

LESIUK Grzegorz, SZATA Mieczysław, RABIEGA Józef

OCENA ZMIAN MIKROSTRUKTURALNYCH I BADANIA FRAKTOGRAFICZNE FRAGMENTÓW KONSTRUKCJI STALOWEJ PRZEPUSTU KOLEJOWEGO PO BLISKO 100- LETNIM OKRESIE EKSPLOATACYJNYM

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych i obserwacji metalograficznych stalowych elementów konstrukcyjnych pochodzących z remontowanego przepustu kolejowego (1909r.). Materiał do badań pozyskano w trakcie przebudowy obiektu. Uzyskane rezultaty badań wytrzymałościowych (statyczna próba rozciągania, udarność) oraz obserwacji metalograficznych (mikroskopia świetlna, skaningowa mikroskopia elektronowa) potwierdzają fakt przynależności analizowanego materiału do grupy zabytkowych stali zgrzewnych. Wykazano, że przeszło 100-letni okres eksploatacyjny spowodował istotne zmiany mikrostrukturalne, które negatywnie rzutują na właściwości wytrzymałościowe dostarczonych do badań elementów konstrukcyjnych.

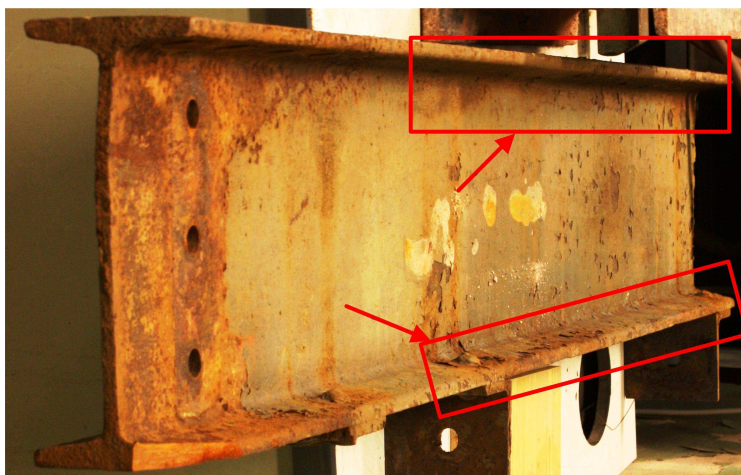
WSTĘP

Zagadnienie bezpieczeństwa zabytkowych przepraw mostowych oraz konstrukcji budowlanych wzniesionych na przełomie XIX i XX wieku staje się obecnie jednym z istotnych kierunków badań wielu programów badawczych współfinansowanych przez Unię Europejską, czego wyrazem może być np. praca [3]. W pracy tej zawarto podstawowe uwagi i zalecenia dotyczące eksploatacji obiektów wzniesionych ze stali zgrzewnej oraz zlewnej. Te zabytkowe, niskowęglowe gatunki stali wykazują tendencję do mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych, które negatywnie wpływają na właściwości wytrzymałościowe powodując m.in. kruchość tych stali. W pracy [5] autorzy przeprowadzili kompleksową analizę 164 awarii i katastrof mających miejsce na przestrzeni ostatniego stulecia na świecie. Wskazano na dominujący udział katastrof obiektów wzniesionych na przełomie XIX i XX wieku (blisko 50%). Ponadto w wielu pracach podnosi się wagę problemu oceny bezpieczeństwa tego typu konstrukcji. Jako dowód można przytoczyć tu zdanie z pracy Bienia [2, s. 97-114]: *"Należy jednak przewidywać, że w nieodległej przyszłości to zagadnienia związane ze starzejącymi się obiektami mostowymi staną się w naszym kraju jednym z głównych problemów infrastruktury transportowej. Będzie to także problem wspólnej europejskiej sieci komunikacyjnej, gdyż infrastruktura transportowa naszego kraju to 7.7% sieci drogowej oraz 9.2% sieci kolejowej Unii Europejskiej"* [2, s. 97-114]. Przytoczone zdanie w pełni uzasadnia narastającą potrzebę wypracowania standardów i procedur badawczych zmierzających do oszacowania stopnia wyeksploatowania tych zabytkowych stali.

1. BADANIA MATERIAŁOWE

Do badań dostarczono fragmenty dwuteownika I320, przedstawionego na rys 1. Belki pobrano z kolejowego przepustu otwartego znajdującego się na 38,689 km linii nr 283 Jelenia Góra - Żagań, szlak Lwówek Śląski - Niwnice. Materiał do badań pozyskano w trakcie remontu obiektu podczas wymiany belek na nowe. Długość eksploatacyjna obiektu wynosi 2.4 m. Rozpiętość pionowa (światło pionowe) ma wymiar 0.75 m, natomiast rozpiętość pozioma (światło poziome) wynosi 1.5m. Przepust wybudowany został w 1909 roku. Materiałem konstrukcyjnym była stal zgrzewna. Z punktu widzenia poznawczego badania tego typu obiektów mają znaczące walory praktyczne z uwagi na fakt, że większość zabytkowych wrocławskich mostów zostało wzniesionych ze stali zgrzewnych, co udokumentowano w pracy [9].

