

# NAUKI TECHNICZNE

**Grzegorz LESIUK\***  
**Mieczysław SZATA**

## **DEGRADACJA MIKROSTRUKTUR ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH POCHODZĄCYCH Z MOSTÓW WZNIESIONYCH NA PRZEŁOMIE XIX I XX WIEKU**

*W pracy przedstawiono wnioski z badań dotyczących starych, stalowych konstrukcji szczególnie tych wzniesionych na przełomie XIX i XX w. Obiektem zainteresowań autorów były wrocławskie mosty Pomorskie; Środkowy i Północny (1885r., 1930) oraz most Piaskowy (1861r.). Materiałem stosowanym na konstrukcję tych mostów była stal zgrzewna lub zlewna. W toku wieloletniej eksploatacji stale te (zwłaszcza zgrzewna) wykazują skłonności do procesów degradacyjnych. W pracy zamieszczono wyniki badań metalograficznych (mikroskopia świetlna, SEM) oraz badań własności mechanicznych (pomiar twardości, próba statycznego rozciągania) obrazujących stan strukturalnego zdegradowania. Zaprezentowano także wstępne wyniki badań stali zgrzewnej pochodzącej z mostu Piaskowego dotyczące procesu rozwoju szczeliny zmęczeniowej. Wyznaczono podstawowe wielkości opisujące kinetykę pęknięcia zmęczeniowego.*

**Słowa kluczowe:** mosty stalowe, stal zgrzewna, stal zlewna, degradacja struktury stali, pęknięcia zmęczeniowa, mechanika pęknięcia

### **1. MATERIAŁY KONSTRUKCYJNE STOSOWANE NA PRZEŁOMIE XIX I XX WIEKU**

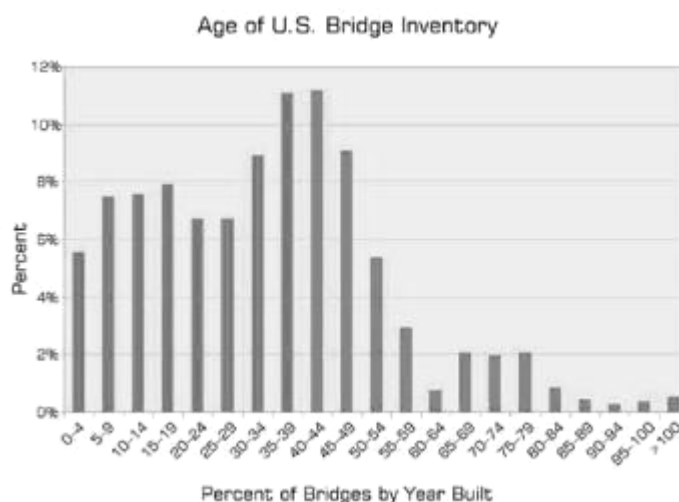
We Wrocławiu znajduje się ponad 120 przepraw mostowych. Wiele z nich pamięta czasy XIX wieku, jak choćby mosty; Piaskowy (1861r.), Młyńskie (1885r.), Sikorskiego (1875r.), Mieszczkański Stary (1876r.), Pomorskie (1885/1930r.), Zwierzyniecki (1897r.), Tumski (1889r.), Grunwaldzki (1910r.), Jagiellońskie (1916r.), Trzebnicki Płd. (1904-1905r.), Trzebnicki Płn. (1916r.). Większość z nich znajduje się

---

\* mgr inż. Grzegorz LESIUK, dr hab. inż. Mieczysław SZATA, prof. nadzw. PWr. – Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej

w ciągu głównych szlaków komunikacyjnych Wrocławia (np. drogi krajowe numer 5 i 8). Część z nich jest sukcesywnie zamykana dla ruchu kołowego ze względów bezpieczeństwa – co dotkliwie odczuwają kierowcy (2009 rok - np. most Piaskowy, mosty Młyńskie). Zatem troska o należyte bezpieczeństwo tych konstrukcji staje się sprawą priorytetową przy jednoczesnym uwzględnieniu wartości użytkowej jak i kulturowej obiektu. Kulturowy aspekt związany jest z klimatem miasta, stworzonym przez wspomniane mosty – Wrocław nazywany jest często drugą Wenecją Północy. Aspekt naukowy polega na identyfikacji zjawisk degradacyjnych następujących w wyniku procesów starzeniowych stali przy jednoczesnym uwzględnieniu wpływu środowiska, a także długotrwałej eksploatacji – często wobec braku dokumentacji - pozostającej czynnikiem nieznanym. Finalnie, naukowo-utilitytarnym celem takich działań jest zarówno wyjaśnienie fizyki zjawisk degradacyjnych na poziomie mikrostruktury, jak i opis kinetyki ich rozwoju. W konsekwencji prowadzi to do (bezpiecznego) umotywowanego wyników badań okresu eksploatacji obiektu.

Powszechnie stosowanymi materiałami konstrukcyjnymi używanymi w XIX i XX wieku była stal zgrzewna lub zlewna. Ówczesnie, wobec braku uregulowań co do terminologii nazewnictwo i obecna interpretacja nazw tych materiałów może być kłopotliwa i dalece odbiegająca od współczesnych nazw. Pozostajemy więc przy nomenklaturze używanej w pracy [3] klasyfikującej (z punktu widzenia obiektów mostowych) tworzywa na stal zgrzewną i zlewną. W zasadzie można zaryzykować stwierdzenie, że konstrukcje wznoszone do końca XIX wieku były wykonywane ze stali zgrzewnej, zaś konstrukcje z początków XX wieku były już ze stali zlewnych. Szacuje się, że na terenach ówczesnej monarchii austro-węgierskiej (w roku 1900) 83% całej produkcji stali stanowiła stal zlewna, a niespełna 10 lat później, aż 95%. Ocenia się także, że jeszcze pod koniec lat 70 ubiegłego wieku w Polsce eksploatowanych było przeszło 10% mostów wzniesionych ze stali zgrzewnej [3]. Z drugiej strony, spoglądając np. na USA, na podstawie raportu AASHTO [12] dowiadujemy się, że średnia wieku mostu w USA wynosi 43 lata.



