

Grzegorz LESIUK¹
Mieczysław SZATA²

WPŁYW PROCESÓW DEGRADACJI MIKROSTRUKTUR NA UDARNOŚĆ STALI MOSTOWYCH Z PRZEŁOMU XIX i XX W.

Stalowe konstrukcje mostowe pochodzące z XIX i XX wieku były wznoszone najczęściej ze stali zgrzewnej (ok. do końca XIXw.) oraz ze zlewnej (XXw.) Stale te na skutek długotrwałej eksploatacji wykazują skłonności do procesów degradacyjnych mikrostruktur (zgrzewne w większym stopniu niż zlewne). Obiektem badań autorów były fragmenty konstrukcji stalowych Mostów Pomorskich we Wrocławiu. W pracy przedstawiono wyniki badań udarnościoowych stali zgrzewnej i zlewnej pochodzącej z elementów konstrukcyjnych Mostu Pomorskiego Środkowego (1885r.) i Północnego (1930r.). Wykazano, że obecność procesów degradacyjnych (polegających m.in. na licznych wydzieleniach azotków i węglików) mikrostruktur w sposób znaczący obniża udarność tych stali.

THE INFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURAL DEGRADING PROCESSES ON TO IMPACT RESISTANCE OF OLD BRIDGE STEEL MANUFACTURED AT THE TURN ON 19th AND 20th CENTURY

The most popular metallic material for bridge steel construction at the turn on 19th and 20th century was the puddled (the second half of 19th century) or cast steel (early 20th century). As a result of long-term operation, mentioned types of steel show a tendency to degradation processes at the microstructure level (the puddled steel more than cast one). The object of investigation were fragments of steel construction from Pomorskie Bridges i.e. Pomorski Środkowy (1885 year) and Pomorski Północny (1930 year). Two types of steel were tested; the puddled (from Pomorski Środkowy) and the cast (from Pomorski Północny). In this paper, the impact resistance test results have been presented. It has been shown that, the Microstructural degrading processes have significantly decreased the impact resistance of the tested steel.

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Tel. +48 71 320 28 99, e-mail: grzegorz.lesiuk@pwr.wroc.pl

² Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Tel. +48 71 320 31 38, e-mail: mieczyslaw.szata@pwr.wroc.pl

1. WSTĘP

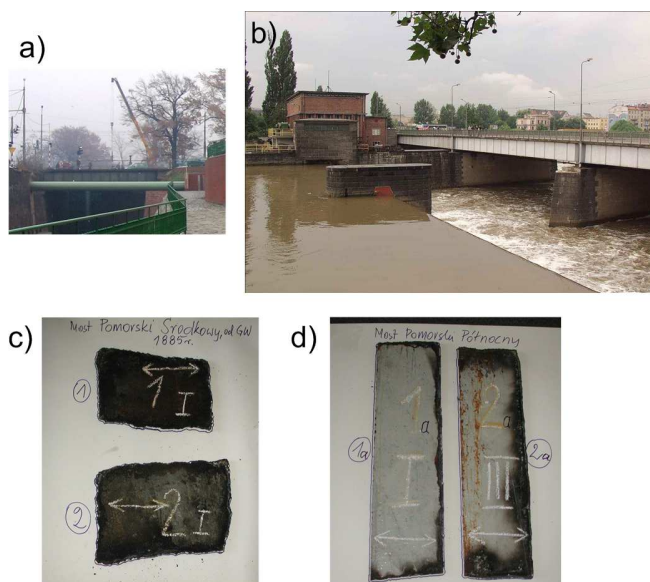
Upowszechnianie się metalicznych materiałów konstrukcyjnych w XIX i XX wieku sprawiło, że we Wrocławiu po dziś dzień znajduje się znacząca ilość zabytkowych, stalowych konstrukcji. Do najbardziej znanych należą: Most Piaskowy (1861), Most Sikorskiego (1875), Most Mieszkański Stary (1876), Mosty Młyńskie (1885), Most Tumski (1888-1889), Most Zwierzyniecki (1895-1897), Most Grunwaldzki (1908-1910), Mosty Trzebnickie (1915-1916, 1904-1905) oraz Mosty Pomorskie (1885, 1930). Materiałem użytym do budowy tych konstrukcji była najczęściej stal zgrzewna lub zlewna. Szacunkowo można przyjąć, że w drugiej połowie XIX wieku dominującym materiałem konstrukcyjnym mostów była stal zgrzewna. Rozwój metalurgii i sposobów świeżenia surówki w piecach konwertorowych sprawił, że z początkiem XX wieku upowszechniła się produkcja stali zlewnej. Potwierdzeniem tego założenia może być cytata z pracy Czaplińskiego [1] str. 35: „W roku 1900 na terenie ówczesnej monarchii Austrowęgierskiej 83% całej produkcji obejmowało stal zlewną, a 10 lat później, aż 95%”.

