

1 [DOI: https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v96.1154.16-24](https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v96.1154.16-24)

2 *Review*

3 **Anomalous properties of steel of old railway bridges in the light of diagnostic**
4 **tests**

5 **Anomalne właściwości stali starych mostów kolejowych**
6 **w świetle badań diagnostycznych**

7 **Bernard Wichtowski¹, and Krzysztof Konecki^{2,*}**

8 ¹ West Pomeranian University of Technology Szczecin, Poland (B.W.)

9 ² Saferoad Pomerania Sp. z o.o. w Szczecinie

10 * Correspondence: krzysztof.konecki@saferoad.pl, Tel.: +48-608-630-932 (K.K.)

11 Received: 20.05.2023; Accepted: 10.11.2023

Abstract: The procedure for assessing the properties of steel in exploited bridge structures is one of the most important issues in the comprehensive assessment of the load capacity and durability of bridges used for a longer period. The paper is an attempt to recapitulate conclusions from many years of research on these structures. Literature and own research have shown that many of these structures do not strictly transfer design loads, but safely transfer the actual loads occurring on a given railway line. The new rules for assessing such bridges will allow to estimate their operational usefulness despite the progressing material degradation. It is necessary to determine the safety factor, especially when it concerns several objects globally at the same time. The authors' dream is to comprehensively interpret Polish research and to develop an appropriate standard to estimate the real pragmatic loads.

Keywords: steel properties; welds cracks; old railway bridges

Streszczenie Procedura oceny właściwości stali eksploatowanych obiektów mostowych jest jedną z najistotniejszych w kompleksowej ocenie nośności i trwałości mostów użytkowanych przez dłuższy okres. Referat jest próbą streszczenia wniosków z wieloletnich badań konstrukcji. Badania literaturowe oraz badania własne wykazały, że wiele z tych konstrukcji nie przenosi ściśle obciążeń projektowych, a bezpiecznie przenosi rzeczywiste obciążenia występujące na danej linii kolejowej. Nowe zasady oceny takich mostów pozwolą oszacować ich przydatność eksploatacyjną pomimo postępującej degradacji materiałowej. Potrzebne jest określenie współczynnika bezpieczeństwa, w szczególności, gdy dotyczy to wielu obiektów jednocześnie. Celem autorów jest zinterpretowanie całościowe badań polskich i opracowanie odpowiedniej normy do szacowania rzeczywistego pragmatycznego obciążenia.

12 **Słowa kluczowe:** właściwości stali; stare mosty kolejowe

13 **Literaturowe wymagania jakościowe stali starych mostów**

14 Z uwagi na naturalne zmniejszanie się nośności starych mostów eksploatowanych przez wieloletnie
15 użytkownie, ich wymagana dalsza trwałość według kryteriów projektowych wydaje się nieuzasadniona.
16 Uzasadnione jest opracowanie nowych metod oceny ich nośności. W XXI wieku, w latach 2004-2011, pięć
17 państw (Kanada, Stany Zjednoczone, Wielka Brytania, Szwajcaria i Dania) przyjęło nową probabilistyczną
18 metodę oceny nośności mostów starych. Jest to metoda rozdzielonych, wykalibrowanych współczynników
19 bezpieczeństwa o obniżonych wymaganiach w stosunku do nowoprojektowanych konstrukcji [1,2]. Analiza
20 nośności tych mostów powinna być procesem umożliwiającym w miarę potrzeb coraz dokładniejsze
21 i bardziej wiarygodne oszacowanie ich nośności. Autorzy zagadnienia te, w odniesieniu do przepisów
22 polskich, przedstawili w artykule [3]. Wszystkie zamieszczone tam uwagi są zgodne z zaleceniami
23 opracowań [4,5], czyli oparte na procedurze Wspólnego Komitetu ds. Bezpieczeństwa Konstrukcyjnego
24 (JCSS) i opublikowanej w 2001 r. [6]. Na uwagę i przedyskutowanie zasługują podane w pracy [5], nieznanie
25 autorom, nowe poniższe uwagi dotyczące omawianego tematu:

26 1. „zakresy naprężeń spektrum projektowego nie przyczyniają się do skumulowanych uszkodzeń, jeśli są
27 poniżej granicy odciążenia 29 MPa”, podano dwa przykłady przy $m=5$,

- 28 2. „granice plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie są wyższe w środku belek niż w ich pasach” –
 29 zgodnie z EN 10025,
 30 3. w przypadku stali zgrzewnej (puddled iron): „Analiza chemiczna musi być wykonana metodą analizy
 31 mokrej, ponieważ jest to niemożliwe za pomocą spektroskopii emisyjnej”, brak uzasadnienia.

