

# Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie zmian odkształcenia i parametrów prądowirowych w kolejnych cyklach obciążenia

Fatigue damage growth evaluation based on changes in the strain and eddy current parameters in the subsequent cycles load

## Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań nad opracowaniem metody ilościowej oceny rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego wysokostopowej stali X10CrMoVNb9-1 z wykorzystaniem nieniszczącej techniki diagnostycznej – metody prądów wirowych. W oparciu o procedurę charakteryzowania stopnia degradacji zmęczeniowej na podstawie zmierzonych wartości odkształceń średnich oraz odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach obciążenia zdefiniowano *odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego* ( $\Phi$ ) opisujący dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach. Wyznaczone w ten sposób parametry uszkodzenia skorelowano z wynikami pomiarów kąta fazowego sygnału prądowirowego mierzonego w ustalonych etapach procesu zmęczenia, przy amplitudzie naprężenia w zakresie 360÷420 MPa. Na podstawie opracowanych procedur pomiarowych uzyskano wyniki wskazujące na możliwość identyfikacji i lokalizacji uszkodzenia zmęczeniowego we wczesnym etapie jego rozwoju, jak również na ilościową ocenę stopnia degradacji w oparciu o zdefiniowany parametr uszkodzenia oraz wyniki uzyskane za pomocą nieniszczącej techniki diagnostycznej.

**Słowa kluczowe:** pękanie zmęczeniowe, spoiny, odkształcenia, prądy wirowe

## Abstract

This paper presents the results of the work on the quantitative method for evaluation the fatigue damage development of the high alloy steel X10CrMoVNb9-1 by eddy current testing. The degree of fatigue degradation described by measured values of the deformation (mean deformation and nonelastic deformation) of load cycles. The basis on this measurement defined fatigue damage strain indicator (FDSI- $\Phi$ ), which described changes of strain dynamic in the fatigue tests. The damage parameters determined in this way are correlated with the results of measurements the Eddy current phase angle, which was measured in the selected cycles of fatigue, in the range of stress amplitude 360÷420 MPa. The results indicate the possibility of identification and location of fatigue damage at an early stage of its development, as well as to quantities description of the degree of degradation based on defined damage parameter correlated with the results obtained by using non-destructive diagnostic technique.

**Keywords:** fatigue damage, weld, strain, Eddy current

Dr inż. Dominik Kukla, mgr inż. Paweł Grzywna – PAN, mgr inż. Radosław Karczewski – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: dkukla@ippt.pan.pl

## Wstęp

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 naprężenia pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych (zarówno mechanicznych, jak i termicznych oraz środowiskowych) oraz zmiany mikrostrukturalne nimi wywołane. Podejmowane są liczne starania zmierzające do opracowania nowych technik nieniszczących, które pozwoliłyby szybko i skutecznie ocenić stopień wyeksploatowania konstrukcji na podstawie oceny 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 do nieniszczących pomiarów naprężeń własnych i eksploatacyjnych w wierzchnich warstwach niektórych elementów konstrukcyjnych. W badaniach tych wykorzystywane są zaawansowane metody analizy mikrostruktury oraz właściwości wytrzymałościowych z wykorzystaniem m.in. mikroskopii świetlnej i elektronicznej, badań ultradźwiękowych oraz emisji akustycznej. W nurt tych badań wpisuje się metoda prądów wirowych, za pomocą której możliwy jest nie tylko monitoring zmian stanu naprężeń w elementach obciążanych zmęczeniowo, ale także ocena stopnia uszkodzenia zmęczeniowego.

Prądy wirowe są powszechnie wykorzystywane do diagnostycznych badań defektoskopowych, gdzie 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 naprężeń 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 naprężeń kół kolejowych po obróbce osadzania wciskowego [1]. Pewnym ograniczeniem jest

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 naprężeń 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, oparte 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 niespodziewanymi 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 w sposób pośredni, ale za to nieniszcząco ocenić stopień zdegradowania materiału pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych.