Ten rodzaj niskowęglowych stali wykazuje skłonności do procesów degradacyjnych na poziomie mikrostruktury. Zjawiska degradacji mikrostruktur w tych stalach polegają (w dużym uogólnieniu) m.in. na: degeneracji obszarów perlitu, obecności wydzieleni węglików i azotków wewnątrz ziaren oraz licznych wydzieleniach cementytu na granicach ziaren. Procesy te zostały już opisane m.in. w pracach [1,3,4,5,6,7]. Wspomniane zjawiska degradacyjne mikrostruktur bardziej uwidaczniają się w stalach zgrzewnych niż zlewnych. Szacuje się, że w Polsce w latach 70. było jeszcze eksploatowanych przeszło 10% mostów ze stali zgrzewnej [1]. Dlatego też istotnym z punktu widzenia użytkowego jest oszacowanie wytrzymałości takiego zabytkowego materiału konstrukcyjnego. Te niekorzystne zmiany na poziomie mikrostruktury istotnie wpływają na mechaniczne własności tych stali. Uniemożliwia to tym samym przyjęcie do symulacji komputerowych z wykorzystaniem MES/MEB danych literaturowych [1,4] dotyczących charakterystyk wytrzymałościowych tych stali jako punktu odniesienia. Istotnym badaniem w przypadku konstrukcji stalowych jest badanie udarności i ustalenie temperatury przejścia plastyczno-kruchości. Wpływ procesów degradacyjnych najsilniej odzwierciedlają wyniki badań udarnościowych. Dlatego też w niniejszej pracy skoncentrowano się na tym rodzaju badań stalowych fragmentów konstrukcji pochodzących z Mostów Pomorskich we Wrocławiu.

2. WYNIKI BADAŃ MOSTU POMORSKIEGO ŚRODKOWEGO (1885) i PÓŁNOCNEGO (1930) WE WROCŁAWIU

Obiektem zainteresowań autorów była stalowa konstrukcja zabytkowych Mostów Pomorskich we Wrocławiu. Najstarszym z nich jest Most Pomorski Środkowy (1885r.) – z którego pobrano materiał w postaci arkusza blachy wykonanego ze stali zgrzewnej. Z Mostu Pomorskiego Północnego (1930r.) pobrano fragmenty konstrukcji w postaci arkusza blachy – w tym przypadku materiałem była stal zlewna. Próbkę do badań zostały pobrane z dźwigarów głównych. Obserwacje makroskopowe dostarczonych do badań blach pobranych z dźwigarów głównych konstrukcji stalowej mostu Pomorskiego (rys. 1) nie wykazywały by stan skorodowania blach był zaawansowania w sposób zagrażający np. perforacją blach. Makroskopowo korozja miała charakter zbliżony do równomiernej. Fragmenty konstrukcji Mostu Pomorskiego Środkowego (rys. 1c) pokryte były grubszą niż

w przypadku pokazanych na rys. 1d warstwą produktów korozji o budowie wielofazowej i słabo związanych z powierzchnią blachy. Po ich usunięciu nie stwierdzono na obserwowanej powierzchni obecności głębokich wżerów korozyjnych.



Rys. 1. a) Most Pomorski Środkowy, b) Most Pomorski Północny, c) Arkusze blach pobrane do badań z Mostu Pomorskiego Środkowego, d) Arkusze blach pobrane do badań z Mostu Pomorskiego Północnego.

