

DOI: <https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v97.1157.04-14>

Original Article

Degradation processes in normalized steels St37-12 and 18G2A of two operational structures from the 20th century

Procesy degradacyjne w stalach normalizowanych St37-12 i 18G2A dwóch eksploatowanych konstrukcjach budowlanych z XX wieku

Bernard Wichtowski ¹, Janusz Hołowaty ^{2,*} 

¹ emerytowany prof. ZUT; marek.wichtowski@zut.edu.pl (B.W.)

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

* Correspondence: janusz.holowaty@zut.edu.pl; tel.: +48-603-116-273 (J.H.)

Received: 05.06.2024; Accepted: 10.10.2024; Published: 01.01.2025

Streszczenie: Przedstawiono badania strukturalno-wytrzymałościowe stali normalizowanej dwóch konstrukcji budowlanych. Są to blachownicowy most kolejowy wykonany z niemieckiej stali zlewnej eksploatowany od 1938 roku oraz zespół pięciu zbiorników cylindrycznych wykonanych z polskiej stali niskostopowej i użytkowanych od 1973 roku. Wykonano badania chemiczne i mechaniczne oraz metalograficzne w zakresie makro i mikro struktury oraz dodatkowo wyżarzanej normalizacyjnie stali tych obiektów. Są to priorytetowe badania tych gatunków stali budowlanej.

Słowa kluczowe: stal konstrukcyjna, stal normalizowana, technologia stali, mikrostruktura

Abstract: Structural-strength tests of normalized steel of two building structures are presented. There is a plate girder bridge of mild steel in service since 1938 and a complex of five-cylinder tanks with capacity 1500 m³ each, constructed of low-alloy steel, in service since 1937. Chemical and mechanical tests in macro and micro structural range and additionally anneal steels from these structures. There are priority tests for such construction steel grades.

Keywords: structural steel, normalized steel, steel technology, microstructure

Wstęp

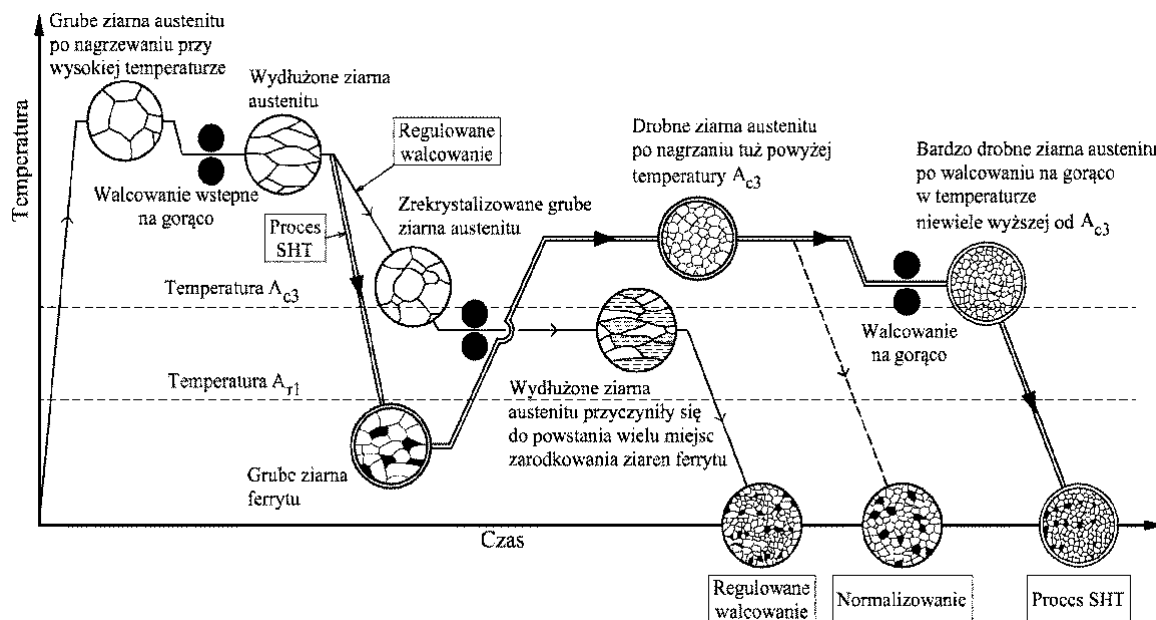
Według literatury technicznej nie ma dwóch takich samych stali, gdyż wszelkie nawet minimalne zmiany w składzie chemicznym i parametrach technologicznych wytwarzania mogą w sposób drastyczny zmienić charakter produktu. Niekiedy przy stalach wysokostopowych zmiana zawartości węgla o dziesiątą procenta wpływa na właściwości spawalnicze [1]–[3]. Nie bez znaczenia jest fakt niedoinformowania kadry projektowo-technologicznej o nowych materiałach, trudnych technologicznie i wymagających indywidualnego podejścia [4]–[6]. Zdziwienie budzi fakt łamania dyscypliny technologicznej oraz opisane przez prof. Hobbahera przykłady awarii konstrukcji budowlanych w Niemczech [6]. Ocena występujących uszkodzeń wykazała, że około 80% z nich jest spowodowana niewłaściwym projektowaniem, a z tego 70% uszkodzeń to wynik pęknięć zmęczeniowych.

Przyjmuje się, że podstawowym czynnikiem określającym cechy materiału są zmiany jego budowy wewnętrznej, wynikające ze strukturalnych procesów degradacyjnych przedstawionych m.in. w [7], [8]. Poziomem porównawczym tych zmian, właściwości materiałowych w czasie eksploatacji, jest symulacja wyjściowej budowy materiału za pomocą wyżarzania normalizującego.

