



BADANIA STALI DWÓCH MOSTÓW KRATOWNICOWYCH NA LINII KOLEJOWEJ NR 273

JANUSZ HOŁOWATY, *janusz.holowaty@zut.edu.pl*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

BERNARD WICHTOWSKI
Projektowanie i Ekspertyzy Budowlane, Szczecin

Streszczenie: Długotrwałe użytkowanie konstrukcji stalowych obiektów mostowych powoduje niekorzystne zmiany mechanicznych właściwości stali. Zagadnienie to przedstawiono na przykładzie badania próbek materiału pobranego z dźwigarów dwóch mostów stalowych oddanych do eksploatacji w roku 1875 i przebudowywanych w latach 1970 i 1983/84. Wykonano badania chemiczne i mechaniczne dwóch gatunków stali: zlewnej z roku 1875 i niskowęglowej gatunku St3M z lat 1970 i 1983/84.

Słowa kluczowe: most kolejowy, most kratowy, stal konstrukcyjna, starzenie stali, trwałość.

1. Wprowadzenie

Według danych historycznych burzliwy rozwój sieci kolejowej trwał od początku XIX wieku do połowy XX wieku. Efektem tego jest fakt, że kolejowe obiekty mostowe to w większości konstrukcje zaawansowane wiekowo. Spółka PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. utrzymuje 32 229 obiektów inżynierskich, w tym 7430 mostów i wiaduktów o długości eksploatacyjnej ponad 234 km, z których w chwili obecnej 54,3% ma ponad 100 lat, a 12,3% od 71 do 100 lat [1]. Autorzy referatu w artykule [2] przedstawili właściwości materiałowe stali 16 mostów kolejowych wybudowanych w drugiej połowie XIX wieku, w latach 1875–1890. W zdecydowanej większości mosty te są w stanie bezpiecznie przenosić obciążenia użytkowe bez konieczności wzmacniania. Zawdzięczamy to faktowi stosowania przy ich projektowaniu większego współczynnika bezpieczeństwa niż obecnie przyjmowanego w metodzie stanów granicznych. Potwierdzeniem tego wniosku są wyniki badań zmęzeniowych mostów eksploatowanych, które omówiono w poz. [3, 4]. Jednocześnie występujące w istniejących konstrukcjach uszkodzenia i zmiany właściwości materiału mogą nie tylko zniwelować poziom tych zapasów, ale też doprowadzić do stanu, w którym stwierdza się niedostateczne ich bezpieczeństwo.

Wymagany jest ciągły monitoring takich mostów i ocena ich nośności. Analizy nośności starych mostów należy prowadzić według nowej filozofii omówionej w poz. [5]. Podano tam zestaw norm Wielkiej Brytanii, Danii i Szwajcarii, które zawierają metody pozwalające na określenie wytrzymałości charakterystycznej materiałów na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji.

Również, w związku z projektowaną modernizacją dwóch mostów kolejowych omówionych w referacie potrzebne było określenie gatunku i jakości stali zastosowanej na konstrukcję oraz oszacowanie wartości jej wytrzymałości obliczeniowej. Parametry te określili autorzy referatu i podali jednocześnie metodykę postępowania przy ich wyznaczaniu. Przedstawiony tok postępowania może być przydatny przy modernizacji i remontach podobnych konstrukcji mostowych. Przyjmowanie a priori parametrów stali zlewnej przy analizie starych mostów jest błędne [2] i może prowadzić do niepotrzebnych prac wzmacniających.