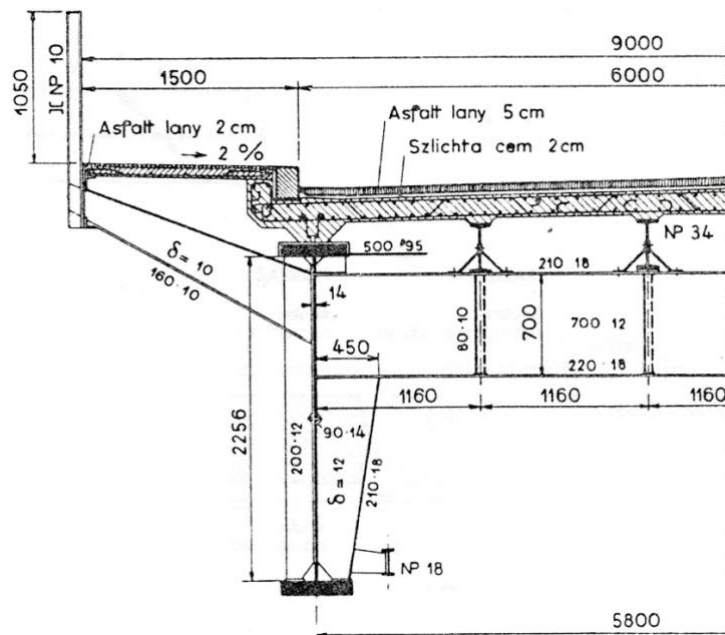
32 Autorzy opracowań [4,5] jako pracownicy Federalnego Instytutu Badań i Testowania Materiałów
 33 w Berlinie (BAM), sugerują jednocześnie wykorzystywać wszelkie informacje na temat wytrzymałości
 34 konstrukcji, które zostały wcześniej zbadane, w najlepszym wypadku uzyskane bezpośrednio z badanej
 35 konstrukcji, a w szczególności, gdy dane istotnie odbiegają od dzisiejszych standardów. Zaskakujące, że
 36 odwrotnie postąpiono w ekspertyzie mostu stalowego z 1885 r. na linii kolejowej Radom-Tomaszów
 37 Mazowiecki. Autor ekspertyzy uzyskał z badań mostu jako średnie wartości z próbek pasowych podłużnie
 38 i poprzecznie walcowanych, $R_{eH}=238$ MPa i $R_m=378$ MPa. Do analizy nośności mostu przyjął jednak wartość
 39 $R_{eH}=0,74 \cdot 235=174$ MPa, która: „gwarantuje maksymalny poziom bezpieczeństwa analizowanego obiektu”.
 40 Ostatecznie rozebrano most, a jego analizę materiałowo-wytrzymałościową przedstawiono w dwóch
 41 publikacjach zamieszczonych w czasopiśmie technicznych.

42 W drugim przypadku publikacji, autor BW jako recenzent, przeprowadził dokładną refutację treści
 43 artykułu, wykazał lapsus i zanegował jego wydrukowanie. Artykuł bezdyskusyjnie jednak wydrukowano.
 44 Rodzi się pytanie: dlaczego „tytułarny autor i recenzenci” oraz Redakcja, znając dokładnie zaistniałą
 45 sytuację, tak bezdyskusyjnie zdecydowali? Czy fakt ten nie kwalifikuje się do Księgi Rekordów Guinnessa?
 46 Według autorów artykułu wzorcową, priorytetową analizę projektowanych mostów przedstawili
 47 wykonawcy dwóch obiektów na rzece Sawie pod Zagrzebiem w Jugosławii, oddanych do eksploatacji
 48 w listopadzie 1939 rok. Były to obiekty przedstawione na **Rys. 1÷3** [7]:

- 49 a) most drogowy o długości 220 m (prześla: 54,6 + 2*55,075 + 54,6) ze stali St44,
 50 b) dwutorowy most kolejowy o długości 306m (prześla: 57,50 + 135,54 + 58,00 + 55,00). Dźwigary nośne
 51 nitowane ze stali St52, a wiatrownice, wieszaki i jezdnie spawane ze stali St37.



52
 53 **Rys. 1.** Most drogowy na Sawie pod Zagrzebiem [7]
 54 **Fig. 1.** Road bridge over the Sava River near Zagreb [7]



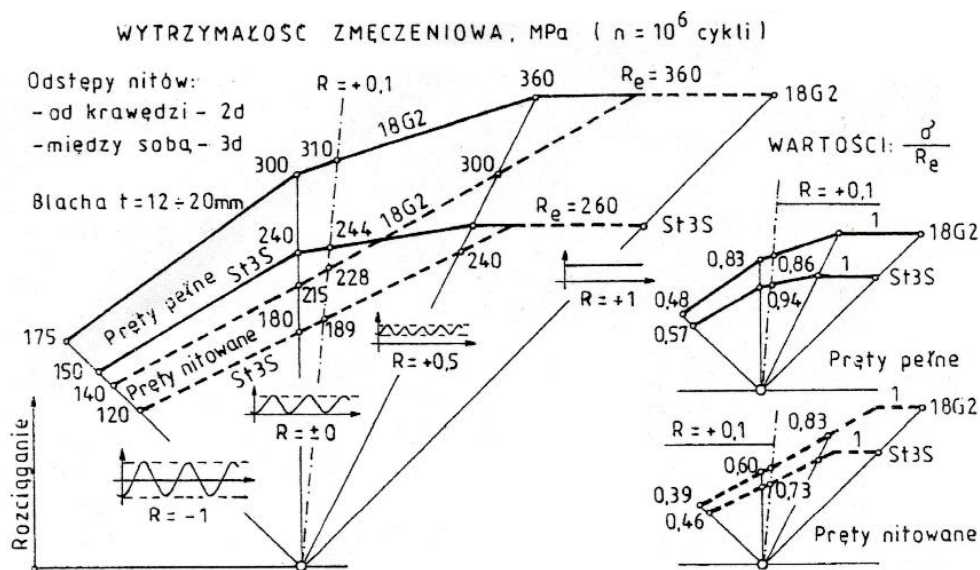
55
 56 **Rys. 2.** Przekrój poprzeczny mostu (1938)
 57 **Fig. 2.** Bridge cross-section (1938)



58

59 **Rys. 3.** Most kolejowy Hendrix Bridge na rzece Sava (1937) [7]

60 **Fig. 3.** Railway bridge Hendrix Bridge over the Sava River (1937) [7]



61

62 **Rys. 4.** Wytrzymałość zmęczeniowa prętów (1925)

63 **Fig. 4.** Fatigue strength of bars (1925)

64 Analizę przygotowawczą prowadzono przez 12 lat (1925-1937), a mosty wybudowano w ciągu 3 lat.
 65 W opracowaniu [7] szczegółowo omówiono: właściwości materiałowo-techniczne, ogólne założenia
 66 konstrukcyjne i szczegóły wykonawcze mostów. Godne uwagi jest: badanie prętów wyżarzanych, w stanie
 67 wolnym od naprężeń (620°C), badanych przy -16°C oraz normalizowanych (940°C). Badania zmęczeniowe
 68 według **Rys. 4**, przeprowadzono przy zróżnicowanych typach obciążeń, przy $R = -1; 0; +0,5; +1$ i liczbie zmian
 69 obciążenia $n = 10^6$ cykli, zgodnie z metodą EMPA. Łatwo zauważyć, że przy współczynniku amplitudy cyklu
 70 $R = +0,1$ wytrzymałość zmęczeniowa dla prętów pełnych jest od 30 do 35% większa od Z_{Tj} dla prętów
 71 nitowanych.