W tym celu wygrzewa się próbki w temperaturze 930 °C przez jedną godzinę i studzi się na powietrzu. Uzyskuje się w tym przypadku najmniejszą możliwą w tej stali wielkość ziarna. Jest to czynnik zwiększający granicę plastyczności i obniżający temperaturę przejścia stali w stan kruchości. Niekiedy uzyskuje się zaskakujące wyniki. Mechanizm procesu starzenia stali wyjaśnia się za pomocą klasycznej teorii wydzieleni lub nowszej teorii blokowania dyslokacji.

W świetle przedstawionej wyżej struktury stali trudno jest mówić o jakiegokolwiek uogólnionej hipotezie jej oceny. Tkwimy wciąż w opisie fenomenologicznym, któremu dodają niewątpliwie nowych wartości coraz doskonalsze narzędzia badawcze zarówno do doświadczeń i modelowania, a także obliczeń numerycznych. Problem komplikuje fakt, że im starsze są obiekty, tym bardziej akumulują częściowe uszkodzenia z cykli obciążenia eksploatacyjnego. W zależności od typu konstrukcji uszkodzenia początkowe i zmęczeniowe, które mają być oceniane podczas kontroli, mogą być spowodowane różnymi przyczynami [9]. Nie zawsze można wykazać wystarczający poziom bezpieczeństwa za pomocą obliczeń, należy wówczas zastosować pomiary statyczne i dynamiczne. Należy dążyć do znalezienia najbardziej efektywnego rozwiązania dla dalszego użytkowania obiektu [4], [7], [8].

W celu częściowego rozwiązania problemu wprowadza się nowości w produkcji samej stali; w postaci odlewania ciągłego i nowych procesów walcowania oraz nowych gatunków stali konstrukcyjnej. Jednocześnie opracowano nową probabilistyczną ocenę nośności starych mostów [10]–[13] Urywek tych zagadnień dotyczy procesów degradacyjnych nowych stali normalizowanych, odlewanych w sposób ciągły i przedstawionych w artykule. Stal odlana w sposób ciągły ma lepszą jakość, jest o większej czystości i korzystniejszej mikrostrukturze niż po odlewaniu do wlewnic [1], [2]. Stale te są w pełni uspokojone. Aby uzyskać różnorodne i szczególne własności blach opracowano i wdrożono szereg odmian procesów regulowanego walcowania (kontrolowane wielokrotne walcowanie) – Rys. 1. Jest to obróbka cieplno-plastyczna szczegółowo omówiona w [2], m.in. nowy proces SHT (ang. *Sumito High Toughness*). Po regulowanym kilkakrotnym walcowaniu ziarna austenitu ulegają całkowitej lub częściowej rekryształizacji – mają drobne ziarno.



Rys. 1. Schemat zmian mikrostruktury w procesie walcowania SHT [2]

Fig. 1. Scheme of microstructure changes in the SHT rolling process [2]

Do nowej generacji tych stali należy zaliczyć stale budowlane normalizowane oraz stale po obróbce cieplnej o podwyższonej wytrzymałości. Autorzy artykułu w swojej pracy zawodowej praktycznie spotkali się z oceną stanu technicznego tylko dwóch konstrukcji stalowych wykonanych ze stali normalizowanej. Są to:

- a) ośmioprzęsłowy most kolejowy z niemieckiej stali zlewnej gatunku St37-12, o długości 314 m, wybudowany w 1938 r.,
- b) zespół pięciu zbiorników cylindrycznych wykonanych z polskiej stali niskostopowej gatunku 18G2A z płaszczy pięciu zbiorników cylindrycznych o pojemności $V = 1500 \text{ m}^3$ każdy, o średnicy 13,0 m i wysokości 12,0 m, wybudowanych w 1973 r.

Rys historyczny rozwoju stali konstrukcyjnych

Prekursorem wprowadzania nowych gatunków stali było hutnictwo niemieckie i angielskie. Szczególny boom nastąpił w drugiej połowie XIX wieku i na początku XX wieku. Związane to było z nowymi procesami produkcji stali i zwiększonym zapotrzebowaniem na stal. Nowe procesy produkcji stali to proces powietrzny: 1855 r. Bessemer i 1879 r. Thomas oraz proces paleniskowy: 1865 r. Simens-Martin. Rozwój, zwłaszcza ilościowy, nowych gatunków stali był możliwy dzięki znacznemu postępowi w jakości stali konstrukcyjnej, który zawdzięczamy ich twórcom. Dzięki licznym eksperymentom oraz badaniom udało się im rozpoznać i stosować podstawowe prawa metalurgii. Już w XIX wieku rozpoznano, że wyżarzanie (normalizowanie) stali polepsza jej parametry [14]. Lepsze jakościowo i wytrzymałościowo wczesne stale zlewne szybko zaczęły zastępować stal zgrzewną i żeliwo wykorzystując dla swoich produktów budowę nowych kolejowych (głównie w USA) i modernizację nawierzchni kolejowych w Europie (wymiana szyn żeliwnych na stalowe). Rozwój sieci kolejowej pod koniec XIX wieku dał także możliwość zastosowania wczesnych stali konstrukcyjnych w budowie dużych obiektów mostowych. Były to wczesne stale konstrukcyjne: węglowe (o podwyższonej wytrzymałości) i zlewne. Zbudowano wtedy tak znane kolejowe obiekty mostowe, jak most „Firth and Forth” w Szkocji o długości 2,46 km z głównymi przęsłami o rozpiętości $2 \times 521 \text{ m}$ oddany do eksploatacji w 1890 roku oraz most łukowy o długości 465 m nad doliną rzeki Wupper koło Müngsten w Niemczech, o rozpiętości przęsła łukowego 170 m i wysokości 107 m oddany do eksploatacji w 1897 roku.