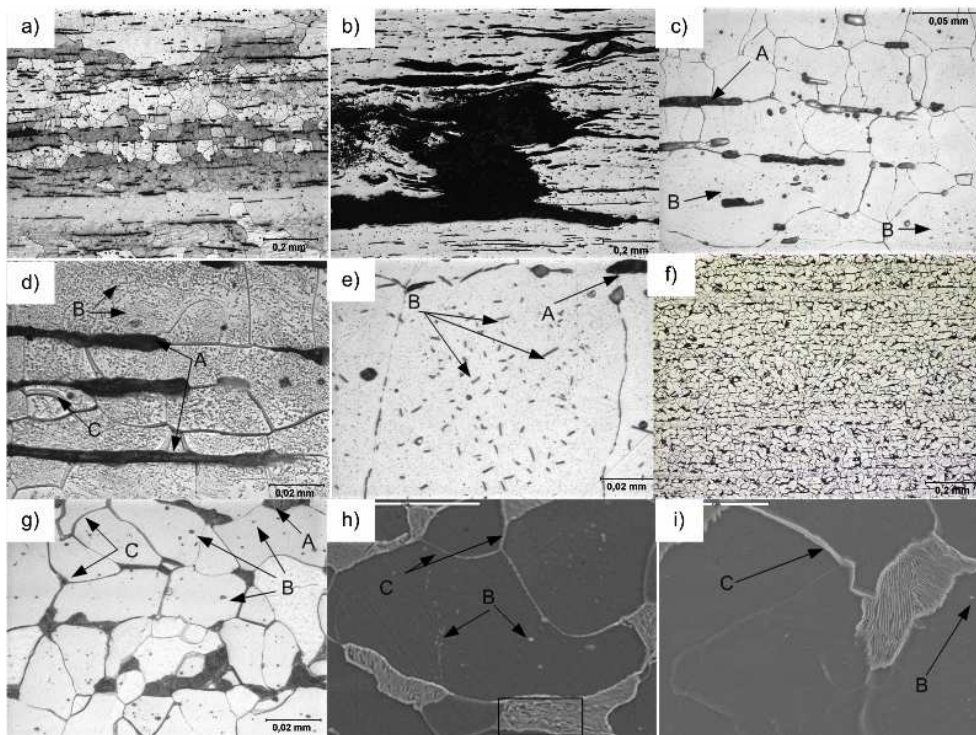
2.1 Analiza składu chemicznego i obserwacje metalograficzne

W tabeli 1 zestawiono wyniki analiz chemicznych wszystkich materiałów blach pokazanych na rys. 1.

Tabela 1. Wyniki analiz chemicznych

Lp	Segment mostu	Ozn. Blachy	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni
1	Pierwszy	1-I	0,020	0,05	0,03	0,240	0,048	0,03	0,02
2	Pierwszy	2-I	0,020	0,05	0,03	0,350	0,051	0,03	0,02
5	Trzeci	1a-I	0,170	0,52	0,03	0,05	0,050	0,03	0,03
6	Trzeci	2a-III	0,170	0,45	0,03	0,035	0,072	0,05	0,05
7	Stal zgrzewna	-----	0,018 ÷ 0,35	Max 0,33	max 0,33	max 0,47	max 0,056	-----	-----
8	Stal zlewna	-----	0,03 ÷ 0,35	0,32 ÷ 0,56	0,02 ÷ 0,75	0,02 ÷ 0,16	0,004 ÷ 0,17	-----	-----

Wyniki analiz chemicznych wskazują (zawartość węgla 0,02÷0,17% i zawartość Si~0,03%), że badane stale mogą wykazywać skłonności do strukturalnych procesów degradacyjnych. Będzie to widoczne w dalszej części pracy na zdjęciach mikrostruktur tych stali (rys. 2). Próbki do badań metalograficznych pobrano z wszystkich dostarczonych do badań blach. Zarówno badania mechaniczne jak i obserwacje mikrostruktur prowadzone były w dwóch stanach próbek; w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym. Zabieg normalizowania polega na wytrzymywaniu materiału do badań w piecu (w atmosferze węgla) w temperaturze 950°C przez 2 godziny i studzeniu na spokojnym powietrzu. Wyżarzanie normalizujące ma za zadanie odtworzyć strukturę wyjściową. Jeśli procesy degradacyjne nie są zbyt zaawansowane to ich produkty w postaci wydzieleniowej ulegają rozpuszczeniu pod wpływem normalizowania. W ten sposób można obserwować kinetykę rozwoju i stopień zaawansowania procesów degradacyjnych na poziomie mikrostruktur. Normalizowanie jako punkt odniesienia zostało zaproponowane przez zespół badawczy związanych z *Teorią Degradacji* [2] i jej materiałowymi aspektami [5,6].