72 Należy żałować, że z uwagi na zróżnicowane wartości liczby cykli obciążenia nie można
 73 porównywać wartości z **Rys. 4** z wynikami uzyskanymi według normy EN ISO 5817: 2014 (Załącznik C)
 74 i przedstawionymi w pozycjach [2,4]. Według tej normy: „Wartość klasy zmęczenia FAT to zakres
 75 zmienności naprężeń $\Delta\sigma_c$ w odniesieniu do 2-milionowej liczby cykli N_c ustalonej przy 75-procentowej
 76 granicy tolerancji ufności średniej z 95-procentowym prawdopodobieństwem przetrwania”.
 77 Celem niniejszej pracy jest syntetyczne przedstawienie informacji związanych z zagadnieniem anormalnych
 78 odchyleń od ogólnej reguły, właściwościami stali i podanie aspektów wpływających na poprawną dalszą
 79 eksploatację historycznych mostów stalowych. Publikacja nie zastąpi porady eksperta w dziedzinie oceny
 80 ich trwałości, ale umożliwi przedyskutowanie problemu podczas ekspertyzy i może mieć wpływ na
 81 końcową ocenę stanu technicznego konstrukcji. Ostateczna ocena stali polega na stwierdzeniu czy w stanie
 82 poeksploatacyjnym spełnia ona jeszcze wymogi norm i przepisów branżowych? Niestety, często spotykamy

83 się z brakiem odpowiedniej wiedzy technicznej i technologicznej, szczególnie niezbędnej przy ocenie
84 konstrukcji niespełniających kryteriów 100% bezpieczeństwa [3,8].

85 Jest to problem światowy, a w odniesieniu do mostów skomplikowany ich starzeniem
86 funkcjonalnym oraz starzeniem strukturalnym stali. Istnieje potrzeba harmonizacji zróżnicowanych
87 procedur i ustanowienia ogólnych zaleceń ich bezpiecznej eksploatacji. Przydatnymi w tej analizie mogą być
88 informacje pozyskane z badań in situ starych obiektów oraz badań laboratoryjnych ich struktury. Artykuł
89 jest próbą wyciągnięcia wniosków z prowadzonych przez autorów wieloletnich badań wpływu starzenia na
90 trwałość tych konstrukcji [9,10].

91 **Właściwości stali starzonej mostów kolejowych**

92 Wszystkie analizowane mosty (około 40) wykonane zostały ze stali zlewnej w latach 1857-1983. Według
93 danych literaturowych prekursorem wprowadzania nowych gatunków stali konstrukcyjnej było hutnictwo
94 niemieckie. Profesor Rudolf Albrecht w [11] podaje, że stal zlewną zaczęto wprowadzać do budowy mostów
95 już w roku 1856. Fakt ten potwierdza literatura anglojęzyczna [12] i obecna [1,5]. Rozwój procesów
96 metalurgicznych (konwertory Bessemera i Thomasa oraz piece Siemens-Martin) przyczynił się do produkcji
97 nowych gatunków stali, szczególnie w drugiej połowie XIX wieku i na początku dwudziestego stulecia [4,5].
98 Uwzględniając ten fakt, w niniejszym opracowaniu analizę stali istniejących konstrukcji przeprowadzono
99 oddzielnie dla:

- 100 - mostów wybudowanych w drugiej połowie XIX wieku,
- 101 - dla obiektów z XX wieku.

102 Celem opracowania jest omówienie strukturalnych procesów degradacyjnych określających cechy
103 materiału tych konstrukcji w funkcji czasu ich eksploatacji. Badania materiałowe stali starych mostów
104 sprowadzają się zazwyczaj do określenia składu chemicznego, próby rozciągania i pomiarów pracy łamania.
105 Natomiast poziomem porównawczym zmian właściwości materiałowych jest porównanie ich właściwości
106 obecnych z właściwościami z okresu budowy obiektu, które uzyskujemy przez wyżarzanie normalizujące;
107 w artykule są to wartości ujęte w nawiasy. Próbki wygrzewamy w temperaturze 930 °C (gdy ilość węgla
108 $C < 0,26\%$) przez jedną godzinę i studzimy na powietrzu. Uzyskuje się w tym przypadku najmniejszą możliwą
109 wielkość ziarna i właściwości z okresu budowy obiektu [13].

110 Wyniki powyższych badań chemicznych i mechanicznych stali 9 mostów kolejowych; pięciu z XIX
111 wieku i czterech z XX wieku, przedstawiono w trzech poniższych tablicach I-III.

112 **Tablica I** Skład chemiczny stali analizowanych 9 mostów

113 **Tab. I** Chemical composition of the analyzed steel 9 bridges

Dane zbiorcze								
Okres	Lata	Liczba mostów	Pierwiastki chem. wag. %					
			C	Mn	Si	P	S	Cu
1	2	3	4	5	6	7	8	9
XIX	1875	5	0,016	0,319	0,000	0,026	0,016	0,029
wiek	-1890		-0,258	-1,409	-0,803	-0,088	-0,043	-0,459
XX	1920	4	0,084	0,390	0,006	0,006	0,011	0,039
wiek	-1983		-0,150	-0,676	-0,169	-0,045	-0,034	-0,156

114 Podany w **Tab. I** skład chemiczny analizowanych mostów wykazuje duży rozrzut zawartości
115 poszczególnych pierwiastków. Zawartości trzech podstawowych pierwiastków wynoszą: węgla od 0,016 do
116 około 0,26%, manganu od 0,32 do 1,41%, a krzemu od 0,00 do 0,803%. Jednocześnie fosforu i siarki,
117 z wyjątkiem jednego przypadku (0,09%), jest mniej od 0,05%, to jest wartości uważanej za szkodliwą [14].
118 W skrajnych przypadkach, zawartość fosforu wynosi 0,09%, a siarki tylko 0,043%.

