XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011
awarie budowlane 2011

BERNARD WICHTOWSKI, *marek.wichtowski@zut.edu.pl*
JANUSZ HOŁOWATY, *jah@wp.pl*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ANALIZA STALI STARYCH MOSTÓW KOLEJOWYCH WEDŁUG BADAŃ TWARDOŚCI I SKŁADU CHEMICZNEGO

STRUCTURAL STEELS IN OLD RAILWAY BRIDGES ANALIZED BY HARDNESS AND CHEMICAL CONTENT

Streszczenie Długotrwałe użytkowanie konstrukcji stalowych obiektów mostowych powoduje niekorzystne zmiany mechanicznych właściwości stali. Zagadnienie to przedstawiono na przykładzie badania próbek materiału pobranego z dźwigarów czterech mostów stalowych oddanych do eksploatacji w roku 1885 i 1888. Ocenę wytrzymałości stali wykonano za pośrednictwem pomiarów twardości wykorzystując próbki wycięte z konstrukcji do badań chemicznych. Zagadnienie to może być przydatne przy modernizacji starych stalowych mostów kolejowych, z których 60% znajduje się w eksploatacji około 100 lat i tylko 1% poniżej 20 lat.

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 specimens testing. The steel samples were taken from steel girders of four bridges constructed in 1885 and 1888. The rough estimation of mechanical properties of steel was carried out on the specimens cut from the structures for chemical analysis purposes. The problem can be useful in modernization old railway steel bridges because 60% of them are in service nearly 100 years and only 1% are in service less than 20 years.

1. Wprowadzenie

Przy opracowywaniu projektu technicznego modernizacji starego obiektu mostowego powinno się dokładnie rozpoznać gatunek stali istniejącej konstrukcji, a także możliwość dołączenia do niej elementów przez spawanie, zwłaszcza gdy pierwotna konstrukcja była nitowana.

W drugiej połowie XIX wieku do budowy mostów stosowana była powszechnie stal zgrzewna, a od przełomu wieku XIX i XX zaczęto stosować do tych celów stal zlewną. Lata 1895÷1914 traktuje się jako okres przejściowy, w którym stosowano oba rodzaje stali [1]. Budowa mostów ze stali zlewnej rozpoczęła się w 1880 r. Początkowo stosowano głównie stal zlewną martenowską, a w latach 1895÷1914 stal tomasowską. Obecnie właściwości stali dawnej mogą odbiegać dość znacznie od właściwości pierwotnych, gdyż nastąpił zaawansowany proces starzenia materiału [2, 3]. Pod wpływem starzenia materiał umacnia się, tzn. zwiększa się jego granica wytrzymałości – R_m, granica plastyczności – R_e oraz twardość – HB, natomiast zmniejszają się jego właściwości plastyczne, takie jak: wydłużalność – A, przewężenie – Z i udarność – KCV (tabl. 1).

Najczęściej właściwości mechaniczne i plastyczne stali mostu określa się na podstawie próby statycznego rozciągania. Próbki stali wycina się z miejsc o najmniejszych naprężeniach normalnych, aby nie spowodować obniżenia nośności elementów konstrukcji

pod istniejącym obciążeniem. Wówczas ubytki materiału można pozostawić bez ich wypełnienia. Ze względu na wymiary próbek nie zawsze jest to możliwe.

Tablica 1. Właściwości mechaniczne i plastyczne stali starych i współczesnych

Rodzaj stali		R_m [MPa]	R_e [MPa]	A%	$\beta_{śr} = R_e/R_m$
Stal zgrzewna	wg dawnych przepisów	330÷400	220÷230	10÷25	0,62
	aktualne dane	350÷370	220÷250	12÷19	0,65
Stal zlewna	wg dawnych przepisów	370÷450	220÷240	18÷25	0,56
	aktualne dane	370÷390	240÷270	25÷35	0,67
Stale współczesne	St3M	370÷470	min. 240	min. 25	0,57
	St3S	375÷460	215÷235*	23÷26	0,54

*) w zależności od grubości

Taki przypadek zaistniał w konstrukcjach mostów kolejowych analizowanych w referacie. Ocenę właściwości mechanicznych i plastycznych stali tych mostów wykonano w sposób niekonwencjonalny, na podstawie pomiarów twardości Brinella wykorzystując próbki wycięte do badań chemicznych. Referat jest jednocześnie skrótowym omówieniem normy PN-EN ISO 6506 [4].