Rys. 1. Systematyka mostów USA względem wieku

*Źródło: Raport [12]*

Jak wynika z rysunku 1, do dzisiaj kilka procent mostów wzniesionych ze stali zgrzewnej lub zlewnej w USA (spośród 590 tys.), jest wciąż eksploatowanych. Problem bezpiecznej eksploatacji i oceny stanu technicznego konstrukcji wzniesionych ze stali zgrzewnej i zlewnej jest i był przedmiotem wielu programów badawczych m.in. VI Ramowego Programu [1], czy programu badawczego opisanego w raporcie [6] z 2005 roku wykonanego przez Federal Institute for Material Research and Testing (BAM) „*Alte Stähle und Stahlkonstruktionen – Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückentragern und Messungen von 1990 bis 2003*”.

W celu zilustrowania problemów związanych z eksploatacją stali zgrzewnych i zlewnych poniżej na podstawie [2], [3] przedstawiono informacje dotyczące zarówno sposobu produkcji stali zgrzewnej i zlewnej, jak i ich własności.

### 1.1. Stal zgrzewna

Żelazo zgrzewne (nazywane później stalą zgrzewną – pojęcie stali nie było wówczas jasno sprecyzowane) wytwarzano metodą pudlarską. Wytwarzano je w małych porcjach wsadu (o masie 200-500 kg) w piecach pudlarskich, gdzie surówkę w stanie stałym nadtapiano gorącym gazem, powstającym przy spalaniu węgla kamiennego lub koksu. Dzięki utleniającemu wpływowi spalin, z surówki wypalany był przede wszystkim węgiel. W ten sposób proces ten podnosił temperaturę krzepnięcia stopu. Na powierzchni stopowej żużel wymagał ciągłego mieszania (w j. ang. „*to puddle*”) po to, aby zapewnić dostęp utleniającego gazu do stopiwa. Stąd nazwa całego procesu – zwanego pudlarskim sposobem produkcji stali (ang. puddled steel) Przy relatywnie niskiej temperaturze uzyskiwanej w piecu pudlarskim (ok. 1400°C) następowało krzepnięcie odwęglonej surówki, która w stanie „ciastowatym” tworzyła bryłę, zawierającą małą ilość węgla, lecz za to wiele zanieczyszczeń żużlowych [2] str. 14. Istotną własnością konstrukcji wytwarzanych ze stali zgrzewnych była duża niejednorodność ich składu chemicznego i warstwowa budowa. Budowa ta wynikała najpewniej z małych porcji wsadu aplikowanego do pieca pudlarskiego. Dodatkowo sam proces technologiczny powodował duże zanieczyszczenie stali. Wszystko to przyczyniało się do powstawania lokalnych wad materiałowych oraz przeogromnego statystycznego rozrzutu wyników. Taki stan rzeczy nie pozostał obojętny na makroskopowe własności stali – stal zgrzewna odznaczała się zróżnicowaniem wydłużenia i wytrzymałości na rozciąganie w kierunku walcowania i w kierunku doń prostopadłym.

Wytrzymałość na rozciąganie stali zgrzewnej wynosi ok. 280÷310 MPa przy wydłużeniu całkowitym 7÷25%. Doniesienia literaturowe [3] wskazują na znaczne fluktuacje dotyczące modułu sprężystości tej stali  $E \sim 170 \div 200$  GPa, choć zdarzało się rejestrować wyniki  $E=132,8$  GPa.

Z dostępnych źródeł literaturowych [2] str. 17 wynika, iż żelazo zgrzewne (stal zgrzewna – dop. autora) wytwarzane w drugiej połowie XIX w. charakteryzowało się następującymi parametrami:

- gęstość  $g=(7,6 \div 7,8)$  Mg/m<sup>3</sup>;
- zawartość węgla  $C=(0,05 \div 0,1)\%$ ;
- zawartość fosforu  $P \sim 0,4\%$ ;

- $R_e=210\div 290$  MPa,  $R_H=(150\div 160)$  MPa,  $R_m=300\div 400$  MPa, wszystkie wielkości w kierunku walcowania;
- wydłużenie całkowite przy zerwaniu (dla rozciągania w kierunku walcowania):  $A_5=8\div 25\%$ ;
- współczynnik sprężystości podłużnej  $E=200\div 215$  [GPa].

Jak już zostało wcześniej zasygnalizowane, stal zgrzewna cechuje się znaczną anizotropią własności mechanicznych. W kierunku walcowania są one istotnie wyższe niż w kierunku doń prostopadłym.

## 1.2. Stal zlewna

Koniec wieku XIX to okres, kiedy stal zlewna wypierała stal zgrzewną. Stało się to możliwe dzięki opanowaniu coraz doskonalszych technik wytwarzania stali, zwłaszcza w zakresie świeżenia surówki i urządzeń odpowiednio wydajnych. Otrzymywanie stali zlewnej okazało się możliwe dzięki zastosowaniu pieców konwertorowych. Pierwsze konwertory do produkcji stali, z zastosowaniem przedmuchiwania powietrzem ciekłej surówki z wykładziną krzemionkową (o odczynie kwaśnym), pozwalały dość łatwo uzyskiwać stal płynną – tzw. stal zlewną, o dowolnie ograniczonej zawartości węgla, krzemu i manganu – co znacząco odzwierciedlają wyniki badań własności mechanicznych i obserwacji mikroskopowych. To jest stal (zlewna) odznaczająca się lepszymi własnościami mechanicznymi, bardziej jednorodnym składem chemicznym, pozbawiona wtrąceń żużlowych i segregacji składników w stosunku do stali zgrzewnej. Konwertorowy sposób produkcji stali był ponadto bardzo efektywny (oczywiście jak na czasy XIX wieku) i pozwalał otrzymywać z jednego wytopu stal zlewną w ilości kilkadziesiąt razy większej niż z pieca pudlarskiego [2] str. 18.

Stal zlewna szybko znalazła zastosowanie jako podstawowy materiał konstrukcyjny w postaci blach, kształtowników walcowych. Występowała w postaci stali kutej przeznaczonej na elementy, które będą podlegać dalszej obróbce – rolki łożyskowe, kliny, sworznie przegubów etc. Stal zlewną można też było spotkać jako staliwo zwykłe, z reguły stosowane do elementów silnie wyteżonych np. cięgien mostów.

Pierwszym mostem zbudowanym całkowicie ze stali zlewnej jest most na Wiśle koło Fordonu, zbudowany w latach 1890-1893.

