

LESIUK Grzegorz<sup>1</sup>  
RABIEGA Józef<sup>2</sup>

### **BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE XIX-WIECZNYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH WYKONANYCH ZE STALI ZGRZEWNICH**

*Na terenie Dolnego Śląska znajduje się (wciąż w eksploatacji) znaczna liczba konstrukcji stalowych, powstałych w na przelomie XIX i XX wieku. W szczególności dotyczy to użytkowania stalowych mostów, a także wiaduktów kolejowych. Obiektem badań autorów były stalowe elementy konstrukcyjne pochodzące z XIX wiekowej stali zgrzewnej. W pracy przedstawiono wyniki analiz chemicznych, obserwacji metalograficznych, a także podstawowych badań wytrzymałościowych tj. statycznej próby rozciągania i udarności. Badania zostały przeprowadzone dla dwóch stanów materiału tj. w stanie poeksploatacyjnym oraz normalizowanym – symulującym stan wyjściowy materiału sprzed blisko 150 lat. Uzyskane wyniki wskazują na znaczne zaawansowanie procesów degradacyjnych mikrostruktur badanych materiałów.*

### **STRENGTH EXAMINATION OF THE 19<sup>th</sup>-CENTURY CONSTRUCTION ELEMENTS MADE FROM PUDDLED STEEL**

*In Lower Silesia exists (still in operation) a significant number of steel constructions manufactured in the late nineteenth and early twentieth century. In particular, it is used as a steel bridges, and railway viaducts. The object of the investigation were steel structural components made from the nineteenth century puddled steel. The results of chemical analysis, metallographic observations and basic static strength tests, i.e. tensile and impact strength have been presented in this paper. The tests were performed for two material states – namely: post-operated state and normalized state - which simulates the initial state of the material (references state for comparison with the post operated state). The results indicate a prominent advancement of degrading processes of microstructures in tested materials.*

---

<sup>1</sup>Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Zakład Mechaniki Układów Dyskretnych, ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, tel. +48 71 320 28 99, E-mail: Grzegorz.Lesiuk@pwr.wroc.pl;

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Mostów; 50-370 Wrocław; Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, Tel: + 48 71 320-23-54, E-mail: Jozef.Rabiega@pwr.wroc.pl

## 1. WSTĘP – CHARAKTERYSTKA XIX-WIECZNYCH METALICZNYCH MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

Podczas badań starych obiektów technicznych wiele trudności następczą studia literaturowe i związane z nimi określenia tworzyw konstrukcyjnych. Problem tkwi zazwyczaj w terminologii. Przykładowo tworzywo metaliczne obecnie rozumiane jako „stal” do połowy lat XX ubiegłego wieku nie było nazywane w ten sposób. „Stal” była onegdaj rozumiana jako „żelazo”, którego i też było kilka rodzajów. Wyraźna granica pomiędzy ówczesną „stalą”, a „żelazem” (np. kowalnym) była rozmyta. W drugiej połowie XIX wieku i początkowych latach XX wieku produkowano niewielki asortyment tworzyw żelaznych, stosowanych do wyrobu nośnych elementów budynków. Spotykane np. na terenie Dolnego Śląska elementy żelazne z tego okresu wykonywane były z trzech grup materiałów (za [1]):

- Żeliwa (Gusseisen),
- Żelaza kowalnego (zgrzewnego – dop. autora – Schmiedbares Eisen),
- Żelaza zlewne (Flusseisen).

Spośród wszystkich wymienionych materiałów najwcześniej stosowane było żeliwo. Druga połowa XIX wieku to domena żelaza zgrzewnego i jego odmian. Koniec wieku to dominacja żelaza zlewne (mniej więcej od ok. lat 80 XIX wieku). Taka reorientacja z żelaza zgrzewnego na zlewne była możliwa dzięki coraz nowszym, coraz doskonalszym technologiom otrzymywania z surowców tego materiału.

