

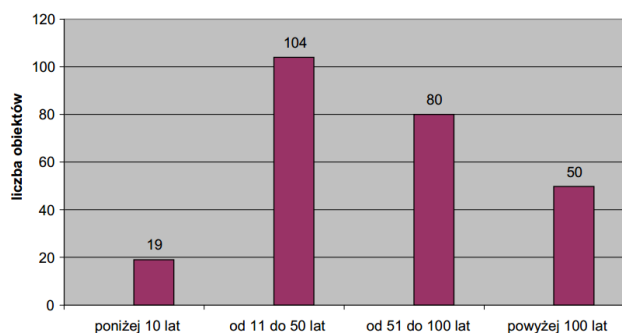
DIAGNOSTYCZNA ROLA BADAŃ KOROZYJNYCH W DETEKCJI PROCESÓW DEGRADACJI MIKROSTRUKTUR ZACHODZĄCYCH W DŁUGOTRWALE EKSPLOATOWANYCH STALACH KONSTRUKCYJNYCH

Streszczenie

W artykule omówiony został przedstawiony problem detekcji zjawisk mikrostrukturalnej degradacji z wykorzystaniem badań potencjodynamicznych – korozyjnych. Na podstawie badań własnych, jak również prowadzonych w innych ośrodkach, wykazano diagnostyczną rolę tego typu badań w ocenie stanu zdegenerowania mikrostruktur. Z punktu widzenia technicznego, szczególnie narażone na obecność procesów degradacji mikrostruktur są elementy konstrukcyjne wykonywane ze stali zgrzewnych i niskowęglowych stali zlewnych (nieuspokojo-nych). Te zabytkowe gatunki materiałów są jeszcze wciąż użytkowane w obiektach infrastruktury kolejowej i inżynierii mostowej. Obecność procesów degradacji mikrostrukturalnej przyczynia się do istotnego obniżenia ciągliwości materiału i utraty jego zapasu trwałości zmęczeniowej. W pracy przedstawiono także wyniki analiz numerycznych mających na celu ocenę ubytku trwałości zmęczeniowej (z punktu widzenia propagującej szczeliny) na skutek obecności procesów degradacyjnych. Udokumentowano także typowe, dla długotrwale eksploatowanych stalowych elementów konstrukcyjnych, zmiany degradacyjne

WSTĘP

Długotrwała eksploatacja stalowych elementów konstrukcyjnych może powodować istotną zmianę właściwości mechanicznych materiału. Te niekorzystne zmiany wywołane są często postępującymi zjawiskami degradacji mikrostrukturalnej. Problem ten jest intensywnie dostrzegany w obiektach technicznych o bardzo długim czasie eksploatacyjnym (<100 lat) – np. w zabytkowych obiektach mostowych, kolejowych [1, 2, 3] jak również obiektach o krótszym czasie eksploatacyjnym, ale w znacznie bardziej zróżnicowanych warunkach wyężenia – np. maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego [4, 5]. Z przytoczonych prac wynika szereg prawidłowości postępujących zjawisk na poziomie mikrostrukturalnym, które indukują makroskopowy wzrost kruchości materiału, a w konsekwencji jego destrukcję. W toku prowadzonych prac badawczych wytypowano szereg charakterystycznych cech i symptomów poprzedzających moment dekohezji materiału. Jak podaje [6], w samym 2013 roku w Polsce miało miejsce aż 258 katastrof budowlanych z czego 145 nie wynikało ze zdarzeń losowych.



Rys. 1. Statystyki katastrof budowlanych w 2013 roku, na podstawie [6]

Jeżeli chodzi o wypadki z udziałem konstrukcji stalowych było ich 11. Na rys. 1. pokazano liczbę zniszczonych obiektów z uwagi na ich wiek, aż 130 z nich było eksploatowanych ponad 51 lat.

Analizując przyczyny zaistniałych wypadków należy zauważyć, że niewłaściwa eksploatacja, brak okresowych przeglądów i remontów doprowadziły do zniszczeń na skutek rozwoju procesów korozyjnych. Długotrwała eksploatacja oraz ekspozycja w agresywnym środowisku wpływają negatywnie i przyspieszają procesy degradacyjne zachodzące w stalach. Do obiektów o szczególnie wysokim ryzyku eksploatacyjnym możemy zaliczyć konstrukcje o przeszło 100. letnim okresie eksploatacyjnym. Na podstawie prac [7, 8], szacuje się, że wiek 75% eksploatowanych stalowych, kolejowych obiektów mostowych przekracza w Polsce 50 lat, z czego przeszło 43% konstrukcji pamięta czasy XIX wieku. Konstrukcje te wznoszone były najczęściej ze stali zgrzewnych (druga połowa XIX w.) i zlewnych (przełom XIX i XX w.). Szczególnie niebezpiecznym zjawiskiem jest rozwarstwianie się stali na wtrąceniach żuźlowych – cechujących stal zgrzewną.