119 Do niedawna ewenementem mostowym był dla autorów obiekt kolejowy ze stali zgrzewnej o śladowej,
120 nieuchwytej pomiarami zawartości węgla, wybudowany w Czechosłowacji w roku 1852. W roku 2020
121 niespodzianka, stwierdziliśmy podobną stal w dwóch mostach. Właściwości tych stali przedstawiliśmy
122 w **Tab. IV**. Według [14] wraz ze zmniejszaniem zawartości węgla w stali następuje wzrost ilości tlenu
123 podczas jej wytwarzania. Dlatego do kąpielii metalowej należy dodawać więcej Al i Si, powodujących wzrost
124 zawartości wtrąceń niemetalicznych. Są to tlenki aluminium, krzemiany i spinele, w skład których wchodzi
125 SiO_2 , Al_2O_3 , MnO oraz pewne ilości FeO i CaO , MgO , TiO_2 . Wydłużanie się wtrąceń niemetalicznych podczas

126 walcowania powoduje anizotropię ciągliwości i uderności, czyli różne własności fizyczne w różnych
127 kierunkach.

128 **Tab. II** Wyniki badań mechanicznych i pracy łamania KV stali 5 mostów z XIX wieku

129 **Table II** The results of mechanical tests and impact toughness KV of steel from 5 bridges from the XIX century

Nr mostu	Rok budowy	C %	R _{eH} MPa	R _m MPa	A ₅ %	Praca łamania KV, (J)				
						-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1875	0,258	343 (337)	548 (543)	27 (25)	11,9 (25,9)	15,9 (35,7)	28,6 (48,0)	41,8 (55,4)	53,9 (66,3)
2	1875	0,147	376 (365)	558 (554)	28 (28)	10,6 (57,1)	19,1 (76,2)	25,6 (124,6)	36,8 (133,6)	47,2 (140,5)
3	1882	0,030	305 (265)	389 (376)	28 (26)	7,4 (24,2)	- (-)	10,9 (63,4)	- (-)	47,8 (230,6)
4	1887	0,028	252 (260)	381 (388)	29 (39)	3,9 (8,5)	4,6 (32,9)	5,5 (39,6)	8,2 (60,7)	12,0 (116,2)
		0,037	259 (285)	387 (408)	38 (39)	3,8 (12,6)	5,8 (19,7)	6,3 (37,7)	9,0 (65,4)	13,9 (107,4)
5	1890	0,016	220 (258)	359 (373)	34 (35)	5,3 (14,4)	8,3 (17,3)	10,7 (52,1)	13,0 (86,7)	28,2 (283,3)
Dane zbiorcze										
\sum_1^5	1875 -1890	0,016 -0,258	220 -376	359 -558	27 -38	3,8 -57,1	4,6 -19,1	5,5 -28,6	8,2 -41,8	12,0 -53,9
$\sum_{(1)}^{(5)}$	1875 -1890	(0,016) (-0,258)	(258) -(365)	(373) (554)	(25) -(39)	(8,5) (57,1)	(17,3) -(76,2)	(37,7) -(124,6)	(55,4) (133,6)	(66,3) (283,3)

130 **Tab. III** Wyniki badań mechanicznych i pracy łamania KV stali 4 mostów z XX wieku

131 **Table III** The results of mechanical tests and impact toughness KV of steel from 4 bridges from the XX century

Nr mostu	Rok budowy	C %	R _{eH} MPa	R _m MPa	R _{eH} /R _m	Praca łamania KV w J				
						-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	1925	0,150	244 (325)	376 (448)	0,65 (0,72)	5,6 (6,5)	7,2 (13,0)	12,1 (22,7)	24,7 (33,4)	37,7 (57,0)
6	1935	0,150	268 (289)	423 (440)	0,63 (0,66)	8,2 (21,4)	9,2 (32,4)	13,9 (41,3)	22,1 (62,8)	27,7 (87,4)
6	1938	0,084	220 (275)	356 (376)	0,62 (0,73)	9,8 (185,0)	13,6 (245,9)	15,8 (212,7)	28,4 (262,3)	56,0 (244,4)
6	1983	0,140	286 (328)	430 (456)	0,67 (0,72)	21,3 (130,6)	25,8 (137,0)	28,6 (160,0)	52,0 (164,8)	132,6 (177,5)
Dane zbiorcze										
\sum_6^9	1825 -1983	0,084 -0,150	220 -286	356 -430	0,62 -0,67	5,6 -21,3	7,2 -25,8	12,1 -28,6	22,1 -52,0	27,7 -132,6
$\sum_{(6)}^{(9)}$	1925 -1983	(0,084) -(0,150)	(275) -(328)	(376) -(456)	(0,66) -(0,73)	(6,5) -(185,0)	(13,0) -(245,9)	(160,0) -(212,7)	(33,4) -(262,3)	(57,0) -(244,4)

132 **Tab. IV.** Dane chemiczne i mechaniczne stali mostów o śladowej zawartości C

133 **Table IV.** Chemical and mechanical data of bridge steels with a trace content of C