Żelazo zgrzewne wyparło w połowie XIX wieku jako tworzywo konstrukcyjne żeliwo. Stal zgrzewna stała się dość szybko podstawowym elementem konstrukcyjnym, z którego wykonywano w budynkach; belki, podciąg stropowe, słupy i elementy nośne dachów etc. Jak podaje Czaplinski [1] materiał ten stosowany był powszechnie do roku 1904. Jako przykładowy efekt takich zmian może posłużyć słynny most Britannia (142 m rozpiętości) zaprojektowany przez Roberta Stephensona w latach 1846-1850.



Rys. 1. Widok na most Britannia, [7]

Istotną cechą stali zgrzewnych była duża niejednorodność ich składu chemicznego jak i warstwowa budowa (patrz wyniki badań faktograficznych). Budowa taka musiała wynikać zapewne z małych porcji wsadu aplikowanych do pieca pudlarskiego. Dodatkowo sam proces technologiczny powodował duże zanieczyszczenie stali. Wszystko to przyczyniało się do powstawania lokalnych wad materiałowych oraz statystycznego rozrzutu wyników. Taki stan rzeczy nie pozostał obojętny makroskopowych własnościom stali – stal zgrzewna odznaczała się zróżnicowaniem wydłużenia i wytrzymałości na rozciąganie w kierunku walcowania jak i w kierunku prostopadłym doń.

W tabeli poniżej zebrano wyniki dotyczące składu chemicznego i własności mechanicznych stali zgrzewnej i zlewnej.

Tab. 1. Orientacyjne składy chemiczne stali zgrzewnych i zlewnych,

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]
STAL ZGRZEWNA	0,018	śladowa	0,1	0,02	0,01				
	-	-	-	-	-	-----	-----	-----	-----
	0,3	0,33	0,33	0,46	0,06				
STAL ZLEWNA	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	śladowa	<b>0,004</b>	<b>0,004</b>	<b>0,01</b>	<b>0,11</b>	<b>0,007</b>	<b>0,03</b>
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>0,35</b>	<b>0,75</b>	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>	<b>0,14</b>	<b>0,014</b>	<b>0,04</b>

Warto nadmienić, że współczesna klasyfikacja tworzyw metalicznych na stal, staliwo, żeliwo ustaliła się w latach powojennych. Niniejszy rozdział pokazuje, w jaki sposób klasyfikowano tworzywa metaliczne oraz jakie były ich podstawowe własności z okresu końca XIX w. i pierwszej połowy XX w. Kolejna tabela przedstawia podstawowe charakterystyki mechaniczne, omówionych dotychczas tworzyw metalicznych.

Tab. 2. Wytrzymałość starych stali,

		R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>H</sub> [MPa]	E [GPa]	A <sub>5</sub> [%]	UWAGI	
STALE NIEMIECKIE Z KOŃCA XIX w. i XX w. (do 1940 roku)	STAL ZGRZEWNA	330	220	150	200	10	Udarność: 350 [kJ/m <sup>2</sup> ]	Gęstość: 7,6 ÷ 7,8 [Mg/m <sup>3</sup> ]
		÷ 400	÷ 230	÷ 160	÷ 215	÷ 25		
	STAL ZLEWNA	370 ÷ 450	220 ÷ 240	150 ÷ 190	215	18 ÷ 25	Udarność: 100 [kJ/m <sup>2</sup> ]	Gęstość: 7,85 [Mg/m <sup>3</sup> ]
	St 00.12 (wg DIN 1612)	min. 500	-	-	-	-	-	-