Rys. 2. Przykład zniszczenia próbki wzdłuż pasm wtrąceń niemetalicznych, statyczna próba rozciągania

Prowadzi to w rezultacie do znacznego spadku wytrzymałości na rozciąganie. Pęknięcie wówczas ma charakter kruchy i zachodzi wzdłuż wtrąceń (rys. 2.)

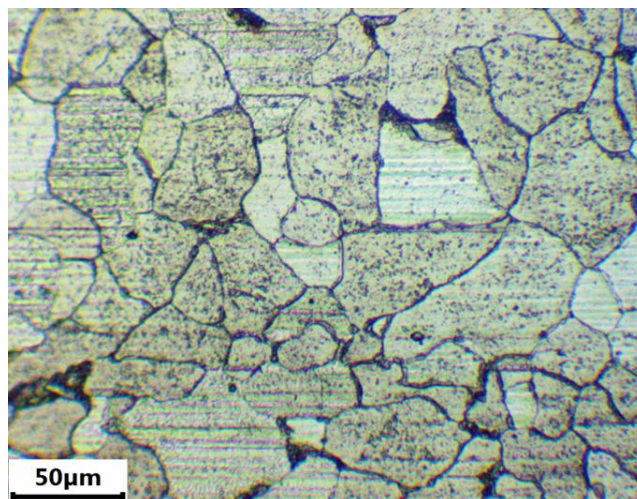
1. BADANIA MATERIAŁOWE I WYTRZYMAŁOŚCIOWE ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH PO PRZESZŁO 100.LETNIM OKRESIE EKSPLOATACYJNYM

Obiektem badań autorów były stalowe elementy konstrukcyjne pochodzące z hali Dworca Głównego we Wrocławiu. Badania wytrzymałościowe oraz obserwacje metalograficzne prowadzono w dwóch stanach materiałowych tj. w stanie poeksploatacyjnym (P) oraz normalizowanym (N) - 950°C, 2h, powietrze. Normalizowanie jako zabieg obróbki cieplnej pozwala na uzyskanie struktury bliskiej stanowi równowagowemu materiałowi - takie rozwiązanie przyjęto zgodnie z założeniami pracy [3,4] i opisanych tam procedur badawczy dla XIX-wiecznych stali.

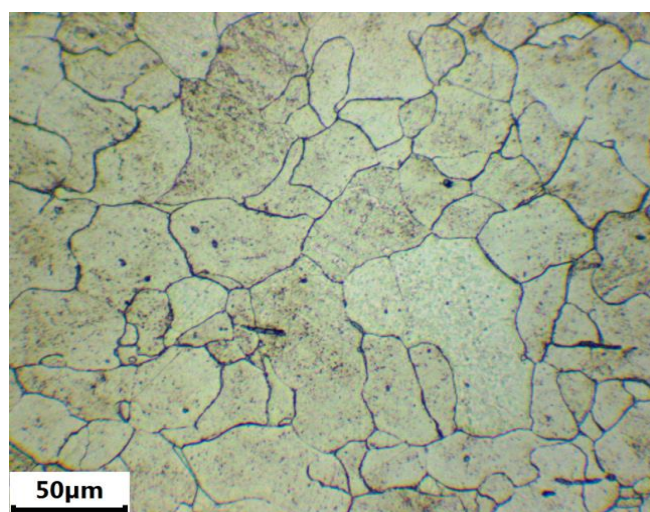


Rys. 3. Materiał badawczy z Dworca Głównego we Wrocławiu

Obserwacje mikrostruktury potwierdziły wyniki analiz składu chemicznego (tab.1) co do zawartości węgla w tej stali i jej przynależności do grupy stali zgrzewnych. Badana stal odznaczała się budową ferrytyczną z niewielkimi obszarami perlitu o zróżnicowanej wielkości ziaren. Jest to charakterystyczna cecha stali zgrzewnych. W próbkach w stanie poeksploatacyjnym można zauważyć dużą ilość, licznych i drobnych wydzieliń kruchych faz we wnętrzach ziaren (najprawdopodobniej są to węgliki, azotki i/lub węglikoazotki – występujące również w zdegenerowanych mikrostrukturalnie stalach w pracach [4, 5]). Taki obraz mikrostruktury jest typowy dla stali zgrzewnej o dużym zaawansowaniu i natężeniu procesów degradacji mikrostrukturalnej.



