

DOI: <https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v96.1154.16-24>

Review

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

Anomalne właściwości stali starych mostów kolejowych w świetle badań diagnostycznych

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

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

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

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

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.

Słowa kluczowe: właściwości stali; stare mosty kolejowe

Literaturowe wymagania jakościowe stali starych mostów

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

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

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

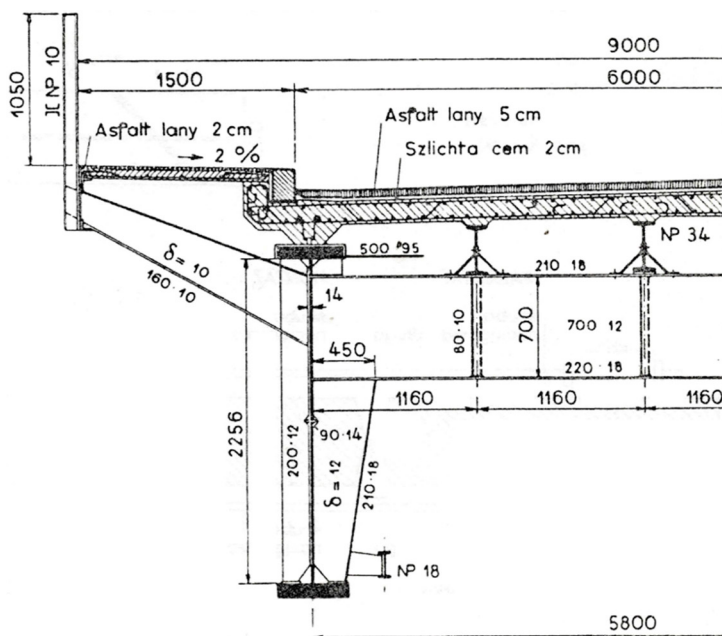
Autorzy opracowań [4,5] jako pracownicy Federalnego Instytutu Badań i Testowania Materiałów w Berlinie (BAM), sugerują jednocześnie wykorzystywać wszelkie informacje na temat wytrzymałości konstrukcji, które zostały wcześniej zbadane, w najlepszym wypadku uzyskane bezpośrednio z badanej konstrukcji,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

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

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



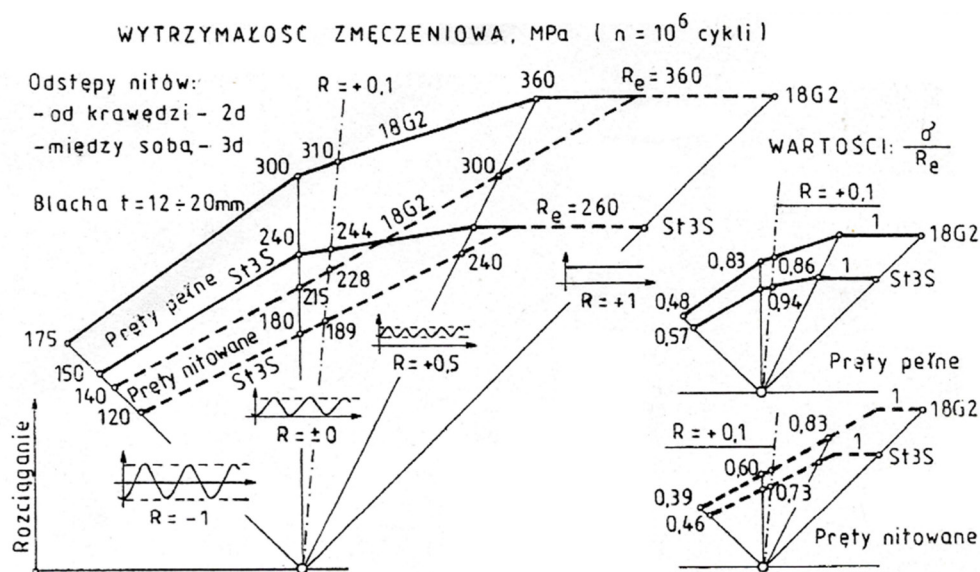
Rys. 1. Most drogowy na Sawie pod Zagrzebiem [7]
Fig. 1. Road bridge over the Sava River near Zagreb [7]



