

Ocena rozwoju procesów zmęczeniowych związanych z lokalnymi odkształceniami na przykładzie stali P91 dla energetyki¹⁾

Assessment of fatigue processes development connected with local strains on the example of P91 steel for power industry

Badania w zakresie oceny stopnia degradacji zmęczeniowej na etapie poprzedzającym powstanie pęknięcia wymaga rejestracji zmian naprężenia i odkształcenia części pomiarowej próbki w kolejnych cyklach obciążenia. Realizację tych badań przeprowadzono w jednoosiowym stanie naprężenia (przy zachowaniu osiowości przyłożonego obciążenia) na próbkach osiowosymetrycznych.

Procesy degradacji zmęczeniowej pod wpływem obciążeń cyklicznych zachodzą w wyniku oddziaływania dwóch mechanizmów rozwoju uszkodzeń. Pierwszym z nich jest ratcheting, generowany lokalnymi odkształceniami wokół elementów mikrostruktury, stanowiącymi koncentratory naprężania, takimi jak wtrącenia, pustki czy wydzielenia. Drugi mechanizm, określanymi jako cykliczna plastyczność, związany jest 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 zależności od składu materiału, technologii wytworzenia oraz warunków obciążenia. Wykonano testy w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, na próbkach ze stali P91, przy różnych wartościach amplitudy naprężenia.

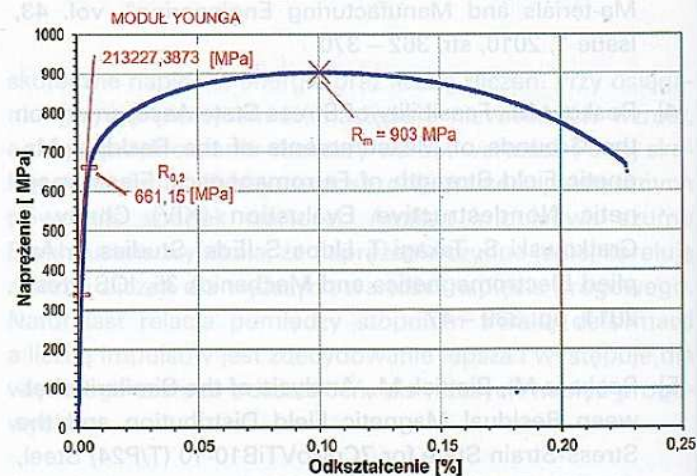
Materiał i metodyka badań

Przeprowadzono badania próbek z materiału pobranego z fragmentu nowego rurociągu ze stali P91 dedykowanego do pracy w warunkach pary świeżej. Wycinek rurociągu

poddano badaniu składu chemicznego dla potwierdzenia zgodności ze składem normowym. Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują na zgodność zawartości większości pierwiastków stopowych z zakresem normowym.

Badania wytrzymałościowe

W celu określenia właściwości wytrzymałościowych stali P91 wykonano statyczną próbę rozciągania dla pięciu próbek. Przykładowy wykres naprężenia w funkcji odkształcenia dla jednej z próbek przedstawiono na rysunku 1. Na podstawie tych badań wyznaczono średnie wartości parametrów stali P91, które zestawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Wynik statycznej próby rozciągania dla jednej z próbek ze stali P91

Zawartość pierwiastków stopowych w próbkach ze stali P91 oraz wg PN

P91	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	S	P
Wycinek rurociągu badanego	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	

¹⁾ Prace realizowane ramach projektu badawczego nr N N507 329536

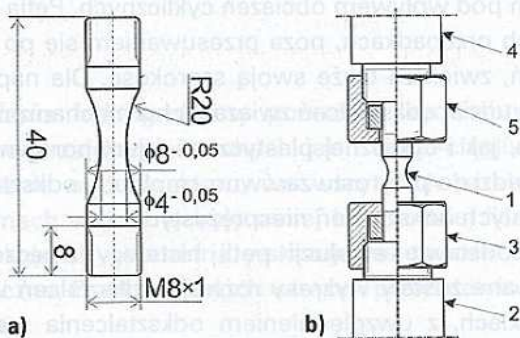
Tabela 1

Parametry wytrzymałościowe badanej stali P 91 oraz według PN

	R_m , MPa	R_e , MPa	A, %
P91 materiał badany	910	670	21
PN: 10216-2:2004	630 - 830	>450	17 - 19

Badania zmęczenia

Badania zmęczenia przeprowadzono na próbkach klepsydrycznych o przekroju kołowym i średnicy w części pomiarowej 4 mm z wykorzystaniem specjalnego uchwytu zapewniającego osiowe zamocowanie próbki (rys. 2). Do pomiaru odkształcenia wykorzystano ekstensometr poprzeczny, przy pomocy którego mierzono zmiany średnicy próbki w kolejnych cyklach obciążenia.