2. Charakterystyka mostów

Omówione w referacie mosty stalowe, o zróżnicowanej nitowanej konstrukcji, usytuowane są na dwóch liniach kolejowych. Mosty A i B na dwutorowej linii kolejowej Skarżysko Kamienna – Ostrowiec Świętokrzyski (rys. 1 i 2), oddanej do eksploatacji w roku 1885, a mosty C i D na częściowo nieczynnej obecnie jednotorowej linii regionalnej Piła-Ulikowo (rys. 3 i 4) oddanej do eksploatacji w roku 1888.

Konstrukcję mostu A (rys. 1) stanowią dźwigary kratowe prostokątne o rozpiętości teoretycznej 65,75 m i rozstawie poprzecznym 5,50 m. Pasy górne mają przekrój dwuścienny z nakładkami górnymi, a pasy dolne dwuścienne łączone są przewiązkami. Pomost typu otwartego ma nitowane poprzecznice dwuteowe o wysokości 840 mm, w rozstawie co 3,65 m, połączone podłużnicami z dwuteownika 550 w rozstawie poprzecznym 1,85 m.

Nitowaną konstrukcję przęseł wolnopodpartych o rozpiętości teoretycznej 11,30 m w rozstawie poprzecznym 1,50 m, mostu B (rys. 2) stanowią dwuteowniki Peiner 1000 o pasach wzmocnionych nakładkami o przekroju 350 ×15 mm. Sztywność przestrzenną przęsła zapewniają cztery tężniki pionowe typu X i stężenia typu W w poziomie pasów górnych i dolnych.

Konstrukcja nośna dwuprzęsłowego mostu C (rys. 3), z jezdnią górą, to dźwigary kratowe z dolnym pasem zakrzywionym zbieżnym, o rozpiętości teoretycznej 42,6 m i rozstawie poprzecznym 3,10 m. Pas górny kratownic o przekroju dwuściennym wykonany jest z dwóch ceowników 300 i z dwóch blach o przekroju 500×15 mm. Pas dolny jest dwuścienny dołem otwarty, wykonany jest a kątowników i blach. Słupki i krzyżulce wykonane są z dwuteowników szerokostopowych, a wieszaki z kątowników. Mostownice drewniane spoczywają na dwóch podłużnicach wykonanych z dwuteowników 475 (DIN 1025), rozstawionych poprzecznie w odstępie 1,80 m. Sztywność przestrzenną mostu zapewniają poprzecznice także z dwuteowników 475 w rozstawie co 4,26 m i stężenia poprzeczne podłużnic z ceowników 160 oraz stężenia pionowe poprzeczne i poziome w płaszczyznach obu pasów.

Rys. 1. Most kratownicowy A przez rz. Kamienną (krata prostokątna w torze nr 1)

Rys. 2. Most blachownicowy B przez rz. Modłą (belki walcowane w torze nr 1)

Rys. 3. Dwuprzęsłowy most kratownicowy C przez rz. Korytnicę

Rys. 4. Trzyprzęsłowy most blachownicowy D przez rz. Płociczną

Konstrukcję nośną mostu D (rys. 4) stanowią trzyprzęsłowe blachownice ciągłe, w rozstawie poprzecznym 2,30 m, o środniku mającym stały przekrój 2500×15 mm oraz pasach mających zmienny przekrój po długości obiektu (3×32,0 m). Na podporach skrajnych pasy wykonane są z blachy poziomej o przekroju 320×15 mm, połączonej ze środnikiem dwoma kątownikami 120×120×15 mm. Sztywność przestrzenną mostu zapewniają stężenia pionowe poprzeczne i poziome. Przęsła skrajne stabilizowane są balastem.