Rys. 2. Widok mostu Müngsten - pierwszy duży most ze stali zlewnej w Niemczech

Fig. 2. The view of the Müngsten Bridge – the first big bridge made of mild steel in Germany

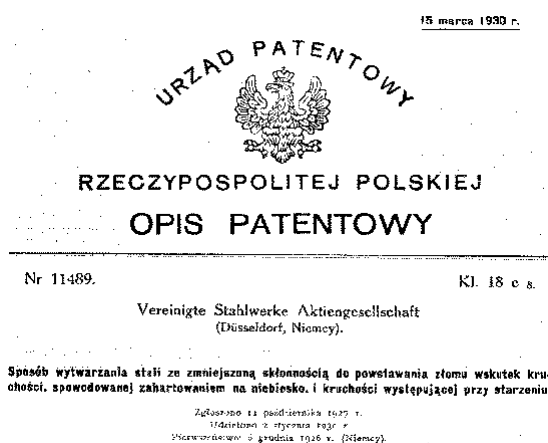
W budowie mostu „Firth and Forth” zastosowano wczesną stal węglową wytwarzaną metodą Siemens-Martina o wytrzymałości 463 MPa dla elementów rozciąganych i 525 MPa dla elementów ściskanych [15]. W budowie mostu Wuppertal zastosowano wczesną stal zlewną wytwarzaną metodą Thomasa o minimalnej wytrzymałości na rozciąganie 370 MPa. Stal ta zapoczątkowała stosowanie stali zlewnej w budowie obiektów mostowych w Niemczech. Oba mosty są eksploatowane do dzisiaj.

Dalszy rozwój stali konstrukcyjnych objęty został wymaganiami zawartymi w aktach normatywnych. Pierwszą normą w Europie określającą wymagane parametry stali jako materiału konstrukcyjnego była norma brytyjska BS15 z roku 1905. Dla obiektów mostowych norma dopuszczała stal produkowaną procesem Simensa-Martina, zarówno zasadowym, jak i kwaśnym, wytrzymałości stali na rozciąganie określano w zakresie 430-490 MPa. Pierwsza norma niemiecka DIN 1612 dla stali zlewnej ukazała się w roku 1924 i obejmowała stal normalnej jakości St 37-12 oraz stale specjalnej jakości St 34-12, St 42-12 i St 44-12, a także stal handlową St 00-12. Wytrzymałości stali normalnej jakości obejmowała zakres 370-450 MPa [16]. W Niemczech przed okresem wprowadzenia norm, jak również i w okresie ich obowiązywania stosowano różne inne gatunki stali

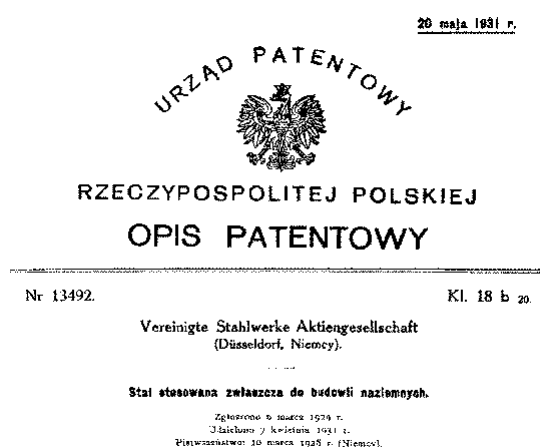
konstrukcyjnych na podstawie indywidualnych warunków dostawy, dopuszczających zastosowanie nowych gatunków stali np. dla obiektów kolei niemieckich, zanim stały one objęte wymaganiami normowymi.

Stal normalnej jakości St 37-12, z uwagi na producenta w Niemczech nazwano: Thomasstahl i SM-Stahl. Należy zaznaczyć, że w Niemczech konwertory Thomasa stosowano od 1880 r., a piece Siemens-Martina od 1864 r. Ulepszanie produkcji stali zaowocowało także nowymi patentami. W 1926 r. opatentowano w Niemczech (Rys. 3): „sposób wytwarzania stali ze zmniejszoną skłonnością do powstawania złomu wskutek kruchości”. Wynalazek polegał na poddaniu stali mechanicznej obróbce na zimno a następnie „żarzeniu w temperaturze 700- 900 °C.” Wyżarzenie normalizujące rozdrabnia ziarna, a tym samym zwiększa granice plastyczności i jednocześnie obniża temperaturę przejścia stali w stan kruchy.

Kontynuacją rozwoju stali konstrukcyjnych były kolejne patenty w latach 1929 i 1932, związane z wprowadzaniem stali o podwyższonej wytrzymałości. Parametry stali konstrukcyjnej w patencie nr 13492 (Rys. 4) wynosiły: granica plastyczności $R_e = 380$ MPa, wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 540$ MPa przy zawartości węgla 0,13% [17].



Rys. 3. Patent do wytwarzania stali normalizowanej
Fig. 3. The patent for production of normalized steel



Rys. 4. Patent dla stali o wysokiej wytrzymałości
Fig. 4. The patent for high tensile structural steel

Problem utrzymania i bezpiecznej eksploatacji obiektów mostowych na świecie i w Polsce będzie narastał, albowiem zarówno na liniach kolejowych, jak również na sieci drogowej są użytkowane liczne mosty będące w eksploatacji już ponad 100 lat. Słusznie organizatorzy 16 edycji seminarium: Wrocławskie Dni Mostowe w listopadzie 2021 r. poświęcili „Bezpieczeństwu budowli mostowych”. Autorzy wzięli również udział we wrześniowej tegorocznej konferencji SDSS 2022 o stateczności i plastyczności konstrukcji stalowych organizowanej przez Uniwersytet w Aveiro, Portugalia i która będzie obchodzić 50-lecie pierwszej konferencji w Paryżu (1972). Przygotowaliśmy referat o stanie technicznym eksploatowanych stalowych mostów kolejowych w Polsce [17].