Pobrane do badań elementy konstrukcyjne nie wykazywały znaczących ubytków materiałowych powstałych na skutek korozji. Zidentyfikowano liczne pęknięcia zmęczeniowe, zlokalizowane w okolicach łączenia blach węzłowych za pomocą nitowania. Miejsca pobrania próbek zaznaczono na rys. 1 ramką [6, s.106].



Rys.1. Materiał dostarczony do badań, ramką zaznaczono miejsca pobrania próbek, Źródło: [6, s. 107]

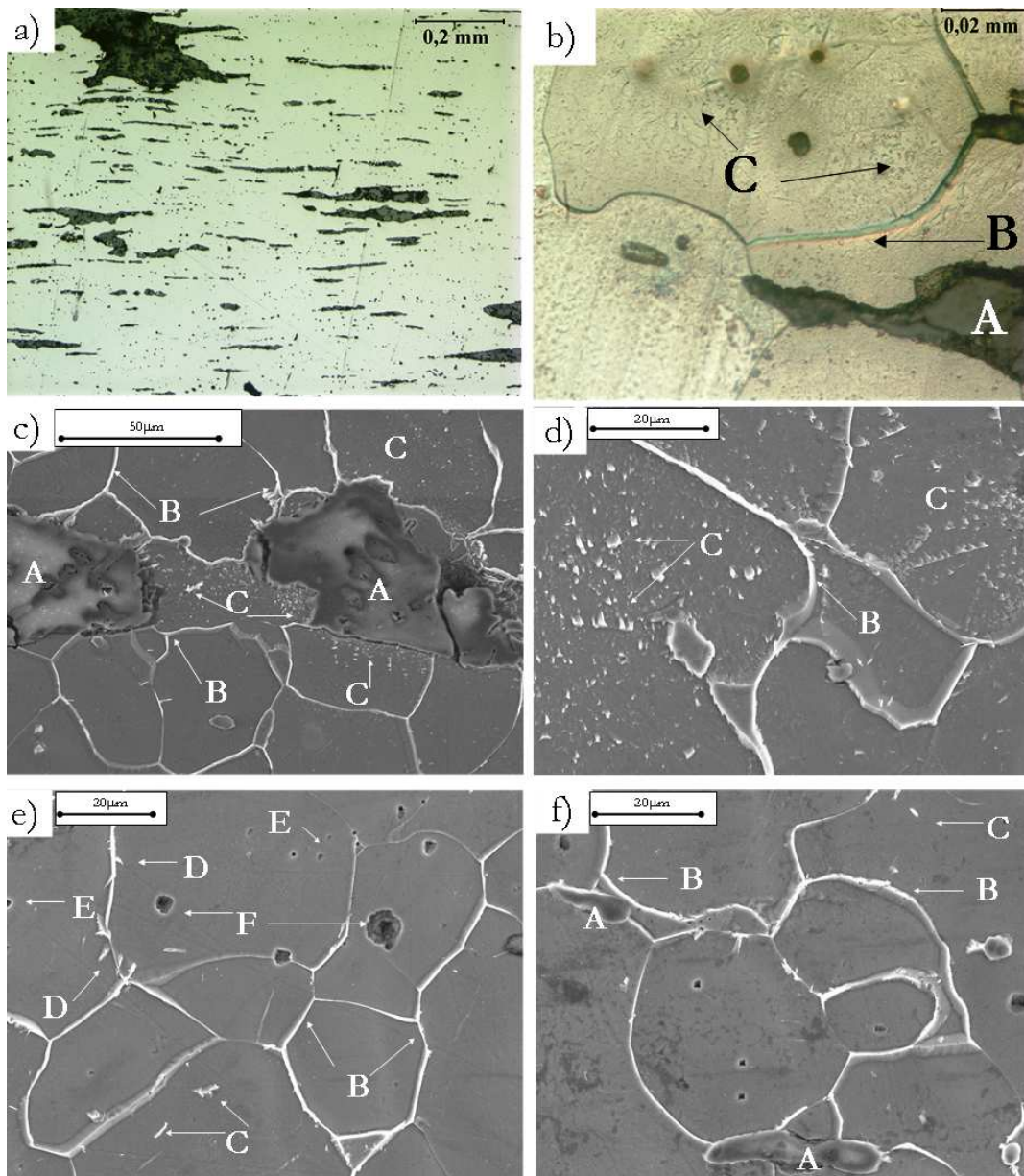
Analizę chemiczną przeprowadzono wykorzystując metodę grawimetryczną. Po obróbce mechanicznej dostarczonej do badań belki, pobierano reprezentatywną partię wiórów metodami nawiercania. Wyniki analizy zebrano w tabeli 1, gdzie zamieszczono także orientacyjne składy chemiczne stali zgrzewnych i zlewnych (na podst. [4]).

Tab.1. Skład chemiczny stali pochodzącej z przepustu kolejowego (1909r.)

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
stal z przepustu kolejowego	0,03	0,03	0,06	0,028	0,045
stal zgrzewna	0,0032-0,15	0,03-0,42	<0,18	0,011-0,4	0,0034-0,02
stal zlewna	0,026-0,2	0,01-0,013	0,036-0,52	0,009-0,136	0,063-0,136

Źródło: [4, 6]

Obserwacje metalograficzne prowadzono (zgodnie z założeniami teorii degradacji i jej materiałowych aspektów [1] oraz uwag zawartych w pracach [8, 9]) metodami mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej w stanie poeksploatacyjnym oraz normalizowanym (950°C, 2h, powietrze) – symulującym stan wyjściowy materiału.