## Materiał i zakres badań

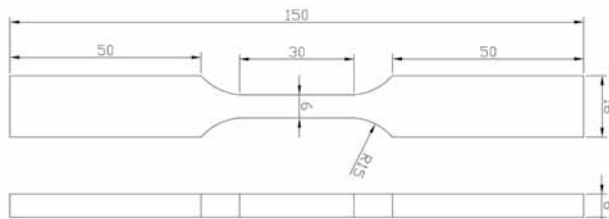
Badania prowadzono na próbkach żarowytrzymałej stali stopowej X10CrMoVNb9-1 (P91), stosowanej w budowie kotłowych przegrzewaczy pary, zbiorników pary, zbiorników ciśnieniowych i rurociągów pary z przeznaczeniem do pracy w zakresie temperatury do 650°C. Próbkę do badań pobrano z nowego, nieeksploatowanego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

**Tablica I.** Zawartość pierwiastków stopowych w próbkach ze stali P91 przed i po eksploatacji oraz wg PN  
**Table I.** Alloying elements contents in the specimens of P91 steel before and after operating and acc. to Polish Standards

Pierwiastek stopowy	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, opracowano geometrię próbek (rys. 1) umożliwiającą pomiar sondą do badań ET, przy zachowaniu wydłużonej części pomiarowej celem uniknięcia lokalizacji uszkodzenia w jednym, najmniejszym przekroju próbki. W celu stwierdzenia 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 sygnału prądów wirowych (*Eddy current* – ET). 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 ET. Dalsze badania prowadzono więc na próbkach o wydłużonej części pomiarowej, o geometrii pokazanej na rysunku 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 ET.



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

**Fig. 1.** Geometry of fatigue testing specimen with elongated measurement part for fracture identification based on current value change

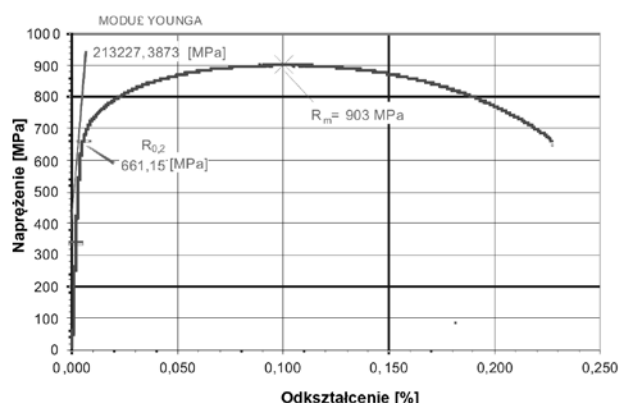
### Badania wytrzymałościowe

W celu wyznaczenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych niezbędnych do opracowania programu testów zmęczeniowych przeprowadzono statyczną próbę rozciągania na próbce o geometrii jak na rysunku 1. Wynik pokazano na rysunku 2.

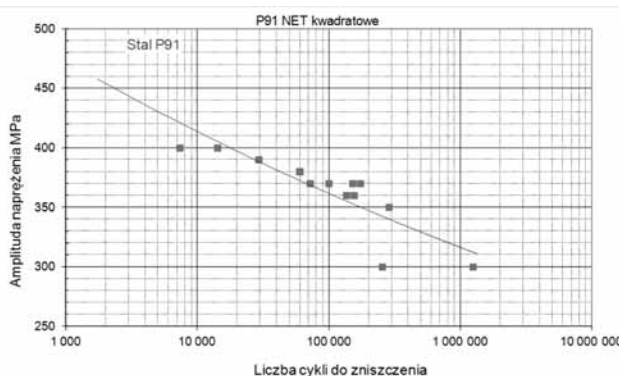
Badania zmęczeniowe próbek ze stali X10CrMoVnB9-1 (P91) wykonano na maszynie wytrzymałościowej

MTS 858, z zakresem siły osiowej +/- 25 kN i momentu skręcającego +/- 200 Nm, wyposażonej w sterownik cyfrowy TestStar II. Maszyna była sterowana za pomocą oprogramowania MTS TestStar v. 4.0D + TestWare-SX v. 4.0D oraz 790.20 Fatigue Test Application.

Podczas badań sterowanie odbywa się przez przemieszczenie trawersu 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.



**Rys. 2.** Krzywa rozciągania i parametry wyznaczone na jej podstawie  
**Fig. 2.** Tensile strength curve and based on it measured parameters



**Rys. 3.** Krzywa Wöhlera dla próbek ze stali P91 w stanie dostawy  
**Fig. 3.** Wöhler curve for as delivered P91 steel specimen

Na podstawie wyznaczonej 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.