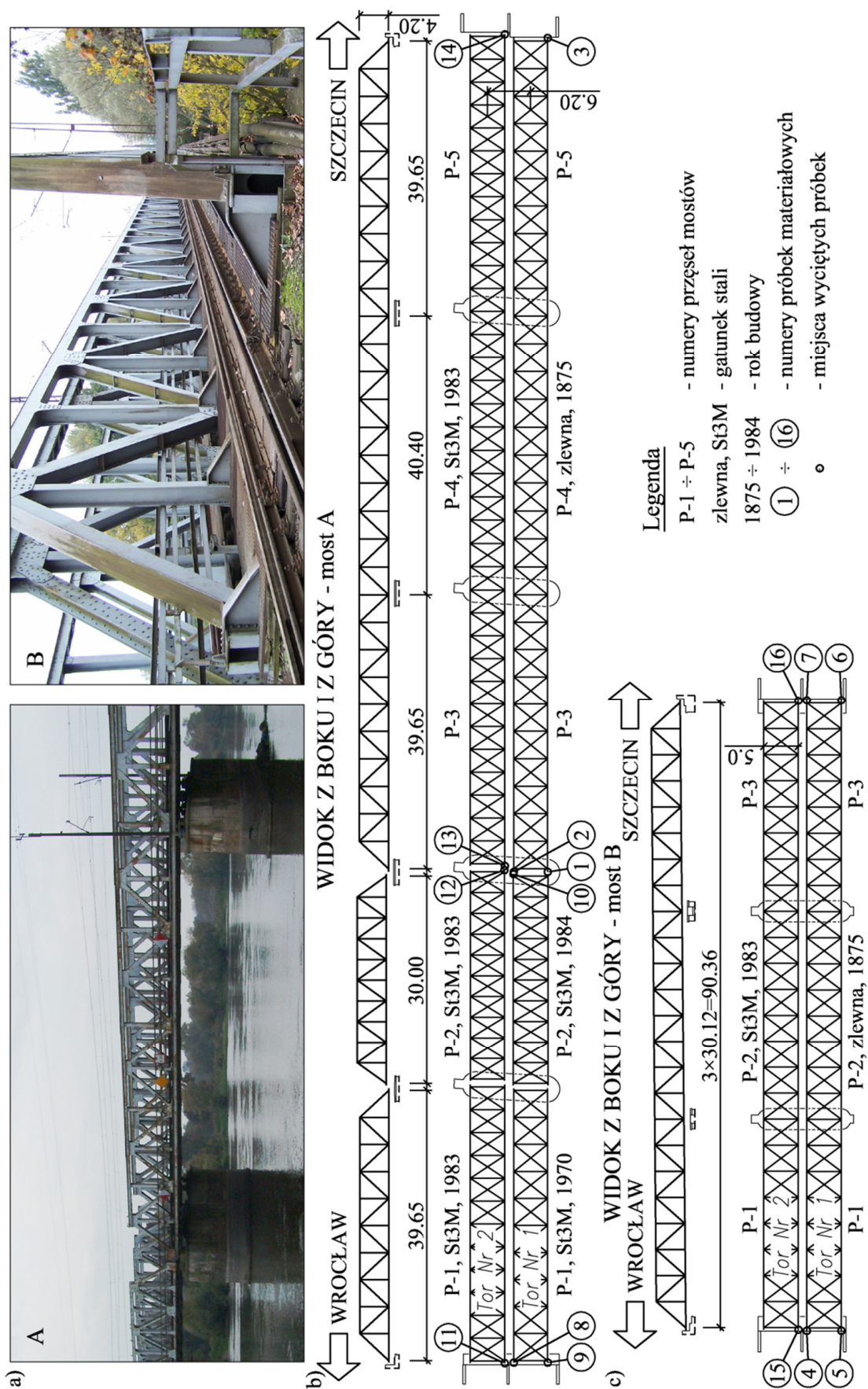
2. Charakterystyka mostów

Dwa omawiane mosty znajdują się w ciągu dwutorowej zelektryfikowanej linii kolejowej nad polderem i rzeką Wartą w miejscowości Kostrzyn nad Odrą (rys. 1a). Są to wieloprzęsłowe konstrukcje kratownicowe górą otwarte z jezdnią dołem. Obiekt A jest konstrukcją pięcioprzęsłową o ich rozpiętościach od 30,00 do 40,40 m, a obiekt B jest konstrukcją ciągłą trzyprzęsłową o jednakowej rozpiętości przęseł 30,12 m (rys. 1b i 1c). Całkowite długości tych mostów, mierzone po osi obiektu, wynoszą 192,76 i 91,45 m.