Popularność stali zlewnej przejawiająca się w dominacji stali zlewnej nad zgrzewną wyrażoną w procentach całkowitej produkcji wynikała z kilku czynników, a są to:

- produkcja stali zlewnej była bardziej wydajna;
- stal zlewna była bardziej „czysta” i jednorodna pod względem składu chemicznego;
- możliwość „sterowania” zawartością węgla i innych składników;
- wykazywała lepsze własności mechaniczne w kierunku walcowania i prostopadłym (wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie, zginanie);
- relatywnie dobrą ciągliwość;

- dobra spawalność metalurgiczna stali (wyjątkiem są miejsca utwardzone – brzegowe).

W początkowym okresie produkcji tej stali wytwarzano jedynie niskowęglowe gatunki o następującej ogólnej charakterystyce średniej [2] str. 20:

- gęstość  $\rho$ : 7,85 Mg/m<sup>3</sup>;
- zawartość węgla: C=0,05÷0,20 %;
- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m=370\div450$  MPa;
- granica plastyczności  $R_e=180\div240$  MPa;
- granica sprężystości  $R_H=150\div190$  MPa;
- wydłużenie całkowite przy rozciąganiu:  $A_5\sim20$  %;
- moduł sprężystości podłużnej  $E=215$  GPa.

Znane są także odmiany wysokowęglowe tej stali, charakteryzujące się zawartością węgla w granicach 0,3÷0,35 % oraz wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  rzędu 440÷550 MPa. Obszar zastosowań tej stali dotyczył głównie mostów niemieckich (północny-wschód) nad kanałami. Mimo to najbardziej znaną konstrukcją wykonaną między innymi z takiej stali jest amerykański most wiszący na linach z drutu stalowego na rzece Delaware w USA z roku 1926. Most ten może imponować rozmiarami. Jego trójprzęsłowa konstrukcja zajmuje długość 972 m!

## **2. ZARYS PROBLEMÓW ZWIĄZANYCH Z DEGRADACJĄ STRUKTURALNĄ STALOWYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH Z KOŃCA XIX I POCZĄTKÓW XX WIEKU POCHODZĄCYCH Z OBIEKTÓW MOSTOWYCH**

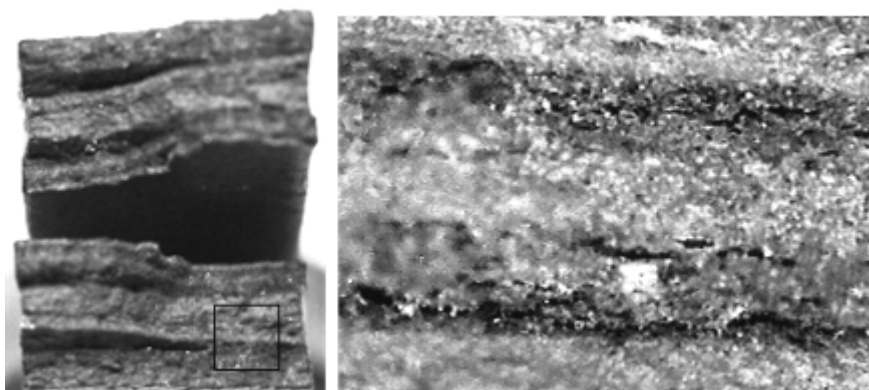
Z informacji literaturowych [4], [9], [10] oraz badań własnych starych konstrukcji stalowych wynika problem pogarszania się własności użytkowych starych stalowych konstrukcji. Powstała na Politechnice Wrocławskiej w latach 90 ubiegłego wieku *Teoria Degradacji* [4], zajmowała się początkowo problemami maszyn roboczych górnictwa odkrywkowego. Jej rozwój doprowadził do systemowej analizy układu maszyna (konstrukcja) – otoczenie. W toku prac udokumentowano [9], [10] szereg problemów związanych z degradacją strukturalną stali. Problem ten jeszcze ostrzej rysuje się w odniesieniu do konstrukcji mostowych z przełomu XIX i XX wieku. W szczególności dotyczy to stali zgrzewnej, która, jak wykazują badania, ma większe skłonności do strukturalnych procesów degradacyjnych niż stal zlewna. Materiałowe aspekty *Teorii Degradacji* zostały ujęte w pracach [8], [9]. Zagadnieniem istotnym w badaniach starych konstrukcji jest ocena stopnia wyeksploatowania stalowego elementu konstrukcyjnego. Brak materiału porównawczego – współczesne technologie produkcji stali są dalece różne od tych z ubiegłych wieków – utrudnia ocenę wyeksploatowania elementu konstrukcyjnego. Jedynym rozwiązaniem wypracowanym w ramach *Teorii Degradacji* i jej materiałowych aspektów (patrz [5], [9]) jest przyjęcie stanu normalizowanego jako poziomu porównawczego.

### **2.1. Materiałowe aspekty teorii degradacji – przykłady degradacji strukturalnej**

Stale stosowane w XIX/XX-wiecznym mostownictwie miały (i mają) strukturę ferrytyczną z niewielką ilością perlitu. Procesy degradacyjne występujące w starych stalach polegają m.in. na rozpadzie perlitu na ferryt i węgliki, wydzieleniach azotków i węglików wewnątrz oraz na granicach ziaren (w tym wypadku mowa jest

o cementycie trzeciorzędowym). W celu zilustrowania Czytelnikowi rodzajów struktur i cech wskazujących na postępującą degradację, przedstawiono na kolejnych rysunkach przykładowe wyniki obserwacji mikroskopowych (mikroskopia świetlna oraz SEM) pochodzących z wrocławskich mostów.

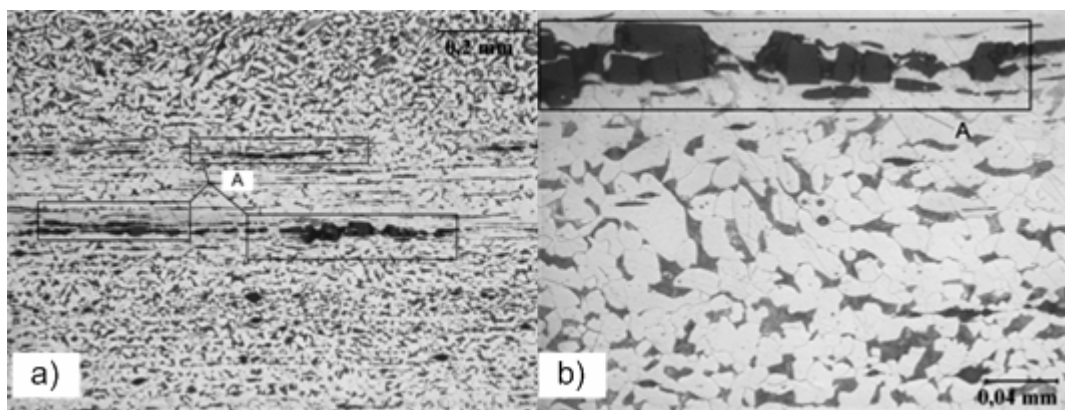
Dla stali zgrzewnej charakterystyczny jest jej przełom – warstwowy z licznymi pustkami – co przedstawiono na rysunku 2. Tam również pokazano makroskopową budowę przełomu próbki (po prawej stronie w powiększeniu) po statycznej próbie rozciągania.