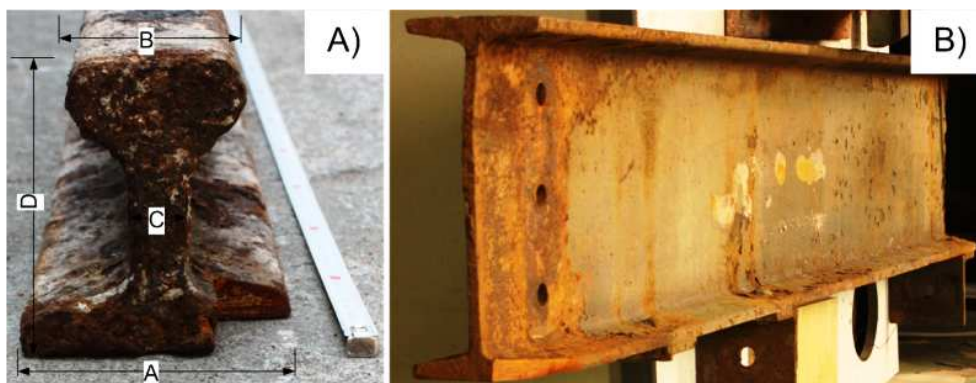
<b>Stal handlowa (Handelsbaustahl wg DIN 1050)</b>	340 ÷ 500	240 ÷ 280	-	-	-	-
<b>St 37.12 (wg DIN 1612)</b>	370 ÷ 500	240 ÷ 280	-	-	-	-
<b>St 48</b>	<b>Dopuszczalne naprężenia <math>k = 156\div 182</math> [MPa] (wg. Zentralblatt der Bauverwaltung 1925)</b>					
<b>StSi</b>	<b>Dopuszczalne naprężenia <math>k = 210</math> [MPa] (wg. Der Bauingenieur H.26/1930)</b>					
<b>St 52</b>	520 ÷ 640	340 ÷ 360	<b>Dopuszczalne naprężenia <math>k \sim 200</math> [MPa] (wg. Stahlbau – Kalender 1940)</b>			

## Bibliografia [1]

Niskowęglowe, długotrwałe eksploatowane stale wykazują tendencje do procesów strukturalnej degradacji. Wyraża się ona obecnością licznych wydzieleni węglików i azotków żelaza wewnątrz ziaren ferrytu oraz miejscami ciągłych wydzieleni cementytu na granicach. Ten stan rzeczy nie pozostaje obojętny własnościom eksploatacyjnym stali. Procesy degradacyjne wydatnie wpływają na wzrost kruchości stali, objawiającą się przede wszystkim spadkiem udarności, wzrostem granicy plastyczności i wytrzymałości, a także spadkiem miar ciągliwości (A i Z) wyznaczanych podczas statycznej próby rozciągania. Dlatego też ocena bezpieczeństwa konstrukcji wznoszonych ze stali zgrzewnych i zlewnych winna być rozważana na podstawie kompleksowych wyników badań wytrzymałościowych, jak i obserwacji metalograficznych. W niniejszej pracy zostaną przedstawione wyniki cząstkowych badań elementów pochodzących z remontowanych obiektów wzniesionych ze stali zgrzewnych.

## 2. WYNIKI ANALIZ CHEMICZNYCH I OBSERWACJI METALOGRAFICZNYCH

Obiektem badań autorów były XIX-wieczne (druga połowa wieku) stalowe elementy konstrukcyjne (rys. 2) pochodzące z modernizowanych lub rozbieranych zabytkowych stalowych konstrukcji. Dostatek materiału badawczego umożliwił weryfikację statystyczną wyników – co najczęściej w przypadku badań tego typu stalowych obiektów jest rzadkością, zwłaszcza jeśli obiekty są wciąż eksploatowane.



Rys. 2. Materiały dostarczone do badań; a) szyna S1 – wymiary:  $A=100\text{mm}$ ,  $B=60\text{ mm}$ ,  $C=25\text{mm}$ ,  $D=100\text{mm}$ , długość  $L=1400\text{mm}$  b) dwuteownik A1 - I320 (długość  $L=1150\text{ mm}$ ) pochodzący z wiaduktu kolejowego z okolic Wałbrzycha

## 2.1 Analizy chemiczne

W tabeli nr 3 zamieszczono wyniki analiz chemicznych (uzyskane metodą grawimetryczną) badanych materiałów.