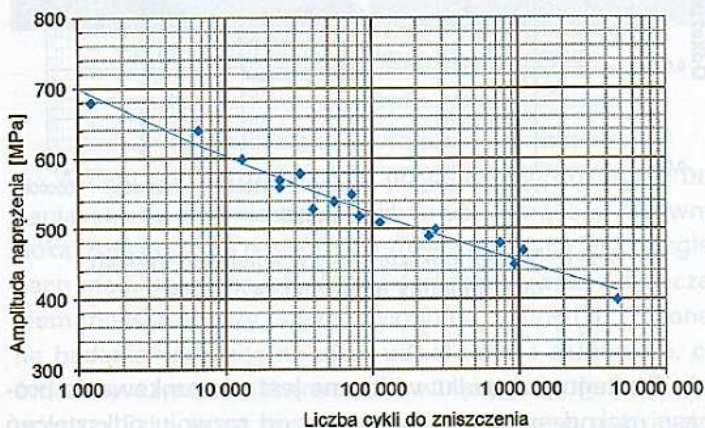


Rys. 2. Próbkę do badań zmęczeniowych:

a) geometria próbki zmęczeniowej, b) uchwyt mocujący

Na podstawie wyznaczonej w próbie rozciągania wartości umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ określono zakres obciążeń zmęczeniowych realizowanych w zakresie amplitudy naprężeń od 400 do 680 MPa, realizowanych przy sterowaniu siłą z utrzymywaniem zerowej jej wartości średniej w cyklu i stałej dla danej próbki wartości amplitudy naprężenia. Łącznie badaniom zmęczeniowym poddano 17 próbek.

Pomiary zmian odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia umożliwiły ocenę rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego poza wyznaczeniem standardowego wykresu Wöhlera (rys. 3).

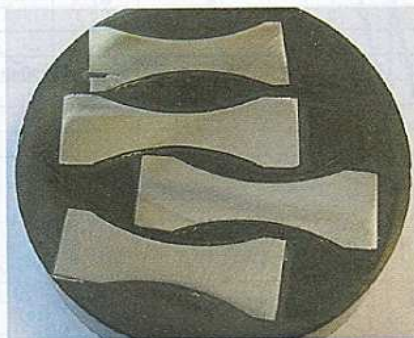


Rys. 3. Wykres Wöhlera wyznaczony dla próbek osiowosymetrycznych ze stali P91

W celu scharakteryzowania rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych dokonano analizy zmian dynamiki odkształceń w poszczególnych cyklach pod wpływem naprężeń o różnych amplitudach. Zachowanie metali w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, a więc przy amplitudzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału, wiąże się z rozwojem odkształceń niesprężystych oraz trwałych odkształceń średnich, związanych z rozwijającymi się lokalnie (wskutek koncentracji naprężeń) odkształceniami plastycznymi wokół elementów mikrostruktury, takich jak pustki, wydzielenia i wtrącenia niemetaliczne. Dlatego też wyznaczono charakterystyki zmian odkształceń średnich jak i amplitudy odkształcenia w kolejnych cyklach dla szerokiego zakresu amplitudy naprężenia.

Badania mikrostrukturalne

Wykonano badania zglądów z przekroju wzdłużnego próbek, po testach zmęczeniowych oraz badania fraktograficzne wybranych przełomów za pomocą mikroskopu świetlnego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Zglądy trawiono odczynnikiem Nital 4% wg PN CR 12361:2000



Rys. 4. Zgląd metalograficzny przekroju wzdłużnego próbek zmęczeniowych

Podczas badań z zastosowaniem mikroskopii SEM wykonano w wybranych mikroobszarach badania składu chemicznego z zastosowaniem detektora EDS. Dokonano m. in. oceny składu chemicznego wtrąceń niemetalicznych. Badania mikrostruktury miały charakter jakościowy.

