

WNIOSKI Z BADAŃ MATERIAŁOWYCH HISTORYCZNYCH MOSTÓW KOLEJOWYCH Z LAT 1873–1950

BERNARD WICHTOWSKI, e-mail: marek.wichtowski@zut.edu.pl

JANUSZ HOŁOWATY

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Streszczenie: Zagadnienie trwałości mostów historycznych jest problemem światowym. W nowych metodach oceny nośności tych obiektów przyjmuje się rzeczywiste obciążenie konstrukcji i aktualne właściwości materiałów. Pomocne w tej ocenie mogą być przedstawione w referacie właściwości zdegradowanej stali 18 mostów kolejowych wybudowanych w latach 1873–1950. Dokładnie przedstawiono analizę składu chemicznego ich stali oraz badania właściwości mechaniczne określające: R_{eH} , R_m , HB i KV. Dla ośmiu mostów analiza ta dotyczy stali starzonej samorzutnie o cechach aktualnie występujących oraz stali normalizowanej o cechach pierwotnych występujących w okresie ich budowy.

Słowa kluczowe: most kolejowy, stal konstrukcyjna, starzenie stali, wytrzymałość, udamność, twardość

1. Wprowadzenie

Mosty to najdłużej użytkowane naziemne budowle inżynierskie. Ponad 75% kolejowych mostów w Polsce liczy ponad 50 lat, z czego prawie 45% jest eksploatowanych ponad 100 lat. Obiekty mostowe w Europie Zachodniej są średnio o 30–50 lat starsze od obiektów infrastruktury mostowej w Polsce, przykładowo w Niemczech ponad połowa mostów kolejowych powstała przed rokiem 1910, a trzecia część przed rokiem 1900 [1].

Zagadnienie nośności mostów starych jest problemem światowym. Decydujący wpływ na trwałość tych obiektów mają procesy degradacji, którym jesteśmy w stanie przeciwstawiać się tylko w nieznacznym zakresie. Procesy degradacji to zjawiska naturalne związane z istnieniem, eksploatacją i starzeniem się, a ich efektem są uszkodzenia powodujące pogarszanie kondycji obiektu [2–5].

Z uwagi na naturalne zmniejszanie się nośności mostów historycznych, stosowanie kryteriów projektowych do oceny ich doraźnej nośności wydaje się nieuzasadnione. W wielu przypadkach eksploatowane mosty, które nie spełniają kryteriów określonych w normach projektowych, są w stanie bezpiecznie przenosić aktualne obciążenia użytkowe. Nowe metody oceny nośności tych mostów zastosowano w ostatnim okresie w normach Kanady, Wielkiej Brytanii, Danii i Szwajcarii [6]. Przyjmuje się rzeczywiste obciążenia, którym jest poddawana konstrukcja oraz, którym może zostać poddana, w pozostałym okresie eksploatacji. Jednocześnie wykorzystuje się dokładne informacje dotyczące właściwości materiałów, z których most jest zbudowany, jak też informacje o ich zachowaniu pod obciążeniem. Pomocne mogą być tutaj dodatkowe wiadomości uzyskane z analizy charakterystyk właściwości materiałów podobnych obiektów historycznych, które przedstawiono w niniejszym referacie. Poddano analizie wyniki badań 21 próbek materiałowych z 18 mostów kolejowych wybudowanych w latach 1873–1950. Badania te pozwoliły oszacować parametry mechaniczne stali, ich stopień degradacji oraz określić aktualną nośność eksploatacyjną obiektu. Dokładnie omówiono wyniki z badań laboratoryjnych:

- składu chemicznego stali konstrukcji nośnych,

- statycznego rozciągania próbek materiałowych,
- twardości metodą Brinella,
- uderności uzyskanej z próbek Charpy'ego.

Wiadomości powyższe mogą być wykorzystane przez ekspertów analizujących nośność starych obiektów mostowych wybudowanych z podobnych gatunków stali.

2. Charakterystyka badanych mostów

Analizowane mosty kolejowe zostały oddane do eksploatacji w latach 1873–1950, a ich dane materiałowe w referacie podano w układzie chronologicznym ich powstawania, w tabl. 1. Są to konstrukcje kratownicowe w ośmiu przypadkach (nr 2–7, 9 i 10) oraz konstrukcje blachownicowe w dziesięciu przypadkach (nr 1, 8 i 11–18). Rozpiętości tych obiektów oraz liczba ich przęseł jest zróżnicowana. Długości konstrukcji kratownicowych wynoszą od 33,85 m (most nr 5) do 192,76 m (most nr 7), a liczba przęseł wynosi od 1 (most nr 5) do 5 (most nr 7). Oznacza to, że liczba nośnych dźwigarów głównych wynosi od dwóch do dwudziestu. Podobnie konstrukcje blachownicowe mają zróżnicowane rozpiętości od 9,22 m (most nr 12) do 314,37 m (most nr 17), a liczba przęseł wynosi od 1 do 8. Dwanaście z tych mostów było tematem trzynastu artykułów, a zbiorcze ich omówienie przedstawiono w poz. [7]. Na rysunku 1 przedstawiono konstrukcje czterech przedmiotowych mostów, są to obiekty nr 1, 5, 10 i 15.

