

Stale konstrukcyjne historycznych mostów spawanych

Structural steels of historic welded bridges

Streszczenie

Prezentowano stale konstrukcyjne, które znajdowały zastosowanie w budowie pierwszych mostów spawanych. Właściwości stali zlewnych i wczesnych stali o podwyższonej wytrzymałości powodowały, że nie wszystkie z nich nadawały się do konstrukcji spawanych. Rozwój historycznych stali spawalnych w konstrukcjach mostowych przedstawiono na podstawie przeglądu norm i zaleceń projektowych. Rozpoznanie tych stali w istniejących mostach jest bardzo istotne pod względem planowanego zakresu modernizacji i wzmocnień oraz możliwości stosowania spawania.

Słowa kluczowe: stal zlewna; spawalność; mosty stalowe

Abstract

The structural steels which were used in construction of the first welded bridges are presented. Properties of mild steels and early high strength steels caused that not all of them were suitable for welded structures. The development of historic weldable steels in bridge structures is reviewed over codes and design requirements. Recognition of these steels in existing bridges is very essential to plan a retrofitting and strengthening range as well as possibility of using welding.

Keywords: mild steel; weldability; steel bridges

Wstęp

Spawanie jest integralnym elementem stosowanym w wielu różnorodnych aspektach systemów transportowych. Takimi elementami w mostach są pale fundamentowe, dźwigary przęsła, łożyska konstrukcyjne, urządzenia dylatacyjne, balustrady i elementy pomostów. Spawanie stosuje się w konstrukcjach tymczasowych, rusztowaniach i podporach montażowych stosowanych w budowie mostów. W budowie obiektów kolejowych stosuje się tymczasowe konstrukcje odciążające, bardzo często ze starych dźwigarów, których gatunek stali należy określić przed dopuszczeniem do ruchu. W mostach kolejowych ciągle obowiązuje zakaz stosowania spawania do starych obiektów, dopóki nie określi się parametrów stali konstrukcyjnej i możliwości jej spawania.

Wprowadzenie spawania do mostów stalowych w Polsce datuje się na koniec lat dwudziestych XX wieku dzięki zrealizowanemu projektowi dwóch mostów drogowych w okolicach Łowicza opracowanych przez prof. S. Bryłę [1,2]. Profesor opracował także pierwsze wytyczne do stalowych konstrukcji spawanych. Spawane mosty kolejowe rozpoczęto budować w 1936 r. [3]. W pierwszych obiektach stosowano ówczesne stale zlewne (niskowęglowe), ale technologia spawania i stosowane materiały spawalnicze były dopiero wdrażane do budowy mostów spawanych. W Niemczech od początku lat trzydziestych XX w. nastąpił gwałtowny rozwój stosowania spawanych mostów kolejowych, głównie o konstrukcji blachownicowej. Przed rokiem 1935 kolej niemiecka posiadała już prawie 100 spawanych mostów blachownicowych [4]. Spawanie z powodzeniem stosowano do spawania mostów ze stali zlewnej, zastosowanie spawania do stali o podwyższonej wytrzymałości spotkało się jednak z niepowodzeniem i rozczarowaniem.

Artykuł przedstawia stale konstrukcyjne stosowane w historycznych mostach spawanych, jak i problemy techniczno-spawalnicze związane z modernizacją mostów nitowanych przy pomocy spawania. Stale zlewne węglowe w historycznych mostach z reguły spełniają warunki spawalności. Do spawania stali o podwyższonej wytrzymałości w tych obiektach należy podchodzić z dużą ostrożnością, a niektóre stale historyczne należy traktować jako trudnospawalne.

Rys historyczny

Początek stosowania spawania w mostownictwie związany jest z naprawami lub wzmocnianiem istniejących mostów, w których zastosowanie nitowania było niemożliwe lub bardzo trudne do wykonania [4,5]. Budowę pierwszych mostów spawanych traktowano jako prace prototypowe do rozpoznania zagadnienia i powstających problemów [4,6,7]. W części obiektów spawanie powodowało znaczne problemy z powodu dużej odkształcalności termicznej elementów przy spawaniu, jakości materiałów spawalniczych i występowania pęknięć. Tworzyło to pewien sceptycyzm w stosowaniu konstrukcji spawanych, ale wskazywało także na problemy, jakie należało zbadać i rozwiązać. Wymagania ekonomiczne, szybkość budowy i oszczędność materiałów wymagały jednak stosowania spawania.