Rys.2. Mikrostruktura stali pochodzącej z przepustu kolejowego z 1909r. a) stan nietrawiony (poeksploatacyjny) – widoczne są liczne pasma i łańcuszki zawalcowanych wtrąceń niemetalicznych, b) struktura ziaren ferrytu wraz z wtrąceniami niemetalicznymi (A) oraz pogrubionymi (kruchą fazą Fe_3C_{III}) granicami ziaren (B), liczne degradacyjne wydzielania kruchych faz (C), stan poeksploatacyjny, trawiono 3% HNO_3 , c-d) struktura ziaren ferrytu wraz z wtrąceniami niemetalicznymi (A) udekorowanych licznymi wydzieleniami wewnątrz ziaren (C), widoczne są także znacząco pogrubione (Fe_3C_{III}) granice ziaren (B), stan poeksploatacyjny, trawiono 3% HNO_3 , SEM, e-f) ziarna ferrytu wraz z wtrąceniami niemetalicznymi (A), siatka Fe_3C_{III} na granicach ziaren (B), pozostałości faz degradacyjnych we wnętrzach ziaren ferrytu (C) i (D) wraz z „dokryształizowanymi” kruchymi fazami (D) na granicach ziaren, markerem (F) oznaczono pustki po wtrąceniach niemetalicznych, stan normalizowany, trawiono 3% HNO_3 , SEM,

Źródło: na podstawie [6, s. 120-124]

W toku obserwacji metalograficznych ujawniono mikrostrukturę stali wykazującą cechy i symptomy typowe dla zmian degradacyjnych. Przykłady takich mikrostruktur pokazano na rys. 2 b-d (stan poeksploatacyjny). Procesy degradacji mikrostrukturalnej analizowanego materiału nie odbiegają od typowych zmian degradacyjnych występujących w szerokiej

grupie stali zgrzewnych pochodzącej z wrocławskich mostów (por. mikrostruktury z prac [7, 8, 9]). Normalizowanie, jako zabieg obróbki cieplnej, mający za zadanie uzyskanie mikrostruktury materiału zbliżonej do równowagowej, usunęło tylko częściowo produkty działalności mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych. Taki stan rzeczy może wskazywać na znaczny stopień zaawansowania degradacji mikrostruktury tej stali. W połączeniu z licznymi pasmami wtrąceń niemetalicznych, dochodzących nawet do rzędu mm, dalsza eksploatacja tej stali obarczona jest istotnym czynnikiem ryzyka oraz zagrożenia związanego z kruchym pękaniem.

2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Podobnie jak obserwacje metalograficzne, badania wytrzymałościowe prowadzono w stanie poeksploatacyjnym oraz normalizowanym. Statyczna próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6892-1:2010 wykorzystując pulsator hydrauliczny MTS 810 wraz z ekstensometrem MTS (model 632.02C), baza pomiarowa 25 mm. Badania przeprowadzono na próbkach okrągłych ($\phi = 8\text{mm}$). Sygnałem sterującym była siła, a prędkość przyrostu obciążenia wynosiła ok. 10MPa/s. Próbkę do badań po normalizowaniu poddawano dodatkowej obróbce mechanicznej celem usunięcia odwęglonej warstwy wierzchniej. Naddatek ten był każdorazowo określony przez obserwacje przekrojów poprzecznych metodami mikroskopii świetlnej. Wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono w tabeli 2. Każda wartość reprezentuje średnią z pięciu próbek.

Tab.2. Wyniki statycznej próby rozciągania z przepustu kolejowego w stanie poeksploatacyjnym (P) oraz normalizowanym (N)

	E [GPa]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A[%]	Z[%]
Stal z przepustu kolejowego (P)	189,1	272	369	15,5	23,7
Stal z przepustu kolejowego (N)	186,4	256,5	373,1	18,1	25,3
Stal zgrzewna	170-200	220-280	330-400	8-25	bd
Stal zlewna	200-220	250-300	340-450	25-35	bd

Źródło: [4, 6]

Badania udarnościowe przeprowadzono za pomocą młota Charpy'ego, zgodnego z wymaganiami normy PN-EN ISO 148-1:2010. Próby wykonywano na próbkach z karbem „V” o wymiarach 10x10x55 mm w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym. W celu wyznaczenia krzywej przejścia plastyczno – kruchego prace łamania określono w temperaturze: -40°C , -20°C , 0°C , $+20^{\circ}\text{C}$. Celem uzyskania zadanej temperatury próbki chłodzono ciekłym azotem przed badaniami właściwymi zapewniając jednorodny rozkład temperatury w całej objętości materiału. Wyniki badań zestawiono w tabeli 3, gdzie każda wartość przedstawia średnią z pięciu rejestrowanych udarności.