3. Skład chemiczny stali mostów

Badania składu chemicznego stali 21 elementów konstrukcyjnych z 18 przedmiotowych mostów wykonano metodą optycznej spektrometrii emisyjnej wyładowania jarzeniowego. Analizę określono na podstawie wypaleń próbek wyciętych z poszczególnego obiektu i ograniczono ją do wykazania 5 podstawowych pierwiastków stopowych: C, Mn, Si, P i S (tabl. 1). Podany skład chemiczny wykazuje duży rozrzut zawartości poszczególnych pierwiastków. Zawartość trzech podstawowych pierwiastków wynosi: węgla od 0,016 do 0,299%, manganu od 0,319 do 1,409%, a krzemu od 0,00 do 0,911%. Jednocześnie fosforu i siarki, z wyjątkiem 4 przypadków (9,5%) jest mniej (dotyczy każdego z tych składników) od 0,05%, to jest od wartości uważanej za szkodliwą. W skrajnych przypadkach zawartość fosforu wynosi około 0,09%, a zawartość siarki tylko dla mostu nr 12 przekracza nieznacznie wartość 0,05% i wynosi 0,051%. Powyższe wartości pierwiastków stopowych stali analizowanych mostów świadczą, że zostały one wykonane ze stali zlewnej.

Jak wykazały dalsze badania, na uwagę zasługują dwa poniższe fakty. Autorzy stwierdzili, że pięć obiektów kratownicowych nr 3–7 zostało wybudowanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości już w 1875 roku [3, 7]. Fakt ten według naszej wiedzy nie został ujęty w literaturze technicznej. Wprowadzenie stali konstrukcyjnych o takich parametrach w mostownictwie jest datowane na przełom XIX i XX wieku. W Niemczech w przypadku mostów były to gatunki wysokowęglowej stali zlewnej oznaczone symbolem St48 ($R_m \geq 480$ MPa, $R_e \geq 312$ MPa), stal krzemowa StSi ($R_m > 480$ MPa, $R_e \geq 360$ MPa) i stopowa stal zlewna St52 ($R_m \geq 520$ MPa i $R_e \geq 360$ MPa) [8].

Trzy mosty nr 3, 4 i 5, ze stali wysokowęglowej o zawartości węgla 0,23–0,30% i wytrzymałości $R_m > 500$ MPa, znajdują się na byłej magistrali Berlin-Wrocław oddanej do eksploatacji 15 maja 1875 roku (rys. 1a), a dwa pozostałe nr 6 i 7 na linii Wrocław-Szczecin w km 254 [3]. Na uwagę zasługuje również 8 przęsłowy most nr 17 o długości 314,37 m przez rzekę Wartę, usytuowany w Gorzowie Wlkp. na jednotorowej linii kolejowej (rys. 2). Jest to most wybudowany przez Niemców w 1938 roku ze stali zlewnej normalizowanej gatunku St37-12 o zadziwiającym stopniu starzenia [9].

Tablica 1. Skład chemiczny i parametry mechaniczne stali 21 elementów konstrukcyjnych z 18 mostów kolejowych

Most	Rok budowy	Zawartość pierwiastka [%]					R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	$\alpha =$ R_{eH}/R_m	Twardość Brinella			
		C	Mn	Si	P	S				HB	R_{mB}	α_B	R_{eB}
1	1873	0,130	0,535	0,010	0,048	0,032	271	393	0,69	113	387	0,70	271
2	1875	0,045	0,538	0,000	0,017	0,025	253	376	0,67	111	375	0,70	262
3	1875	0,233	0,685	0,178	0,036	0,041	318	510	0,62	146	488	0,62	307
4	1875	0,299	0,984	0,182	0,020	0,028	322	560	0,58	160	537	0,58	311
5	1875	0,258	0,591	0,192	0,026	0,043	343 (337)	548 (543)	0,63 (0,62)	152 (151)	507 (504)	0,63 (0,63)	319 (317)
6	1875	0,138	1,085	0,911	0,024	0,043	380	548	0,69	152	509	0,70	356
7	1875	0,147	1,409	0,803	0,035	0,042	376 (365)	558 (554)	0,67 (0,66)	159 (160)	531 (537)	0,67 (0,67)	356 (360)
8	1876	0,042	0,425	0,000	0,037	0,021	327	421	0,78	122	406	0,78	317
9	1882	0,030	0,319	0,004	0,031	0,024	305 (265)	389 (376)	0,78 (0,71)	121 (114)	404 (383)	0,70 (0,70)	283 (268)
10	1887	0,028	0,516	0,000	0,062	0,025	252 (260)	381 (388)	0,66 (0,67)	116 (126)	389 (418)	0,70 (0,70)	272 (292)
		0,037	0,528	0,000	0,088	0,042	259 (285)	387 (408)	0,67 (0,70)	121 (132)	405 (441)	0,70 (0,70)	283 (308)
11	1890	0,033	0,756	0,001	0,033	0,013	258	372	0,69	123	409	0,70	286
		0,016	0,644	0,000	0,040	0,016	220 (258)	359 (373)	0,61 (0,69)	117 (115)	392 (386)	0,64 (0,64)	251 (247)
12	1907	0,200	0,480	0,020	0,019	0,024	283	420	0,67	111	375	0,65	244
		0,142	0,333	0,012	0,051	0,051	298	425	0,70	102	345	0,78	269
13	1925	0,025	0,400	0,001	0,041	0,020	244 (325)	376 (448)	0,65 (0,72)	98 (109)	339 (378)	0,72 (0,72)	244 (272)
14	1928	0,196	1,250	0,378	0,022	0,016	371	587	0,63	179	604	0,63	380
15	1935	0,150	0,390	0,006	0,015	0,032	268 (289)	423 (440)	0,63 (0,66)	121 (116)	426 (408)	0,63 (0,63)	268 (257)
16	1935	0,140	0,540	0,006	0,044	0,038	262	386	0,68	112	378	0,65	246
17	1938	0,084	0,460	0,045	0,006	0,026	220 (275)	356 (376)	0,62 (0,73)	107 (106)	362 (357)	0,70 (0,70)	253 (250)
18	1950	0,180	1,230	0,310	0,050	0,019	363	585	0,62	174	583	0,63	367