Rys. 2. a-e) Zdjęcia mikrostruktury fragmentów konstrukcji stalowej Mostu Pomorskiego Środkowego (1885r.), f-i) Zdjęcia mikrostruktury fragmentów konstrukcji stalowej Mostu Pomorskiego Północnego (1885r.), źródło: wyniki badań własnych oraz na podstawie [7].

Obserwacje mikroskopowe metodami mikroskopii świetlnej wykazały, że badane gatunki stali mają budowę ferrytyczną z niewielkimi obszarami perlitu (rys. 2. a i f).

Struktura badanej stali zgrzewnej cechuje się znaczną ilością wtrąceń niemetalicznych (rys. 2a.) Na rys. 2b. pokazano w powiększeniu obszar z rys. 2a. o ekstremalnym nasileniu wtrąceń niemetalicznych. Ziarna ferrytu wykazują charakterystyczne dla stali zgrzewnych i zlewnych zróżnicowanie rozmiarów, a w warstwach przypowierzchniowych nawet zbliźniczenie. Na mikrofotografiach z rysunku 2 ujawniono – w przypadku stali zgrzewnej – postępujące zaawansowanie procesów degradacyjnych mikrostruktur. Szczególnie widoczne są one na mikrofotografii z rys. 2d, gdzie strzałkami B pokazano liczne wydzielienia (głównie azotków i węglików) wewnątrz ziaren. Na granicach ziaren zauważa się także (C) wydzielienia Fe_3C_{III} . Zaawansowanie procesów degradacji strukturalnej było tak duże, że nawet wyżarzanie normalizujące nie było w stanie usunąć skutków tego strukturalnie destrukcyjnego procesu.

Fragmety konstrukcji stalowej Mostu Pomorskiego Północnego nie wykazały istotnego zaawansowania procesów degradacyjnych. W nieznacznym stopniu są one przedstawione są na rys. 2 g, h, i gdzie symbolem A oznaczono wtrącenia niemetaliczne, B – wydzielienia węglików i azotków wewnątrz ziaren, C – wydzielienia cementytu trzeciorzędowego na granicach ziaren. W bardzo nieznacznym stopniu można było zauważyć degenerację obszarów perlitu – rys.2h, obszar ten zaznaczono ramką. Istotna w tym przypadku jest także relatywnie mała ilość wtrąceń niemetalicznych w porównaniu ze stalą zgrzewną (por. rys. 1a i 1f).

2.2 Wyniki badań uzyskane ze statycznej próby rozciągania

Staticzną próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS810 na próbkach okrągłych, polerowanych – zgodnych z normą PN-EN 10002-1:2001 w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym o wymiarach: długość całkowita $L_c=100$ mm, długość pomiarowa $L_0=25$ mm, średnica części pomiarowej $d_0=8$ mm. W tabeli 2 zamieszczono wyniki zbiorcze statycznej próby rozciągania.

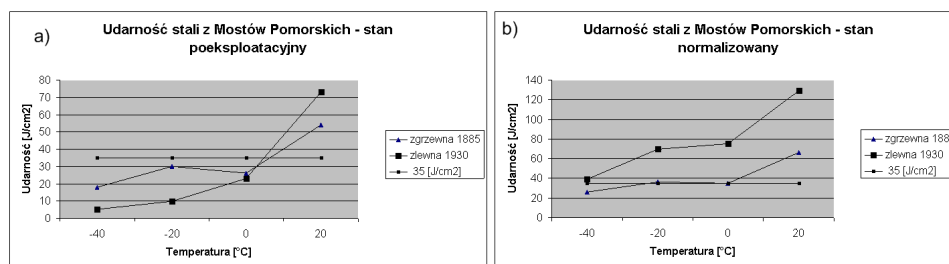
Tabela 2. Wyniki statycznej próby rozciągania