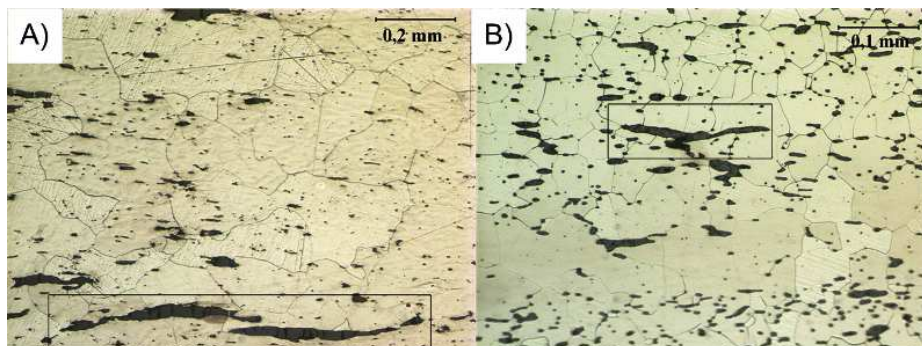
Tab. 3. Składy chemiczne badanych materiałów

Lp.	Materiał	Zaw. N [ppm]	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni
1	S1	62	0,06	0,1	0,17	0,198	0,025	0,03	0,02
2	A1	60	0,03	0,06	0,03	0,28	0,045	0,03	0,02

Uzyskane wyniki analiz chemicznych dla materiałów S1 i A1 mieszczą się w szerokim zakresie, typowym dla stali zgrzewnych (por. tab.1.). Zawartość fosforu wydatnie wskazuje na przynależność badanych stali do grupy stali zgrzewnych. Przypuszczenia autorów powinny potwierdzić obserwacje metalograficzne – przedstawione w kolejnym podpunkcie niniejszej pracy.

## 2.2. Wyniki obserwacji metalograficznych

Obserwacje metodami mikroskopii świetlnej dowiodły, że badane stale w stanie poeksploatacyjnym mają budowę ferrytyczną ze znaczącą ilością wtrąceń niemetalicznych oraz nieciągłości struktury (rys. 3). Ziarna ferrytu wykazują charakterystyczne dla stali zgrzewnych zróżnicowanie rozmiarów. Wstępne wnioski wpływające z analizy składu chemicznego (mała zawartość C) oraz wysokie zawartości P i S (wywołujące segregację składu chemicznego) zostały potwierdzone w trakcie obserwacji mikroskopowych.



Rys. 3. Mikrostruktura stali (w stanie poeksploatacyjnym) S1 (a) i A1 (b) dostarczonych do badań, ramką zaznaczono zawałcowane łańcuszki wtrąceń niemetalicznych, trawiono 3% $HNO_3$ .

### 3. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

#### 3.1. Statyczna próba rozciągania

Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona w Laboratorium Dynamiki Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Do badań użyto próbek okrągłych, proporcjonalnych pięciokrotnych o średnicy  $d=8$  mm. Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej MTS810 (zakres siłomierza 0-100kN) z wykorzystaniem ekstensometru o bazie pomiarowej 25mm i zakresie odkształcenia  $\Delta\varepsilon=\pm 20\%$ . Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 10002-1+AC1, sterowano siłą zachowując stałą prędkość przyrostu naprężenia na poziomie 10MPa/s. Wyniki badań zebrano w tabeli 3. Prezentowane wyniki przedstawiają wartość średnią z badań pięciu próbek.