Uwaga: wartości w nawiasach dotyczą stali normalizowanej



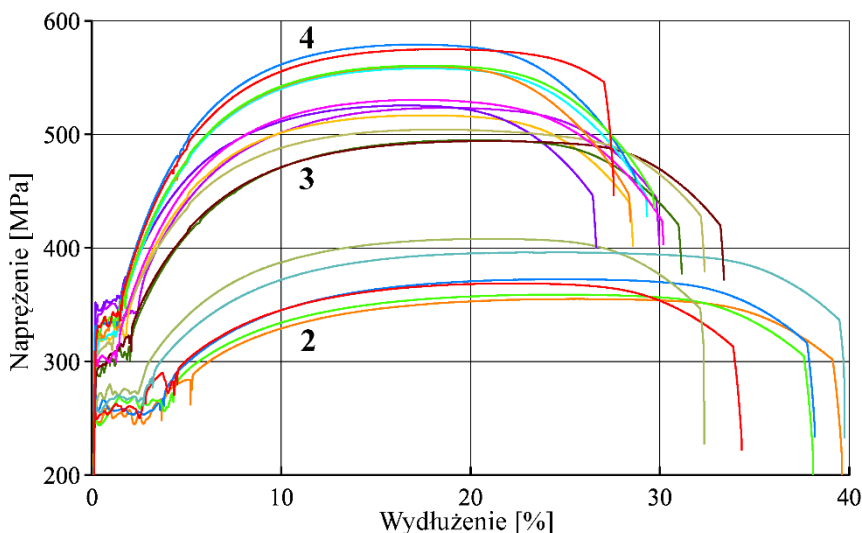
Rys. 1. Cztery badane mosty: a) most nr 1 z 1873 r. na linii nr 353 Poznań-Skandawa, b) most nr 5 z 1875 na linii nr 275 Wrocław-Gubinek, c) most nr 10 z 1887 r. na linii nr 367 Zbąszynek-Gorzów Wlkp., d) wiadukt nr 15 z 1935 r. na linii nr 351 Poznań-Szczecin



Rys. 2. Ośmioprzęsłowy most nr 17 wybudowany w 1938 r. ze stali normalizowanej St37-12 (blachownice) i stali St18G2 (łuk)

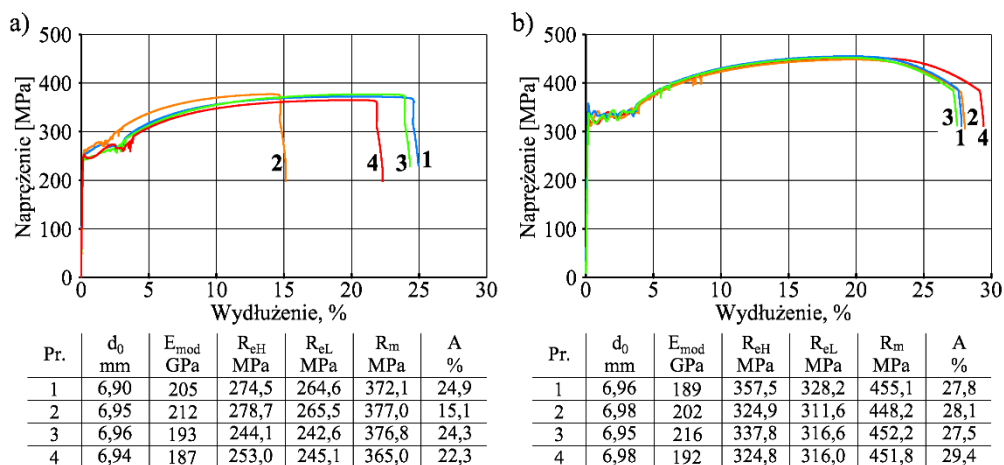
4. Właściwości mechaniczne stali

Właściwości mechaniczne stali wszystkich mostów określono na podstawie badań statycznego rozciągania próbek. Były to próbki pięciokrotne okrągłe, a ich ilość dla danego mostu wynosiła od 3 do 13 sztuk. Dla 10 mostów były to próbki wyłącznie ze stali w stanie poeksploatacyjnym, starzone naturalnie – S, a dla 8 mostów (9 elementów konstrukcyjnych) dodatkowe próbki po normalizacji – N. Próbki N wygrzewano w temperaturze 930°C przez jedną godzinę i studzono na powietrzu. Uzyskuje się w tym przypadku najmniejszą możliwą wielkość ziarna. Określone parametry tych próbek symulują początkowy stan stali z okresu budowy mostu i pozwalają oszacować zakres zmian właściwości mechanicznych stali zachodzących w wyniku starzenia w danym okresie eksploatacyjnym (tabl. 2).