Rys. 2. Przekrój poprzeczny mostu (1938)
Fig. 2. Bridge cross-section (1938)



Rys. 3. Most kolejowy Hendrix Bridge na rzece Sava (1937) [7]
 Fig. 3. Railway bridge Hendrix Bridge over the Sava River (1937) [7]



Rys. 4. Wytrzymałość zmęczeniowa prętów (1925)
 Fig. 4. Fatigue strength of bars (1925)

Analizę przygotowawczą prowadzono przez 12 lat (1925-1937), a mosty wybudowano w ciągu 3 lat. W opracowaniu [7] szczegółowo omówiono: właściwości materiałowo-techniczne, ogólne założenia konstrukcyjne i szczegóły wykonawcze mostów. Godne uwagi jest: badanie prętów wyżarzanych, w stanie wolnym od naprężeń (620 °C), badanych przy -16 °C oraz normalizowanych (940 °C). Badania zmęczeniowe według Rys. 4, przeprowadzono przy zróżnicowanych typach obciążeń, przy $R = -1; 0; +0,5; +1$ i liczbie zmian obciążenia $n = 10^6$ cykli, zgodnie z metodą EMPA. Łatwo zauważyć, że przy współczynniku amplitudy cyklu $R = +0,1$ wytrzymałość zmęczeniowa dla prętów pełnych jest od 30 do 35% większa od Z_{R1} dla prętów nitowanych.

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

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

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

Właściwości stali starzonej mostów kolejowych

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

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

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

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

Tablica I Skład chemiczny stali analizowanych 9 mostów

Tab. I Chemical composition of the analyzed steel 9 bridges

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

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

Do niedawna ewenementem mostowym był dla autorów obiekt kolejowy ze stali zgrzewnej o śladowej, nieuchwytny pomiarami zawartości węgla, wybudowany w Czechosłowacji w roku 1852. W roku 2020 niespodzianka, stwierdziliśmy podobną stal w dwóch mostach. Właściwości tych stali przedstawiliśmy w **Tab. IV**. Według [14] wraz ze zmniejszaniem zawartości węgla w stali następuje wzrost ilości tlenu podczas jej wytwarzania. Dlatego do kąpieli metalowej należy dodawać więcej Al i Si, powodujących wzrost zawartości wtrąceń niemetalicznych. Są to tlenki aluminium, krzemiany i spinele, w skład których wchodzi SiO_2 , Al_2O_3 , MnO oraz pewne ilości FeO i CaO , MgO , TiO_2 . Wydłużanie się wtrąceń niemetalicznych podczas walcowania powoduje anizotropię ciągliwości i udarności, czyli różne własności fizyczne w różnych kierunkach.

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

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 %	ReH MPa	Rm MPa	A5 %	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) -	(258) -	(373) -	(25) -	(8,5) -	(17,3) -	(37,7) -	(55,4) -	(66,3) -
		(0,258)	(365)	(554)	(39)	(57,1)	(76,2)	(124,6)	(133,6)	(283,3)

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

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 %	ReH MPa	Rm MPa	ReH/Rm	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)

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

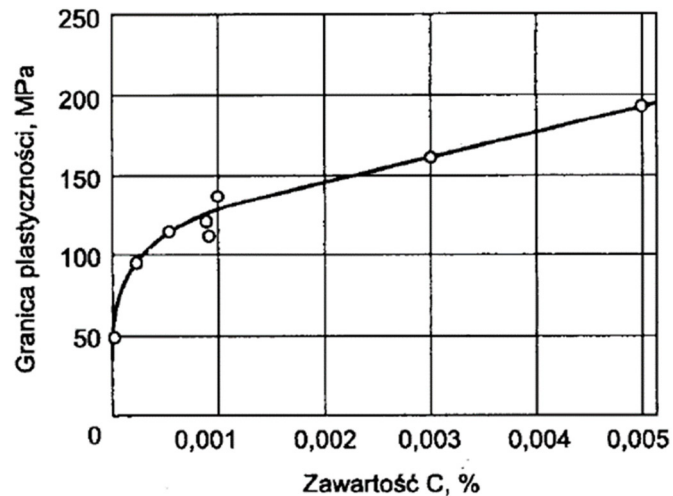
Table IV. Chemical and mechanical data of bridge steels with a trace content of C