Nośne dźwigary kratowe o pasach równoległych mają wysokość teoretyczną 4,20 m, a ich rozstaw poprzeczny wynosi 5,00 lub 4,90 m. Wykratowanie dźwigarów stanowią kraty trójkątne typu W ze słupkami. Pomosty mostów są otwarte o konstrukcji z podłużnic i poprzecznic wraz z dolnym lub pośrednim krzyżowym stężeniem wiatrowym. Nawierzchnia kolejowa wykonana jest z szyn UIC60/S60 na mostownicach drewnianych opartych bezpośrednio na stopkach górnych podłużnic. Rozstaw osi torów wynosi 6,20 m.

Szlak linii kolejowej Chyrzyno-Kostrzyn, na którym znajdują się mosty został zbudowany w 1875 r. Z tego to powodu przedmiotowe mosty są wpisane do gminnej ewidencji zabytków. Obecnie z roku 1875 pozostały jedynie kratownicowe konstrukcje trójpřęsłowe w torze nr 1 obu mostów (por. rys. 1), odbudowane po zniszczeniach wojennych. Są to konstrukcje całkowicie nitowane. Częściową wymianę konstrukcji przeprowadzono w 1970 r., założono wówczas nową konstrukcję przęsla nr 1 od strony Wrocławia, w torze nr 1 mostu A.

Główną modernizację mostów i linii, łącznie z jej elektryfikacją, przeprowadzono w latach osiemdziesiątych XX wieku. W roku 1983 na istniejących podporach, po ich podwyższeniu, wybudowano nowe konstrukcje wszystkich przęseł obu mostów w torze nr 2, odtworzono w ten sposób linię dwutorową (stan sprzed II wojny światowej). W roku 1984 wymieniono także przęsla nr 2 w torze nr 1 mostu A, w czasie podnoszenia konstrukcji mostów w drugim etapie modernizacji. Nowe konstrukcje spawano-nitowane wykonano ze stali gatunku St3M. Konstrukcje mostów przebudowywane w latach 1983/84 zaprojektowano na klasę obciążenia NC wg PN-66/B-02015, co odpowiada klasie: $k = +2$ wg PN-85/S-10030. Według ewidencji konstrukcji most A ma klasę obciążenia NC, a przęsla w torze nr 1 mostu B mają nośność odpowiadającą klasie NL wg PN-66/B-02015. Przy czym, nośność mostu B określono przy założeniu, że konstrukcja mostu jest wykonana ze stali niskowęglowej, co według przedstawionych badań okazało się błędem. Po modernizacji linii w 2014 r. mosty będą spełniały wymagania Id-2 (D-2) [6]. W ramach wykonanych robót zmodernizowano m. in. nawierzchnię kolejową na mostach, wymieniono łożyska na łożyska neoprenowe i wzmocniono odcinki przejściowe przy obiektach. Prace modernizacyjne wykonano według dokumentacji projektowej opracowanej przez jednego z autorów referatu. W projekcie modernizacji wykorzystano wyniki badań wytrzymałościowych stali przedmiotowych mostów, przedstawione w niniejszym referacie oraz w [7]. Analizy statyczno-wytrzymałościowe wykazały, że konstrukcje trzyprzęsłowe bezpiecznie przenoszą aktualnie obowiązujące obciążenia i nie wymagają wzmocnienia.