Charakterystyka analizowanych obiektów budowlanych

Obecnie przewiduje się projektowanie konstrukcji stalowych wg Eurokodu 3. Zaleca on większą liczbę gatunków stali i o lepszej jakości niż poprzednie normy krajowe. Ze względu na technologię wytwarzania nie ma jednak przejścia z dawnych krajowych gatunków stali na gatunki europejskie. Gatunki te są dostarczane w stanie normalizowanym (N), po walcowaniu normalizacyjnym (NL) i po walcowaniu termomechanicznym (M, ML). Przedstawione w artykule konstrukcje zostały wykonane z innych poniższych stali:

- most kolejowy przez rzekę Wartę w Gorzowie Wlkp. z niemieckiej stali zlewnej gatunku St 37-12 zgodnie z normą DIN 1612: 1935, normalizowanej,

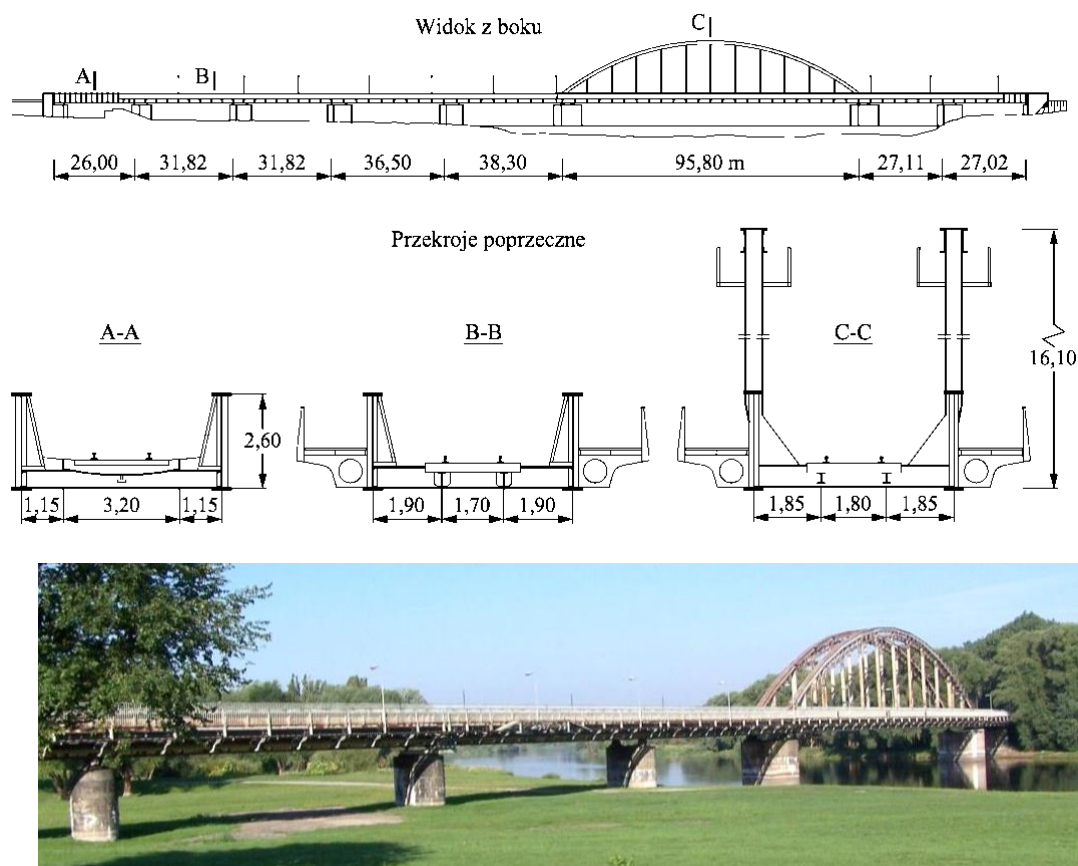
- b) zespół 5 zbiorników ze stali niskostopowej 18G2A, zgodnie z PN-B-03200: 1990, normalizowanej.

Według danych technicznych stale te mają właściwości materiału podane w tablicy I [18]. Z uwagi na znaczne gabaryty analizowanych obiektów stanowiły one obszerne pole do pobrania próbek doświadczalnych. Pozwoliło to, w szczególności w odniesieniu mostowej, przeprowadzić obszerny zakres badań chemicznych i mechanicznych, zarówno w zakresie makro, jak i mikro, który opublikowaliśmy w artykule [7]. Umożliwiło to również określić zaistniałe różnice w procesach degradacyjnych dotychczas przeprowadzonych, a przede wszystkim dowiedzieć się, czy powinny one znaleźć odzwierciedlenie w wynikach badań wytrzymałościowych albo we właściwościach dynamicznych lub zmęczeniowych [19]. Według autorów są to badania „jutra”, badania przyszłości, gdyż według zaleceń Eurokodu 3 w konstrukcjach budowlanych należy stosować stal gatunku S355 w stanie N lub NL.

Tab. I. Właściwości stali zlewnej St37-12 i niskostopowej 18G2A

Tab. I. Properties of mild steel St37-12 and low-alloy steel 18G2A

Stal	Skład chemiczny, % wag.						R_{eH}	R_m
	C	Mn	Si	P	S	P + S	MPa	MPa
Thomas St37-12	max 0,16	0,4÷0,5	~0,01	max 0,09	max 0,06	max 0,13	max 230	370÷450
SM St37-12	max 0,20	0,4÷0,5	~0,01	max 0,06	max 0,06	max 0,10		
18G2A PN-H-84018	max 0,20	1,0÷1,5	0,2÷0,5	max 0,04	max 0,04	max 0,05	max 335	490÷630



Rys. 5. Konstrukcja mostu kolejowego przez rzekę Wartę i jego aktualny widok

Fig. 5. The structure of the Warta River bridge and its current view

Schemat konstrukcyjny i aktualny widok analizowanego mostu kolejowego przedstawiono na Rys. 5. Most został zbudowany dla kolei niemieckiej na jednotorowej linii kolejowej w Gorzowie Wlkp., przez rzekę Wartę, ze stali zlewnej niskowęglowej St37-12 [20]. Dotyczy to obecnie siedmiu przęseł, gdyż zburzone w czasie II wojny światowej łukowe przęsło nurtowe o rozpiętości 95,80 m zostało odbudowane w 1965 r. ze stali 18G2. Jednocześnie most podano modernizacji poprzez wykonanie dwustronnych chodników publicznych o szerokości 1,50 m.