Tab. 3. Wyniki badań wytrzymałościowych

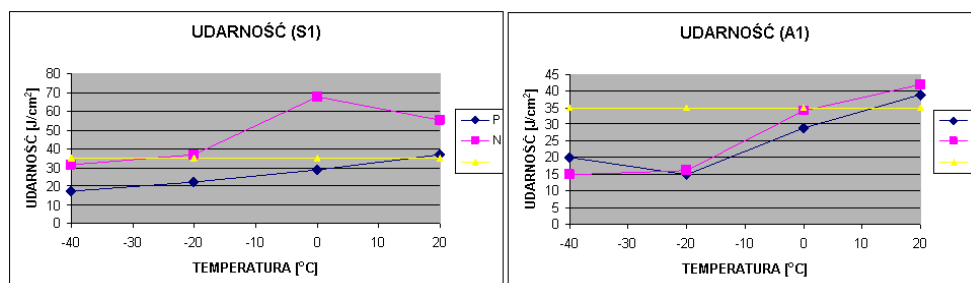
	Material	$R_{m\bar{s}r}$ [MPa]	$R_{e\bar{s}r}$ [MPa]	$A_5$ [%]	Z [%]	E [GPa]
1	S1 stan poeksploatacyjny	375,5	255,5	21,7	35,4	180
2	S1 stan normalizowany	360	217	22,7	37,9	179
3	A1 (wzdłużny) stan poeksploatacyjny	382	275	15,5	23,5	188
4	A1 (wzdłużny) stan normalizowany	375	251	18	23,7	185
5*	A1 (poprzeczny) stan poeksploatacyjny	237	223	6,2	4,1	194
6*	A1 (poprzeczny) stan normalizowany	245	216	3	3,8	195

\*średnia z 2 próbek

Uzyskanie wyniku badań wytrzymałościowych potwierdzają wyniki analiz chemicznych i badań mikroskopowych. Wykazano statystycznie istotne różnice w wartościach uzyskiwanych granic plastyczności jak i wytrzymałości badanych materiałów w stanie poeksploatacyjnym jak i normalizowanym. Każdorazowo po normalizowaniu ulegały one zmniejszeniu – co było związane z rozpuszczaniem podczas normalizowania wydzieleni kruchych faz wewnątrz jak i na granicach ziaren. Wydłużenie  $A_5$  i przewężenie  $Z$  także rosło, lecz z uwagi na wartości odchyłek standardowych nie wykazano statystycznie istotnej różnicy. Choć – jak powszechnie wiadomo – z wyników badań własnych jak i doświadczeń macierzystych instytutów autorów [2÷6] jest to regułą.

### 3.2. Udarność

Próby udarnościowe przeprowadzono w Wydziałowym Zakładzie Wytrzymałości Materiałów Politechniki Wrocławskiej przy użyciu młota Charpy'ego z wymaganiami normy PN-EN 10045-1. Poddano badaniom próbki z karbem „V” o wymiarach 10x10x55 mm w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym. W celu wyznaczenia krzywej przejścia plastyczno – kruchego pracę łamania określono w temperaturach:  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ . Próbki chłodzone były ciekłym azotem w całej swojej objętości. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmian krzywych udarności w funkcji temperatury. Jako minimalny poziom udarności dla współczesnych stali konstrukcyjnych przyjęto wartość wynoszącą  $35\text{J}/\text{cm}^2$ . W literaturze postuluje się, aby wobec braku możliwości określenia zaawansowanymi metodami ilościowymi w metalografii na tej podstawie określać temperaturę przejścia plastyczno-kruchego. Należy wszak podkreślić, że kryterium to winno być każdorazowo weryfikowane przez badania faktograficzne, określające procentowy udział przelomu plastycznego i kruchego.



Rys. 4. Krzywe zmian udarności w funkcji temperatury materiałów dostarczonych do badań. Na poziomie  $35\text{ J}/\text{cm}^2$  zaznaczono żółtą linią wartość kryterialną udarności stawianą współczesnym stalom konstrukcyjnym.

Wyniki badań udarności wskazują na znaczące zaawansowanie procesów degradacji mikrostruktur. Każdorazowo po normalizowaniu obserwowano wzrost wartości udarności. Wyniki udarności uzyskane dla materiału A1 są praktycznie w całym zakresie temperaturowym poniżej kryterialnej wartości  $35\text{J}/\text{cm}^2$ . Normalizowanie spowodowało dla tego materiału jedynie niewielki wzrost udarności – w przeciwieństwie do materiału S1. Taki stan rzeczy jest związany ze znaczącą ilością wtrąceń niemetalicznych (w porównaniu

z materiałem S1), które w przypadku stali A1 bardzo silnie sterują procesem dekohezji materiału. Najlepszym dowodem takiego stanu rzeczy jest anormalne zachowanie się materiału A1 podczas badań odporności na pękanie (z uwagi na ramy objętościowe nie poruszane tutaj na łamach niniejszej pracy) tzn. nienaturalne odchylenie trajektorii pęknięcia spowodowane obecnością pasm wtrąceń niemetalicznych.