Wprowadzanie spawania w budowie mostów stalowych zbiegło się w niektórych krajach z wprowadzeniem stali konstrukcyjnych średniowęglowych i stopowych, które określano wtedy jako stale o wysokiej wytrzymałości o zakresie wytrzymałości $f_u = 480\div 620$ MPa [8]. Stale zbyt drogie lub niespawalne szybko jednak zniknęły z rynku, ale można je znaleźć w obiektach budowanych w tamtym okresie [9,10].

Dr inż. Janusz Hołowaty – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
Autor korespondencyjny/Corresponding author: jah@wp.pl

Stale spawalne do budowy mostów w polskich normach

Wczesne przepisy II Rzeczypospolitej (1920 r.) stosowały jeszcze nazwę żelazo budowlane (zlewne), dla którego wymagano wytrzymałość na rozciąganie nie mniejszą niż 370 MPa, ale nie większą niż 450 MPa. Zawartości siarki i krzemu nie dopuszczano. W warunkach technicznych z 1929 r. do budowy mostów kolejowych wymagano już ograniczenia zawartości fosforu do 0,06% i siarki do 0,05%.

Wprowadzenie stali zlewnej (niskowęglowej) do konstrukcji spawanych odbyło się więc w sposób naturalny i nie stwarzała ona większych problemów pod warunkiem dobrej jej jakości. Przemiany okresu międzywojennego w Polsce znalazły swoje odbicie w przemyśle hutniczym i zakresie produkowanych gatunków stali. W 1937 r. znowelizowano przepisy projektowania konstrukcji stalowych, które objęły tylko stale konstrukcyjne o granicy plastyczności $f_y \leq 500$ MPa [11] oraz wprowadzono normy PN/B-190 i PN/H-223 [8]. Obejmowały one stale tzw. węglowe (W), a żeliwo i stal zgrzewną pominięto, jako już niestosowane w budownictwie. Dostępna wtedy była przeważnie tzw. stal handlowa (stosowana bez oznaczeń) o wytrzymałości na rozciąganie 340÷420 MPa. Oprócz stali handlowej stosowanej w budownictwie ogólnym wprowadzono stale kwalifikowane (W) oznaczane: 010W, 015W i 020W. Oznaczenie gatunków stali i ich parametry mechaniczne podano w tabelicy I.

Stal 010W była stosowana w konstrukcjach mostowych, także do konstrukcji spawanych. Stal 015W była dostarczana na zamówienie, za dopłatą. Stal 020W ujęto w przepisach przyszłościowo, nie była jeszcze produkowana. Stali niskostopowych nie ujęto, gdyż były jeszcze w stadium badań i ich produkcja była niewielka. Przewidywano, że prawdopodobnie w przyszłości zastąpią one stal węglową gatunku 020W.

Pierwsze mosty spawane w Polsce wykonywano ze stali zlewnej o wytrzymałości na rozciąganie $f_u < 450$ MPa. Przykładowy skład chemiczny dla elementów mostu kolejowego położonego nad rzeką Płonką w Płońsku (rys. 1) przedstawiono w tabelicy II. Most posiada konstrukcję bla-

chownicową spawano-nitowaną i został oddany do eksploatacji w 1938 r. Skład chemiczny określono dla pasów górnych dźwigarów głównych (G), podłużnicy walcowanej I360 (P) i krzyżulca stężenia (K). Wyniki badań porównano ze składem chemicznym starych stali zlewnych, stali mostowej St3M i współczesnej stali niestopowej S235.

W roku 1946 normę PN/B-190 znowelizowano [8] i wprowadzono zmianę oznakowania gatunków stali (OW, 015 W37, 6.1.20 W52), w podobny sposób oznakowanie było kontynuowane w następnej normie dla stali do celów budowlanych i konstrukcji stalowych z 1949 r. [12].