Rys. 4. Mikrostruktura stali (Dworzec Główny PKP), stan poeksploatacyjny, mikroskopia świetlna, trawiono 3%HNO₃



Rys. 5. Mikrostruktura stali zgrzewnej (Dworzec Główny PKP), stan normalizowany, mikroskopia świetlna, trawiono 3%HNO₃

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na próbkach woselkowych zgodnie z normą PN-EN ISO 6891-1. Rzeczywisty wygląd próbek przedstawiono na rys. 6. W tabeli 2. Zebrano wyniki statycznej próby rozciągania stali zgrzewnej pochodzącej z Dworca Głównego we Wrocławiu. Dodatkowo przeprowadzono badania udarnościami w temperaturze +20°C celem oceny wpływu obróbki cieplnej (i zmian mikrostrukturalnych) na przebieg procesu dynamicznej dekohezji metalu.



Rys. 6. Próbkę do rozciągania przed próbą statycznego rozciągania

Tab. 1. Wyniki analizy składu chemicznego badanej stali

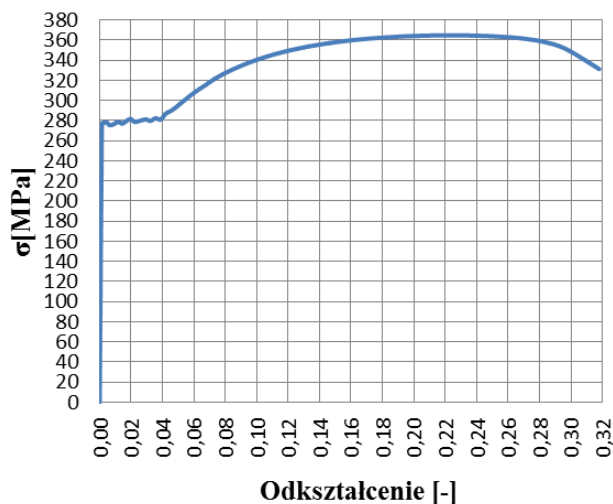
C[%]	Si [%]	Mn [%]	S[%]	P[%]	UWAGI
0,05	0,03	0,3	0,022	0,03	Znaczny rozrzut %zawartości fosforu (lokalnie nawet do 0,35%)

Tab. 2. Wyniki badań właściwości mechanicznych

Stan	R _e [MPa]	R _m [MPa]	E [GPa]	A ₅ [%]	Z [%]	KV ₈ [J]	UWAGI
P	258,7	343,2	197	19,4	X	96	Brak możliwości oceny Z ze względu na rozwarstwienie próbek
N	260,7	377,9	194,3	35,3	75,8	184	2 próbki udarnościowe nie zostały złamane na dwie części przy energii młota 300J

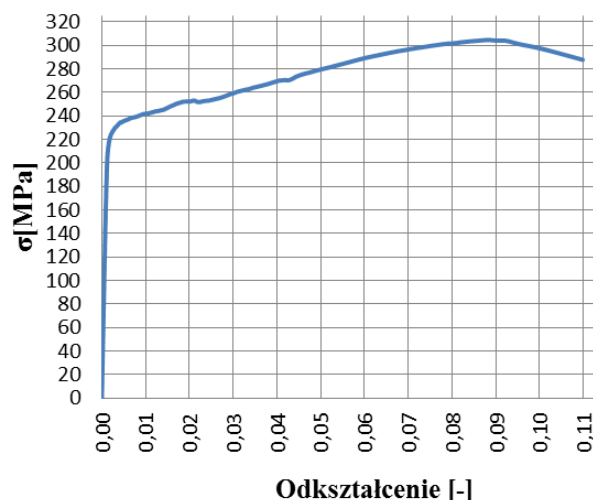
Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych mieszczą się w szerokim zakresie wartości przewidzianych dla stali zgrzewnych. Uwagę zwraca fakt, że sama ocena wartości średnich granic plastyczności nie wnosi istotnych różnic w zachowaniu się materiałów. Stan zdegenerowania mikrostruktury odzwierciedlają wyniki badań udarności (średnia z 5 próbek) oraz wydłużenia A₅ (średnia z 3 próbek). Często dobrym wskaźnikiem zmian degradacyjnych jest także przewężenie Z. Niestety, dla stali w stanie poeksploatacyjnym ze względu na liczne rozwarstwienia materiału nie była możliwa ocena tej wielkości. Przebiegi krzywych rozciągania dla badanych materiałów były bardzo zróżnicowane – co uwidoczniło na rys. 7 i 8, gdzie przedstawiono skrajnie różne przebiegi krzywych σ - ϵ . Istotnie zauważalną różnicą w rejestrowanych przebiegach krzywych w stanie poeksploatacyjnym jest zanik wyraźnej granicy plastyczności (por. rys. 7 i rys. 8). Taki stan rzeczy najprawdopodobniej spowodowany jest obecnością zmian mikrostrukturalnych.