Na rys. 6 przedstawiono widok zespołu pięciu zbiorników o pojemności po 1500 m³ każdy, wybudowany w roku 1973 z przeznaczeniem na magazynowanie kwasu fosforowego. Dlatego też ich płaszcze pionowe oraz pokrycia dachowe od środka zabezpieczono wykładziną gumową o grubości 5 mm, a dno wyłożono płytkami kwasoodpornymi. Zmiana technologii produkcji zakładu zmieniła produkt magazynowania na ciekły nawóz ogrodniczy.



Rys. 6. Zespół pięciu zbiorników cylindrycznych w Szczecinie i schemat ich konstrukcji

Fig. 6. The complex of five cylindrical tanks in Szczecin and scheme of their structure

Na rys. 6 przedstawiono również schemat konstrukcyjny zbiornika o średnicy $D_w = 13,0$ m. Jego płaszcz o wysokości 12,0 m jest wykonany z siedmiu poziomych arkuszy. Sześć dolnych o wysokości 1,75 m i pierścienia górnego o wysokości 1,50 m. Dwa dolne arkusze mają grubość 12 mm, dwa następne 10 mm i trzy górne 8 mm.

Badania stali konstrukcyjnej obiektów

Najbardziej subiektywny i przekonujący, o wielkości degradacji strukturalnej materiału, jest sposób udawania, symulacji wyjściowej jego budowy. Uzyskujemy to za pomocą wyżarzania normalizującego. W tym celu wygrzewa się materiał w temperaturze 930 °C przez jedną godzinę i studzi na powietrzu. Uzyskujemy wówczas właściwości hutnicze oceniane metodą udarności. Dlatego też w celach porównawczych część badań, w zależności od potrzeb, wykonujemy na próbkach dwojakiego typu:

- próbkach S – starzonych bez żadnej dodatkowej obróbki,
- próbkach N – normalizowanych, wygrzewanych w 930 °C przez 1 h.

Badania składu chemicznego wykonano za pomocą emisyjnego spektrometru jarzeniowego GDS 500A firmy LECO. Badaniom poddano trzy próbki: A, B, C pobrane z konstrukcji mostu i jedną z płaszcza zbiornika. Próbkę A pobrano ze strefy podporowej środknika przęsła skrajnego o $l = 26,0$ m, a próbkę B z kątownika stanowiącego słupkę, stężenia podporowe tego przęsła. Natomiast próbkę C pobrano z pasa górnego nad podporą 8 przęsła nr 8 o $l = 27,0$ m. uzyskano skład chemiczny z 6 jarzeń każdej próbki, których średnie wartości zamieszczono w tablicy II. Wszystkie inne badania wykonano na stali z próbki A.

Tab. II. Skład chemiczny stali mostu (M) i zbiornika (Z)

Tab. II. Chemical content of bridge steel (M) and tank steel (Z)

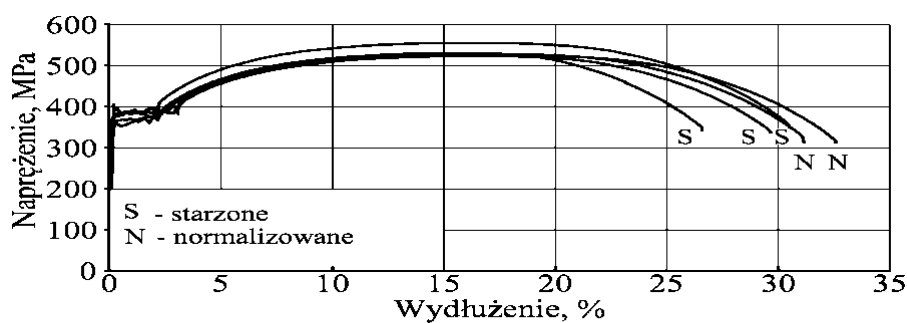
Obiekt	Stal	Próbka	Skład chemiczny, % wag.				
			C	Mn	Si	P	S
M	37-12	A środek	0,084	0,461	0,045	64 ppm	0,026
		B kątownik podporowy	0,031	0,309	0,043	0,036	0,044
		C pas górny	0,035	0,351	0,042	0,027	0,013
Z	18G2A	Płaszcz	0,166	2,055	0,395	0,035	0,027

Z analizy składu chemicznego wynika, że konstrukcje siedmiu blachownicowych przęseł mostu wykonano ze stali niskowęglowej gatunku St 37-12. Według [16] była to stal zlewna (niemiecka terminologia) normalnej jakości o minimalnej wytrzymałości na rozciąganie od 370 MPa i maksymalnej wytrzymałości do 450 MPa. Natomiast stal z płaszcza zbiornika to stal gatunku 18G2A. Jest to odpowiednik obecnie produkowanej stali gatunku S355. Zawartość manganu 2,055% ma raczej negatywny wpływ na spawalność tej stali. Natomiast zawartość aluminium i krzemu, o wartościach 0,083 i 0,395% zwiększają jej odporność na starzenie, co powinno być zauważalne w badaniach uduchałościowych KV.

Statyczna próba rozciągania umożliwia oszacowanie właściwości mechanicznych stali. W tym celu przeprowadzono badania rozciągające próbek okrągłych pięciokrotnych o średnicy bazowej 10 mm (stal mostu) i 8 mm (stal zbiornika). Obejmowały one:

- sześć próbek ze stali St 37-12, w tym trzech w stanie naturalnym, czyli zestarzone (S) oraz trzech, które wcześniej poddano wyżarzaniu normalizującemu (N) w temperaturze 930°C przez 1 godzinę i studzeniu na powietrzu,
- pięć próbek ze stali 18G2A, z płaszcza zbiornika, w tym trzech w stanie starzonym, poeksploatacyjnym (S), a dwie próbki po normalizacji (N).

