacji naprężeń resztkowych, może być także wynikiem pojawienia się pęknięcia, które rozwijając się stabilnie nie powoduje od razu dekohezji próbki, ale wpływa na stan naprężenia.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie metodyki oceny stopnia uszkodzenia generowanego cyklicznym obciążeniem zmiennym, z wykorzystaniem metody prądów wirowych. Metoda ta stosowana powszechnie w defektoskopii może być także stosowana w zakresie oceny stanu materiału po eksploatacji w warunkach cyklicznych obciążeń zmiennych oraz monitorowania rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w końcowym etapie rozwoju. Wymaga to jednak opracowania procedur pomiarowo-badawczych z typoszeregiem próbek referencyjnych oraz systemem wzorcowania i kalibracji, które pozwolą na identyfikację i analizę subtelnych zmian sygnału prądowirowego wywołanych obciążeniami zmęczeniowymi. Ponieważ charakter prądów wirowych wzbudzanych w materiale zależy także od zmian zachodzących po wpływem temperatury, należy rozważyć wykorzystanie tej metody do oceny stopnia degradacji materiałów instalacji i konstrukcji pracujących w warunkach obciążeń mechanicznych i cieplnych.

Opracowane procedury pomiarowo-badawcze mogą stanowić podstawę do badań diagnostycznych o charakterze komercyjnym, wymagają jednak wykonania zestawów próbek wzorcowych z materiału instalacji poddanej badaniu. Przygotowanie takiego zestawu wiąże się z wykonaniem szeregu badań zmęczeniowych symulujących warunki eksploatacji lub też wymaga dostępu do wycinków instalacji po różnych czasach pracy. Konieczne byłoby także wykonanie charakterystyk wytrzymałościowych, aby ocenić na ile pomiar stanu naprężeń i generowanego nim stanu odkształceń pozwala na szacowanie stopnia degradacji właściwości.

Literatura

1. Dybiec Cz., Nakonieczny A., Włodarczyk S. *Praktyczne zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru wielkości i kierunku naprężeń*, 32. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Międzyzdroje, 2003
2. Piekarski R., *Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych kulowaniem warstwy wierzchniej ferromagnetyku*, Inżynieria Materiałowa, nr 3, 2003, pp. 143-145
3. Piekarski R., *Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych wybranymi obróbkami powierzchniowymi*, Praca doktorska, Warszawa 2001
4. Dobrzański J., *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki*, Open Access Library, Volume 3, 2011.
5. Dobrzański J., *Diagnostyka uszkodzeń elementów ciśnieniowych urządzeń energetycznych w ocenie przyczyn powstawania awarii na podstawie badań materiałowych*, Prace IMŻ 2, 2009
6. George W. Woodruff, *Micromechanical Modeling of High Cycle Fatigue Processes*, ASM/TMS Symposium on Computational Materials Design GE Global Research, August 20-21, 2007.
7. Gall, K., Yang, N., Horstemeyer, M., McDowell, D.L., and Fan, *The Debonding and Fracture of Si Particles During the Fatigue of a Cast Al-Si Alloy*, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, 1999, pp. 3079-3088.
8. Gall, K., Horstemeyer, M., McDowell, D.L., and Fan, *Finite Element Analysis of the Stress Distributions Near Damaged Si Particle Clusters in Cast Al-Si Alloys*, Mechanics of Materials, Vol. 32, No. 5, 2000, pp. 277-301.
9. Shenoy M.M., Kumar R.S. and McDowell D.L., *Modeling Effects of Nonmetallic Inclusions on LCF in DS Nickel-Base Superalloys*, International Journal of Fatigue, Vol. 27, 2005, pp. 113-127.
10. Shenoy M.S., Gordon A.P., Neu R.W. and McDowell D.L., *Thermomechanical Fatigue Behavior of a Directionally Solidified Ni-Base Superalloy*, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 27, 2005, pp. 325-336.
11. Kukła D., Dietrich L., Kowalewski Z.L., Grzywna P., *Ocena rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w stalach eksploatowanych w energetyce*- materiały konferencyjne, II Kongres Mechaniki Polskiej, Poznań, 2011, pp. 55-60
12. Kukła D., Dietrich L., Ciesielski M., *Ocena stopnia uszkodzenia eksploatacyjnego materiału rurociągu parowego na podstawie analizy zmian właściwości zmęczeniowych i mikrostruktury*, Acta Mechanica et Automatica vol.5 No.3, 2011 pp. 55-60
13. Kukła D., Grzywna P., *Ocena rozwoju procesów zmęczeniowych związanych z lokalnymi odkształceniami na przykładzie stali P91 dla energetyki*, 4. Konferencja Naukowo-Techniczna, Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych, „ENERGETYKA”, Gdańsk, 2012
14. Kukła D., Ciesielski M., Jaśkiewicz A., *Ocena stopnia uszkodzenia zmęczeniowego stali dla energetyki z zastosowaniem metody prądów wirowych*, 40. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Warszawa, 2011, pp. 22
15. Kukła D., Grzywna P., A. Zagórski, *Ocena rozwoju degradacji zmęczeniowej stali p91 na podstawie zmian kąta fazowego sygnału prądowirowego*, 41. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń, 2012