Rys. 1. Dwa mosty kolejowe: a) aktualny widok ogólny, b) konstrukcja mostu **A**, c) konstrukcja mostu **B**

3. Właściwości chemiczne stali

Analizę składu chemicznego stali mostów określono na podstawie badań 16 próbek wyciętych z pasów dolnych dźwigarów kratownicowych (rys. 1). Badania wykonano metodą optycznej spektrometrii emisyjnej wyładowania jarzeniowego (GDOES) na aparacie firmy HORIBA JOBIN VON, model Profiler 2. Wyniki badań, ograniczone do 9 pierwiastków z 19 zbadanych, podano w tab. 1. Jednocześnie w celach porównawczych podano tam skład chemiczny stali:

- zgrzewnej i zlewnej, które były stosowane w okresie budowy mostów,
- St3M i 18G2A stosowanej w mostownictwie w okresie przebudowy omawianych obiektów; według PN-H-84023/04:1980 i PN-H-84018:1986.

Tabela 1. Porównawczy skład chemiczny stali mostowych

Próbka	Most	Stal	Skład chemiczny, [%]									
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	
1	A	zlewna	0,1435	1,389	0,788	0,036	0,040	0,033	0,081	0,461	41 ppm	
2			0,1456	1,416	0,784	0,037	0,038	0,033	0,079	0,453	62 ppm	
3			0,1514	1,422	0,837	0,031	0,049	0,033	0,082	0,462	51 ppm	
4	B		0,1411	1,048	0,927	0,022	0,041	0,021	0,067	0,440	40 ppm	
5			0,1354	1,071	0,921	0,022	0,045	0,021	0,065	0,437	42 ppm	
6			0,1366	1,136	0,884	0,027	0,043	0,022	0,067	0,445	69 ppm	
7			0,0377	0,592	0	0,039	0,031	0,020	0,035	0,012	0,6 ppm	
8	A	St3M	0,1241	0,719	0,120	0,022	0,039	0,139	0,097	0,285	0,017	
9			0,1038	0,523	0,136	0,028	0,038	0,084	0,048	0,105	0,049	
10			0,1335	0,611	0,155	0,027	0,031	0,070	0,043	0,092	18 ppm	
11			0,1452	0,548	0,202	0,011	0,023	0,062	0,054	0,116	0,055	
12			0,1361	0,611	0,157	0,028	0,031	0,070	0,043	0,092	14 ppm	
13			0,1350	0,769	0,196	0,013	0,024	0,038	0,036	0,071	0,039	
14			0,1215	0,743	0,209	88 ppm	0,029	0,017	0,021	0,056	0,042	
15	B		0,1396	0,676	0,169	0,011	0,021	0,022	0,021	0,039	0,068	
16			0,1391	0,484	0,073	80 ppm	0,012	0,011	77 ppm	0,018	0	
Stal zgrzewna			0,018 –0,30	ślady –0,33	0,010 –0,33	0,02 –0,46	0,01 –0,06	–	–	–	–	
Stal zlewna			0,03 –0,35	0,04 –0,75	ślady –0,18	0,004 –0,16	0,004 –0,115	0,11 –0,14	0,03 –0,04	0,11 –0,14	0,010 –0,020	
St3M			max 0,20	min 0,40	0,12 –0,30	max 0,050	max 0,050	max 0,30	max 0,30	–	min 0,02	
18G2A			max 0,20	1,00 –1,50	0,20 –0,55	max 0,040	max 0,040	max 0,30	max 0,30	max 0,30	min 0,02	

ppm – parts per milion; części na milion = $10^{-4}\%$

4. Właściwości mechaniczne stali

Właściwości mechaniczne i plastyczne stali mostów określono na podstawie badań statycznego rozciągania $16 \times 3 = 48$ próbek okrągłych pięciokrotnych o średnicy bazowej 6 mm ($4 \times 3 = 12$ sztuk) i 8 mm ($12 \times 3 = 36$ sztuk). Są to próbki stali zlewnej starzonej przez 139 lat

oraz stali gatunku St3M starzonej przez 44 i 31 lat (por. rys. 1). Poza badaniami stali starzonej samorzutnie (SS), dla każdego z trzech gatunków stali mostów (dla numerów 3, 7 i 15 w kol. 1 tab. 2) wykonano badania próbek (po 3 sztuki dla danego gatunku), które poddano wyżarzaniu normalizującemu (N). Próbki wyżarzano w temperaturze 930°C przez godzinę i studzono na powietrzu. Uzyskuje się w tym przypadku najmniejszą wielkość ziarna, a wydzielania degradacyjne ulegają rozpuszczeniu. Poza tym w trakcie chłodzenia na powietrzu uzyskuje się struktury równowagowe. Parametry mechaniczne tych próbek są porównywalne z właściwościami stali w fazie dostawy, czyli z cechami stali z okresu budowy mostu [1].