Rys. 2. Stal zgrzewna – charakterystyczny dla tej stali przełom po statycznej próbie rozciągania, po lewej stronie widok przełomu próbki płaskiej, po prawej stronie powiększony fragment obszaru zaznaczonego ramką – widoczne liczne rozwarstwienia i charakterystyczna lamelarna budowa przełomu

*Źródło: Opracowanie własne*

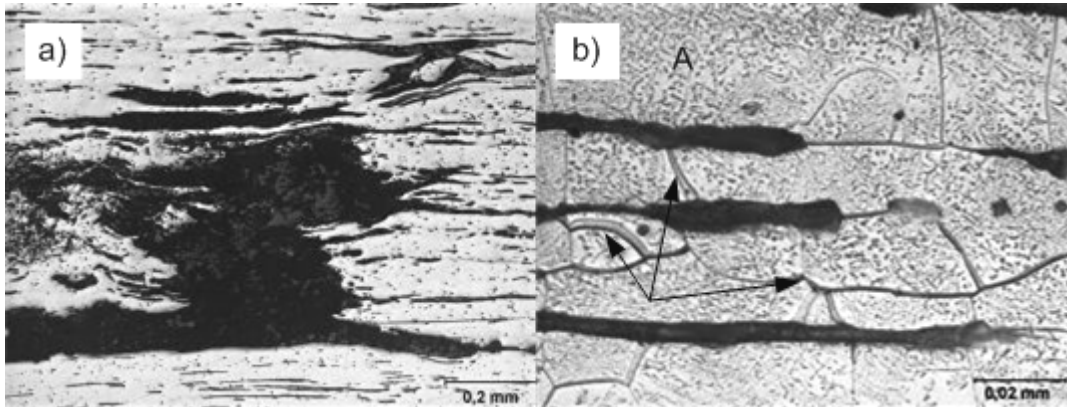
Typowa dla stali zgrzewnej pasmowa struktura (ferrytyczno-perlityczna) w kierunku walcowania oraz niejednorodna wielkość ziaren została pokazana na rysunku 3. Ramką zaznaczono plastycznie odkształcony łańcuszek wtrąceń niemetalicznych.



Rys. 3. Mikrofotografie (mikroskopia świetlna) struktury stali z Mostu Piaskowego Północnego (1861r. – stal zgrzewna, stan poeksploatacyjny):  
 a) ferrytyczno-perlityczna struktura stali, z widocznymi łańcuszkami wtrąceń niemetalicznych (A) oraz zaznaczoną pasmowością mikrobudowy w kierunku walcowania,  
 b) powiększony obszar z rysunku 3a

*Źródło: Opracowanie własne*

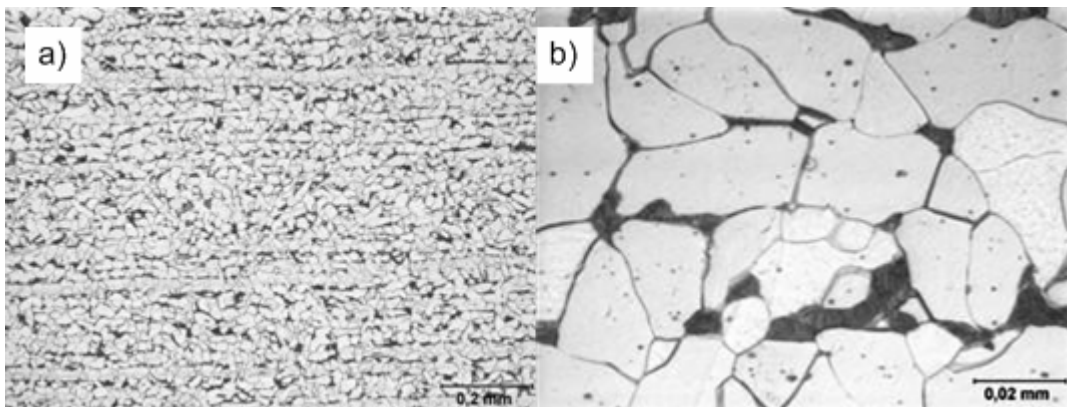
Przykładem struktury o ekstremalnym nasileniu zanieczyszczeń wtrąceniami niemetalicznymi struktury jest struktura pokazana na rysunku 4a – pochodząca z badań fragmentów konstrukcji stalowej Mostu Pomorskiego Środkowego (1885r.-stal zgrzewna).



Rys. 4. Mikrofotografie (mikroskopia świetlna) struktury stali z Mostu Pomorskiego Środkowego (1885r. – stal zgrzewna, stan poeksploatacyjny):  
a) widoczny obszar o ekstremalnym natężeniu wtrąceń niemetalicznych,  
b) obszar z oznakami degradacyjnymi (A) –wydzielenia azotków i węglików wewnątrz ziaren, strzałkami zaznaczono wydzielenia  $Fe_3C_{III}$  na granicach ziaren