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę zmęczeniową, która pozwoliła na weryfikację parametrów zatrzymywanych testów zmęczeniowych realizowanych w połączeniu z metodą ET.

### Badania metodą prądów wirowych

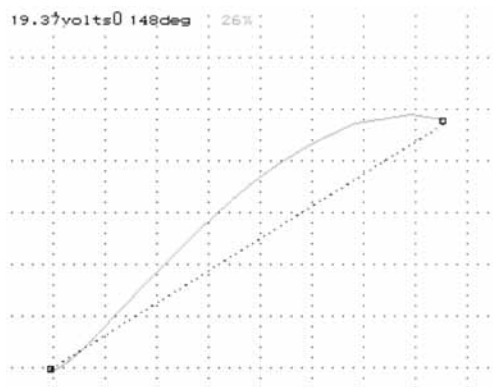
Próby oceny stopnia uszkodzenia próbek pod wpływem zmiennych obciążeń cyklicznych dokonano na aparacie MIZ 27 Si firmy ZETEC przy zastosowaniu sond ołówkowych o zakresie częstotliwości od 5 kHz do 1 MHz. Zakres częstotliwości wynikał z możliwości zastosowania jedynie sond o małej średnicy, umożliwiającymi 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 prądowirowego 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. 4). 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.

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 pokazanego na rysunku 5. Dzięki temu wartość kąta fazowego 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 miejscach przewężenia (z obu stron próbki).

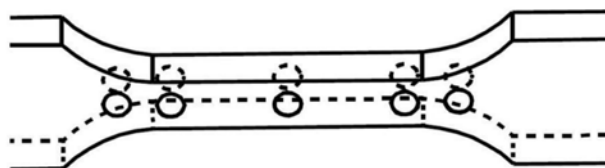
Na podstawie wykonanych prób oceny stopnia zniszczenia zmęczeniowego próbek ze stali P91 za pomocą techniki prądów wirowych można zauważyć, że proces zmęczenia w warunkach obciążeń wysokocyklowych powoduje nieznaczne, ale zauważalne zmiany kąta fazowego sygnału prądowirowego dla sygnału typu *lift-off*.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

Wykonano opracowania wyników 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



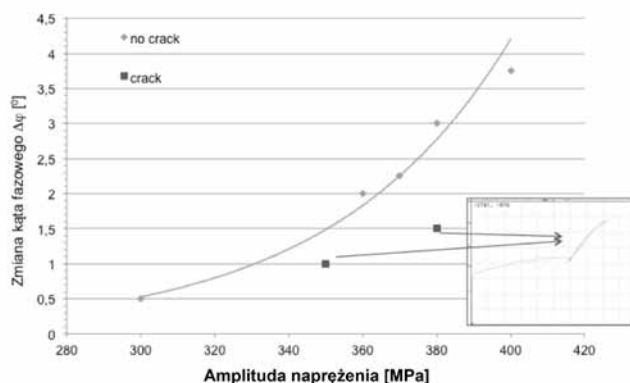
Rys. 4. Metodologia pomiaru kąta fazowego w oparciu o aproksymację liniową sygnału *lift-off*

Fig. 4. Phase angle measurement method acc to line approximation of „Lift-off” signal



Rys. 5. Szkic obrazujący miejsca wybrane do pomiarów kąta fazowego krzywej oddalenia sygnału ET

Fig. 5. The scheme of measurement location of curve of ET signal distance phase angle measurement location



**Rys. 6.** Zależność wielkości kąta fazowego od amplitudy naprężenia dla próbek przed pęknięciem i ze wskazaniami nieciągłości

**Fig. 6.** The function of value of phase angle measurement and stress amplitude for specimen before cracking and with defects indication

generują w próbkach zmęczeniowych stan większych naprężeń resztkowych, 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.