Tab.3. Wyniki badań udarnościowych stali z przepustu kolejowego (1909r.)

stal z przepustu kolejowego	KCV _{10(-40°C)} [J/cm ²]	KCV _{10(-20°C)} [J/cm ²]	KCV _{10(0°C)} [J/cm ²]	KCV _{10(+20°C)} [J/cm ²]
poeksploatacyjny	18	13	23	37
Normalizowany	13	14	32	41

Źródło: [6]

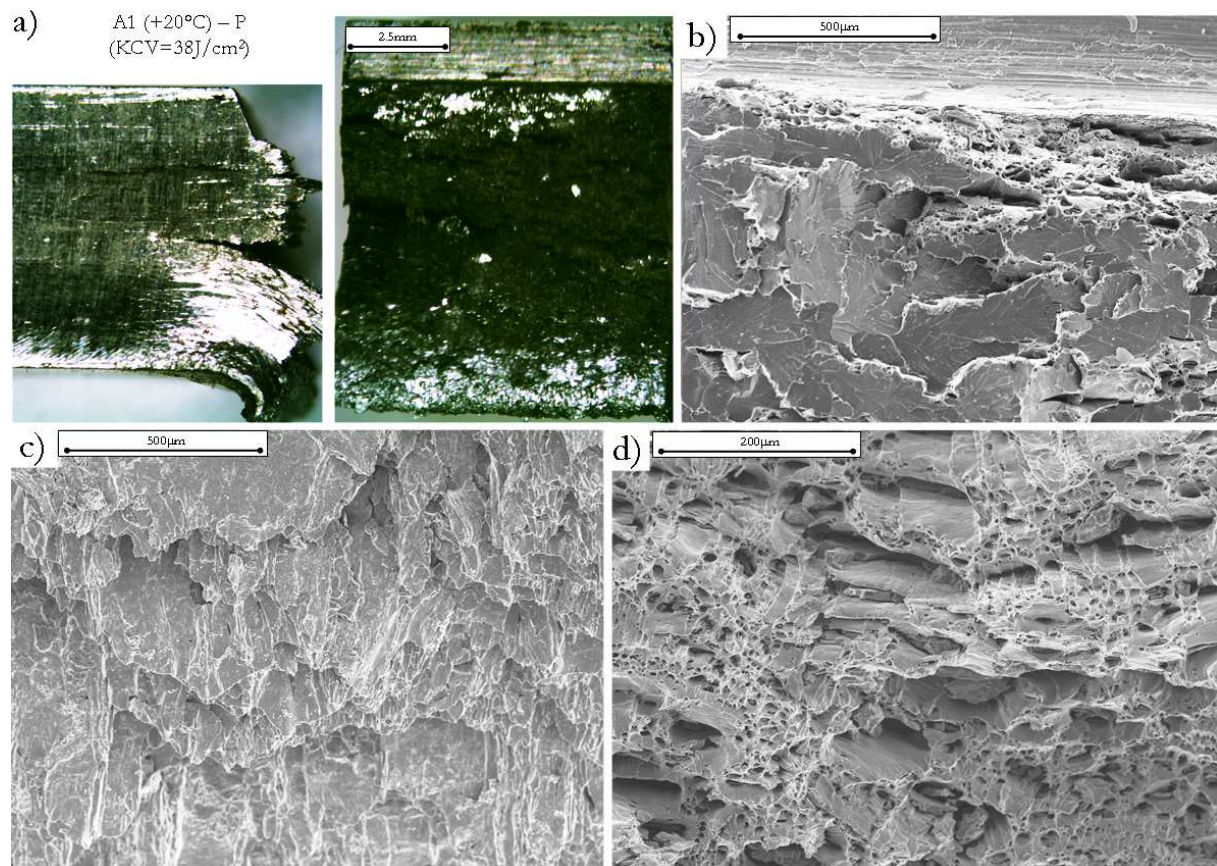
3. ANALIZY FRAKTOGRAFICZNE

Obserwacje fraktograficzne próbek po badaniach udarnościowych prowadzono z wykorzystaniem metod mikroskopii stereoskopowej i skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Przełomy analizowano w trzech strefach przedstawionych na rys. 3, tj. w okolicach karbu (strefa A), w części środkowej próbki (strefa B) oraz części dolnej (strefa C).