Rys. 3. Wykresy rozciągania 18 próbek stali mostów nr 2, 3 i 4 ($C = 0,045\%$, $0,233\%$ i $0,299\%$)

Badania prowadzono zgodnie z PN-EN ISO 6892:2010 na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z6000, a ich wyniki podano w kol. 8–10 tabl. 1. Uzyskano duży rozrzut wyników wartości R_{eH} i R_m w zależności od składu chemicznego stali danego mostu (rys. 3). Granica plastyczności R_{eH} wynosi od 220 do 380 MPa (mosty nr 11 i 6), a granica wytrzymałości na rozciąganie R_m od 356 do 587 MPa (mosty nr 17 i 14). Procentowe zróżnicowanie tych wartości w odniesieniu do wartości minimalnej wynosi: R_{eH} – 61%, a R_m – 64,9%.



Rys. 4. Wykresy rozciągania stali ($C = 0,025\%$) mostu nr 13 z 1925 r.: a) próbki starzone, b) normalizowane

Porównawcze zestawienie właściwości mechanicznych R_{eH} i R_m dla próbek starzonych samorzutnie i próbek normalizowanych (wartości w nawiasach) zamieszczono w tablicy 2. Analiza ta dotyczy stali ośmiu mostów (9 elementów) wybudowanych w latach 1875–1938 ze stali zlewnej przez Niemców na terenie byłego zaboru niemieckiego. Przykładowe wykresy rozciągania tych dwóch rodzajów próbek (S i N) dla stali mostu nr 15 usytuowanego na linii kolejowej nr 353 Poznań-Skandawa przedstawiono na rys. 4.

Tablica 2. Właściwości materiałowe stali starzonej i (normalizowanej) 8 mostów

Most	Rok budowy	Zawartość C [%]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	$\alpha = R_{eH}/R_m$	$R_{eH}/(R_{eH})$	$R_m/(R_m)$
5	1875	0,258	343 (337)	548 (543)	0,63 (0,62)	1,018	1,009
7	1875	0,147	376 (365)	558 (554)	0,67 (0,66)	1,030	1,007
9	1882	0,030	305 (265)	389 (376)	0,78 (0,71)	1,151	1,034
10	1887	0,028	252 (260)	381 (388)	0,66 (0,67)	0,969	0,982
		0,037	259 (285)	387 (408)	0,67 (0,70)	0,909	0,948
11	1890	0,016	220 (258)	359 (373)	0,61 (0,69)	0,853	0,962
13	1925	0,025	244 (325)	376 (448)	0,65 (0,72)	0,751	0,839
15	1935	0,150	268 (289)	423 (440)	0,63 (0,66)	0,927	0,961
17	1938	0,084	220 (275)	356 (376)	0,62 (0,73)	0,800	0,947

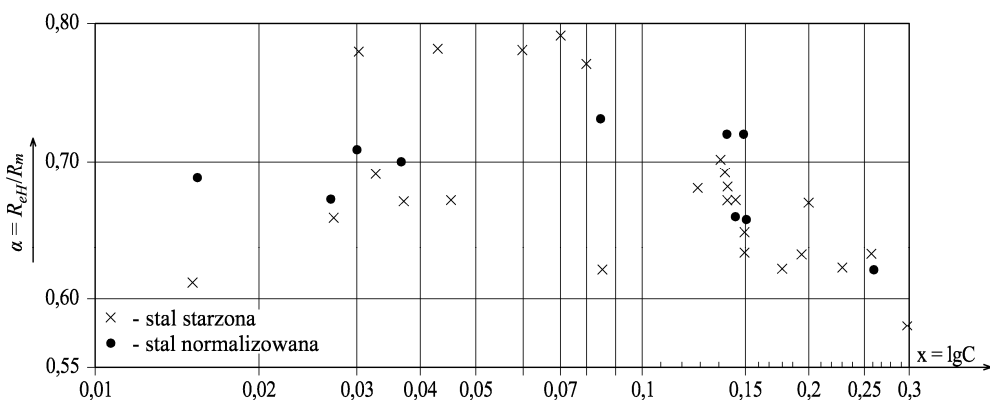
Obliczone wartości ilorazów $R_{eH}/(R_{eH})$ i $R_m/(R_m)$ w kolumnach 7 i 8 tablicy 2, pozwalają oszacować stopień starzenia stali poszczególnego mostu. Efekt starzenia jest zróżnicowany i niezależny od zawartości węgla. W stalach najstarszych mostów nr 5, 7 i 9, z lat 1875–1882, nastąpiło zwiększenie wartości zarówno granicy plastyczności jak i wytrzymałości na rozciąganie. Zwiększenie wartości R_{eH} wynosi od 1,8% (most nr 5) do 15,1% (most nr 9) natomiast zwiększenie wartości R_m jest nieznaczne i wynosi od 0,7 do 3,4% (mosty nr 7 i 9). Odwrotny proces nastąpił natomiast w pozostałych 6 elementach konstrukcyjnych 5 mostów z lat 1887–1938. W mostach tych w wyniku starzenia nastąpiło zmniejszenie wartości zarówno

granicy plastyczności jak i granicy na rozciąganie. Zmniejszenie wartości R_{eH} wynosi od 3,1 do 24,9% (mosty nr 10 i 13), a wartości R_m od 1,8 do 16,1% (również mosty nr 10 i 13).