Wykresy rozciągania próbek stali zbiornikowej przedstawiono na Rys. 7, natomiast wyniki rozciągania wszystkich próbek, stali mostowej i zbiornikowej, przedstawiono w Tabeli III. Są to wartości średnie z trzech próbek, z wyjątkiem $R_e = \min R_{eH}$ (wartość minimalna z górnej granicy plastyczności R_{eH}).



	d_0 mm	R_{eH} MPa	R_{eL} MPa	R_m MPa	A %
S	7,94	368,9	366,9	530,6	26,6
S	7,97	360,9	352,8	523,9	29,7
S	7,87	383,7	379,4	555,5	30,5
N	8,01	387,6	375,6	524,5	32,6
N	8,01	405,5	384,0	528,6	31,1

Rys. 7. Wykresy rozciągania stali płaszcza zbiornika

Fig. 7. Tensile curves for the tank jacket steel

Tablica III. Właściwości mechaniczne stali mostu (M) i zbiornika (Z)

Table III. Mechanical properties of bridge steel (M) and tank steel (Z)

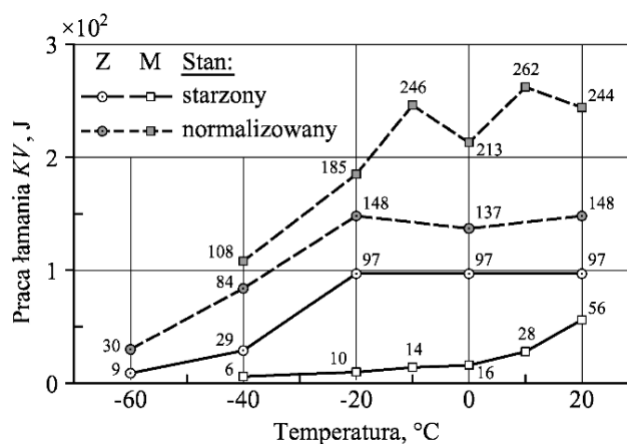
Obiekt i stal	Rodzaj stali	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A5 [%]	Twardość Brinella			
						HB5	R_{mB} [MPa]	α	R_{eB} [MPa]
Most (St-12)	S	220	212	342	36	107	361	0,70	252
	N	275	269	376	41	106	357	0,70	249
Zbiornik (18G2A)	S	361	366	536	29	163	547	0,65	355
	N	387	380	526	32	165	553	0,65	259

Pomiar twardości metodą Brinella. Gdy nie można wykonać próby statycznego rozciągania wówczas R_m można określić metodą przybliżoną, no. Metodą Brinella. Badania takie przeprowadzono w celach porównawczych, a uzyskane wyniki zamieszczono w Tabl. III. Przeprowadzono je twardościomierzem B3CS używając kulki stalowej średnicy 5 mm, przy obciążeniu $F = 7350$ kN utrzymywanym przez 15 s, zgodnie z PN-EN ISO 6506-1: 2014-12. Uzyskane skrajne skrajne wartości różniły się około $\pm 10\%$ (max +14,5%).

Badania udarnościowe Charpy służą do klasyfikacji stali przy odbiorze. Służą one wyłącznie do porównywania odporności różnych gatunków stali na pęknięcia. W przeciwieństwie do R_e i R_m nie można wyników tych badań uwzględnić w obliczeniach wytrzymałościowych. W odniesieniu do omawianych obiektów udarność określono z badań dwóch typów próbek pobranych ze środka mostu (próbka A) oraz z płaszcza zbiornika. Były to próbki:

- starzone samorzutnie S, bez dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej,
- normalizowane N, czyli wyżarzonych w temperaturze 930 °C przez jedną godzinę i starzonych na powietrzu.

Badaniom poddano 66 próbek, po trzy próbki w punkcie o jednakowych parametrach termicznych, zgodnie z Rys. 8. Uzyskane wykresy świadczą o wyjątkowo dużym zestarzeniu stali obu obiektów, zarówno mostu oraz zbiornika. Przyjmowany wskaźnik starzenia WS, równy stosunkowi pracy łamania KV po zestarzeniu (próbki S) do KV materiał i niestarzonego (próbki N), w temperaturze -40 °C i -20 °C wynosi dla mostu 0,056 i 0,054, a dla zbiornika 0,655 i 0,345. Fakt ten dał asumpt do przeprowadzenia dodatkowych badań mikrostrukturalnych w celu częściowego wyjaśnienia zaistniałego zjawiska.

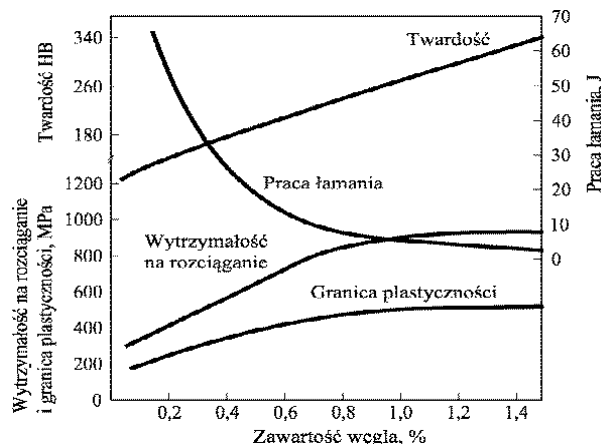


Rys. 8. Średnie wartości pracy łamania KV stali mostu (M) i zbiornika (Z)