3. Analiza właściwości chemicznych

Analizę składu chemicznego i właściwości mechanicznych stali przedmiotowych mostów określono z badań sześciu próbek materiałowych. Z konstrukcji mostów A i B pobrano po jednej próbce, a z mostów C i D po dwie próbki (tabl. 2 i 3). Próbkę mostu A pobrano z pasa górnego nitowanej dwuteowej poprzecznicy jezdni o wysokości 840 mm, a mostu B z pasa górnego dźwigara głównego wykonanego z dwuteownika Peiner 1000.

Tablica 2. Porównawczy skład chemiczny stali mostowych

Most i rodzaj stali		**Skład chemiczny,%**								
		C	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Cu**	**Cr**	**Ni**	**Al**
A	próbka 1	0,177	0,736	0,0003	0,0352	0,0722	0,100	0,00	0,0295	0,0029
B	próbka 2	0,0736	0,390	0,00	0,0279	0,0151	0,126	0,00	0,0302	0,007
C	próbka 3	0,0778	0,323	0,00	0,0281	0,0322	0,0267	0,00	0,0298	0,0919
	próbka 4	0,0307	0,370	0,00	0,0996	0,0268	0,0077	0,00	0,0305	0,0160
D	próbka 5	0,0475	0,343	0,0009	0,0156	0,0309	0,233	0,00	0,132	0,0057
	próbka 6	0,0280	0,370	0,00	0,0057	0,0156	0,170	0,00	0,0922	0,0075
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	0,007 ÷0,014	0,03 ÷0,04	0,010 ÷0,020
St3S		max 0,22	max 1,10	0,10 ÷0,35	max 0,050	max 0,050	max 0,30	max 0,30	max 0,30	min 0,02

Z mostu C pobrano próbki nr 3 i 4 wycięte z nakładki dwuściennego pasa górnego kratownicy i z półki dolnej ceownika 300 tego pasa; natomiast próbki nr 5 i 6, z mostu D, wycięto odpowiednio z pasa dolnego i środnika blachownicowego dźwigara nośnego.

Badania składu chemicznego szlifowanych powierzchni próbek wykonano za pomocą emisyjnego spektrometru jarzeniowego GDS500A firmy LECO. W tablicy 2 analizę składu chemicznego przedstawiono dla wybranych 9 zasadniczych pierwiastków stopowych, z analizy 20 pierwiastków otrzymanych w badaniach poszczególnych próbek. Jednocześnie w celach porównawczych podano skład chemiczny stali zgrzewnej i zlewnej, które były stosowane w okresie budowy przedmiotowych mostów oraz stali najczęściej stosowanej w budownictwie – St3S (S235), wg PN-88/H84020.

Z porównania składu chemicznego poszczególnych gatunków stali wynika, że analizowane mosty kolejowe zostały wykonane ze stali zlewnej. Dotyczy to zarówno elementów walcowanych (próbki 2 i 4) jak i blach połączeniowych. Cechą charakterystyczną wczesnych stali zlewnych jest mała zawartość węgla. Jest to czynnik niekorzystny, ponieważ szybkość starzenia zwiększa się, gdy zawartość węgla jest mniejsza niż 0,10% [1, 2]. Według danych literaturowych, wczesne stale zlewne charakteryzują się jeszcze dość dużym rozrzutem procentowym składu poszczególnych pierwiastków. Przykładowo, zawartość węgla w próbce nr 6 wynosi 0,028%, a w próbce nr 1 wynosi 0,177% co oznacza, że różnica jest 6,32 krotna. Podobnie sumaryczna zawartość fosforu i siarki w stali próbek 6 i 2 wynosi 0,0213 i 0,0430%, natomiast dla stali próbek nr 1 i 4 odpowiednio 0,1074 i 0,1264%. Oznacza to, że największa różnica jest 5,93 krotna.