Lp.	Miejsce pobrania próbek	$R_{m\bar{s}r}$ [MPa]	$R_{e\bar{s}r}$ [MPa]	$A_{\bar{s}r}$ [%]	$Z_{\bar{s}r}$ [%]
1	Segment pierwszy stan dostarczenia - 1885	361	239	18,9	17,7
2	Segment pierwszy stan normalizowany - 1885	364	250	17,0	20,0
3	Segment trzeci stan dostarczenia - 1930	417	258	36,9	60,7
4	Segment trzeci stan normalizowany - 1930	433	281	35,5	64,7
5	Stal zgrzewna	280	145	2,3	X
		460	340	29	
6	Niskowęglowa stal zlewna	370	180	X	X
		450	240		

Całość wyników prób przeprowadzonych w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji – Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej zawarto w odrębnym sprawozdaniu [7]. Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych potwierdzają wyniki analiz chemicznych i badań mikroskopowych w kontekście klasyfikacji gatunku stali. Wskaźniki wytrzymałościowe stali, z której wykonano segment pierwszy (1885) mostu mieszczą się (określane w bardzo szerokim zakresie) w przedziałach własności podawanych dla stali zgrzewnych. Nie mieszczą się natomiast (R_m i R_e) wśród przedziałów cech wytrzymałościowych podawanych dla niskowęglowych stali zlewnych. Materiał segmentu trzeciego spełnia wymagania stawiane niskowęglowym stalom zlewным zarówno w zakresie składów chemicznych (tabela 1) jak i cech wytrzymałościowych (tabela 2).

2.3 Badanie udarności i analiza fraktograficzna

Badanie udarności jest ważnym elementem procedury badawczej starych stalowych konstrukcji. W przypadku zjawisk degradacyjnych procesy wydzieleniowe powodują wzrost kruchości i obniżenie plastyczności materiałów. Próby udarnościowe przeprowadzono przy użyciu młota Charpy'ego z wymaganiami normy PN-EN 10045-1. Próby wykonywano na próbkach z karbem „V” o wymiarach 10x10x55 mm w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym. W celu wyznaczenia krzywej przejścia plastyczno – kruchogo pracę łamania określono w temperaturach: -40°C , -20°C , 0°C , $+20^{\circ}\text{C}$. Wyniki badań zaprezentowano na rys. 3.

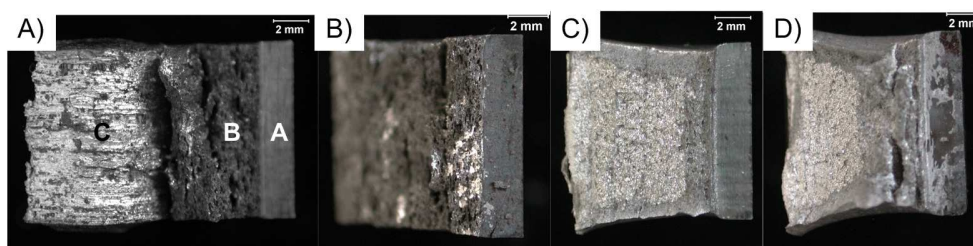


Rys. 3. Wyniki badań udarności stali zgrzewnej i zlewnej z Mostów Pomorskich a) w stanie poeksploatacyjnym, b) w stanie normalizowanym, źródło: opracowanie własne na podstawie [7].

Na rys. 3. poziomą linią oznaczono wartość graniczną - $35\text{J}/\text{cm}^2$ - udarności poniżej, której współczesne stale konstrukcyjne nie zostają dopuszczone do eksploatacji. W obu analizowanych przypadkach normalizowanie wyraźnie (i statystycznie istotnie) spowodowało wzrost udarności. Stal zgrzewna i zlewna w temperaturze otoczenia ma udarność przekraczającą poziom $35\text{J}/\text{cm}^2$ natomiast od temperatury 0°C poziomy udarności są od tej granicy niższe. Badana stal zgrzewna z 1885r. wykazuje bardzo zaawansowany stopień degradacji struktury i bardzo dużą ilość wtrąceń niemetalicznych i nieciągłości. Jednak to właśnie w przypadku stali zlewnej z 1930 roku wzrost udarności wydaje się być większy niż dla stali zgrzewnej. Spowodowane jest to z pewnością

obecnością procesów degradacyjnych. Jak to pokazywały mikrofotografie z rys. 2., należało spodziewać się większego wzrostu udarności po stronie stali zgrzewnej z uwagi na znaczący stopień zaawansowania zjawisk degradacyjnych na poziomie mikrostruktur. Tę pozorną nieściśłość należy rozważyć w kontekście budowy obu gatunków stali – w stali zgrzewnej głównym czynnikiem zmniejszającym udarność jest obecność licznych wtrąceń niemetalicznych i rozwarstwień struktury. Wzrost udarności spowodowany jest tylko częściową likwidacją zmian degradacyjnych (patrz rys. 2e), podczas gdy w stali zlewnej nastąpiło niemal całkowite usunięcie zmian degradacyjnych – co pokazuje rys. 2i.