Rys. 3. Strefy obserwacji przełomu próbki udarnościowej

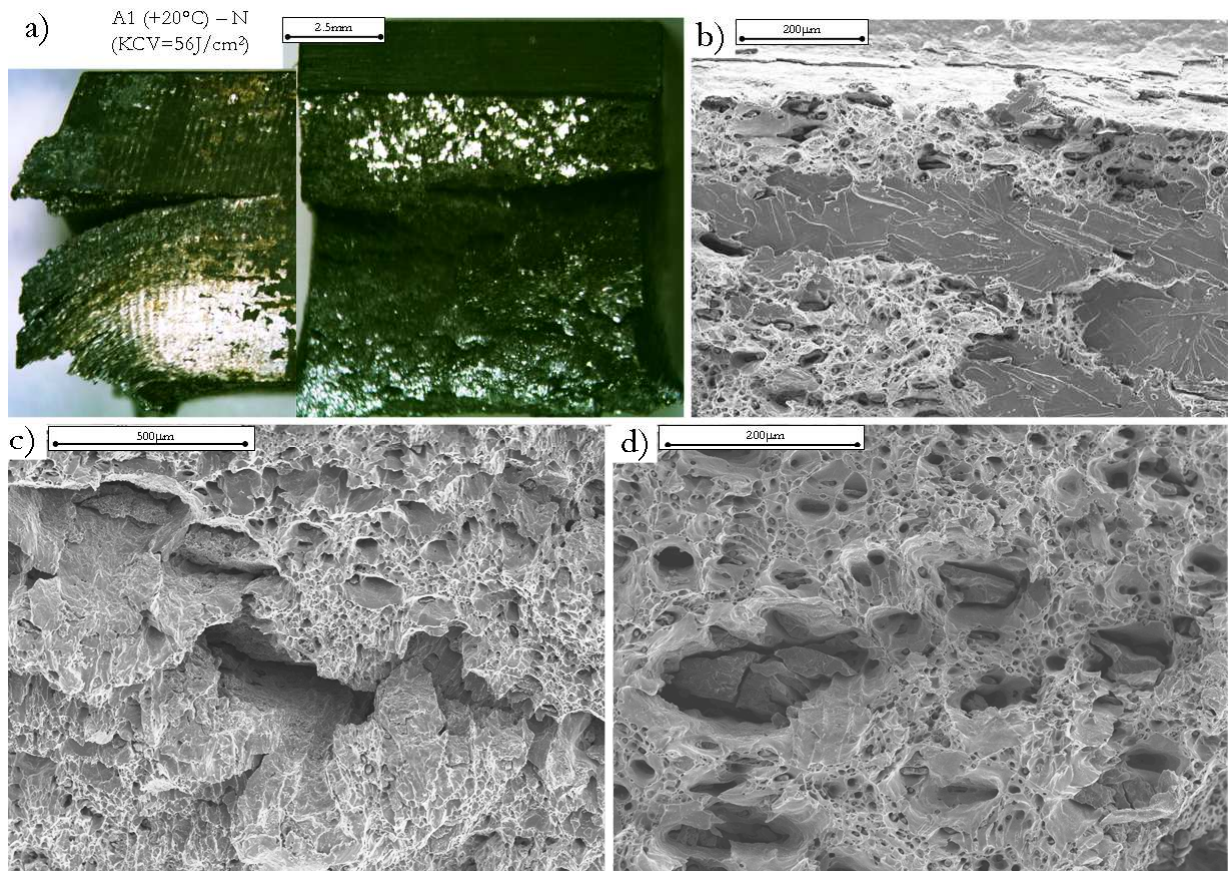
Źródło: [6, s. 50]



Rys.4. Powierzchnia przełomu próbki udarnościowej (temp. badania +20°C, stan poeksploatacyjny);
a) obraz makroskopowy, b) strefa pod karbem (SEM), c) strefa dolna (SEM), d) strefa
środkowa próbki (SEM),

Źródło: [6, s.148]

Przełomy próbek uzyskane w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ w stanie normalizowanym i poeksploatacyjnym wykazują podobny charakter. Liczne wtrącenia niemetaliczne ukształtowały topografię tego przełomu, powodując rozwarstwienia i nieciągłości materiału (rys. 4 a i 5 a).