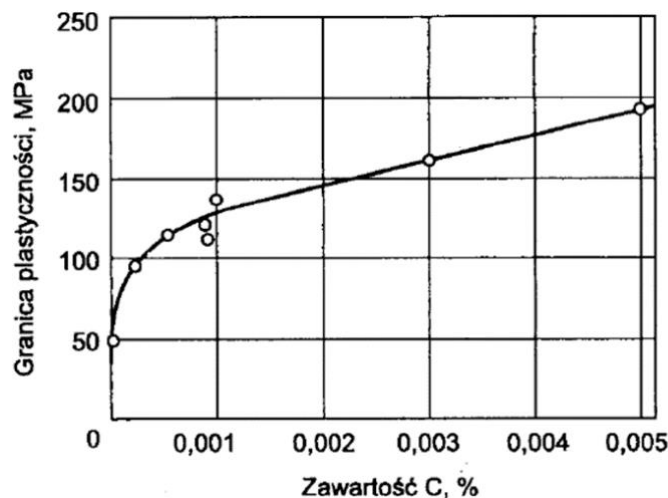
Nr	Rok Budowy	Lokalizacja i przeznaczenie	Elem. (stal)	Skład chem, wag. %					R _{eH} MPa	R _m MPa
				C	Mn	Si	P	S		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1852	Duisburg (m. kolejowy)	- (zgrz.)	0,000	0,060	0,170	0,156	0,030	229	347
2*	1908	Poznań-Bydgoszcz (m. kol. km. 103,78)	L100*12 (zlew.)	0,0042	0,529	0,035	0,060	0,019	240	375

3	1927	Szczecin (wiadukt drogowy) ul. Druckiego-Lubeckiego	C280 L100*11 (zlew.)	0,000 0,000	0,396 0,536	0,022 0,205	0,025 0,014	0,023 0,030	320 334	421 428
---	------	---	----------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	------------	------------

* wartości pierwiastków z kolejnego napawania: 4, 6 i 12 (zawartości C= 0,0053 ÷ 0,0018 ÷ 0,0055%, C_{śred}=0,0042%)

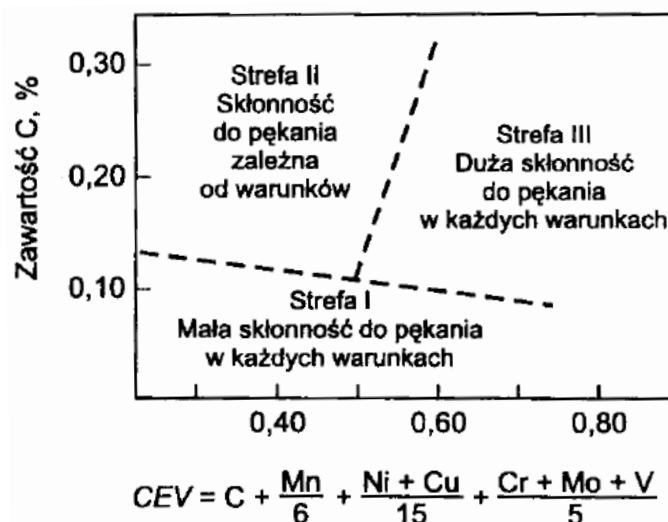
134 Wraz ze wzrostem ułamka objętości wtrąceń, praca łamania i ciągliwość stali maleją wykładniczo.
135 Wydłużenie próbki w próbie rozciągania jest największe, jeżeli kierunek wydłużenia wtrąceń pokrywa się
136 z osią próbki wytrzymałościowej, natomiast najmniejsze, jeżeli wtrącenia mają kształt płytek i są prostopadłe
137 do osi próbki. Według piśmiennictwa technicznego [14,15], aktualny rozwój technologii umożliwia
138 wytworzenie stali o znikomej zawartości wtrąceń z możliwością regulacji ich kształtu (czysta stal), najlepiej
139 kształtu globularnego, który powoduje najmniejszy wzrost naprężeń 2,06 razy niezależnie od średnicy.

140 Węgiel jest podstawowym składnikiem stali; od jego zawartości zależy mikrostruktura i właściwości.
141 Wytrzymałość i twardość rosną ze wzrostem zawartości węgla, natomiast ciągliwość, odporność na pękanie,
142 spawalność i skrawalność – maleją (Tab. IV, Rys. 5,6). Węgiel najmocniej zwiększa wytrzymałość i twardość.
143 Wpływ zawartości węgla rozpuszczonego w żelazie na granicę plastyczności ferrytu przedstawiono na rys.
144 5, a wpływ zawartości węgla i równoważnika CEV (ang. Carbon Equivalent) do tworzenia się pęknięć w SWC
145 (Strefa Wpływu Ciepła) na Rys. 6, według [14].