Nr	Rok Budowy	Lokalizacja i przeznaczenie	Elem. (stal)	Skład chem, wag. %					ReH MPa	Rm 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	0,000	0,396	0,022	0,025	0,023	320	421
			L100*11 (zlew.)	0,000	0,536	0,205	0,014	0,030	334	428

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

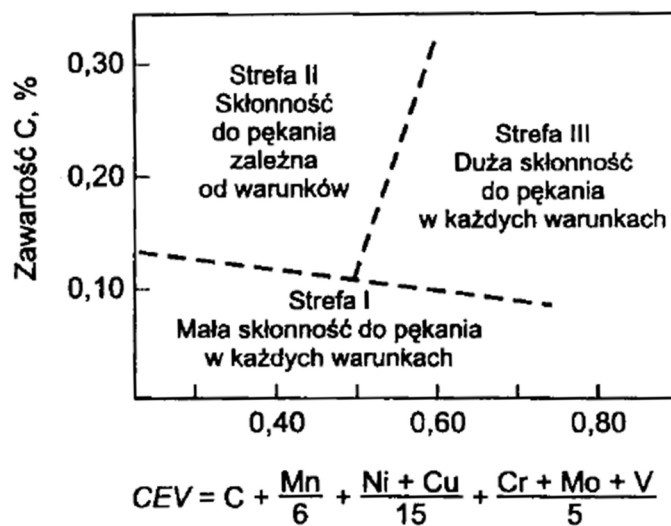
Wraz ze wzrostem ułamka objętości wtrąceń, praca łamania i ciągliwość stali maleją wykładniczo. Wydłużenie próbki w próbie rozciągania jest największe, jeżeli kierunek wydłużenia wtrąceń pokrywa się z osią próbki wytrzymałościowej, natomiast najmniejsze, jeżeli wtrącenia mają kształt płytek i są prostopadłe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