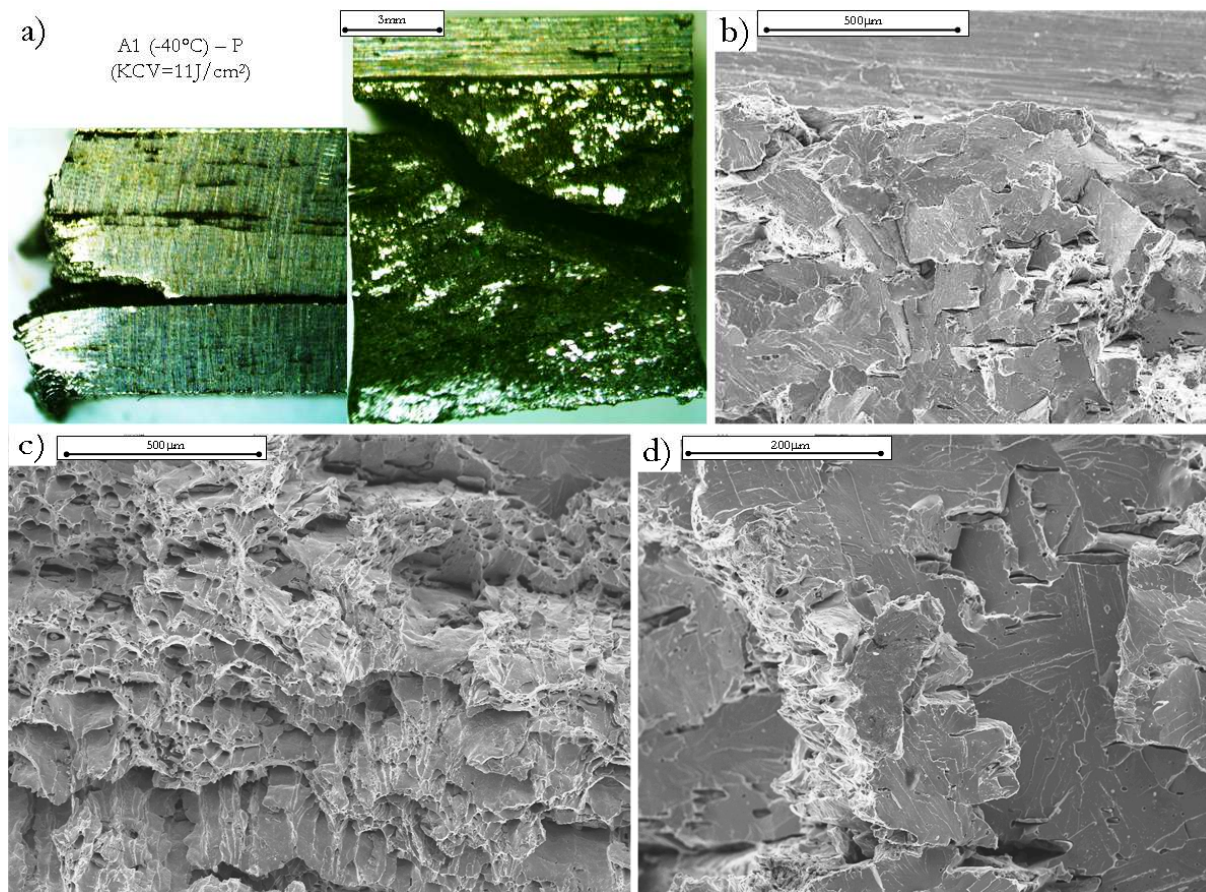


Rys.5. Powierzchnia przełomu próbki udarnościowej (temp. badania $+20^{\circ}\text{C}$ - stan normalizowany); a) obraz makroskopowy, b) strefa pod karbem (SEM), c) strefa dolna, (SEM), d) strefa środkowa próbki (SEM)

Źródło: [6, s. 149]

Strefy z okolic karbu obydwu próbek (rys. 4 b oraz 5 b) wykazują podobny charakter pęknięcia, ukształtowany przez dominujące obszary przełomu kruchego wraz z niewielkimi obszarami przełomu ciągliwego, występującego głównie w okolicach bocznych strefy przy karbie. Kruchy charakter przełomu w tych okolicach może świadczyć o relatywnie małej odporności związanej z inicjacją pęknięcia tego materiału, w przeciwieństwie do stref środkowych próbek, które odznaczały się cechami typowymi dla przełomu plastycznego (rys. 4 d oraz 5 d) o strukturze plastrowej. We wnętrzach dołków tej struktury uwidoczniono liczne wtrącenia niemetaliczne, które prawdopodobnie ukształtowały charakter przełomu [6, s. 148-150].

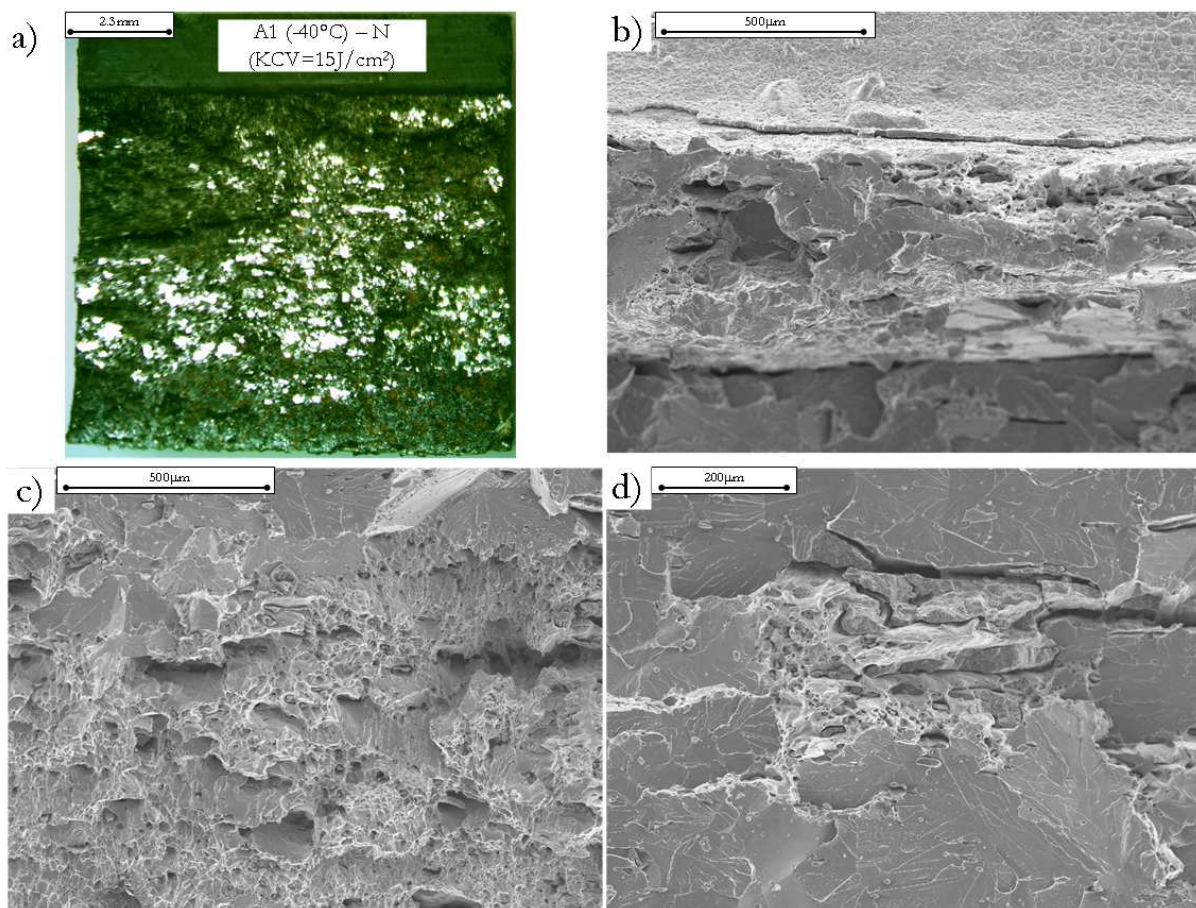
W temperaturze -40°C przełom miał w przeważającej części charakter kruchy na całym przekroju próbki, zarówno w stanie poeksploatacyjnym, jak i normalizowanym. Istotną rolę także i w tym wypadku odegrały wtrącenia niemetaliczne, powodujące liczne rozwarstwienia i pęknięcia próbki, a nawet jej zupełne rozdzielanie w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji pęknięcia (rys. 6 a). W okolicach karbu dominuje kruchy charakter przełomu z nieznacznymi obszarami przełomu plastycznego (rys. 6 b).