146 Rys. 5. Wpływ niskiej zawartości węgla na granicę plastyczności żelaza [14]
147

148 Fig. 5. The influence of a very low carbon content on the yield point of iron [14]

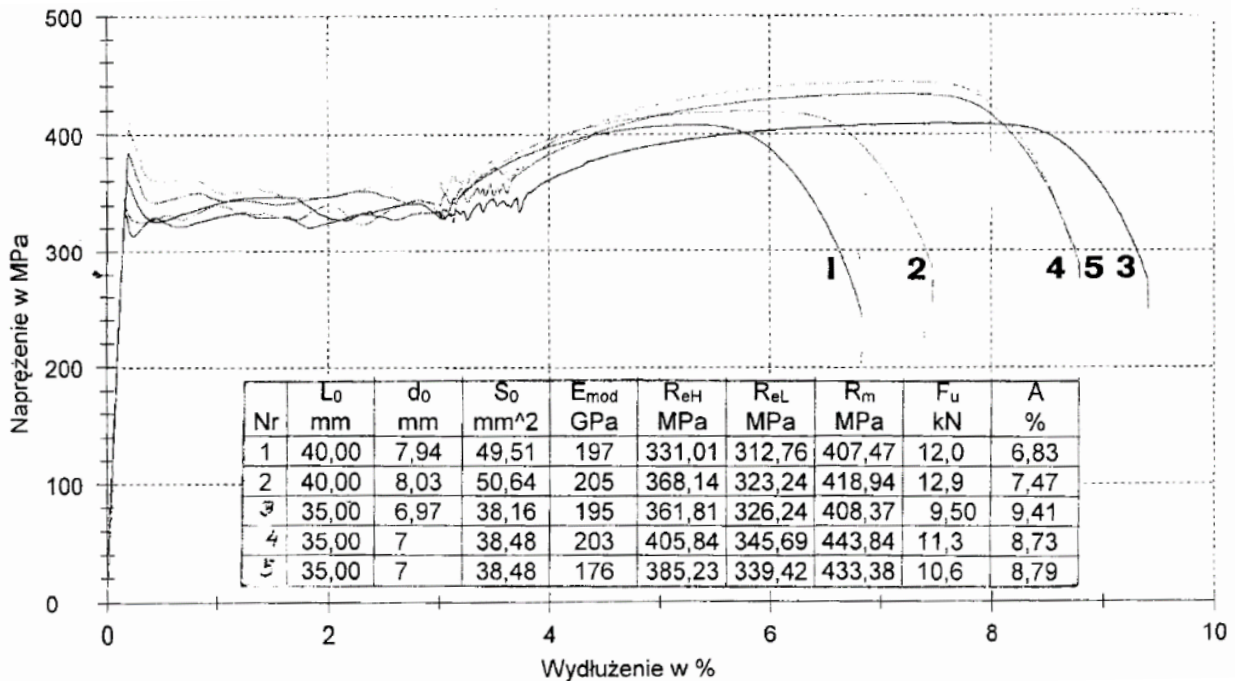


149 Rys. 6. Wpływ zawartości C i CEV na tworzenie się pęknięć w SWC [14]
150

151 Fig. 6. The influence of C and CEV content on cracks formation in the HAZ [14]

152 Z omawianą wcześniej właściwością kierunkowości wydłużenia stali, o mikrostrukturze
153 ferrytyczno-perlitycznej podczas statycznego rozciągania próbek, spotkali się autorzy podczas badań
154 mostu kolejowego na linii Tczew-Kostrzyn [16]. Uzyskano bardzo małą wartość wydłużenia procentowego po
155 rozerwaniu wszystkich badanych próbek, A5=(σ /l σ) 100% wyniosło od 6,83 do 9,41% - Rys. 7. Dotychczasowa norma

156 mostowa PN-82/S-1052 dla stali wszystkich gatunków zalecała wartości A5 większe od 22%, a norma PN-EN 10025-2:
 157 2004 dla stali o $t \geq 3\text{mm}$ i $\leq 250\text{mm}$ przewiduje minimalne wydłużenie procentowe po rozerwaniu w granicach $26 \div 17$
 158 % w zależności od gatunku materiału. Norma PN-54/H-84021 dla stali gatunku St37S przewidywała wartość
 159 charakterystyczną A5= 25%.



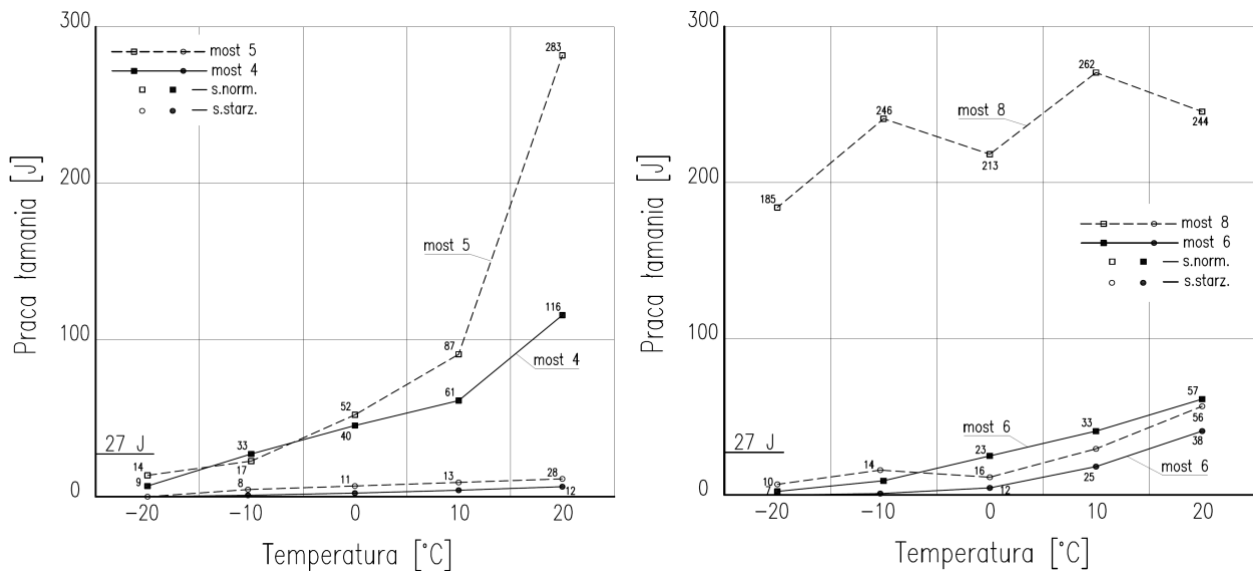
160 **Rys. 7.** Wyniki rozciągania próbek stali z dźwigara mostu [16]
 161 **Fig. 7.** The results of tensile tests of samples from bridge girder [16]

162 To zagadnienie dokładnie wyjaśnia prof. Marek Blicharski w publikacji [14], przy opisie kierunkowej
 163 właściwości stali. Niekiedy ferryt i perlit grupują się w pasma równoległe do kierunku walcowania
 164 i położone przemiennie. Tworzenie mikrostruktury pasmowej jest spowodowane segregacją
 165 międzydendryczną manganu podczas krystalizacji stali. Pasmowość mocno wpływa na właściwości stali
 166 jedynie w kierunku prostopadłym do pasm, w kierunku normalnym. Jest to przyczyna anizotropii własności
 167 stali, podobnie jak wtrącenia niemetaliczne. Wpływ ten jest nieznaczny przy wtrąceniach kształtu kulistego,
 168 o czym świadczą zalecenia norm PN-EN 10025-2: 2004 przewidujące dla stali gatunku S275 minimalne
 169 wydłużenie A5= 23% dla $t \geq 3\text{mm}$ i $\leq 40\text{mm}$