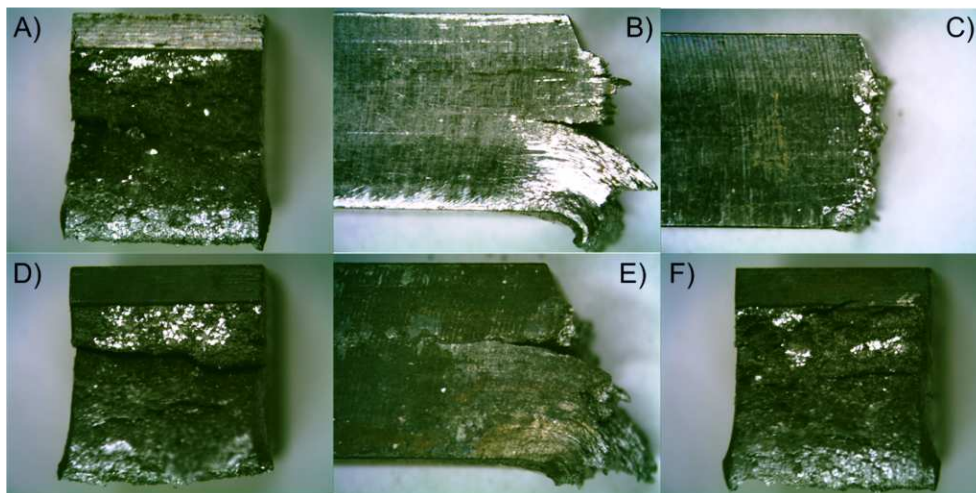


*Rys. 5. Próbki zwarte po badaniach odporności na pękanie (materiał A1) i anormalna trajektoria pęknięcia. Na próbkach widoczne rozległe pasma wtrąceń niemetalicznych powodujących pękanie próbek wzdłuż ich rozkładu.*

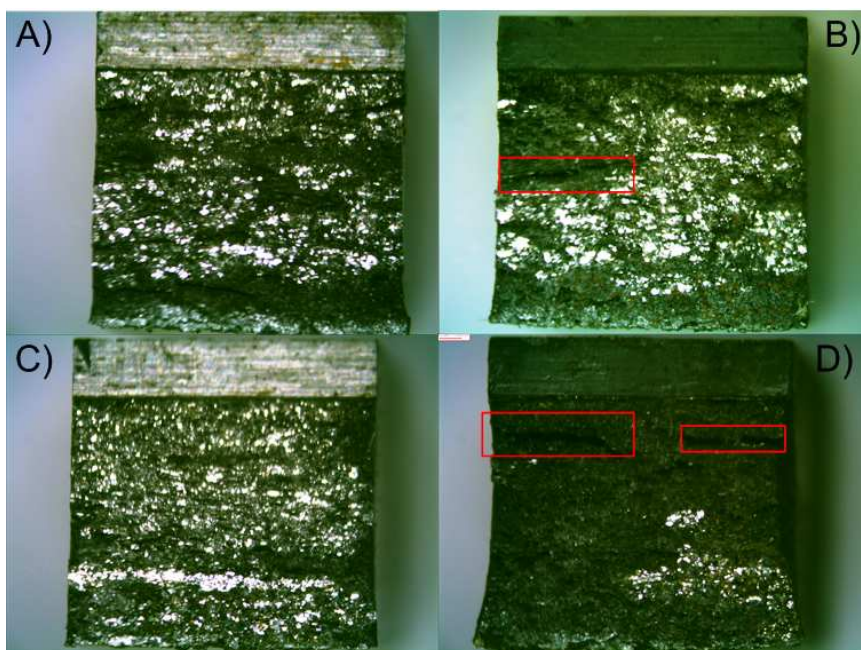
### **3.3. Makroskopowe wyniki badań fraktograficznych**