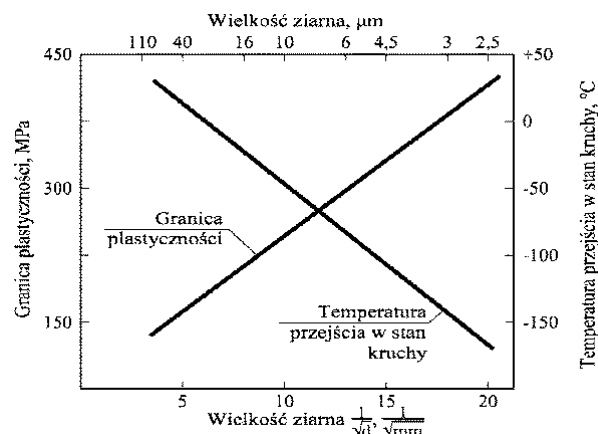
Fig. 8. Average values of impact energy KV for bridge steel (M) and for tank steel (Z)

Badania mikrostrukturalne dokładnie opisane są w [1],[2]. Szczególnie szczegółowo właściwości stali o małej zawartości węgla i mikrostrukturze ferrytyczno-perlitycznej, czyli stali stosowanej w budownictwie przedstawił prof. M. Blicharski w [1]. Tam też podano zależność między mikrostrukturą, a własnościami tej stali (Rys. 9 i 10). Na rys. 10 przedstawiono te wpływy dla stali

zawierającej C 0,10%, Mn 0,50%, Si 0,20% i N 0,0006% [2]. Łatwo zauważyć, że w próbie udarności Charpy'ego wartość KV maleje z zawartością węgla, a jedynym czynnikiem zwiększającym granicę plastyczności R_e i obniżającym temperaturę przejścia w stan kruchy jest rozdrobnienie ziarna. Stale te cechują się niejednorodnością polegającą na tym, że ferryt i perlit grupują się w pasma równoległe do kierunku walcowania i położone na przemienne.

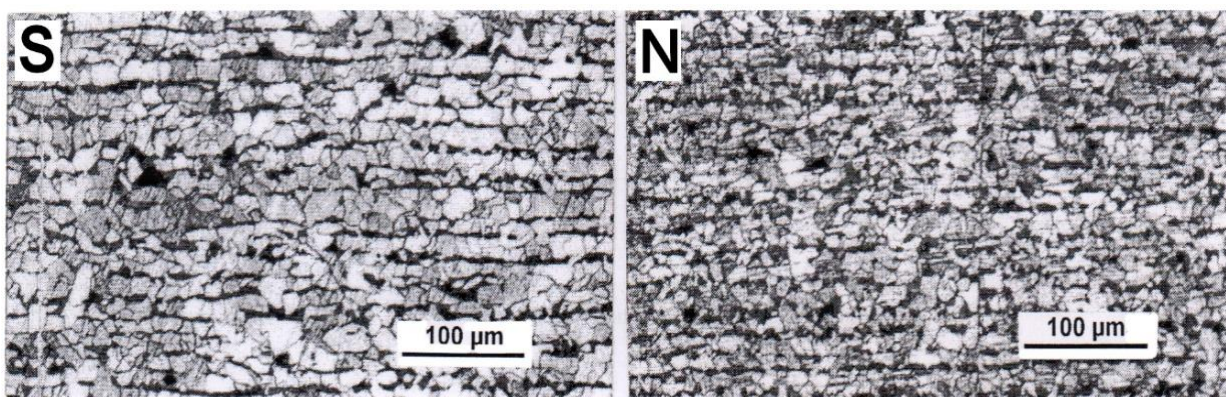


Rys. 9. Wpływ zawartość węgla na właściwości stali
Fig. 9. Effect of carbon content on steel properties



Rys. 10. Wielkość ziarna ferrytu a R_e i kruchość stali
Fig. 10. Ferrite grain size vs. R_e and steel brittleness

Mikrostruktura pasmowa oraz wtrącenia niemetaliczne są przyczynami anizotropii własności mechanicznych omawianych stali. W stali mostowej i zbiornika ujawnienie tych obecności degradacyjnych przeprowadzono poprzez obserwacje w stanach: samorzutnie starzonych i normalizowanych, a także wyżarzanych zupełnie (Wz) i normalizowanych – N2 (Rys. 11).

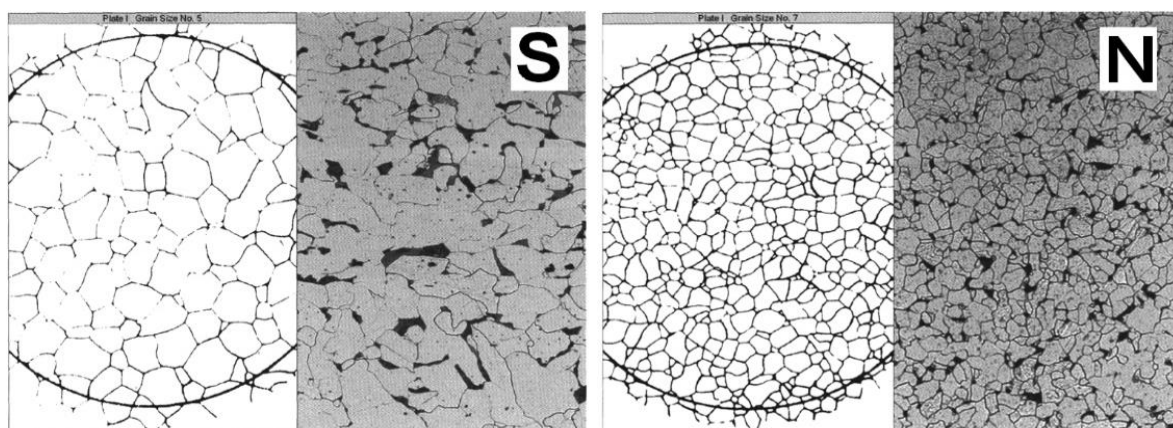


Rys. 11. Mikrostruktura pasmowa stali płaszcza zbiornika

Fig. 11. Band microstructure of the tank jacket steel

Określenie wielkości ziarna przeprowadzono metodą porównawczą (wg skali wzorców) zgodnie z PN-EN ISO 634:2020-07. Podobnie jak poprzednio i tutaj określenie wielkości ziarna przeprowadzono dla próbek w dwóch stanach: starzonym samorzutnie S i wyżarzonym normalizującym N. W stanie wyżarzonym normalizującym N wielkość ziarna uległa zmniejszeniu:

- dla stali mostowej St 37-12 ze średnicy ziarna G5 o $d_m = 0,0625$ mm do średnicy G7 o $d_m = 0,0312$ mm (Rys. 12),
- dla stali zbiornika 18G2A, ze średnicy ziarna G9 o $d_m = 0,0156$ mm do średnicy G10 o $d_m = 0,0110$ mm.