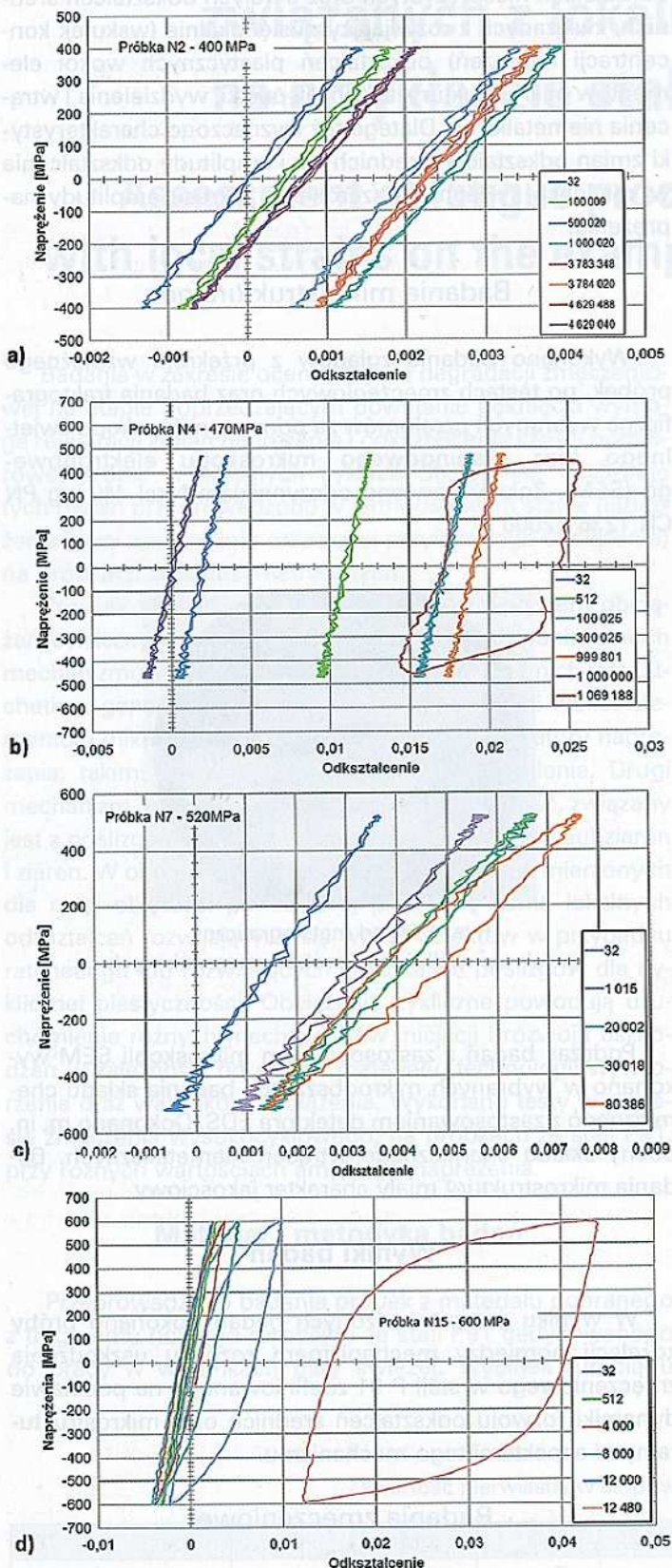
Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań dokonano próby korelacji pomiędzy mechanizmem rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w stali P 91 zdefiniowanego na podstawie dynamiki rozwoju odkształceń średnich oraz mikrostrukturalnymi aspektami tego mechanizmu.

Badania zmęczenia

Badania zmęczenia pozwoliły ustalić, że dominującym mechanizmem rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w próbkach ze stali P91, jest ratcheting, związany z lokalnym rozwojem odkształceń wokół elementów (defektów) mikrostruktury stanowiących koncentratory naprężenia. Mechanizm

ten determinuje proces degradacji w szerokim zakresie amplitudy, co jest widoczne na wykresach naprężenie – odkształcenie w wybranych cyklach, dla czterech wybranych wartości amplitudy naprężenia, w zakresie od 400 do 600 MPa.