Rys. 6. Powierzchnia przełomu próbki udarowości (temp. badania -40°C - stan poeksploatacyjny);
 a) obraz makroskopowy, b) strefa pod karbem (SEM), c) strefa dolna (SEM), d) strefa
 środkowa próbki (SEM),

Źródło: [6, s.151]

Widoczne są tam także liczne uskoki płaszczyzn propagacji pęknięcia. Lokalnie występują pojedyncze przypadki międzykrystalicznego pęknięcia powodowane obniżeniem spójności na granicach ziaren. W stanie normalizowanym w okolicach karbu (rys. 7) przełom wraz z występującymi wysepkami przełomu plastycznego ma charakter kruchy. Także tutaj widoczne są liczne nieciągłości i rozwarstwienie materiału, a także uskoki pęknięcia. W częściach środkowych obydwu próbek (P i N) widoczne są fasetki pęknięć kruchych wraz z licznymi uskokami i dorzeczami. Występują również lokalne mostki przełomu plastycznego, oddzielające fasetki pęknięć łupliwych. Mostkom tym towarzysza zerwy (rys. 7 d). Taki kwaziłupliwy charakter przełomu próbek z niewielkimi obszarami pęknięcia o charakterze plastycznym odzwierciedlił się w niskich wynikach udarności. Należy zaznaczyć, że dla tej stali wtrącenia niemetaliczne wyraźnie określiły charakter przełomu, co dobrze dokumentują zdjęcia z rys. 5 a oraz rys. 6 a. [6, s. 148-150].



Rys. 7. Powierzchnia przełomu próbki udarowościowej (temp. badania -40°C - stan normalizowany); a) obraz makroskopowy, b) strefa pod karbem (SEM), c) strefa dolna (SEM), d) strefa środkowa próbki (SEM),

Źródło: [6, s.152]

DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Wyniki analizy chemicznej badanego materiału z konstrukcji stalowej przepustu kolejowego mieszczą się w szerokim zakresie składów chemicznych przewidzianych dla grupy stali zgrzewnych (tab.1). Obserwacje metalograficzne oraz mikrostruktura stali składająca się z ziaren ferrytu udekorowanych ciągłą otoczką $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ oraz wydzieleniami kruchych faz zarówno wewnątrz jak i na granicach ziaren w pełni potwierdza ten fakt. Badana stal odznaczała się także relatywnie wysokim (w stosunku do stali dotychczas badanych – patrz [7, 8, 9]) udziałem pasm wtrąceń niemetalicznych dochodzących swoimi rozmiarami do kilku mm. Ujawnione zmiany degradacyjne mikrostruktur są typowe dla stali zgrzewnych pochodzących z wrocławskich mostów prezentowanych m.in. w pracy [9]. Wyniki statycznej próby rozciągania w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym mieszczą się w szerokim zakresie przedziałów wartości (tab. 2) przewidzianych dla stali zgrzewnych. Każdorazowo po normalizowaniu wzrastała ciągliwość stali, co przejawiało się we wzroście wydłużenia A oraz przewężenia Z. W stosunku do stanu poeksploatacyjnego wyraźnemu zmniejszeniu ulegała granica plastyczności. Zmiany te można wiązać z obecnością procesów degradacji mikrostrukturalnej. Częstym przejawem obecności procesów degradacji mikrostrukturalnej jest wzrost poziomu wyraźnej granicy (R_e) plastyczności, a w skrajnym przypadku nawet całkowity zanik przystanku plastyczności.