Z analizy wartości zamieszczonych w tablicy 2 wynikają poniższe wnioski:

- każdorazowo, indywidualnie należy rozpatrywać proces starzenia stali danego mostu,
- niezależnie od wielkości zmniejszenia parametrów mechanicznych stali danego obiektu, w wyniku starzenia, wartość granicy plastyczności R_{eH} każdorazowo jest nie mniejsza od wartości 220 MPa,
- określone maksymalne procentowe zmniejszenie wartości (R_{eH}) o 24,9% z 325 na 244 MPa (most nr 13) jest porównywalne z maksymalną wartością znaną z literatury, równą 26% według [10].

Wykorzystując próbki do badań składu chemicznego stali mostów, określono jej twardość metodą Brinella. Twardość mierzono w tzw. warunkach standardowych, używając kulki stalowej o średnicy $D = 10$ lub 5 mm przy obciążeniach $P = 29430$ N i $P = 7355$ N utrzymywanych przez czas $t = 15$ s. Badania przeprowadzono twardościomierzem B3CS, a ich wyniki zamieszczono w kol. 11 tabl. 1. Uwzględniając wartości HB, wyznaczono według normy PN-EN ISO 6506-4:2002 wartości wytrzymałości na rozciąganie R_{mB} (kol. 12). Łatwo zauważyć, że wartości R_{mB} różnią się nieznacznie od wartości R_m . Wartości granicy wytrzymałości R_{mB} wynoszą od 339 do 604 MPa (mosty nr 13 i 14) i różnią się od granicznych wartości R_m wynoszących 356 i 587 MPa (mosty 17 i 14) jedynie o -4,8% i +2,9%.



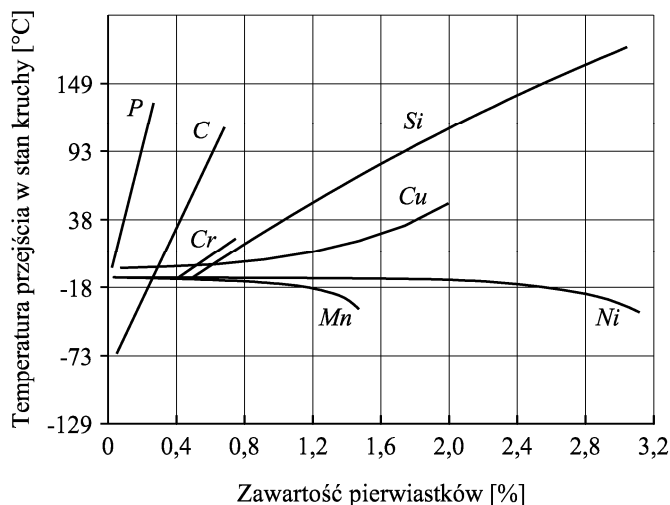
Rys. 5. Wartości α w zależności od zawartości węgla dla 21 elementów

Trudności występują przy określaniu wartości $R_{eB} = \alpha R_{mB}$ z uwagi na znaczną rozpiętość, dla omawianych mostów, wartości $\alpha = 0,58$ – $0,78$ (por. tabl. 1 kol. 10). Zróżnicowane wartości α uzależnione są od zawartości węgla wg rysunku 5. Ostatecznie po analizie rys. 5 i artykułu [11] przy ocenie wartości R_{eB} według badań twardości metodą Brinella zaleca się przyjmować poniższe wartości współczynnika α_B :

- $C < 0,02\%$ → $\alpha_B = 0,64$
- $C = 0,02$ – $0,05\%$ → $\alpha_B = 0,70$
- $C = 0,05$ – $0,10\%$ → $\alpha_B = 0,75$
- $C = 0,10$ – $0,15\%$ → $\alpha_B = 0,69$
- $C = 0,15$ – $0,20\%$ → $\alpha_B = 0,65$
- $C = 0,20$ – $0,28\%$ → $\alpha_B = 0,64$
- $C > 0,28\%$ → $\alpha_B = 0,60$