Lata powojenne, ze względu na deficyt stali, charakteryzowały się tendencją do wzrostu stosowania stali o podwyższonej wytrzymałości dla zmniejszenia ilości zużytej stali konstrukcyjnej i zbrojeniowej. Norma PN/H-82021 z lipca 1949 r. [12,13] wprowadza już stal konstrukcyjną o wytrzymałości na rozciąganie $f_u \geq 500$ MPa. Na konstrukcje mostowe dopuszczano stosowanie tylko stali zlewnej martenowskiej. Oznaczenie gatunków stali i ich parametry mechaniczne podano w tabelicy III.

Stal o znaku K52 określana była jako stal o wysokiej wytrzymałości o granicy plastyczności i wydłużeniu zależnym od grubości elementu. Stal tą dopuszczano jednak tylko na konstrukcje nitowane, chociaż prowadzono badania nad spawalnością tej stali i ulepszeniem jej składu [14]. Do konstrukcji spawanych stosowano stal węglową znaku 015W z cechą K37. Dla tej stali określano zawartość węgla na ok. C = 0,15%. Ograniczono zawartość fosforu P i siarki S do 0,06%, a ich sumy do 0,10%.



Rys. 1. Widok mostu kolejowego nad rzeką Płonką w Płońsku, 2017 r.
Fig. 1. View of the railway bridge over the Płonka river in Płońsk, 2017

Tablica I. Gatunki stali i parametry mechaniczne – 1937 r.

Table I. Steel grades and mechanical properties – 1937

Znak stali		Bez znaku	010W	015W	020W
Własności mechaniczne	f_u [MPa]	Nie określa się	340÷420	370÷450	420÷500
	f_y [MPa]		210	230	250
	A_{10} [%]		25	22	20

Tablica II. Skład chemiczny stali elementów mostu kolejowego w Płońsku

Table II. Chemical composition of steel in members of the railway bridge in Płońsk

Rodzaj stali	Skład chemiczny, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Al
G – dźwigar 1	0,083	36 ppm	0,479	0,030	0,027	0,151	0,111	0,089	0
G – dźwigar 2	0,031	19 ppm	0,459	0,028	0,026	0,147	0,109	0,082	0
P – I360	0,086	4,4 ppm	0,539	0,026	0,015	0,162	0,131	0,062	0
K – L100×10	0,078	7,5 ppm	0,417	0,021	0,013	0,121	0,158	0,108	27 ppm
Zlewna	0,03÷0,35	ślady÷0,18	0,04÷0,75	0,004÷0,16	0,004÷0,11	0,110÷0,14	0,007÷0,014	0,030÷0,04	–
St3M	max 0,20	0,12 ÷ 0,30	min 0,40	max 0,050	max 0,050	–	max 0,30	max 0,30	min 0,02
S235J0	max 0,17	–	max 1,40	max 0,030	max 0,030	max 0,55	–	–	–

Kolejna zmiana oznaczeń stali konstrukcyjnych nastąpiła według normy PN-54/H-84021 [15]. Stale konstrukcyjne podzielono w niej na stale pospolitej jakości, zwykłej jakości i o wysokiej wytrzymałości. Stale o wysokiej wytrzymałości określono jako stale z podwyższoną zawartością manganu. Oznaczenie gatunków stali zwykłej jakości i stali o wysokiej wytrzymałości oraz ich parametry mechaniczne podano w tablicy IV.

Stal St52 miała podobne wymagania dla składu chemicznego jak stal K52. Stale zwykłe były spawalne, z wyjątkiem stali St3SX przy grubości elementu powyżej 25 mm. Stal wysokiej wytrzymałości St52 była spawalna w postaci prętów i kształtowników, a dla blach przy grubości do 20 mm i przy grubości 21÷40 mm w stanie normalizowanym. Producent każdorazowo musiał potwierdzać spawalność tej stali. Norma po raz pierwszy wprowadziła wymagania minimalnej udarności.