*Źródło: Raport [10]*

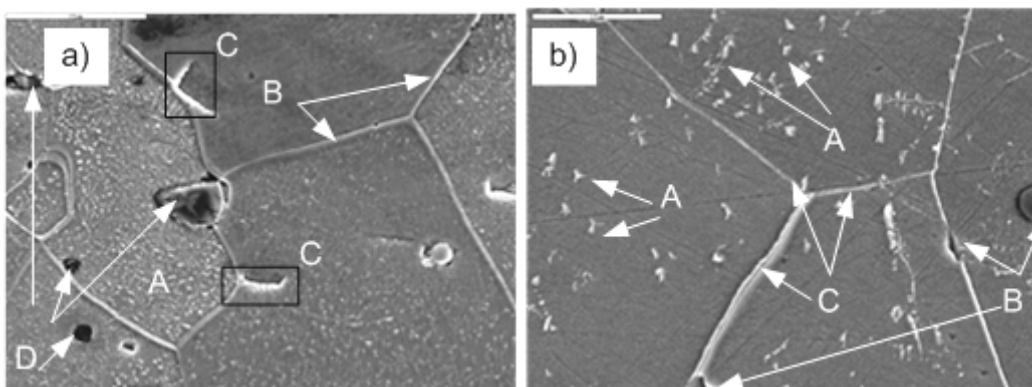
Na rysunku 4b pokazano również wspomniane, zmienione degradacyjnie struktury. Również i w przypadku stali zlewnej z 1930r. można obserwować wydzielenia degradacyjne – np. takie jak na rysunku 5b. Należy porównać rysunek 2 i 5a celem obserwacji różnicy ilości zanieczyszczeń wtrąceniami niemetalicznymi stali zgrzewnych (rys. 2) i zlewnych (rys. 5a).



Rys. 5. Mikrofotografie (mikroskopia świetlna) struktury stali z Mostu Pomorskiego Północnego (1930r. – stal zlewna, stan poeksploatacyjny):  
a) drobnoziarnista ferrytyczno-perlityczna struktura stali,  
b) struktura ziaren ferrytu z perlitem o budowie drobnopłytkowej oraz nielicznymi wydzieleniami (azotki) wewnątrz ziaren ferrytu. Lokalnie otoczka  $Fe_3C$  na granicach ziaren

*Źródło: Raport [10]*

Poniżej na rysunkach 6÷8 pokazano przykłady struktur o różnym nasileniu zmian degradacyjnych – zdjęcia zostały wykonane przy pomocy skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

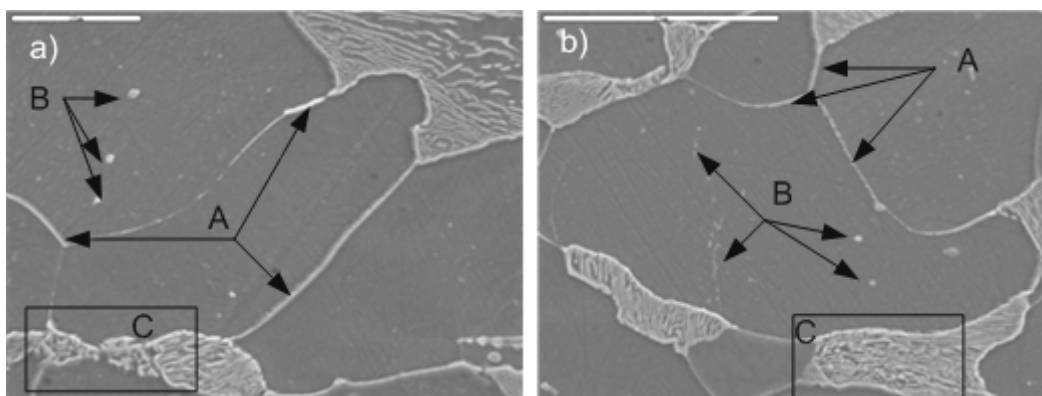


Rys. 6. Mikrofotografie (SEM) struktury stali z Mostu Pomorskiego Środkowego (1885r. – stal zgrzewna, stan poeksploacyjny):

- a) ziarna ferrytu z wydzieleniami azotków i węglików wewnątrz (A), pobrębione granice ziarn wydzieleniami  $Fe_3C$  (B) oraz degradacyjne wydzielenia cementytu (C), zaznaczone widoczne wtrącenia niemetaliczne (D),
- b) struktura ziaren ferrytu licznymi wydzieleniami (azotki żelaza) wewnątrz ziaren ferrytu (A), lokalnie otoczka  $Fe_3C$  na granicach ziaren (C), wtrącenia niemetaliczne (B)

*Źródło: Opracowanie własne*

Bardzo często typowym przejawem degradacji strukturalnej dla niskowęglowych stali jest degradacyjna postać perlitu – czy może raczej „perlitu zdegenerowanego” – jak to określa Profesor Fryderyk Staub [11]. Takie zdegenerowane obszary perlitu zostały pokazane na rysunku 7 – zaznaczone ramką – w stali zlewnej z 1930 roku z Mostu Pomorskiego Północnego oraz na rysunku 8 – w stali zgrzewnej z Mostu Piaskowego z 1861r.

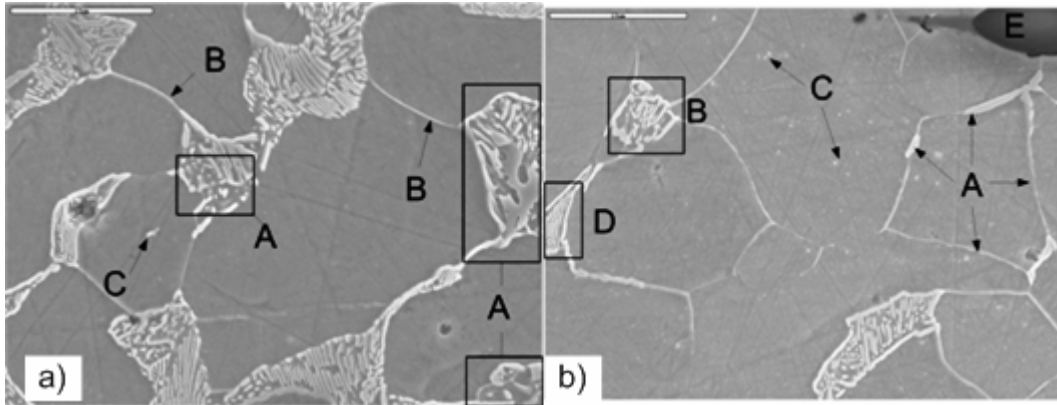


Rys. 7. Mikrofotografie (SEM) struktury stali z Mostu Pomorskiego Północnego (1930 r. – stal zlewna, stan poeksploacyjny):

- a) i b) ziarna ferrytu z wydzieleniami azotków i węglików wewnątrz (B), pobrębione granice ziarn wydzieleniami  $Fe_3C$  (A), ramką zaznaczono również obszary perlitu częściowo zdegradowanego (perlitu zdegenerowanego)