5. Badania udarnościowe

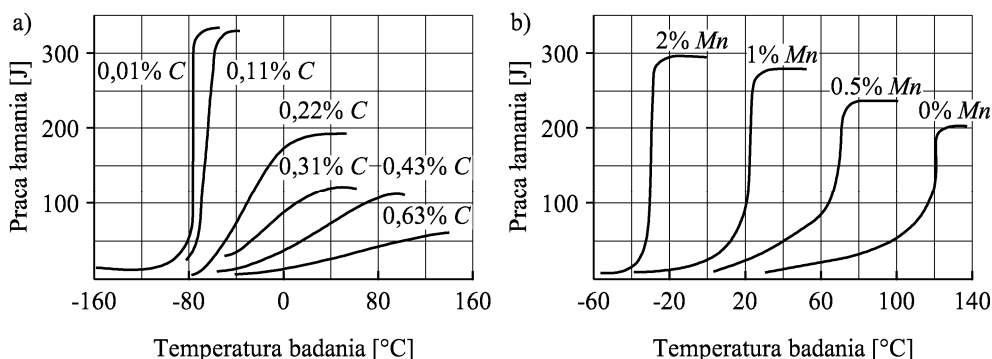
Badania materiałowe stali starych konstrukcji sprowadza się zazwyczaj do określenia ich składu chemicznego, próby rozciągania oraz pomiaru twardości (por. pkt. 4). Na podstawie tych wyników ustalany jest gatunek stali oraz przyjmowane aktualne właściwości wytrzymałościowe. Poziomem porównawczym zmian właściwości materiałowych w trakcie eksploatacji jest porównanie ich z właściwościami z okresu budowy obiektu, które uzyskujemy przez wyżarzanie normalizujące. Przyjmuje się, że podstawowym czynnikiem określającym cechy materiału są zmiany jego budowy wewnętrznej wynikające ze strukturalnych procesów degradacyjnych. Te zmiany struktury znajdują odzwierciedlenie przede wszystkim w zmianach udarności materiału. Próba udarności jest najprostszą metodą badań odporności na pękanie. Jako kryterium temperatury przejścia w stan kruchy przyjmuje się temperaturę T_{27J} przy której minimalna praca łamania KV (próbek Charpy) nie będzie mniejsza niż 27 J (PN-EN 1993-1-10 i PN-EN-10025-2). Te wymagania normowe zaleca się stosować przy doborze stali na nowe konstrukcje. Nie dotyczą one konstrukcji użytkowanych.



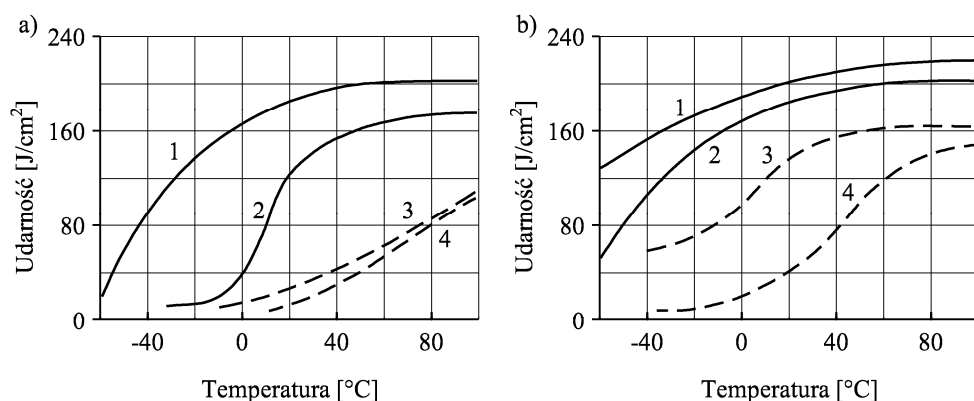
Rys. 6. Wpływ pierwiastków stopowych na temperaturę przejścia w stan kruchy [12]

W stalach mostów historycznych stwierdza się duży rozrzut zawartości poszczególnych pierwiastków, których wpływ w stali na temperaturę przejścia w stan kruchy jest bardzo zróżnicowany (rys. 6). Główny składnik stali węgiel zmniejsza odporność na pękanie, przesuwając temperaturę przejścia w stan kruchy w kierunku temperatur dodatnich (rys. 7a). W przeciwieństwie do węgla mangan i nikiel znacznie poprawiają odporność stali na pękanie (rys. 6 i 7b).

Wartości udarności są traktowane jako jeden z podstawowych wskaźników właściwości mechanicznych stali. Temperatura przejściowa ma znaczenie praktyczne, gdyż jest miarą stosowności materiału pod obciążeniem uderzeniowym, wyznacza temperaturę, w której mogą powstać nagle pęknięcia kruche. Poziomem porównawczym stanu degradacji w okresie eksploatacji obiektu jest symulacja wyjściowej budowy stali za pomocą obróbki cieplnej (rys. 8). Jak wynika z rysunku, najwyższą wrażliwość na kruche pękanie wykazują stale nieuspokojone, natomiast najbardziej odporne na pękanie są stale niskowęglowe drobnoziarniste uspoko-



Rys. 7. Wpływ zawartości węgla (a) w stali oraz manganu (b) [12]



Rys. 8. Zależność udarności od temperatury: a) po starzeniu, b) w stanie normalizowanym: 1 – stal niestarczająca się, 2 – stal uspokojona, 3 – stal półuspokojona, 4 – stal nieuspokojona [12]

Badania udarnościowe przeprowadzono dla stali 9 elementów konstrukcyjnych z 8 mostów kolejowych oznaczonych w tabl. 1 numerami 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15 i 17. Są to obiekty oddane do eksploatacji w latach 1875–1938 i usytuowane na 8 liniach kolejowych. Badania przeprowadzono na próbkach Charpy'ego o wymiarach 10×10×55 mm z karbem V wykonanym wg PN-EN ISO 148-1:2010. Podobnie jak w badaniach na rozciąganie również udarność określono na dwóch typach próbek:

- starzonych samorzutnie (S), czyli próbkach bez dodatkowych zabiegów oraz na
- normalizowanych (N) o wartościach podawanych w nawiasach.