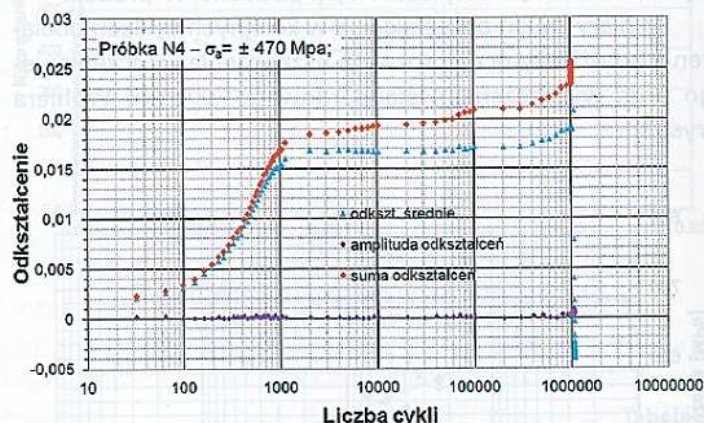
Rys. 5. Pętle histerezy i ich ewolucja w kolejnych cyklach

- pętla histerezy dla amplitudy 400 MPa,
- pętla histerezy dla amplitudy 470 MPa,
- pętla histerezy dla amplitudy 520 MPa,
- pętla histerezy dla amplitudy 600 MPa

Dla próbek poddanych obciążeniom cyklicznym o amplitudzie 400 i 470 MPa (rys. 5a, b) szerokość pętli histerezy, a tym samym amplituda odkształceń nie zmieniały się w kolejnych cyklach, a rosło tylko średnie odkształcenie w cyklu. Pętla histerezy o stałej szerokości przesuwiała się w miarę narastania liczby cykli. Lokalne deformacje mają niesymetryczny charakter przy zmianie kierunku naprężenia, co powoduje, że trwałe odkształcenia w kolejnych cyklach mogą narastać i zmniejszać się, co pokazano na rysunku 5. Niemniej jednak mechanizmy wywołujące niesymetryczną odpowiedź materiału przy rozciąganiu i ściskaniu, jak np. mechanizm odspojenia osnowy od wtrącenia, powodujące lokalne odkształcenia tylko przy naprężeniach rozciągających, z reguły powodują wzrost wartości odkształceń ratchetingu, aż do utraty kohezji próbki [1, 2].

W przypadku próbek poddanych testom zmęczeniowym przy amplitudach wyższych (rys. 5c, d) widać zwiększający się udział amplitudy odkształcenia w globalnym rozwoju odkształceń pod wpływem obciążeń cyklicznych. Pętla histerezy w tych przypadkach, poza przesuwaniem się po osi odkształceń, zwiększa także swoją szerokość. Dla naprężenia 600 MPa udział odkształceń związanych z mechanizmem ratchetingu, jak i cyklicznej plastyczności jest porównywalny, co prowadzi do przyrostu zarówno amplitudy odkształcenia, jak i trwałych odkształceń niesprężystych.

Na podstawie ewolucji pętli histerezy zmęczeniowej opracowane zostały wykresy rozwoju odkształceń w kolejnych cyklach, z uwzględnieniem odkształcenia średniego oraz amplitudy odkształcenia. Przykładowy wykres tego typu, dla wartości naprężenia zmiennego 470 MPa, przedstawiono na rysunku 6, na którym zamieszczono także dynamikę zmian sumy odkształceń, jako parametr służący do ilościowej oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego, stosowany m. in. w odniesieniu do oceny próbek stalowych [1, 2]. Parametr ten stanowi sumę wartości bezwzględnych odkształcenia, co pozwala na skumulowanie odkształceń zarówno dodatnich jak i ujemnych.

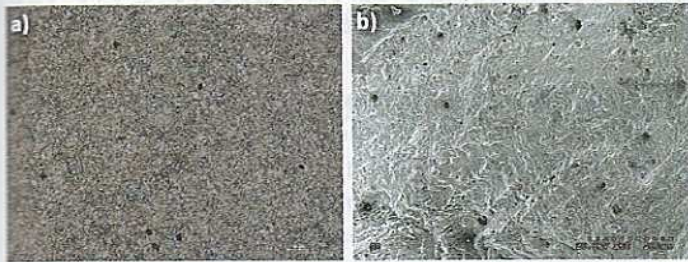


Rys. 6. Rozwój odkształcenia w kolejnych cyklach dla amplitudy naprężenia 470 MPa

Dla tego przypadku widoczne jest uwarunkowanie procesu uszkodzenia zmęczeniowego od rozwoju odkształceń średnich, przy znikomych zmianach amplitudy odkształcenia.