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



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

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

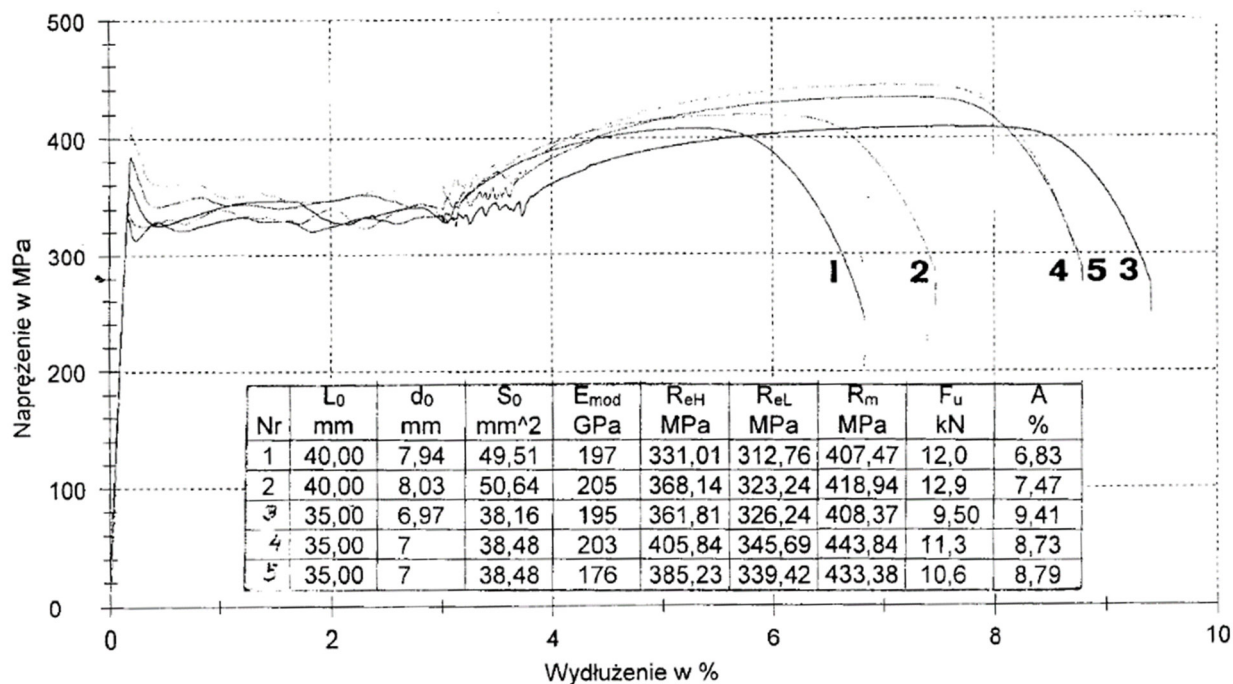


Rys. 6. Wpływ zawartości C i CEV na tworzenie się pęknięć w SWC [14]

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

Z omawianą wcześniej właściwością kierunkowości wydłużenia stali, o mikrostrukturze ferrytyczno-perlitycznej podczas statycznego rozciągania próbek, spotkali się autorzy podczas badań mostu kolejowego na linii Tczew-Kostrzyn [16]. Uzyskano bardzo małą wartość wydłużenia procentowego po rozerwaniu wszystkich badanych próbek, $A5=(\Delta l/l_0) 100\%$ wyniosło od 6,83 do 9,41% - Rys. 7. Dotychczasowa norma mostowa PN-82/S-1052 dla stali wszystkich gatunków zalecała wartości $A5$ większe od 22%, a norma PN-EN 10025-2: 2004 dla stali o $t \geq 3\text{mm}$ i $\leq 250\text{mm}$ przewiduje minimalne wydłużenie procentowe po rozerwaniu w granicach

26 ÷ 17 % w zależności od gatunku materiału. Norma PN-54/H-84021 dla stali gatunku St37S przewidywała wartość charakterystyczną A5= 25%.



Rys. 7. Wyniki rozciągania próbek stali z dźwigara mostu [16]

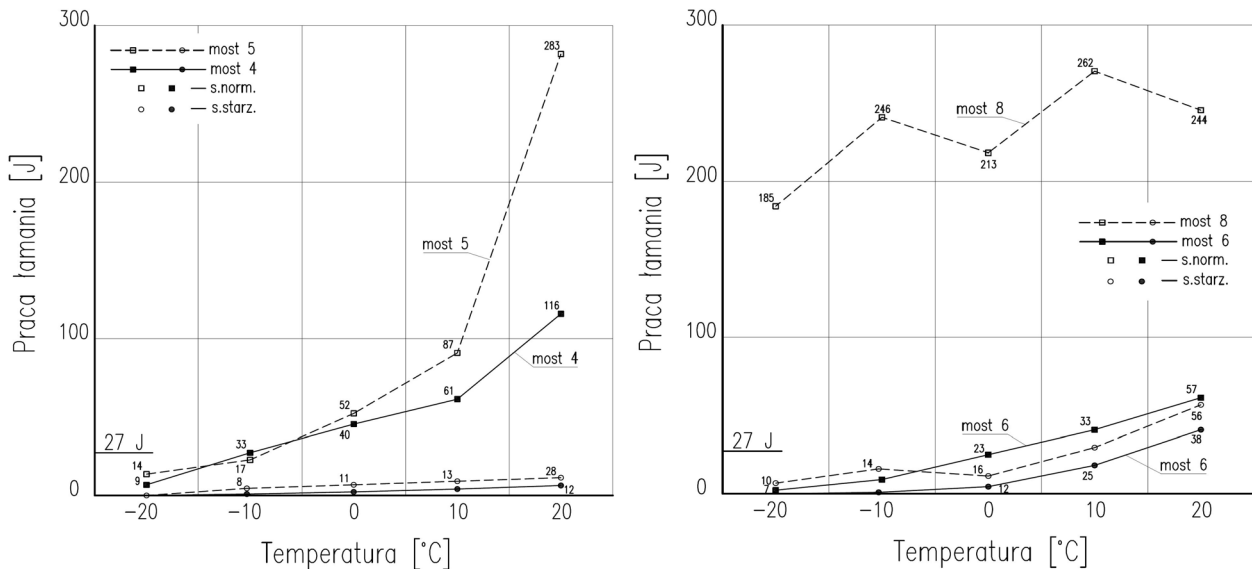
Fig. 7. The results of tensile tests of samples from bridge girder [16]