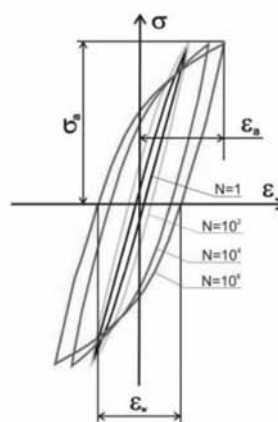
Po wykonaniu pomiarów zmian kąta fazowego wszystkie próbki zostały poddane standardowym badaniom defektoskopowym w celu identyfikacji i lokalizacji pęknięć. W wyniku tych badań stwierdzono występowanie pęknięć w części pomiarowej dwóch próbek. Dla tych próbek kąt fazowy wykazywał mniejszą wartość w porównaniu 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 rysunku 6, 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 przez wywołanie częściowej relaksacji naprężeń resztkowych skumulowanych w wyniku obciążeń cyklicznych.

Opierając się 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.

## Mechanizm uszkodzenia zmęczeniowego i opis ilościowy

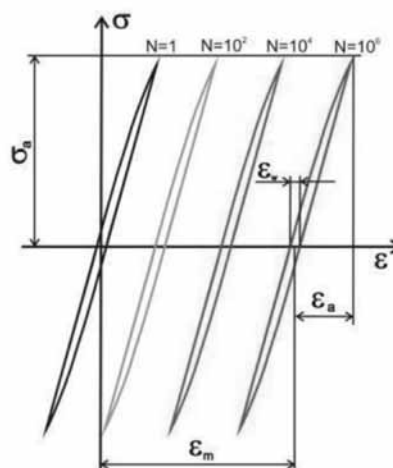
Monitorowanie zmian właściwości mechanicznych zachodzących pod wpływem obciążeń cyklicznych wymaga rejestracji naprężenia i odkształceń części po-

miarowej 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 poślizgów. Typowym zachowaniem tej grupy metali jest zwiększająca się szerokość pętli histerezy wykresu naprężenie – odkształcenia jak uwidoczniło na rysunku 7. 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.



**Rys. 7.** Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy dla metali o dominującym mechanizmie deformacji w postaci pasm poślizgów prowadzących do efektów cyklicznej plastyczności.

**Fig. 7.** Changes fatigue hysteresis loop for metals with the dominant deformation mechanism in the form of slip bands leading to the effects of cyclic plasticity.



**Rys. 8.** Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy dla metali zdominowanych lokalnymi mechanizmami wokół wad struktury prowadzącymi do efektów ratchetingu

**Fig. 8.** Changes fatigue hysteresis loops for metal-dominated local mechanisms around the defect structure leading to ratcheting effects

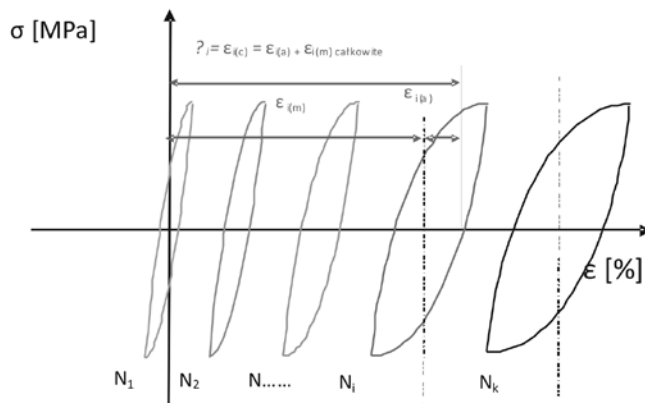
Każda z tych wielkości – odkształcenie niesprężyste, amplituda odkształcenia i granica plastyczności może być miarą rozwoju uszkodzeń wykorzystaną do wyznaczenia wartości parametru uszkodzeń w kolejnych cyklach obciążenia.

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 uwidoczniła na rys. 8. 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 rysunku 8 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 znacznie 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 pokazanego na rysunku 9. Efekt końcowy zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju i wymiarów 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 niskocyklowego i wysokocyklowego i podejmowane są próby ich opisu i modelowania [8÷10].