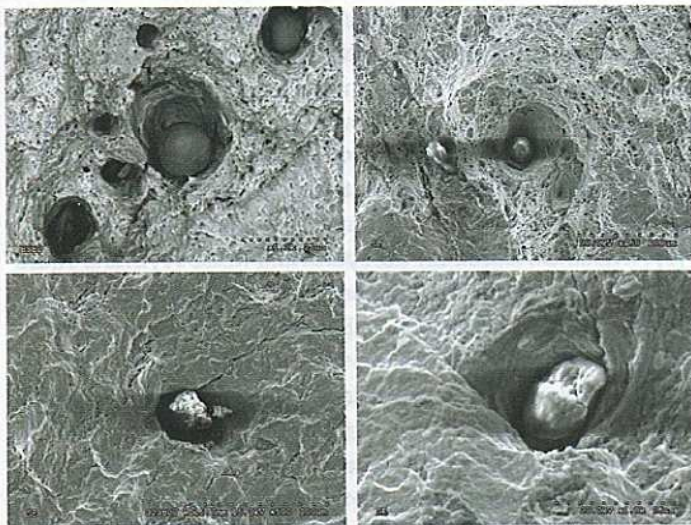
Badania mikrostrukturalne

Badania mikrostrukturalne wykazały obecność licznych wtrąceń widocznych zarówno na zglądzie jak i na przelomie próbek ze stali P91 (rys. 7).



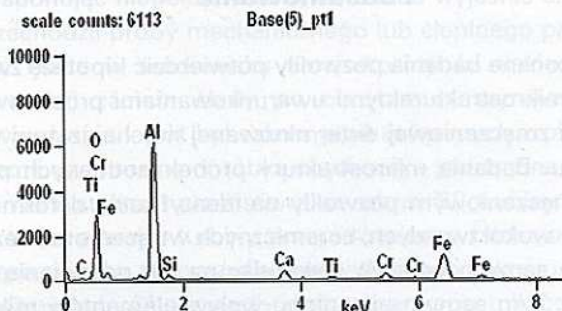
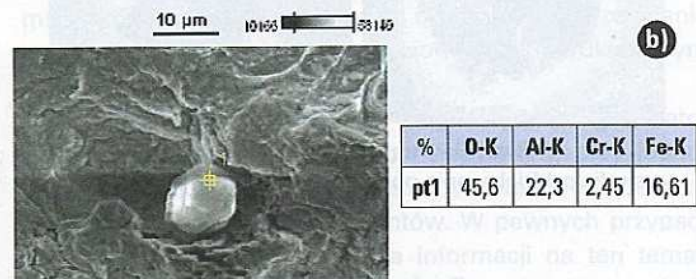
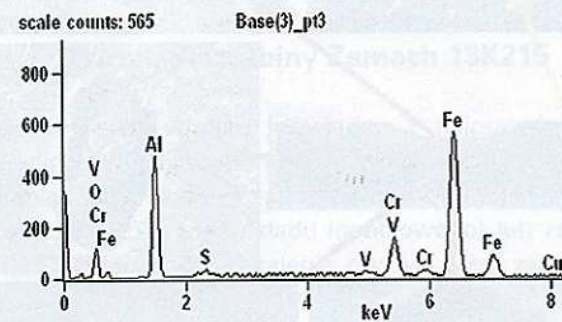
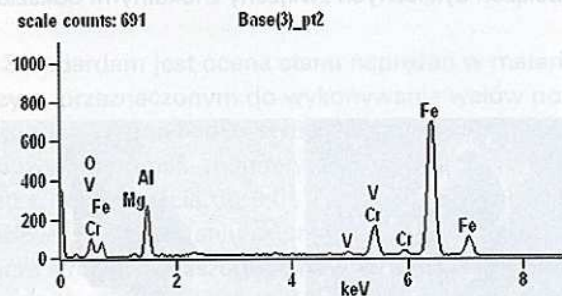
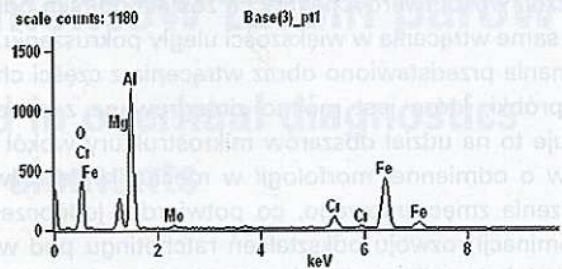
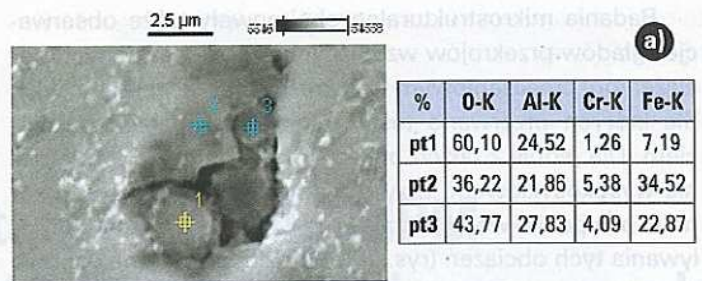
Rys. 7. Mikrostruktura zglądu (a) oraz przelomu (b) stali P91 z widocznymi wtrąceniami