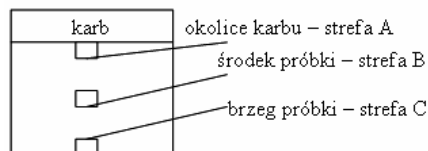
Zróźnicowanie budowy fraktograficznej próbek po badaniach udarności w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ pokazano na rys. 4.



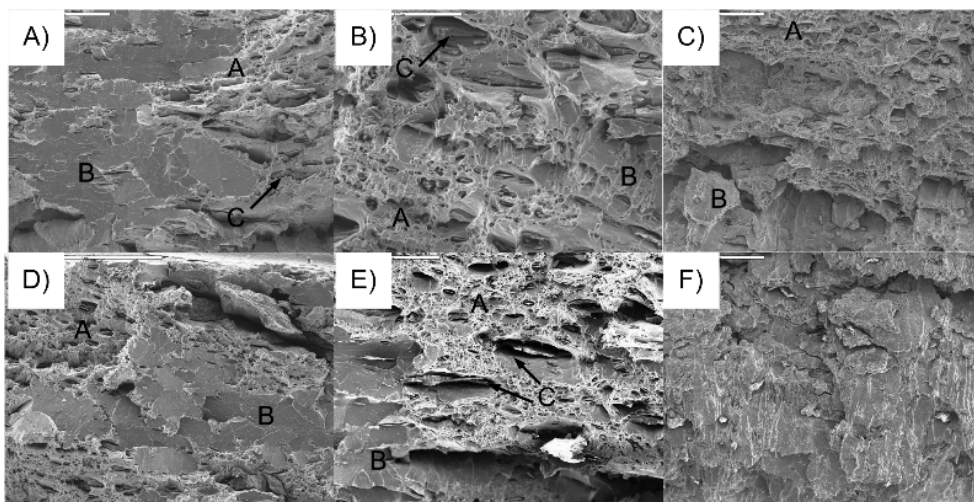
Rys. 4. Przełomy po próbach udarnościowych w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$, a) stan poeksploacyjny – stal zgrzewna, A – obszar karbu, B – obszar strefy dynamicznej propagacji frontu pęknięcia, C – część przełomu z widocznymi odkształceniami plastycznymi, b) stan normalizowany – stal zgrzewna, d) stan poeksploacyjny – stal zlewna, d) stan normalizowany – stal zlewna.

Topografia przełomów stali zgrzewnej (zarówno w stanie poeksploacyjnym jak i normalizowanym) była kształtowana przez liczne wtrącenia niemetaliczne i nieciągłości budowy stali, co dobrze ilustruje obszar B na rys. 4a oraz przełom z rys. 4b.

Analiza fraktograficzna w dalszej części niniejszej pracy zostanie przeprowadzona przy użyciu metod mikroskopii skaningowej. Dla wszystkich próbek badania przeprowadzono dla przełomów uzyskanych w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ i -40°C . Ponadto dla segmentu pierwszego przeprowadzono badania przełomów uzyskanych w stanie poeksploacyjnym jak i normalizowanym. Zaś dla segmentu trzeciego tylko w stanie poeksploacyjnym. Uzasadnienie takiego toku postępowania wynika z faktu zróżnicowanego zaawansowania procesów degradacyjnych w przypadku stali zgrzewnej z 1885 roku i zlewnej z 1930 roku. Pod względem badawczym interesujące są charakterystyczne miejsca przełomów. Do takich miejsc należy zaliczyć; okolice karbu, środek próbki oraz brzeg. Miejsca obserwacji próbek przedstawia schematyczna ilustracja przedstawiająca model przełomu na rys. 5.