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



Rys. 9. Schemat rozwoju odkształceń w kolejnych cyklach zmęczeniowych próbek ze stali P91

Fig. 9. Scheme of deformation development in following fatigue cycles for P91 steel samples

odkształcenia plastycznego pod wpływem obciążeń zmiennych dla wszystkich zastosowanych wartości amplitudy naprężenia. Zmiany te zostały sparametryzowane za pomocą odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego ( $\varphi$ ) [12, 13], w różny sposób obrazującego 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. 9), jako parametr opisujący rozwój uszkodzenia przyjęto sumę odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego i wyrażonego wzorem:

$$\varphi = \varepsilon_a + \varepsilon_m$$

gdzie:

$\varepsilon_a$  - amplituda szerokości pętli histerezy cyklu, wyrażone wzorem:

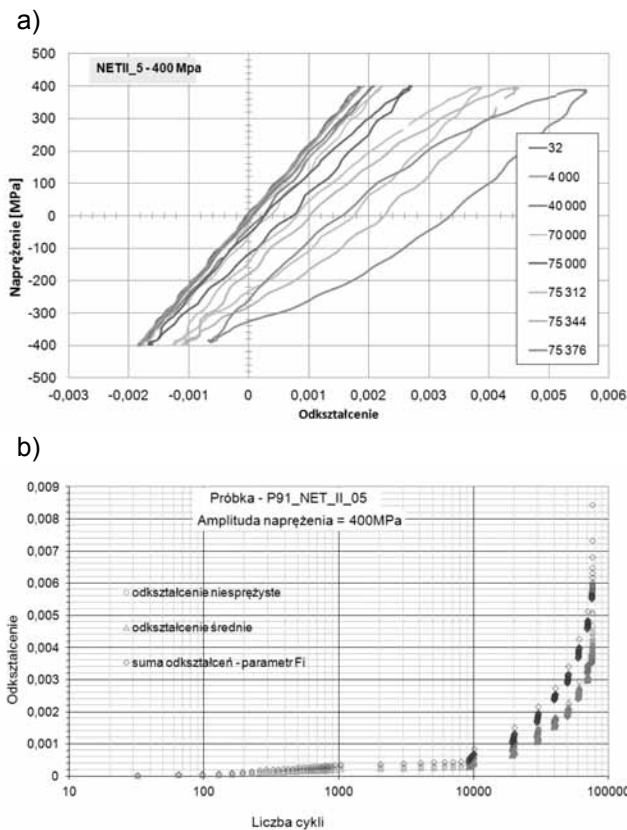
$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{min}^{F=0}}{2} - \frac{\varepsilon_{max}^{F=0}}{2}$$

$\varepsilon_m$  - średnie odkształcenie w cyklu określające położenie pętli histerezy danego cyklu na osi odkształceń, wyrażone wzorem:

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{min}^{F=0}}{2} + \frac{\varepsilon_{max}^{F=0}}{2}$$

Na rysunku 10 przedstawiono rozwój odkształcenia w trakcie procesu zmęczenia dla próbki obciążanej zmiennym naprężeniem cyklicznym o wartości 400 MPa. Na pierwszym wykresie widać ewolucję pętli histerezy zmęczeniowej, która wskazuje na rozwój procesu uszkodzenia zgodnie z obydwojema 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. 10b) obrazujących charakter i dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach.

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



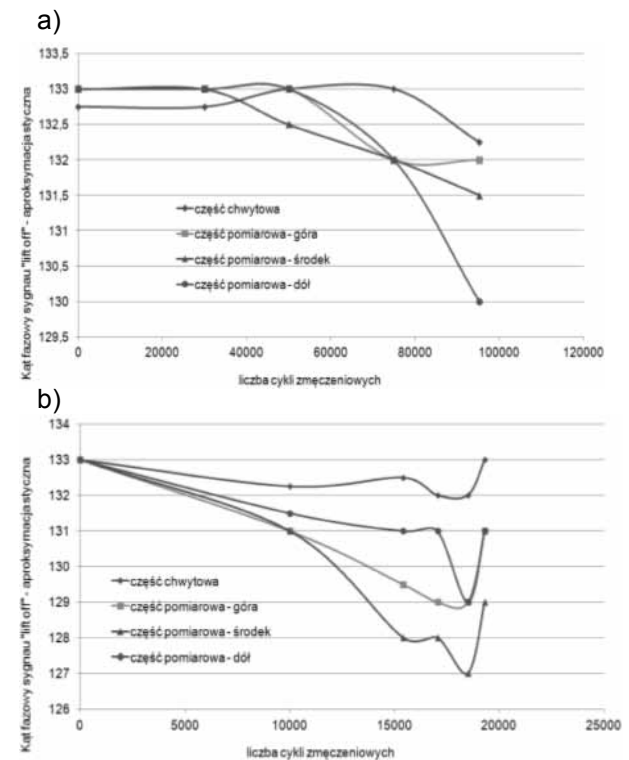
**Rys. 10.** Rozwój odkształceń w postaci: a) pętli histerezy zmęczeniowej i jej ewolucji w wybranych cyklach, b) przyrostu składowych odkształceń w kolejnych cyklach, dla amplitudy 400 MPa