*Źródło: Opracowanie własne*



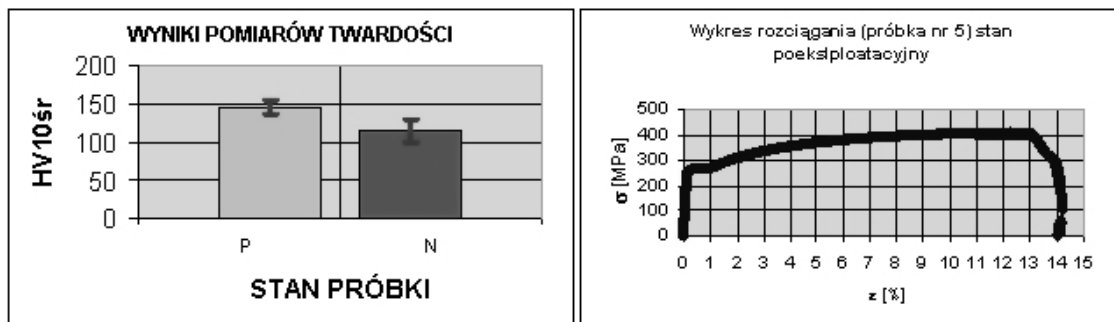


Rys. 8. Mikrofotografie (SEM) struktury stali z Mostu Piaskowego (1861r. – stal zgrzewna):  
 a) ferrytyczno-perlityczna struktura stali (stan poeksploatacyjny – zgląd poprzeczny),  
 (A) – zdegenerowane obszary perlitu, (B) – pogrubione granice ziaren wydzieleniami  $Fe_3C$ ,  
 (C) – nieliczne wydzielenia wewnątrz ziaren,  
 b) ziarnna ferrytu i kolonie perlitu (stan normalizowany, zgląd wzdłużny), A – pogrubione  
 wydzieleniami cementytu granice ziaren ferrytu, B – obszary zdenerowanego perlitu, C –  
 wydzielenia (azotków i węglików) wewnątrz ziaren ferrytu, D – perlit o prawidłowej budowie  
 (bez oznak degradacji strukturalnej), E – wtrącenie niemetaliczne

Źródło: Opracowanie własne

## 2.2. Wpływ procesów strukturalnej degradacji na własności mechaniczne

Procesy degradacji strukturalnej przedstawione w poprzednim podpunkcie wydatnie wpływają na podstawowe charakterystyki mechaniczne – tj. twardość, udarność. Ogółem można stwierdzić, na podstawie studiów literaturowych i badań własnych autorów, że w ujęciu ogólnym rozwój i intensyfikacja procesów degradacyjnych powoduje wyraźny wzrost twardości (po normalizowaniu następuje jej spadek) – co następowało we wszystkich badanych gatunkach stali. Przykładem tego mogą być wyniki badań dla Mostu Piaskowego (1861 r. – stal zgrzewna) przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Stal zgrzewna – Most Piaskowy (1861r.) po lewej stronie wyniki pomiarów twardości HV10 dla próbek w stanie poeksploatacyjnym (P) i normalizowanym (N), po prawej stronie typowy wykres rozciągania dla p

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku badań udarności efekt strukturalnych zmian degradacyjnych jest jeszcze bardziej wyraźny i obserwowany w postaci jej spadku w stanie poeksploatacyjnym i wzroście w stanie normalizowanym. Oczywiście fizyczne

Wyjaśnienie tego zachowania jest związane z obecnością licznych wydzielen (zwłaszcza tych na granicach ziaren) kruchej fazy, jaką jest cementyt – co powoduje spadek ciągliwości, a tym samym wzrost kruchości – co sprzyja pękaniu w sposób łupliwy. W związku z czym raptownie spada uduerność w niskich temperaturach. Co więcej, w toku wieloletnich badań stwierdza się, że w znaczącej liczbie przypadków temperatura przejścia plastyczno-kruchej ustala się w zakresie dodatnich temperatur w stanie poeksploatacyjnym. W podobny sposób należy rozumieć wzrost twardości stali w stanie poeksploatacyjnym (rys. 9).

Tabela 1. Wyniki statycznej próby rozciągania dla stali zgrzewnej (Most Piaskowy)

	R <sub>H</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	E [GPa]	Z [%]	A <sub>gt</sub> [%]
MOST PIASKOWY - STAN P	100,3±0,7	263,3±5,8	410±21,1	197±4,9	18,26±2,9	12,87±2,3
MOST PIASKOWY - STAN N	103±2,4	294±20,9	442±18,5	202±10,7	23±0,45	16,7±0,1