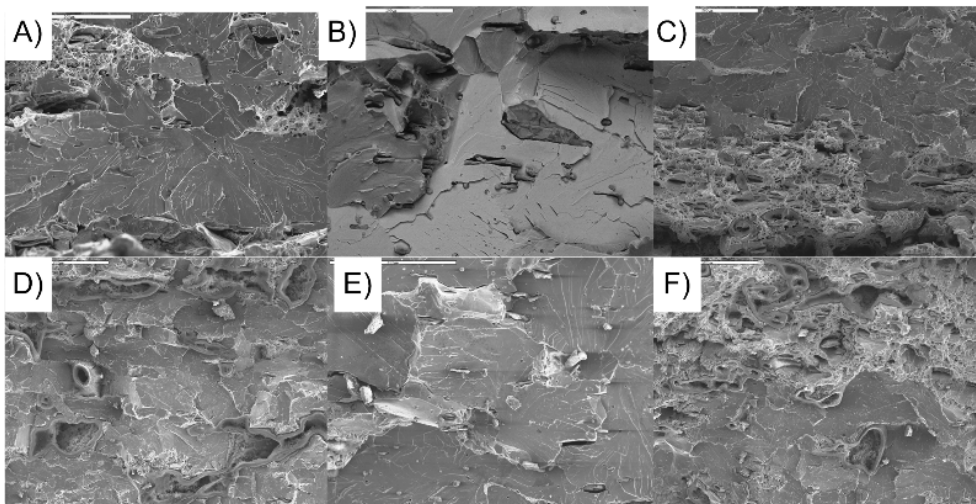


Rys.5. Oznaczenia stref skanowania próbek udarnościowych

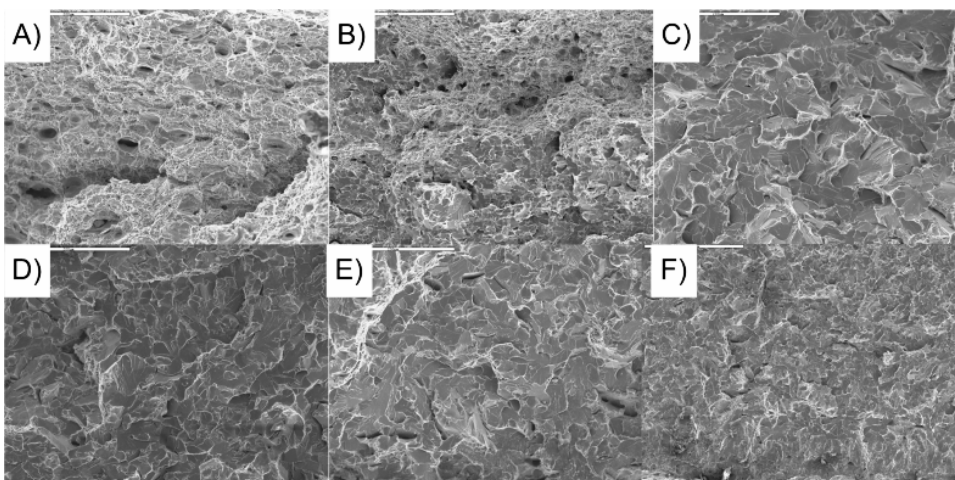


Rys. 6. Mikrofotografie przełomów (SEM) próbek udarnościowych stali zgrzewnej w temp. $+20^{\circ}\text{C}$, a) strefa A – stan poeksploatacyjny – pow. 80x, b) strefa B – stan poeksploatacyjny – pow. 250x, c) strefa C – stan poeksploatacyjny – pow. 80x, d) strefa A – stan normalizowany – pow. 60x, e) strefa B – stan normalizowany – pow. 80x, f) strefa C – stan normalizowany – pow. 80x.

Na mikrofotografiach SEM stali zgrzewnej (rys. 6) w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym w okolicach karbu (strefa A) w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ udział przełomu kruchego (B) i plastycznego (A) jest podobny (co dobrze koresponduje z wynikami badań udarności). W części środkowej (strefa B) i brzegowej (strefa C) daje się zauważyć w obu stanach ten sam rodzaj przełomów. Na mikrofotografiach uwidoczniono również wtrącenia niemetaliczne zaznaczone strzałką i symbolem C na rys. 6a i 6e. Obserwacje fraktograficzne próbek (stal zgrzewna) z temp. -40°C i $+20^{\circ}\text{C}$ wykazują istotną zmianę typu budowy przełomu. Dobrze widać to zwłaszcza w strefie A (porównaj rys. 6a i rys. 6d) podobnie jak w strefie C (porównaj rys. 6c i rys. 6f).