**Fig. 10.** The development of deformations in the form of: a) the hysteresis loop of fatigue and its evolution in selected cycles, b) the increase in the deformation of the components of the subsequent cycles, for the amplitude of 400 MPa

## Wyniki pomiarów kąta fazowego sygnału prądowego

Pomiary kąta fazowego [14, 15] 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 rysunku 11.

Poszczególne linie na wykresie przedstawiają zmianę kąta w różnych miejscach próbki w funkcji liczby cykli, przy czym linia oznaczona rombem 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 niewielkich zmian mikrostrukturalnych, przed powstaniem pęknięć, których inicjacja i propagacja cechuje ostatni etap uszkodzenia, któremu towarzyszy dynamiczny wzrost wartości odkształceń.



**Rys. 11.** Zmiany wartości kąta fazowego w kolejnych cyklach obciążenia amplitudą: a) 360, b) 420 MPa

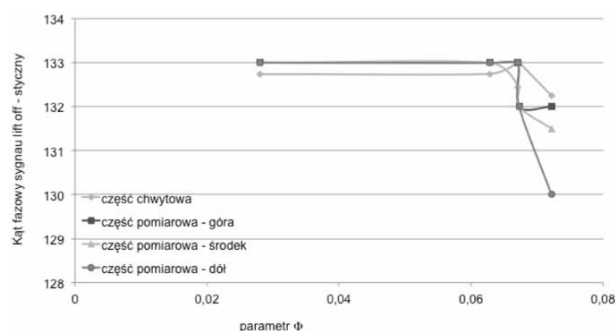
**Fig. 11.** Changes in the value of the phase angle in subsequent cycles load amplitude: a) 360 MPa, b) 420 MPa

## Korelacja wyników badań zmęczeniowych z wynikami badań ET

Na podstawie opracowanych i opisanych wcześniej procedur pomiaru stopnia uszkodzenia w dowolnym etapie jego rozwoju dokonano korelacji wyznaczonych parametrów uszkodzenia z wynikami badań nieniszczących. Na rysunkach 12÷15 przedstawiono zależność kąta fazowego sygnału ET od stopnia uszkodzenia wygenerowanego w próbkach zmęczeniowych opisanego parametrem odkształceniowym.

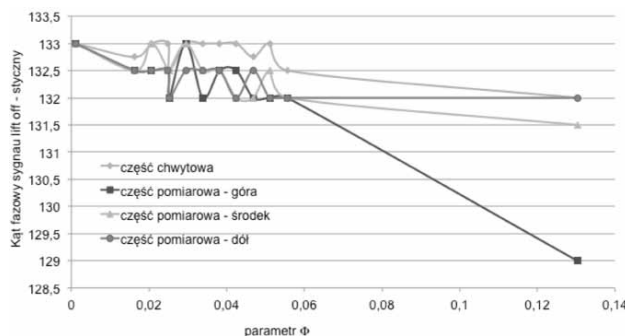
We wszystkich czterech próbkach widoczna jest zmiana wartości kąta fazowego w wybranych punktach części pomiarowych próbek, przy czym zmiany te intensyfikują się w końcowym etapie testu zmęczeniowego. Wielkość tych zmian zależy także od wartości amplitudy i zmienia się od 3° różnicy pomiędzy częścią referencyjną i pomiarową dla amplitudy 360 MPa do 6° 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. 15), 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. Wytlumaczeniem 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 rysunku 16. Przegrzanie materiału doprowadziło do relaksacji skumulowanych w procesie zmęczenia naprężeń i wpłynęło na uzyskany wynik [16].

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.