Badania fraktograficzne pozwoliły wyodrębnić strefy zarówno przelomów kruchych jak i quasi-ciągłych [5]. Niezależnie od charakteru, we wszystkich przebadanych przelomach widoczne były mniej lub bardziej liczne wtrącenia, których geometria wskazuje na twarde wtrącenia ceramiczne. Przykłady takich wtrąceń przedstawiono na rysunku 8.



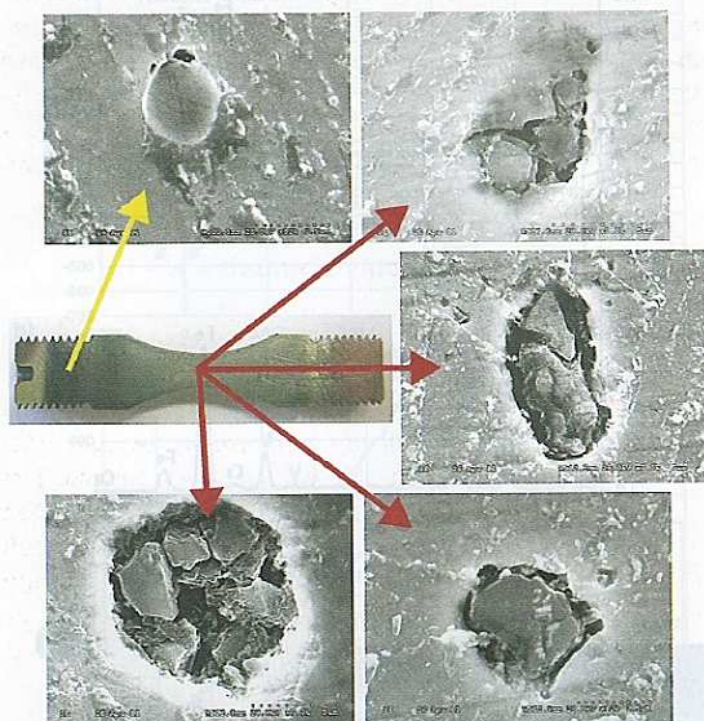
Rys. 8. Wtrącenia widoczne na przelomach

W celu potwierdzenia tych przypuszczeń dokonano badania składu chemicznego wybranych wtrąceń, zarówno zlokalizowanych na przelomach zmęczeniowych jak i na zglądach metalograficznych. Wyniki tych analiz wraz z oznaczeniem miejsca analizy przedstawiono na rysunku 9. Wykonane badania wskazują na duży udział tlenu i aluminium, co świadczy o tym, że obserwowane wtrącenia są tlenkami aluminium. Fakt, że są to wtrącenia niemetaliczne potwierdza także kontrast fazowy oraz efekt „świecenia” nieprzewodzących wtrąceń.