170 Normalizacja stali

171 Według autorów w sposób najbardziej subiektywny, przekonujący o wielkości starzenia strukturalnego
 172 stali jest symulacja (udawanie) wyjściowej budowy materiału za pomocą wyżarzania normalizującego
 173 [13÷15]. W tym celu wygrzewa się próbki w temperaturze 930 °C przez jedną godzinę i studzi w powietrzu.
 174 Uzyskuje się w tym przypadku najlepsze hutnicze właściwości stali, z okresu budowy obiektu. Stali
 175 o najmniejszej możliwej wielkości ziarna, zwiększającej granicę plastyczności i obniżającej temperaturę
 176 przejścia w stan kruchości, szacowanej metodą udarności. Próba udarności służy do klasyfikacji stali przy
 177 odbiorze, jest to próba jakościowa. Wyników badań udarności, w przeciwieństwie do R_e i R_m, nie można
 178 uwzględnić w obliczeniach wytrzymałościowych. Badania udarności służą wyłącznie do porównania
 179 odporności różnych gatunków stali na pęknięcia – tablice II i III oraz **Rys. 8.**

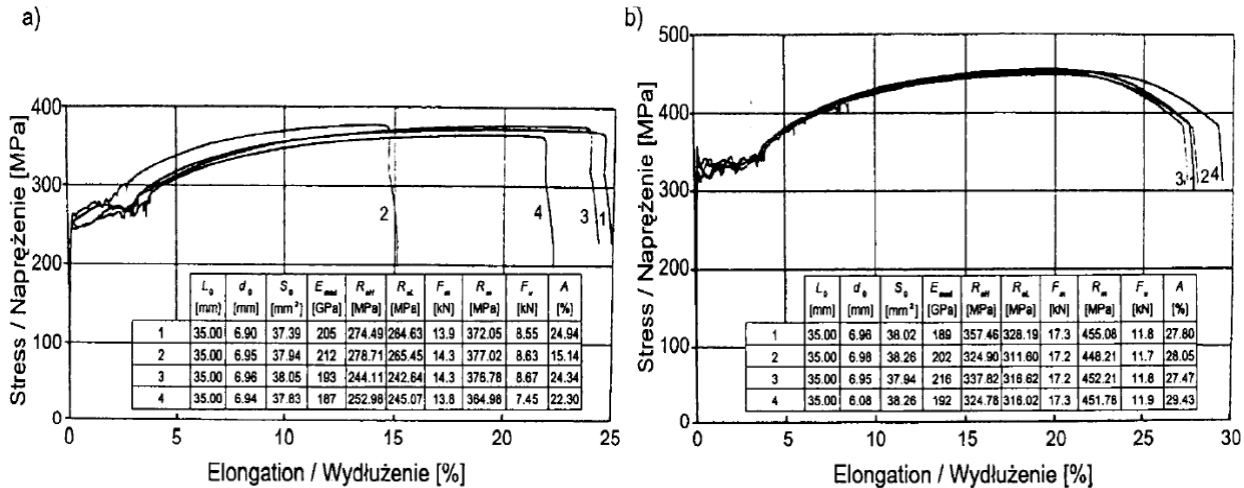
180 Na Rys. 8. przedstawiono wartości pracy łamania KV, w pięciu zakresach temperatury, ograniczone
 181 każdorazowo do dwóch skrajnych mostów z XIX i XX wieku. Dla mostów 4 i 6 o najmniejszym starzeniu
 182 i dla mostów 5, 8 o największym starzeniu. Zaskakująca regularność starzenia występuje w stali gatunku
 183 St37-21 mostu nr 8. Uwaga ta dotyczy w szczególności temperatur ujemnych dla tego mostu. Nastąpiło 18
 184 krotne zmniejszenie wartości KV w ciągu 76 lat jego eksploatacji.
 185



186 Rys. 8. Udarność stali: a) mostów 4 i 5 z XIX wieku, b) mostów 6 i 8 z XX wieku.
 187 Fig. 8 Impact toughness: a) bridges 4 and 5 from the XIX century, b) bridges 6 and 8 from the XX century
 188

189 **Podsumowanie**

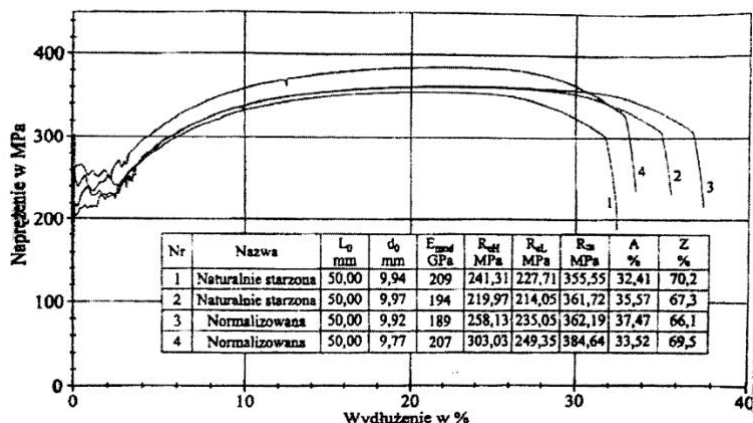
190 Wyniki badań wartości R_{eH} i R_m , w Tab. II i III wykazały, że efekt starzenia samorzutnego jest znaczny
 191 w stalach zlewnych o małej zawartości węgla (kol. 3), mniejszej niż 0,10%. Stopień i szybkość starzenia są
 192 ważne dla każdej stali, nawet w zakresie tego samego gatunku (Rys. 9). Nigdy jednak badacze nie uzyskali
 193 wartości niższej niż $R_{eH} = 220$ MPa. Taką też wartość $R_{eH} = 220$ MPa i $R_m = 320 + 380$ MPa zalecił przyjmować
 194 (bez konieczności badań) Międzynarodowy Związek Kolei UIC już w roku 1986 [17]. Słusznie również
 195 Eurokod 3 (EN 1993-1-10: 2007) zalecił najniższą wartość pracy łamania $KV \geq 27$ J stosować w doborze stali
 196 na nowe konstrukcje, a nie stosować jej w konstrukcjach użytkowanych (por. Rys. 8).