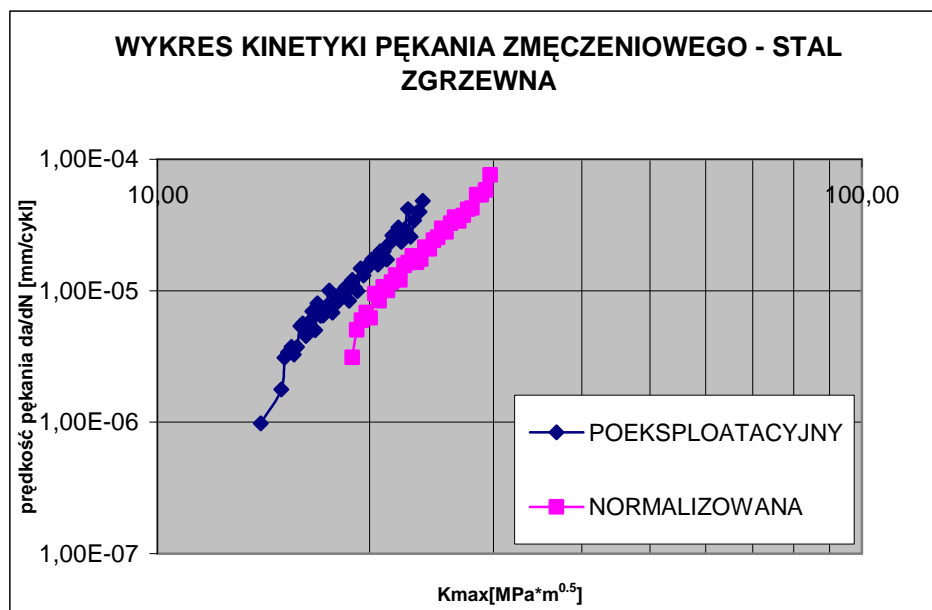
*Źródło: Opracowanie własne*

W statycznej próbie rozciągania często przyjmuje się stosunek  $R_e/R_m$  jako przydatny wskaźnik stopnia wyeksploatowania (zdegradowania strukturalnego). Choć jak pokazują wyniki innych prac (np. [9]) - nie zawsze tak się dzieje. Rozwój procesów degradacyjnych odzwierciedlony jest także przy wydłużeniu (A) i przewężeniu próbki (Z) – co naturalnie jest miarą zmian ciągliwości materiału. W prezentowanych wynikach badań dla mostu Piaskowego w tabeli 1 można zauważyć wyraźny efekt wzrostu obu wspomnianych charakterystyk w stanie normalizowanym. Można wysnuć hipotezę, iż staje się to regułą, ale jak wiadomo z literatury [2], [3], [7] np. stal zgrzewna cechuje się znacznymi rozrzutami wyników statycznej próby rozciągania, co niekiedy zakłóca obserwację tego efektu (patrz praca [10] i wyniki dla stali zgrzewnej z segmentu D) i może prowadzić do odrzucenia wspomnianej hipotezy. Zachowanie się granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie na ogół wykazuje tendencje do uzyskiwania wyższych wartości w stanie poeksploatacyjnym niż normalizowanym, ale niekiedy może się też zdarzyć inaczej (tabela 1, praca [9]).

### 3. BADANIA ROZWOJU SZCZELINY ZMĘCZENIOWEJ W STALI ZGRZEWEJ PO 149 LETNIM OKRESIE EKSPLOATACJI

W obliczu tak przedstawionego w poprzednim punkcie zarysu wpływu procesów degradacyjnych na zachowanie się elementu konstrukcyjnego w warunkach strukturalnej degradacji zasadne wydają się badania cykliczne. W szczególności badania kontrolowanego rozwoju szczeliny zmęczeniowej. Zmęczenie i następnie rozwój szczeliny zmęczeniowej to najniebezpieczniejsza dla tego typu konstrukcji para zagrożeń. Dlatego też wiedza na temat, zarówno kierunków, jak i charakteru rozwoju pęknięcia zmęczeniowego umożliwia albo ocenę stabilności rozwoju istniejących pęknięć, albo pozwala na wyznaczenie czasu pomiędzy kolejnymi inspekcjami czy w końcu pomaga podjąć decyzję o zmniejszeniu nośności mostu – podyktowaną fizykalnymi przesłankami. W niniejszym punkcie zaprezentowane zostaną wyniki badań stali zgrzewnej pochodzącej z Mostu Piaskowego (1861r.) we Wrocławiu.

W trakcie prac badawczych wyznaczono wykresy kinetyki pęknięcia zmęczeniowego uzyskanego w sposób „konwencjonalny” zgodny z normą (np. ASTM E647). Celem badań było wyznaczenie podstawowej charakterystyki pęknięcia zmęczeniowego dla współczynnika asymetrii cyklu  $R=0.1$  (wobec ograniczonej ilości próbek – część z nich pękła w sposób dyskwalifikujący je w rozumieniu postanowień normy ASTM E647) w stanie normalizowanym i poeksploatacyjnym. Najważniejszą częścią tych badań była obserwacja różnic w kinetyce pęknięcia zmęczeniowego. Z uwagi na ograniczoną grubość i możliwości techniczne laboratorium dynamiki Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej PWr. zdecydowano się na próbki zgodne z normą ASTM E647 typu M(T) (Middle Cracked Tension Specimen - nomenklatura jak w ASTM E647  $t=5$  mm,  $W=40$  mm,  $L=4W$ ) mocowane przy pomocy zacisków hydraulicznych w maszynie wytrzymałościowej. Próbki pochodziły ze stalowych elementów pobranych z Mostu Piaskowego. Podstawowe własności wytrzymałościowe stali zgrzewnej z Mostu Piaskowego przedstawiono wcześniej w tabeli 1. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 810, używając metody stałoamplitudowej. Próbkę obciążano przy zachowaniu stałego współczynnika asymetrii cyklu  $R=0.1$  obciążeniem sinusoidalnie zmiennym w zakresie od 1.65-16.5 kN z częstotliwością 10 Hz. Przed właściwym badaniem „zaostrzono” karb mechaniczny zgodnie z normą ASTM E647, zachowując jednocześnie wszelkie rygory ważności badań. Wyniki badań przedstawia rysunek 10.



Rys. 10. Wykresy kinetyki pęknięcia zmęczeniowego dla stali mostowej; stan poeksploatacyjny i normalizowany, współczynnik asymetrii cyklu  $R=0.1$

*Źródło: Opracowanie własne*

Zbiornicze podsumowanie wyników badań przedstawia tabela 2. W tabeli wyszczególniono wielkości związane z trzema obszarami typowego wykresu kinetyki pęknięcia zmęczeniowego (prezentowanego w sposób poglądowy w poprzednim podrozdziale niniejszego raportu). W tabeli zamieszczono również stałe modelu Parisa (1) związane ze stabilnym – prostoliniowym fragmentem wykresu kinetyki pęknięcia zmęczeniowego

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

gdzie:

a – długość szczeliny zmęczeniowej,

$\Delta K$  – zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń,

C, m – stałe modelu (charakterystyczne dla danej grupy stali).

Zbliżone wartości stałych w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym wskazują na podobieństwo w sposobie propagowania szczeliny (niezależnie od struktury).

Tabela 2. Podsumowanie charakterystyk związanych z kinetyką pękania

	STAN POEKSPLOATACYJNY	STAN NORMALIZOWANY
$K_{th}$ [MPa*m <sup>0.5</sup> ]	14	17
$K_{fc}$	24	28
Wykładnik m w prawie Parisa	5,34	5,11
Stała C w prawie Parisa	10 <sup>-11,52</sup>	10 <sup>-11,74</sup>