Rys. 9. Wtrącenia i ich skład chemiczny z udziałem wagowym podstawowych pierwiastków
a) wtrącenie w strefie poddanej zmęczeniu
b) wtrącenie w przelomie zmęczeniowym

Badania mikrostrukturalne obejmowały także obserwacje złączy przekrojów wzdłużnych próbek poddanych obciążeniom zmęczeniowym w zakresie znaczącej liczby cykli, dla których przerwano testy zmęczeniowe przed pęknięciem. Dla jednej z takich próbek, poddanej próbie zmęczenia wysokocyklowego przy obciążeniu 400 MPa stwierdzono w przypadku wszystkich wtrąceń znaczące efekty oddziaływania tych obciążeń (rys. 10). Bardziej plastyczna osnowa metaliczna wokół twardych wtrąceń została od nich odspojona, a same wtrącenia w większości uległy pokruszeniu. Dla porównania przedstawiono obraz wtrącenia z części chwytowej próbki, które jest mocno zintegrowane z osnową. Wskazuje to na udział obszarów mikrostruktury wokół elementów o odmiennej morfologii w mechanizmie rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, co potwierdza jednocześnie fakt dominacji rozwoju odkształceń ratchetingu pod wpływem obciążeń cyklicznych związany z lokalnymi odkształceniami.



Rys. 10. Wtrącenia niemetaliczne w strefie oddziaływania obciążeń zmęczeniowych i poza nią

Podsumowanie

Wykonane badania pozwoliły potwierdzić hipotezę związaną z mikrostrukturalnymi uwarunkowaniami procesu degradacji zmęczeniowej determinowanej mechanizmem ratchetingu. Badania mikrostruktury próbek poddanych próbom zmęczeniowym pozwoliły na identyfikację deformacji osnowy wokół twardych, ceramicznych wtrąceń oraz dezintegrację samych wtrąceń wskazując na ich odspojenie od osnowy. Tym samym ujawniono wpływ elementów mikrostruktury o odmiennych właściwościach w stosunku do osnowy na mechanizm rozwoju degradacji zmęczeniowej.

Fakt powstawania lokalnych mikronieciągłości wokół wtrąceń na skutek oddziaływania zmiennych obciążeń

cyklicznych pozwala na przypuszczenie, że tego typu defekty mogą wpływać na subtelne zmiany impedancji obszarów zdegradowanych. Zmiany te mogą być poddane analizie z zastosowaniem metody prądów wirowych lub innych technik diagnostycznych bazujących na wykorzystaniu pola magnetycznego lub elektrycznego. Prace w tym zakresie prowadzone są zarówno w ramach innych prac autorów [6 – 7] jak w szerszych zespołach badawczych [8 – 9] od kilku lat.

LITERATURA

- [1] Kukła D., Dietrich L., Kowalewski Z., Grzywina P., Ocena rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w stalach eksploatowanych w energetyce, II Kongres Mechaniki Polskiej, Poznań, sierpień 2011
- [2] 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”, 2011, Vol. 5, No. 3, s. 55 – 60
- [3] Szymczak T., Kowalewski Z. L., Dietrich L., Experimental analysis of creep and fatigue of light multifunctional aluminium alloys, „Materials Research Innovations” 2011, 15, 53 – 56
- [4] Kowalewski Z. L., Szymczak T., Rutecka A., Zmiany właściwości mechanicznych materiałów w warunkach monotonicznej deformacji realizowanej w obecności obciążenia cyklicznego, „Przegląd Mechaniczny” 2011, LXX, 2, 27 – 32
- [5] Kukła D., Grzywina P., Dietrich L., The development dynamics of the located fatigue failure in the porous silumin, 28 Danubia Adria Symposium, Siofok-Hungary, September 2011, materiały konferencyjne, s. 61
- [6] Kukła D., Ciesielski M., Jaśkiewicz A., Ocena stopnia uszkodzenia zmęczeniowego stali dla energetyki z zastosowaniem metody prądów wirowych, „Zeszyt Problemowe Badania Nieniszczące”, s. 22
- [7] Kukła D., Żurek Z., Kurzydłowski K. J., Wybrane metody wykrywania degradacji zmęczeniowej w stalach ferromagnetycznych, „Zeszyt Problemowe Badania Nieniszczące”, s. 40
- [8] Kowalewski Z. L., Szymczak T., Makowska K., Augustyniak B., Assessment of material degradation of power steels using destructive and non-destructive testing methods, Konf. on Thermal Stresses, Budapest, Hungary 2011, 1, 1 – 4
- [9] Kowalewski Z. L., Szymczak T., Makowska K., Augustyniak B., Correlation of parameters determined using destructive and non-destructive testing methods as a tool of material degradation assessment, Proceedings of PLASTICITY '11: The Seventeenth International Symposium on Plasticity and its Current Applications, 1 – 3, 2011