197 Rys. 9. Wykres rozciągania stali (C=0,025 %) mostu kolejowego z 1873 r. na linii 353, a) stal starzona, b) stal
 198 normalizowana
 199 Fig. 9. Tensile charts of steel (C= 0,025 %) of railway bridge from 1873 on line 353, a) aged steel, b) normalized steel
 200

201 „Rekordziści amerykańscy” [18] dla stali S235JR uzyskali wartości $R_{eH} = 340$ MPa i jej zmniejszenie w wyniku
 202 starzenia do $R_e = 235$ MPa, czyli o 30,9 %. Autorzy niniejszego artykułu wpływ maksymalnego starzenia stali
 203 stwierdzili w moście na linii kolejowej nr 353, nad przesmykiem Zbiornika Pakowskiego, zgodnie z rys. 9.
 204 Wartość granicy plastyczności uległa zmniejszeniu z wartości $R_{eH} = 325$ MPa do wartości $R_{eH} = 253$ MPa, czyli
 205 o 22,2 %. W pozostałych przypadkach wartości te były mniejsze – por. rys. 10. Średnio, według badań
 206 własnych (tabl. II i III, kol. 4), eksploatacyjny spadek wartości R_{eH} w stalach omawianych mostów ma wartość
 207 32,8 MPa, tj. około 15 % wartości pierwotnej.

208 Taką też wartość R_{eH} ma stal ($C=0,016\%$) mostu nr 5 z 1890 r., usytuowanego na linii nr 3 Warszawa-
 209 Kunowice w km 26,806. Uzyskane wartości $R_{eH}=258$ i 220 MPa pozwalają oszacować zmniejszenie granicy
 210 plastyczności, w okresie dotychczasowej eksploatacji, o 38 MPa, które stanowi $14,7\%$ wartości R_{eH} próbek
 211 normalizowanych.



212 Rys. 10. Wykres rozciągania stali ($C=0,016\%$) mostu nr 5
 213 Fig. 10. Tensile charts of steel ($C=0,016\%$) of bridge no 5

214 **Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

215 Literatura

- 216
- 217 1. Wiśniewski D.F.; Casas J.R.; Ghosn M. Codes for Safety Assessment of Existing Bridges – Current State and
 218 Further Development. *Structural Engineering International*, **2012**, Vol. 22(4).
- 219 2. Pipinato A. (editor) *Innovative Bridge Design Handbook. Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Elsevier Inc.,
 220 Amsterdam-Tokyo **2016**.
- 221 3. Wichtowski B.; Konecki K. Kontrowersje dotyczące oceny trwałości historycznych stalowych mostów kolejowych,
 222 *Inżynieria i Budownictwo*, **2021**, Vol. 11-12.
- 223 4. Kühn B. et al. Assessment of existing steel structures: Recommendations for estimation of remaining fatigue life.
 224 JRC Scientific and Technical reports. Editors: Sedlacek, et al. First Edition **2008**, EUR 23252 EN, ISSN 1018-5593,
 225 JRC 43401.
- 226 5. Helmerich R.; Kühn B.; Nussbaumer A. Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the
 227 remaining fatigue life. *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, **2006**.
- 228 6. JCSS (Joint Committee on Structural Safety). *Probabilistic Assessment of Existing Structures*, **2001**.
- 229 7. Ros M. Dwa nowe godne uwagi mosty w Jugosławii. *Polskie Archiwum Techniczne w Szwajcarii*, zeszyt 2.
 230 Zurych **1944**.
- 231 8. Wińcza M. Analfabetyzm techniczny – rzeczywistość, czy fikcja (analiza problemu). *Przegląd Spawalnictwa*. Vol.
 232 LXXX, Nr 6/2008.
- 233 9. Wichtowski B. Badania parametrów mechanicznych stali w istniejących konstrukcjach stalowych. XXXI
 234 Ogólnopolskie WPPK, Szczyrk **2016**.
- 235 10. Wichtowski B. Wytrzymałość zmęczeniowa spawanych złączy doczołowych w stalowych mostach kolejowych.
 236 *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej* nr 572. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin **2002**.
- 237 11. Albrecht R.: *Richtlinien zum Brückenbau*. Band 1. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin **1975**.
- 238 12. Bates W.: *Historical structural steelwork handbook*. The British Constructional Steelwork Association Limited,
 239 London **1991**.
- 240 13. Butnicki S. *Spawalność i kruchość stali*. WNT, Warszawa **1975**.
- 241 14. Blicharski M. *Inżynieria materiałowa. Stal*. WNT, Warszawa **2011**.
- 242 15. Tasak E. *Spawalność stali*. FOTOBIT, Kraków **2002**.
- 243 16. Wichtowski B.; Woźniak Z. Badania diagnostyczne mostu stalowego przez rzekę Drawę na linii kolejowej nr 203.
 244 *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11-12/2021.
- 245 17. Madaj A. Wołowicki W.: *Budowa i utrzymanie mostów*. WKiK, Warszawa **1995**.
- 246 18. Bakar A.A.; Dow R.S. *Collision and Grouping of Ships* Newcastle University, **2010**.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).