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

Normalizacja stali

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

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

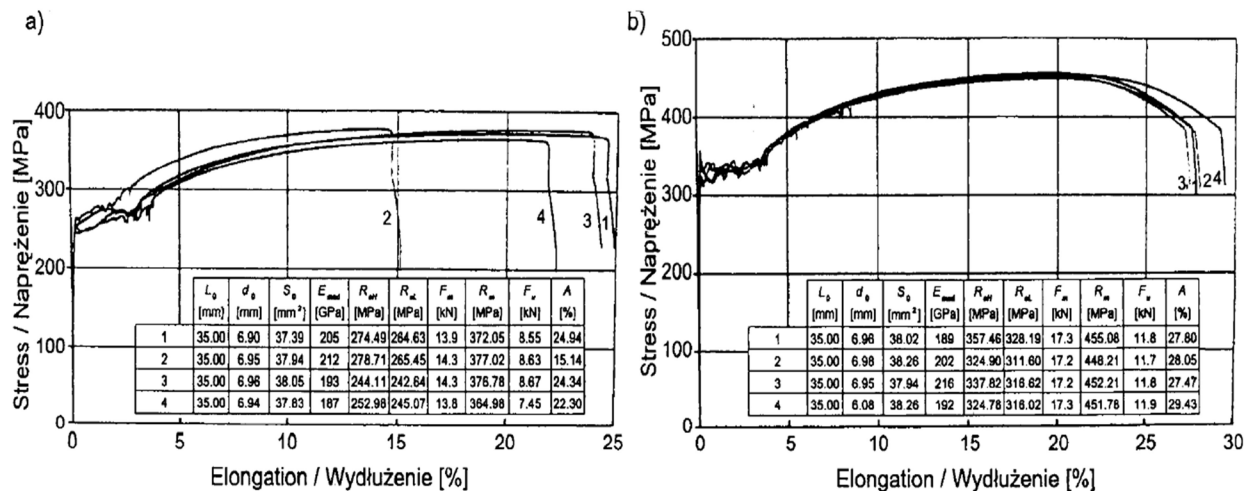


Rys. 8. Udarność stali: a) mostów 4 i 5 z XIX wieku, b) mostów 6 i 8 z XX wieku.

Fig. 8 Impact toughness: a) bridges 4 and 5 from the XIX century, b) bridges 6 and 8 from the XX century

Podsumowanie

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

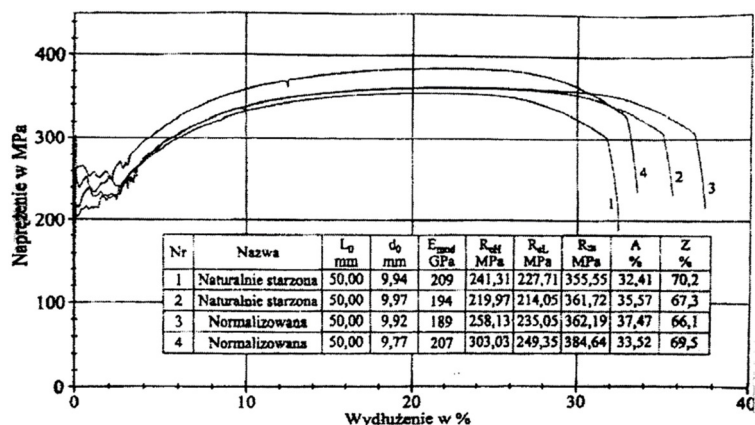


Rys. 9. Wykres rozciągania stali ($C=0,025$ %) mostu kolejowego z 1873 r. na linii 353, a) stal starzona, b) stal normalizowana

Fig. 9. Tensile charts of steel ($C=0,025$ %) of railway bridge from 1873 on line 353, a) aged steel, b) normalized steel

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

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



Rys. 10. Wykres rozciągania stali ($C=0,016\%$) mostu nr 5

Fig. 10. Tensile charts of steel ($C=0,016\%$) of bridge no 5

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

Literatura

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