Tablica 3. Pomiar twardości sposobem Brinella

Most i numer próbki		**Dane próbki**		**Dane pomiaru**	
		element	**grubość [mm]**	**Ø odcisku [mm]**	**twardość HB**
A	próbka 1	blacha	14	5,0	143
B	próbka 2	IP 1000	36	5,6	111
C	próbka 3	blacha	15	5,35	124
	próbka 4	C 300	16	5,4	121
D	próbka 5	blacha	15	5,5	116
	próbka 6	blacha	15	5,8	103

4. Pomiar twardości metodą Brinella oraz ocena właściwości mechanicznych i plastycznych

Wykorzystując próbki do badań właściwości chemicznych przeprowadzono pomiar twardości stali poszczególnych mostów. Badania przeprowadzono twardościomierzem typ B3Cs w tzw. warunkach standardowych, a ich wyniki przedstawiono w tabl. 3 [4]. Zachowano oznaczenie twardości jako HB lub HBS [5], a nie HBW wg aktualnej normy [4], ponieważ jako wgłębnik stosowano kulkę stalową, a nie z węglika spiekanego.

Wycięte próbki z konstrukcji mostów miały małe wymiary i nie można było wykonać z nich próbek na rozciąganie oraz na udarność, celem określenia właściwości mechanicznych i plastycznych stali. Wyznaczenie wytrzymałości R_m dokonano na podstawie wielkości uzyskanych z pomiarów twardości sposobem Brinella [5]. Brinell już w 1900 r. podał dla stali węglowych, niehartowanych, zależność fenomenologiczną między wytrzymałością na rozciąganie R_m i twardością HB równą:

$$R_m = 3{,}47\ \mathrm{HB} \tag{1}$$

Inni autorzy, w wyniku licznych badań, podali następujące zależności:

$$\begin{aligned} \text{stal o} \quad 125 < \text{HB} < 175 &\rightarrow R_m \approx 3{,}43\ \text{HB} \\ \text{stal o} \quad \text{HB} > 175 &\rightarrow R_m \approx 3{,}62\ \text{HB} \end{aligned} \tag{2}$$

Norma PN-93/H-04357 [5] podaje powyższe zależności w postaci ogólnego wzoru

$$R_m = \alpha\ \text{HB} \tag{3}$$

przy czym współczynnik α zależy od stosunku granicy plastyczności R_e do wytrzymałości na rozciąganie R_m, czyli R_e/R_m. Ze wzrostem tego stosunku od 0,5 do 0,9 współczynnik α zmniejsza się w przybliżeniu od 3,53 do 3,33. W normie tej podano porównanie twardości HB i wytrzymałości na rozciąganie R_m w zależności od trzech zakresów stosunku R_e/R_m = poniżej 0,65; od 0,65 do 0,80 i powyżej 0,80 oraz wprowadzono pola rozrzutu powyższych zależności. Zamieszczono także wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie przy współczynniku α = 3,37, których przyjmowanie zaleca się, gdy nie jest znany stosunek R_e/R_m.

Autorzy referatu w swoich badaniach stali zlewnej obiektów wybudowanych w latach 1882÷1902, uzyskali średnie wartości R_e/R_m = 0,652; 0,659; 0,662; 0,692; 0,723; 0,756 oraz 0,938 [2]. Odrzucając wartość ostatnią, średnia wartość R_e/R_m równa się 0,690 i jest podobna do wartości podawanych w literaturze. Również w tablicy 4, dla aktualnie badanej stali zgrzewnej i zlewnej, średnie wartości ilorazu R_e/R_m wynoszą 0,65 i 0,67.

Dla pomierzonych twardości stali próbek z poszczególnych mostów (tabl. 3), odczytuje się z wykresu lub przyjmuje z normy [5] wytrzymałości na rozciąganie R_m (tabl. 4), których wartości dla danego stosunku R_e/R_m pozwalają określić granice plastyczności R_e ($R_{0,2}$). W referacie wyznaczenie wartości R_e dokonano dla przyjętej z badań własnych wartości R_e/R_m = 0,690. Dla całościowego zobrazowania zagadnienia w tabl. 4 podano R_m wyznaczone z normy [5] przy stosunku R_e/R_m = 0,65÷0,80 oraz wartości normowe średnie $R_{m\ śred}$ i określono wartości poszczególnych współczynników α.