Próbka DwN2



Rys.7. Przebieg krzywej rozciągania dla próbki N2 w stanie normalizowanym

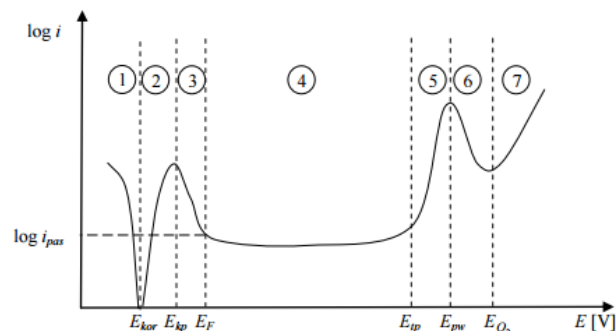
Próbka DwP1



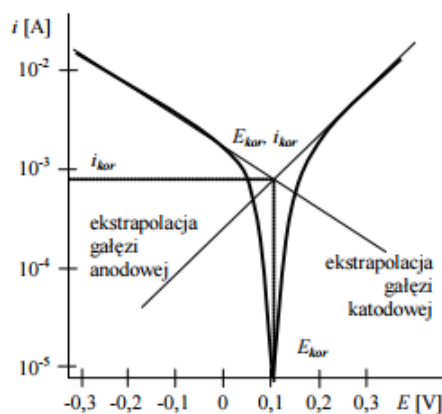
Rys.8. Przebieg krzywej rozciągania dla próbki P1 w stanie poeksploatacyjnym

2. BADANIA KOROZYJNE

Jedną z obiecujących technik diagnostycznych jest wykorzystanie zmian parametrów elektrochemicznych materiału wyznaczanych w trakcie badań korozyjnych metodą potencjodynamiczną. W szczególności dotyczy to oporu polaryzacyjnego oraz stałych równania Tafela. Charakterystyki te możemy podzielić na kilka rodzajów: potencjodynamiczne, potencjostatyczne, galwanokinetyczne i galwa-nostatyczne. Najczęściej wykorzystywana jest metoda potencjodynamiczna i taka też została użyta do badań.



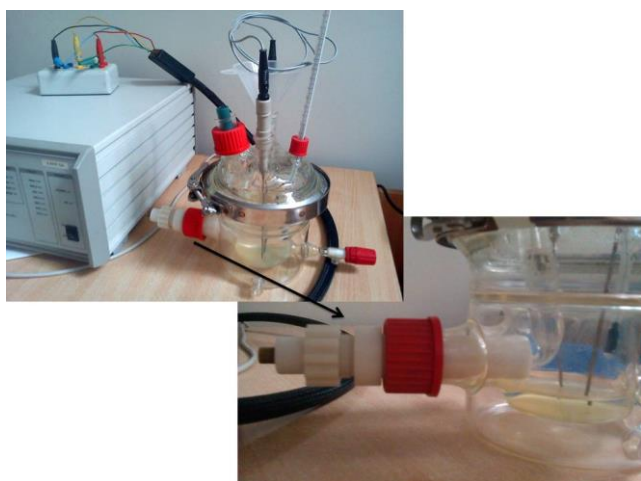
Rys. 8. Charakterystyka potencjodynamiczna dla metalu ulegającego pasywacji, [9]