Następną normą wprowadzającą zmiany w oznakowaniu gatunków stali i ich parametrów jest PN-63/H-84021 [16]. Norma, łącznie z normą PN-64/H-84023 [17], posłużyła do określenia gatunków stali stosowanych w mostach wg ostatnich w Polsce wytycznych projektowania mostów stalowych w oparciu o naprężenia dopuszczalne [19,20]. Oznaczenie gatunków stali zwykłej jakości i o podwyższonej wytrzymałości oraz ich parametry mechaniczne podano w tablicy V [16÷18].

Stal konstrukcyjną oznaczano znakami oznaczającymi stal węglową zwykłej jakości lub stal niskostopową. Znak stali niskostopowej składał się z liczby podającej średnią zawartość węgla oraz liter oznaczających składniki stopowe i cyfry oznaczającej ich zawartość w całkowitych procentach. Dla manganu stosowano oznaczenie G. Przy dodatkowych wymaganiach dla składu chemicznego stosowano na końcu literę A. Stal o podwyższonej wytrzymałości 18G2A można było stosować do mostów spawanych. Zawartość węgla w tej stali była ograniczona do 0,20%, a fosforu i siarki do 0,04%. Stal 18G2A z zawartością miedzi 0,25÷0,50% oznaczano dodatkowymi literami Cu (18G2ACu).

Normy [16,17] nowelizowano w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku z zachowaniem znakowania gatunków stali. Te gatunki stali konstrukcyjnej są również stosowane w normie projektowania mostów stalowych PN-82/S-10052 i przetrwały one do czasu wprowadzenia gatunków stali konstrukcyjnych wg norm europejskich. Jedne z ostatnich mostów wybudowanych ze stali 18G2ACu o konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej w regionie za-

chodniopomorskim przedstawiono na rysunku 2. Mosty oddawano do eksploatacji etapowo w latach 2002/2003.



Rys. 2. Widok głównych mostów przeprawy przez Regalicę w Szczecinie

Fig. 2. View of the main bridges for Regalica crossing in Szczecin

Inne stale

Stal zlewną o parametrach stali St37, K37, czy St3 wprowadzano już po pierwszej wojnie światowej. W Niemczech stal węglową o zawartości węgla C = 0,25÷0,33% i wytrzymałości na rozciąganie 500÷550 MPa stosowano od 1911 r. Stal tą określano wtedy jako wysokowęglową. W latach dwudziestych ubiegłego wieku pojawiła się w Niemczech stal St43, a następnie kolej niemiecka rozpoczęła wprowadzanie stali St48 i stali krzemowej St Si [8÷10]. Pod koniec lat dwudziestych pojawiła się stal wysokiej wytrzymałości St52 w kilku odmianach w zależności od składu chemicznego. Część obiektów zbudowanych z tych stali znajduje się obecnie w infrastrukturze polskich kolei. Ocena i rozpoznanie tych stali jest jednak utrudnione, gdyż stosowano dość duży zakres składu chemicznego, a ich parametry nigdy nie były objęte niemieckimi normami (DIN), a wytycznymi kolei niemieckiej. Stale zlewne lub zwykłe gatunku St37 w obiektach mostowych z reguły są spawalne. Dla innych stali należy rozpoznać ich spawalność na podstawie składu chemicznego i sprawdzić parametry mechaniczne. Stale gatunku St52 są spawalne w wersji wytwarzanej dopiero od 1938 r. Wcześniejsze rodzaje tej stali, jak i stale krzemowe okazały się trudnospawalne w tamtym okresie i bardzo podatne na kruche pękanie po spawaniu.

Parametry wczesnych stali w mostach

Obiekty mostowe są obiektami o długim okresie eksploatacji i w ich stalach konstrukcyjnych zachodzą procesy starzenia materiału. Parametry mechaniczne stali mostów

Tablica III. Gatunki stali i parametry mechaniczne – 1949 r.