Tablica 4. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie (R_m) i granicy plastyczności (R_e) oraz wytrzymałości charakterystycznej (f_{yk}) i obliczeniowej (R) w zależności od twardości HB

Most i numer próbki		**HB**	R_m [1] **[MPa]**	$R_{m\ śred}$ [2] **[MPa]**	**α**	R_e **[MPa]**	f_{yk} **[MPa]**	R **[MPa]**
A	próbka 1	143	479	482	3,349	330	330	275
B	próbka 2	111	375	376	3,378	258	258	215
C	próbka 3	124	411	418	3,314	283	278	230
	próbka 4	121	404	407	3,339	278		
D	próbka 5	116	389	391	3,353	268	240	200
	próbka 6	103	348	344	3,378	240		

[1] wartości z normy [5] przy R_e / R_m = (0,65÷0,80)
[2] wartości normowe [5] średnie, orientacyjne

Z uwagi na małe różnice wartości R_m i $R_{m\ śred}$, które dla omawianych próbek wahają się od 0,3 do 1,7%, nie podano w tabl. 4 współczynników $\alpha_{śred}$ oraz granicy plastyczności $R_{e\ śred}$. Określono natomiast dla stali poszczególnych mostów (w dwóch ostatnich kolumnach): wytrzymałość charakterystyczną – $f_{yk} = R_{e\ min}$, oraz obliczeniową – $R = R_{e\ min}/\gamma_s$, gdzie: γ_s = 1,15 + 0,05 = 1,20, gdy $R_e \leq 355$ MPa – według PN-82/S-10052.

5. Ocena spawalności stali

Bezpieczna eksploatacja konstrukcji spawanej w określonym czasie i określonych warunkach zależy od czynników związanych ze spawalnością metalurgiczną, technologiczną i konstrukcyjną. Z punktu widzenia przydatności konstrukcji do przebudowy, podstawowe znaczenie ma spawalność metalurgiczna, określana na podstawie składu chemicznego. Badania stali z czterech konstrukcji mostowych pozwalają ocenić jej spawalność metalurgiczną i częściowo konstrukcyjną. W tym celu określono poniższe wskaźniki, których wyniki dla stali mostu A podane są bez nawiasów, a dla mostów B, C i D odpowiednio w nawiasach okrągłych, kwadratowych i klamrowych:

– równoważnik węgla

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = 0,308;\ (0,149);\ [0,135 \text{ i } 0,095];\ \{0,129 \text{ i } 0,108\}\% < 0,34\% \tag{4}$$

– wskaźniki odporności materiału na pękanie gorące

$$HCS = 1000\left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}\right)\frac{C}{3Mn + Cr + Mo + V} \tag{5}$$

$$HCS = 8,634;\ (2,724);\ [4,864 \text{ i } 3,504];\ \{2,159 \text{ i } 0,559\}\% > 4 \text{ i} < 4\%$$

$$C_{ekw} = C + 2S + \frac{P}{3} + \frac{Si - 0,4}{10} + \frac{Mn - 0,8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0,8}{15} \tag{6}$$

$$C_{ekw} = 0,297;\ (0,090);\ [0,116 \text{ i } 0,085];\ \{0,137 \text{ i } 0,044\}\% > 0,15 \text{ i} < 0,15\%$$

– wskaźniki oceny skłonności do pękania zimnego

$$C'_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{P}{2} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{Cr + V}{5} + 0,0024t \tag{7}$$

$$C'_e = 0,361;\ (0,251);\ [0,186 \text{ i } 0,181];\ \{0,176 \text{ i } 0,149\}\% < 0,4\%$$

gdzie: t = 14÷36 mm – wg tabl. 3

$$C''_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (\text{gdy} \quad t < 37\text{mm}) \tag{8}$$

$$C''_e = 0,308;\ (0,149);\ [0,135 \text{ i } 0,095];\ \{0,129 \text{ i } 0,108\}\% < 0,41\%$$

– twardość strefy wpływu ciepła

$$HV_{max} = 90 + 1050\,C + 47\,Si + 75\,Mn + 30\,Ni + 31\,Cr \tag{9}$$

$$HV_{max} = 332;\ (197);\ [205 \text{ i } 151];\ \{170 \text{ i } 150\}HV < 350HV$$

– parametr dodatkowy

$\frac{Mn}{S} = 10,19;\ (25,83);\ [10,03 \text{ i } 13,81];\ \{11,10 \text{ i } 23,72\}$ – skłonność do pęknięć na gorąco spoin wykazuje stal *mostu A*.