Badania rozciągające wykonano na maszynie Zwick/Roell Z600, a uzyskane wyniki zestawiono w tab. 2. Uzyskano bardzo mały rozrzut wartości materiałowych w danej grupie badanej stali. Na przykład, maksymalne wartości odchyłek dla R_e i R_m od wartości średniej wynoszą:

- dla stali zlewnej (próbki 1–6) – od -4,2 do +2,5%,
- dla stali St3M (próbki 8–15) – od -5,8 do +5,4%.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne stali mostów

Próbka 1) 2) 3)	Most	Stal	R_e [MPa]	R_m [MPa]	$\alpha =$ $= R_e/R_m$	Twardość Brinella				R_e/R_{eB}	R_m/R_{mB}	
						HB	R_{mB}	α_B	R_{eB}			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	A	zlewna	380	565	0,672	156	523	0,70	366	1,04	1,08	
2			386	568	0,679	165	553	0,70	387	1,00	1,03	
3			362 (365)	540 (554)	0,670 (0,659)	152 –	508 –	0,70 –	355 –	1,02 –	1,06 –	
4	B		375	562	0,667	156	523	0,70	366	1,02	1,07	
5			385	534	0,721	148	494	0,70	346	1,11	1,08	
6			–	–	–	143	479	0,70	336	–	–	
średnia			378	554	0,682	153	513	0,70	359	1,04	1,06	
7	B	zlewna	245 (266)	357 (402)	0,686 (0,661)	111 –	375 –	0,70 –	262 –	0,94 –	0,95 –	
8	A	St3M	304	437	0,695	131	438	0,70	306	0,99	1,00	
9			291	415	0,701	131	438	0,70	306	0,95	0,95	
10			303	442	0,685	143	479	0,70	336	0,90	0,92	
11			290	430	0,674	131	438	0,70	306	0,95	0,98	
12			–	–	–	135	452	0,70	316	–	–	
13			278	411	0,676	125	414	0,70	290	0,96	0,99	
14			311	431	0,721	139	466	0,70	326	0,95	0,92	
15	B		286 (328)	430 (456)	0,665 (0,719)	118 –	396 –	0,70 –	277 –	1,03 –	1,09 –	
16			–	–	–	121	404	0,70	283	–	–	
średnia			295	428	0,688	130	436	0,70	305	0,96	0,98	
1) Wartości w nawiasach dotyczą stali normalizowanej												
2) W wartościach średnich nie uwzględniono stali normalizowanej												
3) Nie badano twardości stali normalizowanej												

Jednocześnie obliczony współczynnik $\alpha = R_e/R_m$ ma iloraz od 0,667 do 0,721 – dla stali zlewnej i od 0,665 do 0,721 – dla stali gatunku St3M. Wartość współczynnika α ma duże