Table III. Steel grades and mechanical properties – 1949

Znak stali / cecha stali		0W37 / KX	015W / K37*	020W / K42	6.1.20 / K52
Własności mechaniczne	f_u [MPa]	370÷450	370÷450	420÷400	520÷640
	f_y [MPa]	210	210	230	320÷360
	A_5 [%]	25	25	24	19÷23

* stale stosowane w mostach spawanych

Tablica IV. Gatunki stali i parametry mechaniczne – 1954 r.

Table IV. Steel grades and mechanical properties – 1954

Znak stali		St1S	St37S	St3SX/St3S*	St52*
Własności mechaniczne	f_u [MPa]	320÷400	370÷450	380÷470	520÷640
	f_y [MPa]	190	220	240	320÷360
	A_5 [%]	33	25	25÷27	19÷23

* stale stosowane w mostach spawanych

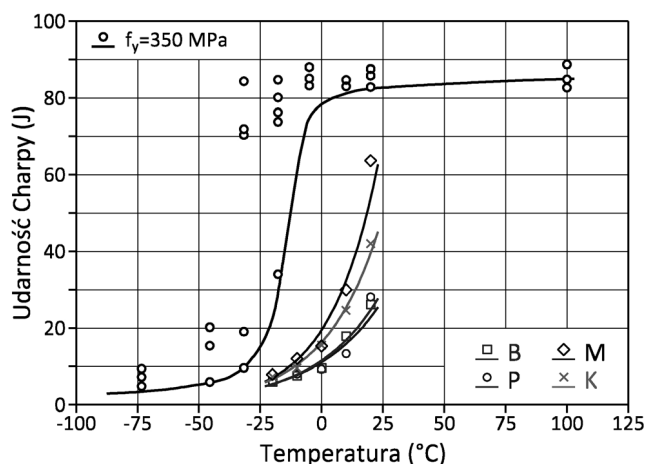
Tablica V. Gatunki stali i parametry mechaniczne – 1963/1964 r.
Table V. Steel grades and mechanical properties – 1963/1964

Znak stali		St3SX	St3SY/St3S	St3M*	18G2	18G2A*
Własności mechaniczne	f_u [MPa]	380÷470	380÷470	380÷470	520÷640	520÷640
	f_y [MPa]	220÷240	230÷240	220÷240	320÷360	320÷360
	A_5 [%]	25÷27	25÷27	25	19÷22	19÷22

* stale stosowane w mostach spawanych

historycznych są dość zróżnicowane. Standardowo sprawdza się udarność stali metodą Charpy'ego. Część parametrów stali ulega zmianie, co szczególnie jest widoczne w zmniejszeniu udarności. Porównanie pracy łamania względem temperatury KV(T) współczesnej stali konstrukcyjnej o granicy plastyczności $f_y = 350$ MPa stosowanej do budowy mostów spawanych [21] i stali zlewnej wiaduktu kolejowego zbudowanego w 1907 r. przedstawiono na rysunku 3. Badania wykonano dla czterech elementów przęsła blachownicowego wiaduktu: S – środkik dźwigara głównego, P – poprzecznicą, M – podłużnicą i K – kątowniką stężenia [22].

O ile w konstrukcjach spawanych obawy co do spawalności stali są nieuzasadnione, to problemem może być jakość wykonanych złączy spawanych. W konstrukcjach nitowanych możliwość naprawy lub wzmocnienia z zastosowaniem spawania powinna być zweryfikowana po sprawdzeniu składu chemicznego stali, jej parametrów mechanicznych i przewidywanych oddziaływaniach w złączach spawanych [8]. W wyniku zastosowania spawania w mostach historycznych może wystąpić wzrost kruchości materiału co jest zjawiskiem szczególnie niebezpiecznym.



Rys. 3. Zależność między pracą łamania KV a temperaturą dla współczesnej stali $f_y = 350$ MPa i stali zlewnej z elementów wiaduktu kolejowego
Fig. 3. Relation between impact energy KV and temperature for a contemporary steel $f_y = 350$ MPa and mild steel from the railway viaduct members

Podsumowanie

Pierwsze drogowe mosty spawane wykonano w Polsce na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych ubiegłego wieku stosując niskowęglowe stale zlewne. Pomimo sceptycyzmu dotyczącego zastosowania spawania zbudowano także kilka mostów kolejowych. Artykuł przedstawia stale konstrukcyjne stosowane w budowie mostów, zwłaszcza spawanych, rozwój tych gatunków stali i stawiane im wymagania. Część najstarszych obiektów przetrwała okres wojenny i obecnie są przygotowywane do wykonania modernizacji.