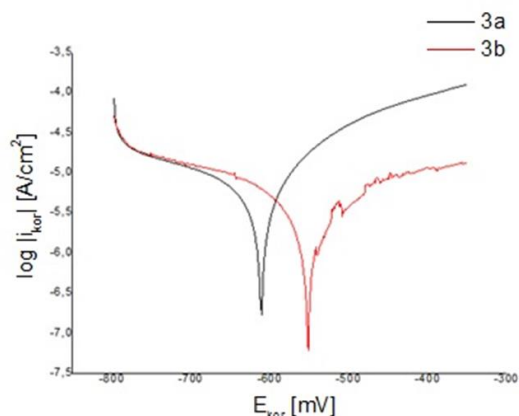
Rys. 9. Przykładowy przebieg krzywej polaryzacyjnej w okolicach potencjału korozyjnego, [9]

Pomiary polegają na zmianie polaryzacji elektrody zgodnie z zadanym programem, w tym przypadku w kierunku anodowym. Następnie wyznacza się charakterystykę gęstości prądu w funkcji potencjału $\log|i|=f(E)$. Rejestrując wykres w szerokim paśmie, możliwe jest wyznaczenie zakresów odpowiadających zjawiskom nie tylko korozji ale także pasywacji (rys. 8). Jednak najbardziej interesujący z punktu widzenia odporności na korozję jest zakres krzywych polaryzacji anodowej i katodowej, występujący wokół wartości potencjału korozyjnego ($\pm 0,25V$) (rys. 9). Poniżej potencjału korozyjnego E_{kor} materiał jest odporny na korozję. Natomiast powyżej tej wartości następuje proces utleniania, aż do punktu krytycznego potencjału pasywacji, od którego zaczyna się proces pasywacji [9].

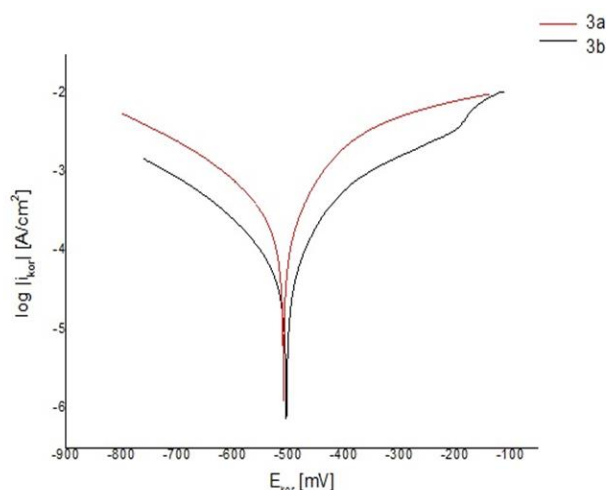
Do przeprowadzenia badań polaryzacyjnych został przygotowany trójelektrodowy układ pomiarowy. Elektrode pomocniczą wykonano ze stali austenitycznej a elektrodą odniesienia była nasycona elektroda Ag/AgCl. Badana próbka w postaci krążków o średnicy $d=0,785$ cm była elektrodą badaną. Stanowisko składało się z: potencjostatu ATLAS 0531 - ELEKTROCHEMICAL UNIT & IMPEDANCE ANALYSER, sterownika komputerowego oraz naczynia pomiarowego (rys. 10). Przed badaniem każda z próbek była szlifowana na tarczach z papierem ściernym o wzrastającej gradacji oraz polerowana sukniem z dodatkiem pasty diamentowej. Następnie próbki zostały umyte i odtłuszczone w acetonie w ultradźwiękowej płuczce. Czyste egzemplarze poddano ekspozycji, przez 20 minut w temperaturze $20^{\circ}C$, na działanie badanych roztworów (woda destylowana i 5% roztwór HCl). Po tym czasie dokonano pomiarów polaryzacyjnych zwiększając potencjał badanej elektrody z katodowego w kierunku anodowym z szybkością $dE/dt= 1$ mV/s.



Rys. 10. Potencjostat (po lewej) i naczynie pomiarowe z zaznaczoną elektrodą badaną (po prawej)



Rys. 11. Krzywe polaryzacji dla stali zgrzewnej pochodzącej z Dworca Głównego we Wrocławiu, 3a – stan poeksploatacyjny, 3b – stan normalizowany, woda destylowana



Rys. 12. Krzywe polaryzacji dla stali zgrzewnej pochodzącej z Dworca Głównego we Wrocławiu, 3a – stan poeksploatacyjny, 3b – stan normalizowany, 5% roztwór HCl

Szczegółowe zestawienie liczbowych różnic w rejestrowanych wartościach parametrów elektrochemicznych stali w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym, zawiera tabela 3 (woda destylowana) oraz tabela 4 (5% HCl). Po normalizowaniu stali, każdorazowo obserwowano przesunięcie krzywych polaryzacyjnych w kierunku wyższych potencjałów – co można interpretować na rzecz wzrostu odporności korozyjnej badanego materiału.