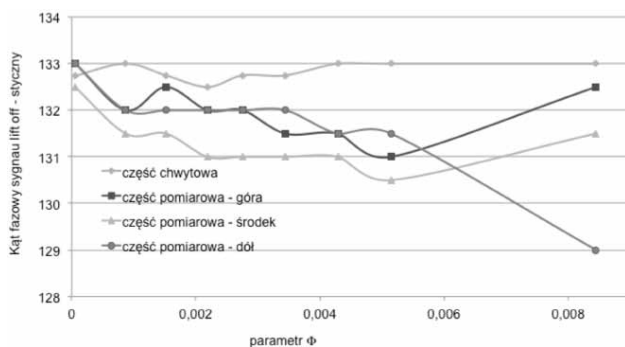
**Rys. 12.** Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru  $\phi$  dla amplitudy 360 MPa

**Fig.12.** Changes of phase angle  $\phi$  as a function of the parameter for the amplitude of 360 MPa



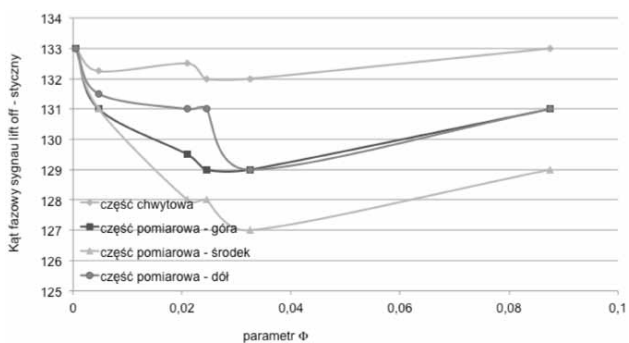
**Rys. 13.** Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru  $\phi$  dla amplitudy 380 MPa

**Fig. 13.** Changes of phase angle  $\phi$  as a function of the parameter for the amplitude of 380 MPa



**Rys. 14.** Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru  $\phi$  dla amplitudy 400 MPa

**Fig. 14.** Changes of phase angle  $\phi$  as a function of the parameter for the amplitude of 400 MPa



**Rys. 15.** Zmiany kąta fazowego w funkcji parametru  $\phi$  dla amplitudy 420 MPa

**Fig. 15.** Changes of phase angle  $\phi$  as a function of the parameter for the amplitude of 420 MPa



**Rys. 16.** Próbką po teście zmęczeniowym z efektem przegrzania

**Fig. 16.** Sample after fatigue test with overheating effect



## 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 zastosowana w zakresie oceny stanu materiału po eksploatacji w warunkach cyklicznych obciążeń zmiennych oraz monitorowania rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w jego końcowym etapie. Wymaga to jednak opracowania procedur pomiarowo-badawczych z typoszeregiem próbek referencyjnych oraz systemem wzorcowania i kalibracji, które umożliwią na identyfikację i analizę subtelnych 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 zarówno mechanicznych, jak 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 dostęp 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”. Mat. 32 Krajowej Konf. 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, s. 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, Vol. 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] G.W. Woodruff: Micromechanical Modeling of High Cycle Fatigue Processes, 2007 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 J.: The Debonding and Fracture of Si Particles During the Fatigue of a Cast Al-Si Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, 1999, s. 3079-3088.
- [8] Gall K., Horstemeyer M., McDowell D.L. and Fan, J.: “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, s. 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, s. 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, s. 325-336.
- [11] Kukła D., Dietrich L., Kowalewski Z.L., Grzywna P.: „Ocena rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w stalach eksploatacyjnych w energetyce” – materiały konferencyjne, II Kongres Mechaniki Polskiej, Poznań – sierpień 2011, s. 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) s. 55-60.
- [13] Kukła D., Grzywna P.: Ocena rozwoju procesów zmęczeniowych związanych z lokalnymi odkształceniami na przykładzie stali P91 dla energetyki, materiały konferencyjne Diagnostyka Materiałów I Urządzeń Technicznych, ENERGETYKA 08/2012.
- [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, październik 2011, Zeszyty Problemowe Badania Nieniszczące, str. 22.
- [15] Kukła D., Grzywna P., Zagórski A.: „Ocena rozwoju degradacji zmęczeniowej stali P91 na podstawie zmian kąta fazowego sygnału prądowirowego” Przegląd Spawalnictwa, 13, 8-11, 2012.
- [16] Grzywna P., Kukła D., Wpływ eksploatacji na wybrane właściwości mechaniczne stali X10CrMoVnB9-1 (P91), Przegląd Spawalnictwa, 12, 75-77, 2013.