znaczenie przy określaniu R_e stali mostów, w których granice wytrzymałości R_m określa się na podstawie badań twardości HB [2]. Dla całościowego zobrazowania zagadnienia, w celach porównawczych, zbadano twardość wszystkich próbek metodą Brinella. Twardość mierzono w tzw. warunkach standardowych używając kulki stalowej średnicy $D = 5$ mm, przy obciążeniu $P = 7355$ N utrzymywanym przez $t = 15$ s. Badania wykonano twardościomierzem B3Cs, a średnie wyniki z trzech pomiarów każdej próbki podano w tab. 2, kol. 7. Uwzględniając wartości HB, wyznaczono według normy PN-H-04357:1993, przy stosunku $R_e/R_m = 0,65\text{--}0,80$, wartości wytrzymałości na rozciąganie R_{mB} . Jednocześnie wyznaczono wartości R_{eB} (tab. 2, kol. 10) przy przyjętej wartości równej 0,70 wg [2]. Otrzymane wartości R_{mB} i R_{eB} są zbliżone do R_m i R_e uzyskanych z badań na rozciąganie (tab. 2, kol. 4 i 5). Maksymalne odchyłki między tymi wartościami wynoszą $\pm 10\%$ (por. ilorazy R_e/R_{eB} i R_m/R_{mB}).

Badania materiałowe dwóch typów próbek starzonych samorzutnie – SS i normalizowanych – N (próbki nr 3, 7 i 15), miało na celu określenie stopnia degradacji stali w wyniku długotrwałej eksploatacji danego mostu (tab. 2). Wielu autorów stwierdza, że najbardziej wrażliwym parametrem degradacyjnych zmian właściwości wytrzymałościowych jest udarność. Wyniki badań udarowości stali zlewnej pięciu mostów kolejowych, wybudowanych w latach 1875–1925, przedstawili autorzy referatu w poz. [8]. W odniesieniu do analizowanych mostów na linii kolejowej Nr 273, badania udarowości przeprowadzono oddzielnie dla stali zlewnej z trójpłaszczyznowych konstrukcji w torze nr 1 oraz dla stali gatunku St3M z elementów wybudowanych w 1983 r. Badania przeprowadzono na próbkach Charpy'ego o wymiarach $10 \times 10 \times 55$ mm z karbem V wykonanym według PN-EN ISO 148-1: 2010. Podobnie jak w badaniach na rozciąganie również udarność, dla analizowanych dwóch gatunków stali, określono na dwóch typach próbek:

- starzonych samorzutnie SS, czyli próbek bez dodatkowych zabiegów,
- normalizowanych – N.

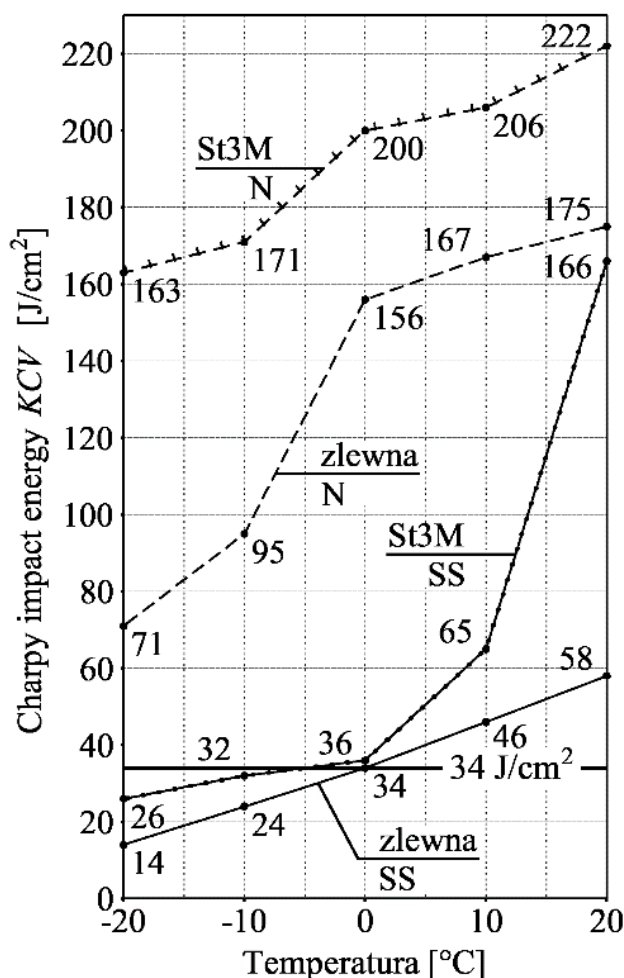
Uzyskane wyniki z badań $4 \times 15 = 60$ próbek zobrazowano graficznie na rys. 2. Poziomą linią zaznaczono wartość udarności wynoszącą 34 J/cm^2 – jako wielkość krytyczną stawianą przez Eurokod 3 stalom badanych próbek o $A = 80 \text{ mm}^2$ za wartość minimalną w nowych konstrukcjach stalowych, wg PN-EN 1993-1-10.