W tablicy 3 podano dla poszczególnego mostu średnie wartości pracy łamania uzyskane każdorazowo z badań 3 próbek w danej temperaturze. Zamieszczone wyniki otrzymano z badań 258 próbek. Uzyskane wyniki pracy łamania KV z badań stali poszczególnego mostu, w temperaturze -20°C, przedstawiono graficznie na rys. 9. Poziomą linią zaznaczono wartość pracy łamania na poziomie 27 J – jako wielkość krytyczną wymaganą przez Eurokod 3 za wartość minimalną w nowych mostowych konstrukcjach stalowych.

Tablica 3. Wartości pracy łamania KV stali starzonej i (normalizowanej) 258 próbek z ośmiu mostów kolejowych

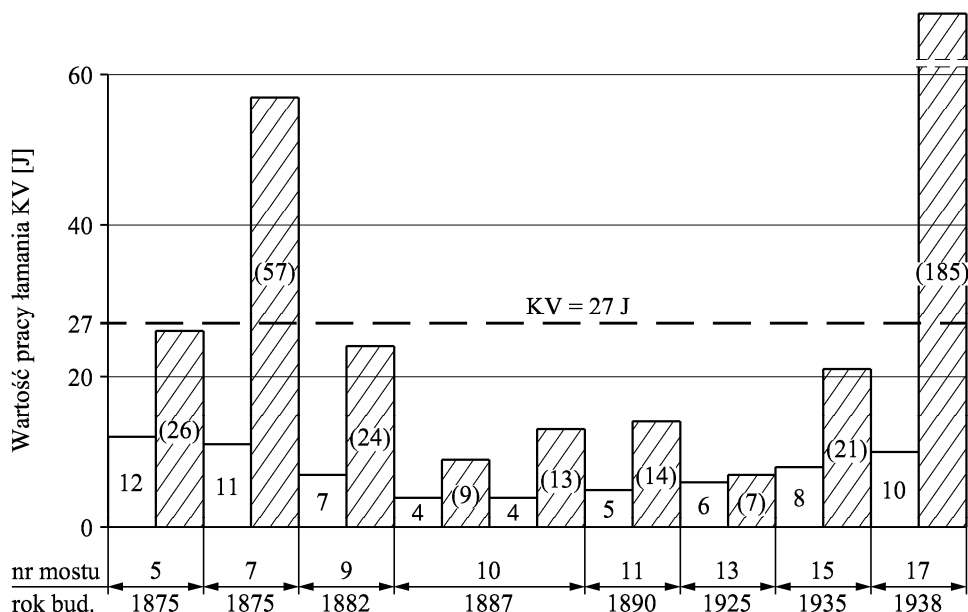
Most	Rok budowy (nr linii)	Konstrukcja dźwigarów	C %	Praca łamania KV w J				
				-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C
5	1875 (275)	kratownica jazda górą	0,258	12 (26)	16 (36)	29 (48)	42 (55)	54 (66)
7	1875 (273)	kratownica jazda dołem	0,147	11 (57)	19 (76)	26 (125)	37 (134)	46 (140)
9	1882 (410)	kratownica jazda górą	0,030	7 (24)	-	11 (63)	-	48 (140)
10	1887 (367)	kratownica jazda dołem	0,028	4 (9)	5 (33)	6 (40)	8 (61)	12 (116)
			0,037	4 (13)	6 (21)	6 (38)	9 (65)	14 (107)
11	1890 (3)	konstrukcja zespolona	0,016	5 (14)	8 (17)	11 (52)	13 (87)	28 (283)
13	1925 (353)	blachownica jazda górą	0,025	6 (7)	7 (13)	12 (23)	25 (33)	38 (57)
15	1935 (351)	ramownica jazda górą	0,150	8 (21)	9 (32)	14 (41)	22 (63)	28 (87)
17	1938 (368)	blachownica jazda dołem	0,084	10 (185)	14 (246)	16 (213)	28 (262)	56 (244)

Badana stal wszystkich mostów w stanie poeksploatacyjnym, starzonym ma bardzo małą wartość pracy łamania. Aktualnie stwierdzona wartość KV dla tej stali wynosi jedynie od 4 do 12 J. Zależność ta dotyczy wszystkich stali niezależnie od zawartości węgla od 0,016 do 0,258%. Fakt ten występuje także w stali normalizowanej mostu nr 15 wybudowanego w 1938 r., która wyjściowo miała „kosmiczną” wartość pracy łamania KV = 185 J. Oznacza to, że w trakcie eksploatacji przez 78 lat, zmniejszenie wartości KV nastąpiło 18,5 razy. Praktycznie można przyjąć, że poza mostem nr 17 ze stali St37-12, wymaganą pierwotną wartość KV = 27 J z okresu budowy obiektu miała również stal mostów 5, 7 i 9 o wartości węgla od 0,030 do 0,258% i zwiększonej zawartości manganu oraz krzemu.