*Źródło: Opracowanie własne*

Zaobserwowano za to różnice w wielkościach progowych  $K_{th}$  i  $K_{fc}$  – co może mieć związek z obecnością procesów starzeniowych badanej stali. Należy zauważyć, że wykładnik m we wzorze Parisa, bezpośrednio odpowiedzialny za prędkość rozwoju szczeliny zmęczeniowej dla badanej stali (stal niskowęglowa), jest wysoki tzn. znacznie wyższy niż dla współczesnych stali niskowęglowych (tam m=3). Wielkości  $K_{fc}$  są stosunkowo niskie w porównaniu ze współczesnymi niskowęglowymi stalami.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zarys problemów związanych z eksploatacją starych, stalowych konstrukcji z końca XIX i początku XX wieku. Scharakteryzowano (głównie na podstawie prac Czaplińskiego [2], [3]) ówczesne materiały konstrukcyjne. Przedstawiono także procesy degradacji strukturalnej na przykładzie próbek pobranych z wrocławskich mostów tj. Mostu Pomorskiego Środkowego, Mostu Pomorskiego Północnego i Mostu Piaskowego. Wykazano w każdym z tych przypadków obecność zmian degradacyjnych na poziomie mikrostruktury. Taki stan rzeczy nie jest obojętny dla podstawowych charakterystyk wytrzymałościowych. Obniżenie ciągliwości stali, wzrost twardości sprzyja kruchemu pękaniu. Na tym tle mechanika pękania okazuje się narzędziem nie do przecenienia. W pracy przedstawiono wyniki badań rozwoju szczeliny zmęczeniowej w stali zgrzewnej pochodzącej z Mostu Piaskowego po przeszło 149-letnim okresie eksploatacji. Uzyskane wyniki w stanie poeksploatacyjnym są porównywalne z podobnymi uzyskanymi przez niezależne zespoły badawcze w pracach [1], [6]. Tym, co odróżnia wyniki badań autorów od wspomnianych na łamach niniejszej pracy artykułów jest prowadzenie badań w dwóch stanach; poeksploatacyjnym i normalizowanym. Obserwowane różnice w kinetyce pękania zmęczeniowego (rysunek 10) w obszarze I i III (zakres progowy  $K_{th}$  i  $K_{fc}$ ) mogą wynikać z rozwoju procesów degradacyjnych. Jednakże z uwagi na małą liczbę próbek

użytych do badań weryfikacja statystyczna nie jest miarodajna. Dlatego też przy wysuwaniu hipotezy, że takie zmiany kinetyki są regułą, należy być ostrożnym. Natomiast w zakresie prostoliniowym uwagę zwraca stosunkowo duża wartość wykładnika  $m$  w prawie Parisa, zaś brak różnic w kinetyce pęknięcia zmęczeniowego w tym obszarze może wskazywać na niewrażliwość sposobu propagacji szczeliny w tym zakresie od struktury – co wydaje się poparte faktami eksperymentalnymi znanymi w mechanice pęknięcia. Niezależnie od uzyskanych wyników (tutaj uwadze dotyczącej różnicy w kinetyce pęknięcia zmęczeniowego) mechanika pęknięcia pozwala w sposób racjonalny zaplanować ewentualne okresy inspekcji pęknięć w konstrukcji.

*Artykuł powstał dzięki badaniom realizowanym w ramach stypendium współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego.*

## LITERATURA

- [1]Cremona C., A. Patron, B. Johansson, T. Larsson, B. Eichler, S. Höhler, B. Kühn, *Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges*, Research Project “Sustainable Bridges - Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives” funded by the European Commission within 6th Framework Programme, 2007.
- [2]Bodarski Z., Czaplinski K., Materiały konferencyjne: *Naprawy i wzmocnienia konstrukcji metalowych, lekkiej obudowy i posadzek przemysłowych* – „Dawne konstrukcyjne tworzywa żelazne w świetle rozwoju historycznego”, Ustroń 2000.
- [3]Czaplinski K., *Dawne wyroby ze stopów żelaza*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009.
- [4]Dudek D., Oziemski S., Sobczykiewicz W., *Elementy teorii degradacji maszyn*, [w:] „Problemy Maszyn Roboczych” 4/1994, Warszawa 1994.
- [5]Dudziński W., Haimann K., *Ocena stopnia degradacji materiałów stosowanych w maszynach górnictwa odkrywkowego z zastosowaniem metod mikroskopii elektronowej*, III konferencja naukowa „Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn”, Wrocław – Szklarska Poręba 1997.
- [6]Helmrich R., *Alte Stähle und Stahlkonstruktionen Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin 2005.
- [7]Madaj A., Wołowicki W., *Budowa i utrzymanie mostów*, WKŁ, Warszawa 2007.
- [8]Pękalski G., *Material aspects of the degradation theory - conception of a multi-criterion system of estimation of the state of material*, Systems (Wrocław), 1998, vol. 3, nr 2, Wrocław 1998.
- [9]Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport serii SPR nr 14/99, Wrocław 1999.

- [10] Rabiega J., Pękalski G., *Badania materiałowe mostów Pomorskich: Południowego, Środkowego i Północnego na rzece Odrze we Wrocławiu*, Raport serii SPR 9/2007, Wrocław 2007.
- [11] Staub F. i inni, *Metaloznawstwo*, Wydawnictwo “Śląsk”, Katowice 1979.
- [12][online]. [dostęp: 2009]. Dostępny w Internecie: [www.transportation.org](http://www.transportation.org)., AASHTO Bridging the Gap final report, USA, 2008.

## MICROSTRUCTURAL DEGRADATION PROCESSES IN ELEMENTS OF BRIDGES ERECTED AT THE TURN OF THE 19<sup>TH</sup> AND 20<sup>TH</sup> CENTURIES

### Summary

*Structural degradation processes are taken into account in old steels. It is particularly visible in the steels manufactured at the turn of 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries. Structural degradation processes consist of the decomposition of pearlite or bainite areas into carbides and ferrite. Also, separation processes (carbides and nitrides) are taken into account. These structural changes strongly influence the rudimentary mechanical properties, i.e. an increase in material hardness and strength, and a decrease in ductility, impact resistance and crack resistance. These processes are more intense in puddled steels (produced until the end of 19<sup>th</sup> century) rather than in cast steels. In the paper, the authors present the study of a cyclic behaviour of old puddled steel taken from the oldest bridge in Wrocław: the Piaskowy Bridge (erected in 1861). With the ASTM E64 the measurement stand and an experimental procedure were set up. The M(T) specimens were tested on the testing machine MTS 810 with the force controlling method. The tests were performed for 10 Hz frequency and the sinusoidal force signal. The specimens were tested in two states: the post operational state and the normalised one.*

### ACKNOWLEDGEMENTS

*This work has been conducted with the scholarship co-financed by the European Union within the European Social Fund.*

**Key words:** *steel bridges, cast steel, steel structure degradation, fatigue fractures, fracture mechanics*

*Artykuł recenzował: dr hab. inż. Stanisław PIESIĄK, prof. nadzw. PO*