Rys. 12. Wielkość ziarna i mikrostruktura starzona S i normalizowana N stali mostu

Fig. 12. Grain size and aged S and normalized N microstructures of the bridge steel

Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań mechaniczno-wytrzymałościowych i strukturalnych stali dźwigarów blachownicowych mostu i stali płaszcza zbiornika potwierdziły fakt ich wykonania z gatunków stali St37-12 i 18G2A, normalizowanych. Są to stale drobnoziarniste o aktualnym numerze wielkości ziarna G5 ($d_m = 0,0625$ mm) i G9 ($d_m = 0,0156$ mm). Ich aktualne wartości R_e i R_m są prawie analogiczne do zalecanych przez normy DIN 1612 i PN-H-84018. Jedyną odskocznią od reguły normowej są „kosmiczne” wyniki uzyskane z badań pracy łamania KV (Rys. 8). Fakt ten dotyczy w szczególności temperatur minusowych. Stwierdzone zmiany degradacyjne w czasie dotychczasowej eksploatacji autorzy oceniają jako nieistotne, kosmetyczne.

Na uwagę zasługuje fakt, że możliwość wystąpienia wszystkich stwierdzonych niuansów w stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, łącznie z zanieczyszczeniami i wydzieleniami, przewidywał prof. Blicharski w [1].

Author Contributions: conceptualization, B.W. and J.H.; methodology, B.W. and J.H.; validation, B.W., and J.H. formal analysis, B.W.; investigation, J.H.; resources, B.W.; data curation, J.H.; writing—original draft preparation, B.W.; writing—review and editing, J.H.; visualization, J.H.; supervision, J.H.

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

Literatura

- [1] M. Blicharski, *Inżynieria materiałowa*. Warszawa: WNT, 2017.
- [2] E. Tasak and A. Ziewiec, *Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1 Spawalność stali*. Kraków: Wydawnictwo JAK, 2009.
- [3] M. Wińcza, „Analfabetyzm techniczny – rzeczywistość czy fikcja (analiza problemu),” *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 80, no. 6, 2008.
- [4] B. K. Wichrowski and K. Konecki, „Kontrowersje dotyczące oceny trwałości historycznych mostów kolejowych,” *Inżynieria i Bud.*, no. 11–12, pp. 547–552, 2021.
- [5] A. Pimpinato, Ed., *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Amsterdam-Tokyo: Elsevier Publishing Company, 2021.
- [6] A. Hobbacher, „Direction of welding and joining technics in production of reliable and economic products,” *Bull. Inst. Weld.*, no. 2, 2004.
- [7] B. Wichtowski and W. Jasiński, „Mikrostrukturalne procesy degradacyjne normalizowanej stali zlewnej z mostu kolejowego,” *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 87, no. 5, pp. 96–101, 2015, doi: 10.26628/ps.v87i5.234.
- [8] J. Hołowaty and B. Wichtowski, „Ocena wytrzymałościowa stali mostów historycznych w świetle badań nieniszczących,” *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 88, no. 10, pp. 51–56, 2016, doi: 10.26628/ps.v88i10.686.
- [9] K. Ferenc, P. Cegielski, T. Chmielewski, and D. Golański, *Technika spawalnicza w praktyce: poradnik*

- inżyniera, konstruktora i spawacza*. Warszawa: Verlag Dashofer, 2009.
- [10] D. F. Wiśniewski, J. R. Casas, and M. Ghosn, "Codes for safety assessment of existing bridges-current state and further development," *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 552–561, 2012, doi: 10.2749/101686612X13363929517857.
 - [11] B. KÜHN *et al.*, *Assessment of Existing Steel Structures - Recommendations for Estimation of the Remaining Fatigue Life*. 2008.
 - [12] R. Helmerich, B. Kühn, and A. Nussbaumer, "Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 245–255, 2007, doi: 10.1080/15732470500365562.
 - [13] D. Diamantidis (Editor), "Report rep032 : Probabilistic Assessment of Existing Structures - JCSS Report," 2001.
 - [14] H. H. Campbell, *The Manufacture And Properties Of Structural Steel (1896)*. New York – London: The Scientific Publishing Co, 1896.
 - [15] W. Westhofen, *The Forth Bridge*. London: Engineering, 1890.
 - [16] *Stahl in Hochbau.*: Berlin: Verlag, Julius Springer, 1935.
 - [17] J. Hołowaty and B. Wichtowski, "Properties of Structural Steels in Historical Railway Bridges by Diagnostic Tests," *ce/papers*, vol. 5, no. 4, pp. 73–78, 2022, doi: 10.1002/cepa.1730.
 - [18] G. Schaper, *Stählerne Brücken. Band I*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1948.
 - [19] G. Lesiuk, J. Rabiega, and M. Szata, "Mikrostrukturalne procesy degradacyjne zachodzące w XIX-wiecznych stalach zgrzewnych," *Inżynieria i Bud.*, vol. 69, no. 11, pp. 610–612, 2013.
 - [20] B. Wichtowski and Z. Woźniak, "Właściwości normalizowanej stali zlewnej mostu kolejowego po 75 latach eksploatacji," *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 87, no. 5, pp. 112–116, 2015, doi: 10.26628/ps.v87i5.238.