6. Podsumowanie

Stal zlewna przedmiotowych mostów historycznych charakteryzuje się bardzo zróżnicowanymi właściwościami mechanicznymi. Jest to wynik dużego rozrzutu procentowego składu poszczególnych pierwiastków stopowych. Przeciętna zawartość węgla wyniosła od 0,016 do 0,299%. Stwierdzono również duże zróżnicowanie stopnia degradacji stali poszczególnego mostu. Największy stwierdzony wzrost wartości R_{eH} i R_m ma wartość 15,1 i 3,4%, a największe zmniejszenie tych wartości wynosi 24,9 i 16,1%. Każdorazowo jednak wartość R_{eH} była nie mniejsza niż 220 MPa. Słuszne jest stwierdzenie literaturowe, że praktycznie, bez wykonywania badań, dla stali mostów starych można przyjmować najniższe parametry wytrzymałościowe stali współcześnie stosowanej w tego typu konstrukcjach. Międzynarodowy Związek Kolejowy UIC już w roku 1986, w podobnym przypadku, zalecił przyjmować poniższe wartości:

- wytrzymałość na rozciąganie – $R_m = 320\text{--}380$ MPa,
- granica plastyczności – $R_e = 220$ MPa,
- współczynnik sprężystości podłużnej – $E = 200\ 000$ MPa.



Rys. 9. Wartości pracy łamania KV stali mostów w temperaturze -20°C dla próbek starzonych i (normalizowanych)

Często w konstrukcjach starych mostów poszczególne elementy nośne wykonane są z różnych gatunków stali, niekiedy nawet z czterech gatunków o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych. Dlatego celowym wydaje się, podczas ich ekspertyz, sprawdzanie jednorodności użytych gatunków stali w konstrukcji. Pomocne w tych badaniach jest wykorzystywanie przenośnych twardościomierzy. Niekiedy, za zgodą użytkownika, identyfikacja parametrów wytrzymałościowych stali wykonywana jest wyłącznie metodą pośrednią poprzez pomiar twardości metodą Brinella. Należy wówczas wartość $R_{eB} = \alpha_B R_{mB}$ określać z uwzględnieniem zmiennej wartości współczynnika α_B , zależnej od zawartości węgla przyjmowanej z badań chemicznych materiału. Zgodnie z rysunkiem 5 wartości α_B wynoszą od 0,60 do 0,75.

Badania udarnościowe dwóch rodzajów próbek stali 8 mostów, próbek starzonych samorzutnie i próbek normalizowanych, pozwoliły określić prace łamania KV próbek Charpy V w funkcji temperatury stali o różnej zawartości węgla. Wykazana na rysunku 9 aktualna praca łamania w temperaturze -20°C ma bardzo małe wartości. Wartość KV wynosi od 4 do 12 J. Fakt ten należy uznać za zjawisko nadzwyczaj niebezpieczne z punktu widzenia eksploatacyjnego, z uwagi na możliwość powstania pęknięć kruchych w warunkach zimowych. Konsekwencją niskiej udarności badanych stali jest fakt, że dla próbek stali w stanie poeksploatacyjnym (S) praktycznie temperatura przejścia plastyczno-kruchego znajduje się w temperaturach dodatnich w zakresie od -1°C do $+16^{\circ}\text{C}$, a dla mostu nr 10 jest niemożliwa do określenia (por. tabl. 3).

Literatura

1. Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. WKŁ, Warszawa 2010.
2. Brandes K.: Eigenschaften alter Eisen und Stähle und ihre adäquate Materialprüfung und Bewertung. Bautechnik, No. 6/2008.

3. Hołowaty J., Wichtowski B.: Properties of structural steel used in early railway bridges. *Structural Engineering International*, No. 4/2013.
4. Wichtowski B.: Load-carrying capacity of steel railway bridge of the second half of XIX century – discussion. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, No. 4/2014.
5. Hołowaty J., Wichtowski B.: Properties of steel in railway bridge constructed in 1887. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, No. 4/2015.
6. Wiśniewski D., Majka M., Bień J.: Ocena nośności mostów w okresie ich eksploatacji – doświadczenia krajowe i zagraniczne. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7–8/2013.
7. Wichtowski B., Hołowaty J.: Analiza właściwości materiałowych i spawalności stali zlewnej mostów kolejowych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 5/2013.
8. Schaper G.: *Stählerne Brücken*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1949.
9. Wichtowski B., Woźniak Z.: Właściwości normalizowanej stali zlewnej mostu kolejowego po 75 latach eksploatacji. *Przegląd Spawalnictwa*, nr 5/2015.
10. Bakar A.A., Dow R.S.: *Collision and Grouping of Ships*. Newcastle University 2010.
11. Hołowaty J., Wichtowski B.: Ocena wytrzymałościowa stali mostów historycznych w świetle badań nieniszczących. *Przegląd Spawalnictwa*, nr 10/2016.
12. Tasak E., Ziewiec A.: *Spawalność materiałów konstrukcyjnych, tom 1 Spawalność stali*. Wyd. JAK, Kraków 2009.

CONCLUSIONS FROM THE MATERIAL TESTING OF HISTORICAL RAILWAY BRIDGES BUILT BETWEEN 1873 AND 1950

Abstract: The issue of sustainability of historical bridges is a global problem. New evaluation methods for these structures assume the actual loads and current material strength parameters. Properties of degraded steel from 18 railway bridges built between 1873-1950, presented in this paper, can be helpful in this assessment. The analysis of the chemical composition of their steel and the mechanical properties of ReH, Rm, HB and KV are presented. For the eight bridges, this analysis concerns sparsely aged steels with currently occurring features and standardized steel with primary features occurring during their construction.

Keywords: railway bridge, structural steel, ageing of steel, ultimate strength, toughness, hardness