Badane stale obu gatunków wykazały małą udarność w temperaturze ujemnej. Temperatury przejścia tych stali od stanu plastycznego do stanu kruchego (temperatura przejścia plastyczno-kruchego – T_{kv27}) wynoszą $1,5^\circ\text{C}$ dla stali zlewnej i $-4,0^\circ\text{C}$ dla stali St3M. Są to temperatury odpowiadające normowej minimalnej wartości pracy łamania równej 27 J ($27/0,8 = 34 \text{ J/cm}^2$). Wyraźny wzrost udarności dla stali St3M następuje powyżej temperatury $+10^\circ\text{C}$ i dla $T = 20^\circ\text{C}$ wynosi $KCV = 166 \text{ J/cm}^2$. Normalizacja stali w sposób zdecydowany zwiększyła ich udarność. Zwiększenie tej udarności dla stali zlewnej w temperaturze -10°C i 0°C jest cztero- i pięciokrotne, a w temperaturze $+20^\circ\text{C}$ trzykrotne. Dla tych samych temperatur zwiększenie udarności stali normalizowanej gatunku St3M wyniosło 5,3 i 5,6 razy oraz 1,3 razy. Podobne zwiększenie udarności stali normalizowanej (N) w porównaniu z udarnością stali starzonej (SS) stwierdzono w badaniach stali zlewnej mostów w poz. [8].

Z porównania składu chemicznego poszczególnych gatunków stali (por. tab. 1) wynika, że analizowane przęsła mostów zostały wykonane ze stali zlewnej dwóch gatunków oraz ze stali St3M. Konstrukcje trójpłaszczyznowe mostów o długościach $L_t = 119,70$ i $90,36$ m, w torze Nr 1, wykonano:

- z niemieckiej stopowej stali zlewnej, w późniejszym okresie oznaczonej symbolem St52 (hochwertiger Baustahl), o właściwościach polskiej stali 18G2A [9], oraz
- z niskowęglowej stali zlewnej (Flußstahl) o składzie wg próbki nr 7.

Pozostałe wszystkie przęsła wolnopodparte mostu A oraz przęsła ciągle trójpłaszczyznowe w torze Nr 2 obu mostów wykonano ze stali gatunku St3M.



Rys. 2. Udarność badanych próbek SS i N stali zlewnej i St3M

Zaskakującym wydaje się fakt zastosowania w konstrukcjach trzyprzęsłowych, z roku 1875 w torze Nr 1, stali zlewnej dwóch gatunków oraz, że jeden z nich ma wytrzymałość na rozciąganie R_m większą niż 500 MPa (próbki 1–5). Z taką sytuacją spotkali się autorzy referatu również w moście linii kolejowej nr 353 [1] i w mostach linii Wrocław-Berlin, które oddano do eksploatacji odpowiednio w latach 1873 i 1875 [10]. Według rozeznania autorów referatu, literatura techniczna za początek stosowania zlewnych stali o podwyższonej wytrzymałości podaje lata dwudzieste XX wieku, a stali zlewnej St52 (hochwertiger Baustahl) rok 1929. Prawdopodobnie konstrukcje przedmiotowych mostów wykonano z wcześniejszych gatunków stali St48 i StSi o $R_{m,min} = 520$ MPa i $R_{e,min} = 360$ MPa [11].