Obserwacji przełomów dokonano przy pomocy mikroskopu stereoskopowego (przy powiększeniach w zakresie od 8-50x). Wyniki obserwacji wykazywały, że przełomy uzyskane w temp. +20°C wykazują wyraźną przewagę przełomu plastycznego. Topografia przełomów (zarówno w stanie poeksploatacyjnym jak i normalizowanym) była kształtowana przez liczne wtrącenia niemetaliczne i nieciągłości budowy stali. W temperaturze -40°C w stanie poeksploatacyjnym dominował kruchy charakter pękania. Normalizowanie także i w tym przypadku także powodowało zwiększenie udziału przełomu ciągliwego – zwłaszcza widać to na rys. 7d.





Rys. 6. Makroskopowa budowa przelomów stali zgrzewnej po próbach udarnościowych uzyskanych w temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$ , a i b) stal A1 – stan poeksploacyjny, d i e) stal A1 – stan normalizowany, c) materiał S1 stan poeksploacyjny, f) S1 stan normalizowany.



Rys. 7. Makroskopowa budowa przelomów stali zgrzewnej po próbach udarnościowych uzyskanych w temperaturze  $-40^{\circ}\text{C}$ , a) stal A1 – stan poeksploacyjny, b) stal A1 – stan normalizowany, c) materiał S1 stan poeksploacyjny, d) materiał S1 stan normalizowany.

#### 4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych stalowych elementów konstrukcyjnych, pochodzących z połowy XIX wieku. Zgodnie z koncepcją wielokryterialnego systemu oceny stanu elementów stalowych długotrwale eksploatowanych [5] wykonano statyczną próbę rozciągania jak również badania udarności w funkcji zmian temperatury. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że tak znaczące zmiany granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie jak i udarności (zwłaszcza w przypadku materiału S1) oraz zmian charakteru pęknięcia w różnej temperaturze spowodowane są obecnością mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych. Ich znaczący wpływ na udarność został już przedyskutowany w pracy [4] i [5]. Obecność procesów degradacyjnych została potwierdzona w trakcie obserwacji metalograficznych nieprezentowanych na łamach niniejszej pracy z uwagi na ramy objętościowe). Należy także podkreślić, że w przypadku bardzo dużej kumulacji wtrąceń niemetalicznych, postępujące procesy dekohezji pod wpływem wieloletniego okresu eksploatacji potrafią zdominować proces destrukcji materiału – co pokazują przykładowe zdjęcia próbek, po badaniach odporności na pęknięcie. Prędkość obciążania oraz ciepło powodują, że przejście w stan kruchy stali zgrzewnych (A1 i S1) odbywa się już w zakresie dodatniej temperatury. Taki stan rzeczy może być nadzwyczaj groźny podczas eksploatacji obiektów w warunkach zimowych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Czaplński K.: *Dawne wyroby ze stopów żelaza*, Wrocław 2009, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2009
- [2] Dudek D.: Oziemski 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 przełomie XIX i XX wieku*, Zeszyty Naukowe - Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki, Wrocław 2010
- [4] Lesiuk G., Szata M., *Wpływ procesów degradacji mikrostruktur na udarność stali zgrzewnych*, Logistyka nr 6/2010.
- [5] Pękalski G.: *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport serii SPR nr 14/99, I-19, PWr, Wrocław 1999
- [6] Rabiega J.: Pękalski G., *Badania materiałowe mostów Pomorskich: Południowego, Środkowego i Północnego na rzece Odrze we Wrocławiu*, Raport serii SPR 9/2007, I-19, PWr, Wrocław 2007.
- [7] [http://www.bbcel.co.uk/capabilities/bridges/158\\_britannia-bridge-underbridge-number-165-cn3](http://www.bbcel.co.uk/capabilities/bridges/158_britannia-bridge-underbridge-number-165-cn3)

**Prace badawcze zostały częściowo sfinansowane ze środków stypendialnych współfinansowanych przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.**