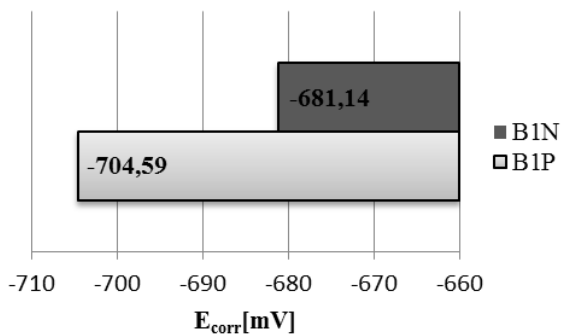
Tab. 3. Zestawienie wyników analiz krzywych polaryzacji (H_2O)

Rodzaj próbki	ikor	Ekor	Ekor	$\Delta Ekor$
	[A/cm ²]	[V]	[mV]	
stan poeksploatacyjny	3,82E-06	-0,601	-600,61	41,72
normalizowana	4,31E-06	-0,559	-558,90	

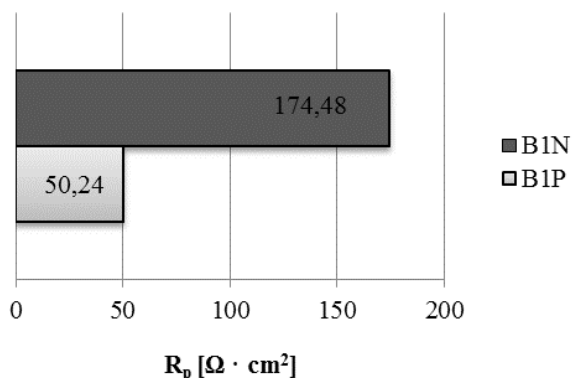
Tab. 4. Zestawienie wyników analiz krzywych polaryzacji (5% HCl)

Rodzaj próbki	ikor	Ekor	Ekor	$\Delta Ekor$
	[A/cm ²]	[V]	[mV]	
stan poeksploatacyjny	0,005	-0,536	-536,06	75,49
normalizowana	0,012	-0,461	-460,56	

Uzyskane wyniki odniesiono do znanych w literaturze nowatorskich prób oceny ilościowej zjawiska degradacji w funkcji zmian wybranych parametrów elektrochemicznych wyznaczonych w trakcie badań odporności na korozję. W badaniach prowadzonych w ośrodku Lwowskim [10], każdorazowo, wraz z ze wzrostem różnic w mikroskopowych obrazach degradacyjnych zjawisk, obserwowano wzrost oporu polaryzacyjnego w materiałach o mniejszym natężeniu procesów degradacyjnych. Obserwacje te pozostały także w dużej zgodności ze zmianami udarności. Podobną tendencję wykazywał poziom napięcia Ekor – efekt ten uwidocznił na rys. 11 i 12. Dodatkowo, przeprowadzono analizę w 5% roztworze NaCl. Także i w tym wypadku przebiegi krzywych polaryzacyjnych wykazywały podobną tendencję do przesunięć, tak jak dla wody destylowej i 5% roztworu HCl.



Rys. 13. Zestawienie wartości potencjałów korozyjnych E_{corr} (5% NaCl), [12]



Rys. 14. Zestawienie wartości oporów polaryzacyjnych R_p (5% NaCl), [12]

W celu zilustrowania liczbowego ubytku trwałości eksploatacyjnej wywołanego tylko samymi zmianami degradacyjnymi zaprezentowane zostaną wyniki analiz numerycznych prowadzonych dla wybranej geometrii elementu – zgodnie z procedurami FITNET i zaimplementowanej dostępnej w bibliotekach narzędzia FMTOOL – opracowanego przez Nobo Solutions S.A. Za cel analizy obrano wyznaczenie podkrytycznego okresu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w próbie laboratoryjnej typu CT ($B=10\text{mm}$, $W=48\text{mm}$, $\Delta F=7200\text{N}$, $R=0.1$ – zgodnie z założeniami w pracy [12]). Rozważano stabilny wzrost szczeliny od długości 15mm do 30mm z wykorzystaniem równania Parisa. Do analiz wybrano ekwiwalentny materiał pochodzący z Dworca Głównego PKP we Wrocławiu – oznaczony jako stal B, [12]. Wyniki symulacji i stałe równania Parisa:

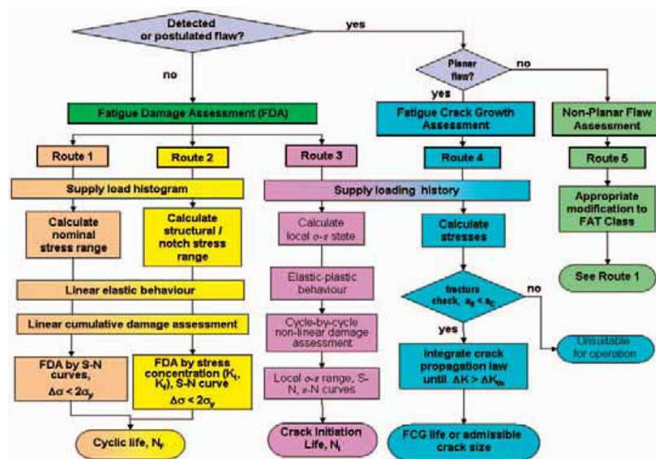
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

zebrano w tab. 5. Stałe C i m wyznaczono z wykresów kinetyki pęknięcia zmęczeniowego w układzie mm/cykl-MPam^{0.5}.

Tab.5. Wyniki analiz numerycznych z użyciem FMTOOL, [12]

C	m	N_f [cykle]	Redukcja trwałości zmęczeniowej
$2,44 \cdot 10^{-16}$	5,8	$4,77 \cdot 10^5$	$\Delta N_f = -53.1\%$
$7,73 \cdot 10^{-18}$	6,7	$10,17 \cdot 10^5$	

Przyjmując stan normalizowany (stal B) jako stan wyjściowy, obliczono redukcję trwałości zmęczeniowej spowodowanej tylko samą obecnością procesów degradacyjnych. Proces obliczeniowy FMTOOL zgodny jest ze standardami procedur FITNET [13] – moduł zmęczenie, ścieżka 4 (rys. 15).



Rys. 15. Ogólny schemat postępowania w module zmęczenie procedur FITNET, [13]

Jak wynika z analizy danych w tab.5. – ubytek trwałości zmęczeniowej dla stali zgrzewnej B wynosi aż 53,1% co należy ocenić jako znaczący stopień wyeksploatowania materiału ze względu na obecność procesów degradacyjnych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań zabytkowych, stalowych elementów konstrukcyjnych pochodzących z Dworca Głównego we Wrocławiu (XIX wiek). Wyniki analizy składu chemicznego oraz obserwacje metalograficzne potwierdzają fakt przynależności badanego materiału do grupy stali zgrzewnych. W toku prowadzonych prac badawczych udokumentowano także obecność procesów degradacyjnych zachodzących na poziomie mikrostruktury. Te, niekorzystne zmiany powodują m.in. wzrost kruchości materiału. Tendencję tę wyraźnie odzwierciedlają wyniki badań udarności i redukcja wydłużenia względnego A_5 zmierzonego w próbie statycznego rozciągania w stanie poeksploatacyjnym. Do oceny zmian mikrostrukturalnych zaproponowano „małoinwazyjną” metodę badań elektrochemicznych z wykorzystaniem potencjodynamicznych badań korozyjnych materiału. Wykonane badania elektrochemiczne wykazały wzrost odporności korozyjnej dla materiału po procesie normalizacji we wszystkich typach przygotowanych środowisk korozyjnych (woda destylowana, 5% HCl, 5% NaCl). Potwierdzają to przede wszystkim uzyskane charakterystyki potencjodynamiczne, jak również parametry charakteryzujące odporność korozyjną materiału – głównie E_{kor} , R_p . W świetle uzyskanych wyników, można stwierdzić, że dobrany program badań korozyjnych i uzyskane charakterystyki elektrochemiczne mogą stać się dobrym markerem degradacji mikrostruktur stalowych elementów konstrukcyjnych. Uzyskane wyniki są także interesujące z punktu widzenia porównawczego – bowiem znacząca liczba zabytkowych obiektów mostowych we Wrocławiu jest wzniesiona z tego samego gatunku stali. Dlatego też prezentowane wyniki mogą być dobrym punktem odniesienia w przyszłych analizach związanych z faktem rewitalizacji, przebudowy istniejących stalowych konstrukcji mostowych powstałych na przełomie XIX i XX wieku. Z drugiej strony wykorzystanie procedur FITNET [13] może pozwolić na ilościową ocenę strat trwałości eksploatowanego elementu konstrukcyjnego ze względu na podkrytyczny okres rozwoju pęknięcia zmęczeniowego (tab. 5).