5. Podsumowanie

Wykonane badania chemiczne i wytrzymałościowe stali wykazały, że konstrukcje trzyprzęsłowe w torze nr 1 obu mostów zostały wykonane ze stali zlewnej dwóch gatunków, tj.: niskowęglowej i stopowej. Według rozeznania autorów referatu, literatura niemiecka fakt stosowania stali zlewnej o podwyższonej wytrzymałości w mostach stalowych szacuje na lata 1882–1890 [12]. Początkowo była to stal St48 o $R_e \geq 290$ MPa i $R_m = 500$ –550 MPa, a później stale: StSi, St52 i St46. Stale te charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami chemicznymi ($C = 0,14$ – $0,35\%$, $Mn = 0,4$ – $1,2\%$) oraz mechanicznymi ($R_e = 280$ –360 MPa i $R_m = 460$ –650 MPa).

Określony „wskaźnik starzenia” W_s , równoważny stosunkowi udarności po zestarzeniu do materiału niestarzonego (próbki normalizowane), w temperaturach -20 i 0°C wynosi dla stali zlewnej 0,19 i 0,20, a dla stali St3M odpowiednio 0,16 i 0,18. Wartości te świadczą o znacznym wpływie tzw. efektu starzenia. Fakt ten należy uznać za zjawisko niebezpieczne z uwagi na możliwość powstania pęknięć kruchych w warunkach zimowych i zmęczeniowych [13]. Przedstawiona analiza stali zlewnej mostów kolejowych z roku 1875 może być przydatna ekspertom opracowującym projekty modernizacji i wzmocnień starych mostów kolejowych z drugiej połowy XIX w.

Literatura

1. Wichtowski B., Hołowaty J. Ocena właściwości stali konstrukcyjnych modernizowanego mostu na linii kolejowej nr 353. Inżynieria i Budownictwo, nr 8/2014.
2. Wichtowski B., Hołowaty J. Analiza właściwości materiałowych i spawalności stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2013.
3. Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IBDiM, Warszawa 2001.
4. Wichtowski B. Wytrzymałość zmęczeniowa spawanych złączy doczołowych w stalowych mostach kolejowych. Prace Naukowe PS Nr 572, Szczecin 2002.
5. Wiśniewski D., Majka M., Bień J. Ocena nośności mostów w okresie ich eksploatacji – doświadczenia krajowe i zagraniczne. Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8/2013.
6. Id-2 (D-2) Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynierskich. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2005.
7. Hołowaty J., Wichtowski B. Problemy spawalnicze przy modernizacji starych mostów kolejowych (referat zgłoszony na XXI. N-T Krajową Konferencję Spawalniczą, Międzyzdroje 2015)
8. Wichtowski B., Hołowaty J. Badania udarnościowe stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2014.
9. Albrecht R. Richtlinien zum Brückenbau. Band 1-Stählerne Brücken einschließlich Stahlträger in Beton und Verbundkonstruktionen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1975.
10. Hołowaty J., Wichtowski B. Properties of Structural Steel used in Earlier Railway Bridges. Structural Engineering International, No 4/2013.
11. Stahl im Hochbau. Zwölfte Auflage, Verlag Stahleisen M.B.H. Düsseldorf 1935.
12. Schaper G. Stählerne Brücken. Verlag von Wilhelm Ernst&Sohn, Berlin 1949.
13. Siwowski T. Trwałość zmęczeniowa drogowych mostów kratownicowych o konstrukcji nitowanej. Inżynieria i Budownictwo, nr 8/2014.

TESTING OF STEEL FROM TWO TRUSS BRIDGES ON RAILWAY LINE NO 273

Abstract: Long term service of steel bridge structures causes unfavourable change of mechanical properties of steel. This problem is presented by the results of material specimen testing. The steel samples were taken from steel girders of two bridges constructed in 1875, rebuilt in 1870 and 1983/84. Chemical and mechanical tests of two steel grades were carried out: cast steel from year 1875 and low carbon steel of grade St3M from years 1970 and 1983/84.

Keywords: railway bridge, truss, structural steel, aging of steel, durability.