Rys. 7. Mikrofotografie przelomów (SEM) próbek udarnościowych stali zgrzewnej w temp. -40°C, a) strefa A – stan poeksploacyjny – pow. 250x, b) strefa B – stan poeksploacyjny – pow. 500x, c) strefa C – stan poeksploacyjny – pow. 80x, d) strefa A – stan normalizowany – pow. 80x, e) strefa B – stan normalizowany – pow. 250x, f) strefa C – stan normalizowany – pow. 80x.



Rys. 8. Mikrofotografie przelomów (SEM) próbek udarnościowych stali zlewnej; a) strefa A – stan poeksploacyjny – pow.250x – temp. badania +20°C, b) strefa B – stan poeksploacyjny – pow.250x - temp. badania +20°C, c) strefa C – stan poeksploacyjny – pow. 100x - temp. badania +20°C, d) strefa A – stan poeksploacyjny – pow.250x - temp. badania -40°C, e) strefa B – stan poeksploacyjny – pow. 250x - temp. badania -40°C, f) strefa C – stan poeksploacyjny – pow. 80x - temp. badania -40°C.

Na mikrofotografiach przelomów stali zlewnej po próbach udarnościowych dostrzega się istotną różnicę w budowie przelomów z okolic strefy A oraz w strefie C w temp. +20°C i -40°C. Warty uwagi jest fakt, iż w temp. -40°C przelom na całym przekroju jest kruchy.

3. WNIOSKI

Obecność mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych w stali zgrzewnej z 1885 roku pochodzącej z Mostu Pomorskiego Środkowego we Wrocławiu oraz ich znaczny stopień zaawansowania rys. 2 c,d,e powodują, że materiał konstrukcyjny tego mostu można uznać za całkowicie zdegradowany. Pasmowość struktury, liczne, rozległe i odkształcone plastycznie w kierunku walcowania wtrącenia niemetaliczne (rys. 2 a i b) potęgują efekt kruchości tej stali, co doskonale odzwierciedlają wyniki badań udarności – prezentowane na rys. 3 – odbiegające w szerokim zakresie temperatur od przyjętej normy 35J/cm². Obserwacje fraktograficzne próbek z tej stali w temp. -40°C i +20°C wykazują istotną zmianę typu budowy przelomu, co może być szczególnie groźne w kontekście eksploatacji obiektu w okresie zimowym. W przypadku elementów pochodzących z Mostu Pomorskiego Północnego można wnioskować, że stal ta, wykazując niewielką ilość (o małym stopniu nasilenia) procesów degradacji mikrostruktur po blisko 80 letnim okresie eksploatacji nie powinna wykazywać większych skłonności do strukturalnych procesów degradacyjnych.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Czapliński K., *Dawne wyroby ze stopów żelaza*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009
- [2] Dudek D., Oziemiński S., Sobczykiewicz W., *Elementy teorii degradacji maszyn*, „Problemy Maszyn Roboczych” Nr 4, Warszawa 1994
- [3] Lesiuk G., Szata M., *Degradacja mikrostruktur elementów konstrukcyjnych pochodzących z mostów wzniesionych na przelomie XIX i XX w.*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych we Wrocławiu, Wrocław 2010
- [4] Madaj A., Wołkowiecki W., *Budowa i utrzymanie mostów*, WKiŁ, Warszawa 2009
- [5] Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport serii SPR nr 14/99, Wrocław 1999
- [6] 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
- [7] Rabiega J., Pękalski G., *Badania materiałowe mostów Pomorskich: Południowego, Środkowego i Północnego na rzece Odrze we Wrocławiu*, Raport serii SPR 9/2007, Wrocław 2007
- [8] Szata M., Lesiuk G., Pękalski G., *Assessment of degrading processes progress in the old bridge steel in terms of fracture mechanics – part one – the investigation of possibilities*, Logistyka nr 6/2010.