Naprawom i modernizacji z zastosowaniem spawania podlegają także mosty nitowane wykonane z różnych gatunków stali zlewnej. Część obiektów zbudowano ze stali stosowanych przez kolej niemiecką. Są wśród nich stale uznawane za niespawalne. Rozpoznanie tych gatunków stali w istniejących mostach jest bardzo istotne dla prawidłowego zaplanowania zakresu prac modernizacyjnych. Ocena aktualnych parametrów stali konstrukcyjnych oraz współczesne technologie spawania i materiały spawalnicze umożliwiają prawidłowy dobór metod naprawy lub wzmocnienia z udziałem spawania.

Literatura

- [1] Bryła S.: Most żelazny spawany elektrycznie na rzece Słudwi pod Łowiczem, Spawanie i Cięcie Metali, nr 11, s. 186-194, 1929.
- [2] Karśnicki W.: History of two welded bridges near Łowicz, Przegląd Spawalnictwa, nr 10-11, 1976.
- [3] Szelągowski F.: Pierwszy most kolejowy w Polsce z dźwigarami spawanymi, Inżynier Kolejowy, nr 11, s. 388-390, 1936.
- [4] Voormann F.: The use of Welding in Civil Engineering – Condition of a Technological Innovation in the 1920s, Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009.
- [5] Bryła S.: Początki żelaznych konstrukcji spawanych w Niemczech, Spawanie i Cięcie Metali, nr 7, s. 112-115, 1929.
- [6] Wittfoht H.: Building Bridges. History. Technology. Construction, Beton-Verlag, Dusseldorf 1984.
- [7] Leonhardt F.: Reflections on 60 years of structural development, in Structural Engineering: History and development (Ed. R.J.W. Milne), s. 7-31, E & FN Spon, London 1997.
- [8] Czapliński K.: Dawne wyroby ze stopów żelaza, DWE, Wrocław 2009.
- [9] Hołowaty J., Wichtowski B.: Properties of structural steel in early railway bridges, Structural Engineering International, Vol. 23 (4), s. 512-518, 2013.
- [10] Hołowaty J.: Properties of high tensile steels in historical railway bridges, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, Ahead of print, s. 1-12, 2017, <http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.17.00012>
- [11] Bryła S.: Nowe przepisy obliczania konstrukcji stalowych, Przegląd Techniczny, tom LXXVI (25), s. 901-905, 1937.
- [12] PN/H-84021. Stal do celów budowlanych i do konstrukcji stalowych. Lipiec 1949 r.
- [13] Psenicki A.: Mosty stalowe nitowane, WK, Warszawa 1954.
- [14] Pilarczyk J.: Spawalność stali K 52, Hutnik, 9-10, s. 321-329, 1950.
- [15] PN-54/H-84021. Stal do celów budowlanych i do konstrukcji stalowych. Zestawienie i klasyfikacja.
- [16] PN-63/H-84021. Stal dla budownictwa. Gatunki.
- [17] PN-64/H-84023. Stal węglowa o określonym przeznaczeniu i o szczególnych właściwościach. Zestawienie gatunków.
- [18] Kędziński B.: Postęp techniczny w mostownictwie, WKŁ, Warszawa 1972.
- [19] Szelągowski F.: Mosty metalowe. Część I, WKiŁ, Warszawa, 1966.
- [20] Cholewo J., Sznurowski M.: Mosty kolejowe, WKiŁ, Warszawa 1970.
- [21] Dexter R.J., Fisher J.W.: Fatigue and Fracture, in: Bridge Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton – Washington, 2000.
- [22] Hołowaty J., Wichtowski B.: Mała konstrukcja stalowego wiaduktu kolejowego i duży problem naprawczy, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 88 (5), s. 5-9, 2016.