6. Podsumowanie

Przedstawione w referacie wyniki badań oraz obliczone parametry pozwalają stwierdzić, że:

– Analizowane mosty zostały wykonane ze stali zlewnej, prawdopodobnie stali zlewnej martenowskiej. Właściwości stali mostów B, C, i D to typowe właściwości wczesnych stali zlewnych, analogiczne do podawanych w literaturze (tabl. 1). Właściwości stali mostu A (R_m i R_e) mają najwyższe parametry, średnio o 28% wyższe od danych stali mostów pozostałych (tabl. 4). Dotyczy to także odmiennego składu chemicznego (tabl. 2) i wyższych wartości HB (tabl. 3).

– Wyznaczanie wytrzymałości na rozciąganie stali R_m, na podstawie twardości HB, dokonuje się wg PN-93/H-04357 [5] przy raczej stabilnej wartości współczynnika α. W wypadku stali z analizowanych mostów wartość α = 3,314÷3,378 (tabl. 4). Niestety wyznaczanie granicy plastyczności dokonuje się z dużym rozrzutem wyników, gdyż dla obecnie badanej stali zlewnej wartość $\beta = R_e/R_m$ wynosi:
  - według danych literaturowych (tabl. 1) β = 0,615÷0,730,
  - według badań własnych (pkt. 4) β = 0,652÷0,938.

  Zdaniem autorów, wydaje się potrzebnym przeprowadzenie rozszerzonych badań tego zagadnienia celem dokonania statystycznej oceny wyników.

– Właściwości mechaniczne i plastyczne stali określone na podstawie pomiarów twardości Brinella należy traktować jako przybliżone i orientacyjne; dlatego też postanowiono przyjąć dla mostów C i D, jako miarodajne, wyznaczone wartości mniejsze.

– Badane stale są spawalne bez ograniczeń, gdyż C_e waha się od 0,095 do 0,308% i każdorazowo jest mniejsze od 0,34%, a ilość fosforu i siarki, z wyjątkiem próbki 4, jest mniejsza (dla każdego z tych składników) od 0,05% oraz ilość manganu mniejsza od 1%, a krzemu od 0,5%. Stale są stalami nieuspokojonymi z uwagi na śladowe ilości krzemu Si o wartości od 0,00 do 0,0009% < 0,12%,

– Z wyjątkiem mostu A, stale pozostałych trzech mostów są odporne na gorące i zimne powstawanie pęknięć podczas spawania. Dla mostów B, C i D wszystkie wskaźniki spawalności *HCS*, C_{ekw} oraz C'_e i C''_e, jak również właściwości *SWC* HV_{max} oraz ilorazy Mn/S są każdorazowo mniejsze od wartości granicznych. Jedynie stal mostu A jest skłonna do powstawania gorących pęknięć, gdyż oba wskaźniki *HCS* > 4% oraz C_{ekw} > 0,15%, a iloraz Mn/S plasuje się w strefie pękania na gorąco spoin. W wypadku stosowania spawania w moście A, należy wprowadzić środki ostrożności, np. kontrolowanie energii liniowej łuku lub niewysokie podgrzewanie przed spawaniem.

Literatura

1. Czapliński K.: Dawne wyroby ze stopów żelaza. DWE, Wrocław 2009.
2. Wichtowski B., Woźniak Z.: Właściwości stali zlewnej kratownicowego mostu kolejowego po 122 latach eksploatacji. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/2006.
3. Wichtowski B.: Wpływ starzenia stali na jej wytrzymałość zmęczeniową. Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2009.
4. PN-EN ISO 6506: 2002. Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 1-4.
5. PN-93/H-04357. Stal i staliwo. Tablice porównawcze twardości określonej sposobem Rockwella, Vickersa, Brinella, Shore'a i wytrzymałości na rozciąganie.