Bardzo czułym wskaźnikiem zmian degradacyjnych jest udarność – co wykazano w wielu pracach (np. prace [1, 6, 7, 8, 9]) oraz udokumentowano jej przydatność do oceny stopnia

wyeksplotowania starych stali z punktu widzenia procesów degradacji mikrostrukturalnej. W analizowanym przypadku stali z przepustu kolejowego uwagę zwraca fakt niewielkich zmian udarności w temperaturze -40°C oraz -20°C w stanie normalizowanym i poeksploatacyjnym. Wynikom tym odpowiada także podobny charakter przełomów (por. rys. 6 i 7). W temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ charakter przełomów jest podobny z niewielką przewagą przełomu plastycznego. Uwagę zwraca także bardzo niska wartość udarności w temperaturze otoczenia, określona na poziomie 37 (P) oraz 41 (N) J/cm^2 . Z punktu widzenia użytkowego i kryterium przyjmowanego dla współczesnych niskowęglowych stali określonego w normach na poziomie $35 \text{ J}/\text{cm}^2$ badana stal spełnia ten warunek jedynie w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ pomimo formalnego spełnienia wymagań co do poziomu plastyczności (na podstawie wyników statycznej próby rozciągania).

Jak dotychczas we wszystkich analizowanych przypadkach stali zgrzewnych i zlewnych zmiany udarności odpowiadały poziomom nasilenia oraz zaawansowania procesów degradacji mikrostrukturalnej. Jednak w rozważanym przypadku zmiany udarności są nieproporcjonalnie małe w stosunku do obserwowanych ilości mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych oraz ich stopnia zaawansowania. Przyczyny takiego zachowania materiału można doszukiwać się w wyjątkowo dużej ilości wtrąceń niemetalicznych. Znacząca frakcja kruchych wtrąceń niemetalicznych w pełni determinuje proces pęknięcia ferrytowej matrycy materiału, zwłaszcza w temperaturze poniżej zera – dokumentują to także obrazy przełomów przedstawione na rys. 6-7. Na tej podstawie oraz dotychczasowych wyników badań [1, 6, 7, 8, 9] można wysnuć wniosek, że przy znaczącej ilości wtrąceń niemetalicznych procesy degradacyjne mogą odgrywać rolę drugorzędą w trakcie gwałtownej dekohezji materiału – czego wyrazem mogą być tak niewielkie zmiany udarności badanego materiału. Należy zauważyć, że dotychczasowe kryteria i metody badawcze stali zgrzewnych wypracowane w ramach teorii degradacji i jej materiałowych aspektów [8, 9] powinny zostać uzupełnione o nowe ilościowe kryterium frakcji wtrąceń niemetalicznych, powyżej którego nie powinno się w ogóle (!) rozpatrywać przydatności stali zgrzewnej do dalszej eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Ambroziak A., Pękalski G., Rabiega J., *Propozycje metod oceny stanu degradacji stalowych konstrukcji wrocławskich przepraw mostowych z przełomu XIX i XX wieku*. Mosty stalowe. Projektowanie, technologie budowy, badania, utrzymanie - Seminarium – Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, listopad 2008. Zakład Mostów Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej.
2. Bień J., *Trwałość obiektów jako kryterium w zarządzaniu infrastrukturą mostową*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, redaktor, Trwałość obiektów mostowych, strony 97–114. Politechnika Wroclawska, Dolnośląska Izba Inżynierów Budownictwa, Związek Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej, 2012.
3. Cremona C., Patron A., Johansson B., Larsson T., Eichler B., Hóhler S., *Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges*. Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002–2006), 2007.
4. Czapliński K. *Dawne Wyroby ze stopów żelaza*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009.
5. Imam B., Chryssanthopoulos M., *Bridge Maintenance, Safety and Management, A review of metallic bridge failure statistics*, strony 635–643. Taylor and Francis Group, CRC Press, London, 2010.
6. Lesiuk G., *Degradacja mechaniczna i strukturalna XIX-wiecznych stali zgrzewnych*, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechnika Wroclawska, Rozprawa Doktorska, Wrocław 2013..

7. Lesiuk G., Szata M., *Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation*. Materials Science (New York), Springer Verlag, 47(1):82–88, 2011.
8. Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*. Raport instytutowy, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999.
9. Pękalski G., *Procesy degradacyjne konstrukcji stalowych mostów Wrocławia z przełomu XIX i XX w.* - na prawach rękopisu. Raport instytutowy, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2007.

ASSESSMENT OF THE MICROSTRUCTURAL CHANGES AND FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF THE RAILWAY CROSSING BRIDGE STEEL CONSTRUCTION AFTER 100 YEARS OPERATING TIME

Abstract

The results of strength tests and metallographic observation of structural elements from the repaired railway culvert in 1909 have been discussed in this paper. The results of strength tests (static tensile strength, impact strength) and metallographic observation (light microscopy, scanning electron microscopy) confirm the fact that they belong to a group of material analyzed historic puddled steel. It has been shown that the 100-year operating time caused significant changes in microstructure. These changes combined with the big number of non-metallic inclusions are the main risk factor in brittle type of fracture of this material.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Lesiuk** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Grzegorz.Lesiuk@pwr.wroc.pl,

dr hab. inż. **Mieczysław Szata, prof. PWr.** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Mieczyslaw.Szata@pwr.wroc.pl,

dr inż. **Józef Rابيةga** – Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Mostów, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Jozef.Rابيةga@pwr.wroc.pl