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca powstała ze środków Politechniki Wrocławskiej (zadanie 0402/0112/16(K1010)) w ramach dotacji statutowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Pękalski G., *Procesy degradacyjne konstrukcji stalowych mostów Wrocławia z przełomu XIX i XX w.* – na prawach rękopisu. Raport Instytutowy, IMiMT, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007
2. Rabięga J., Pękalski G., *Badania materiałowe mostów Pomorskich: Południowego, Środkowego i Północnego na rzece Odrze we Wrocławiu*, Raport SPR 9/2007, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2007
3. Lesiuk G., Szata M., *Degradacja mikrostruktur elementów konstrukcyjnych pochodzących z mostów wzniesionych na przełomie XIX i XX w.*, Zeszyty Naukowe – Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. Gen. T. Kościuszki we Wrocławiu, 42(1):96-109, Wrocław 2010
4. Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport IMiMT, Politechnika Wroclawska, 1999
5. Dudziński W., Haimann K., *Ocena stopnia degradacji materiałów stosowanych w maszynach górnictwa odkrywkowego z zastosowaniem metod mikroskopii elektronowej*, materiały konferencyjne Metody Doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn 243-252, Wrocław-Szklarska Poręba,
6. Główny zarząd nadzoru budowlanego, *Katastrofy budowlane w 2013 roku*, Warszawa 17 marca 2014r.
7. Bień J., *Trwałość obiektów jako kryterium w zarządzaniu infrastrukturą mostową*, praca zbiorowa: Trwałość obiektów mostowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 97-114, Politechnika Wroclawska, Dolnośląska Izba Inżynierów Budownictwa, Związek Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej, 2012,
8. Bień J., *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
9. Krzyczmonik P., Uniwersytet Łódzki, Wydział Chemii, *Podstawy elektrochemii i korozji, Ćwiczenie 5, Korozja, diagramy Pourbaix. Krzywe polaryzacyjne. Wyznaczanie parametrów procesów korozji.*
10. Nykyforchyn H.M., Tsyrunyk O.T., *In-service degradation diagnostics of low-alloyed steels and aluminum alloys properties by electrochemical methods*, ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS (ULTRASOUND), Vol.64, No.1, 2009.
11. Lesiuk G., Frątczak R., Maciejewski Ł., Czaplinski T., Przygoda A., Zięty A., *Wykorzystanie hybrydowych metod obliczeniowych w szacowaniu trwałości zmęczeniowej i ocenie stopnia wyeksploatowania metalicznych materiałów konstrukcyjnych, materiały konferencyjne PIRE 2016 – Projektowanie, Innowacje i Remonty w Energetyce, Energetyka 2016 (w druku)*
12. Lesiuk G., Szata M., Bocian M., *The mechanical properties and the microstructural degradation effect in an old low carbon steels after 100-years operating time*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 15, Issue 4, September 2015, Pages 786-797, ISSN 1644-9665, <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.06.004>.
13. Kocak M., *FITNET Fitness-for-Service Procedure: An Overview*, Welding in the World, 5/51, 2007

DIAGNOSTIC ROLE OF THE CORROSION RESISTANCE TEST IN DETECTION OF MICROSTRUCTURAL DEGRADATION PROCESSES IN A LONG-OPERATED STEEL

Abstract

In the paper, the problem of microstructural degradation processes detection (in terms of the corrosion resistance test) has been discussed. Based on the author's experimental data and according to the reports from another laboratories, the diagnostic role of this type of research in the assessment of degeneracy of microstructures has been confirmed. From the technical point of view, structural components made of wrought iron (puddled) and old, mild rimmed steel are particularly endangered to the presence of degradation processes in microstructures. These ancient materials are even still used in the railway infrastructure and bridge engineering. The presence of microstructural degradation processes contributes to a significant decrease in the material toughness and the loss of fatigue life. The paper presents the results of numerical analysis of the fatigue crack growth lifetime. The simulations were performed in order to illustrate the loss of fatigue life caused by the mentioned microstructural degradation processes. It is well documented in the images from light microscopy (LM) and scanning electron microscopy as well.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Lesiuk** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Grzegorz.Lesiuk@pwr.edu.pl

mgr inż. **Anna Zięty** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

inż. **Mateusz Tabaszewski** - Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

dr inż. **Józef Rabięga** – Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Mostów i Kolei, ul. Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław