

prof. dr hab. inż. Bronisław Gosowski*
mgr inż. Piotr Organek*
mgr inż. Michał Redecki*

Bezpośrednie i pośrednie wyznaczanie wytrzymałości obliczeniowej stali w konstrukcjach budowlanych

Direct and indirect ways of determining ultimate strength of steel used in building structures

Streszczenie. Przedstawiono metodykę statystycznego wyznaczania obliczeniowych parametrów stali konstrukcji budowlanych z uwzględnieniem rzeczywistej liczby prób. Pokazano, jak to należy zrobić w przypadku przeprowadzenia kilku lub kilkunastu badań niszczących, na podstawie których obliczeniowe parametry wytrzymałościowe wyznacza się bezpośrednio, a także – jak to zrobić w sposób pośredni, przez badania twardości stali sposobem Brinella. Dokonano porównania przedmiotowych parametrów stali otrzymanych bezpośrednio i pośrednio. Sposób pośredni jest polecany w przypadku stali stosowanej w konstrukcjach budowlanych, która występuje z reguły w stanie surowym lub normalizowanym. Artykuł zakończono zaleceniami i wnioskami praktycznymi.

Słowa kluczowe: stal konstrukcyjna, wytrzymałość, twardość Brinella.

Abstract. Methodology of determining statistical values for calculated parameters of constructional steel with regard to the actual number of test samples is presented. It was shown how it should be done in case carrying out a dozen or so numbers of destructive tests, according which calculated characteristics are determined directly and also how to do this in an indirect way, through research hardness of the samples in the Brinell scale. The comparison for the parameters obtained directly and indirectly was made. Indirect method is recommended for steel used in building structures, which is generally crude or normalized steel. The paper ends with recommendations and practical conclusions.

Keywords: constructional steel, strength, Brinell hardness.

Jednym z istotnych problemów, z jakim często spotykamy się w praktyce inżynierskiej, jest konieczność wyznaczenia wytrzymałości obliczeniowej stali, z której została wykonana eksploatowana konstrukcja budowlana. Potrzeba taka powstaje z reguły na etapie opracowywania projektów rewitalizacji, remontów lub ewentualnych wzmocnień konstrukcji, w celu dostosowania jej do zwiększonych obciążeń. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest brak projektów powykonawczych wzniesionych obiektów budowlanych, do przechowywania których nie wszyscy inwestorzy przykładają wystarczająco dużo staranności. Są wówczas dwie możliwości określenia parametrów wytrzymałościowych stali, z której została wykonana konstrukcja, a mianowicie bezpośrednia, polegająca na przeprowadzeniu badań niszczących odpowiednio dużej liczby próbek pobranych z konstrukcji lub pośrednia – przez badania twardości Brinella.

Pobranie z eksploatowanej konstrukcji stosunkowo dużych kawałków kształtowników lub blach do wykonania próbek [1] do badań niszczących jest na ogół niemożliwe, dlatego wyznacza się wytrzymałość stali na podstawie pomiarów twardości Brinella [1], które wykonuje się stacjonarnie na niedużych próbkach stali pobranych z konstrukcji lub bezpośrednio na elementach konstrukcyjnych (w sposób nieniszczący). W badaniach nieniszczących zastosować można ogólnie dostępny młotek Poldi lub inny twardościomierz. W przypadku nieniszczących badań twardości należy pamiętać o wpływie zarówno sprężystości elementów cienkościennych, jak i wy-

teżenia elementów konstrukcyjnych na wyniki pomiarów twardości [1]. Dużo mniej zagrożeń, w odniesieniu do wyników pomiarów twardości przeprowadzanych na elementach konstrukcyjnych, niesie zastosowanie twardościomierza przenośnego. Nie zaleca się przy tym stosowania do tego celu twardościomierzy przenośnych działających dynamiczno-sprężysto.

Celem artykułu jest przedstawienie metodyki określania obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych stalowych konstrukcji budowlanych w przypadku ograniczonej liczby próbek stosowanych do badań bezpośrednich i pośrednich oraz dokonanie porównania parametrów otrzymanych obu sposobami.

Badania bezpośrednie

Wartości minimalne parametrów wytrzymałościowych stali $R_{e,min}$ i $R_{m,min}$, na podstawie wyników badań n próbek stali na rozciąganie, obliczamy wg wzoru:

$$R_{i,min} = \bar{R}_i - k_n \cdot s_{Ri}, \text{ przy } i = e, m \quad (1)$$

gdzie:

\bar{R}_i – wartość średnia (oczekiwana) odpowiednio granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie;

s_{Ri} – empiryczne odchylenie standardowe odpowiednio granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie;

k_n – wskaźnik tolerancji w przypadku ograniczonej liczby n próbek.

Zakładając rozkład normalny (Gaussa), poziom istotności $\alpha = 0,05$ oraz wadliwość jak dla wartości obliczeniowych $\omega = 0,135\%$ [2], co odpowiada globalnemu wskaźnikowi tolerancji $k_\alpha = 3,0$, stosowny wskaźnik tolerancji k_n , na poziomie istotności α , wyznacza się wg wzoru [2, 3]:

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

$$k_n = k_\infty \left(1 + \frac{1,163}{\sqrt{n}} + \frac{1,961}{n} \right) \quad (2)$$

W tabelach 1 ÷ 4 zestawiono wyniki badań na rozciąganie czterech różnych gatunków stali. W tabeli 5 podano wartości obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych stali, których wyniki badań podano w tabelach 1 ÷ 4, wyznaczonych wzorami (1) i (2) z uwzględnieniem pełnych zbiorów, a w niektórych przypadkach ponadto dla zbiorów ograniczonych, co zapisano w wierszach dolnych.

Skład chemiczny rozważanych gatunków stali mieści się w granicach normowych, lecz niektóre parametry wytrzymałościowe są zbyt małe jak na stale gatunku St3S (S235), 10HA (S355W) i 18G2 (S355). W takich przypadkach poszukiwane

Tabela 1. Wyniki badań na rozciąganie próbek ze stali gatunku St3S

Numer próbki	Parametry wytrzymałościowe z badań i wyniki obróbki statystycznej [MPa]					
	R_e	\bar{R}_e	s_{Re}	R_m	\bar{R}_m	s_{Rm}
3.1	325,0	309,37	9,618	460,0	453,17	5,663
3.2	325,0					
3.3	310,0					
3.4	300,0					
3.5	300,0					
3.6	304,8					
3.1p	309,7					
3.2p	302,2					
3.3p	307,6					

Tabela 2. Wyniki badań na rozciąganie próbek ze stali gatunku 10HA

Numer próbki	Parametry wytrzymałościowe z badań i wyniki obróbki statystycznej [MPa]					
	R_e	\bar{R}_e	s_{Re}	R_m	\bar{R}_m	s_{Rm}
10.1	330,0	344,93	19,222	480,0	466,42	11,773
10.2	335,0					
10.3	330,0					
10.4	325,4					
10.5	340,0					
10.6	335,0					
10.1p	374,2					
10.2p	371,9					
10.3p	362,9					

Tabela 3. Wyniki badań na rozciąganie próbek ze stali gatunku 18G2

Numer próbki	Parametry wytrzymałościowe z badań i wyniki obróbki statystycznej [MPa]					
	R_e	\bar{R}_e	s_{Re}	R_m	\bar{R}_m	s_{Rm}
18.1	350,0	355,09	8,518	545,0	492,86	41,499
18.2	350,0					
18.3	350,0					
18.4	342,8					
18.5	370,7					
18.6	363,4					
18.1p	353,1					
18.2p	354,8					
18.3p	361,0					

parametry wyznaczono na podstawie ograniczonych zbiorów wyników, w których pomija się wartości największe. Konsekwencją tego jest zmniejszenie odchylenia standardowego, co prowadzi do zwiększenia wartości obliczeniowych. To, że obliczona granica plastyczności stali 10HA i 18G2 (tabela 5) jest nadal mniejsza od normowej, można wytłumaczyć tym, że w hutnictwie przyjmuje się mniejszy globalny wskaźnik tolerancji ($k_\infty = 2$), przy jednoczesnym zwiększeniu odchylenia standardowego, przez uwzględnienie w nim odchyłek wymiarów elementów walcowanych.

Tabela 4. Wyniki badań na rozciąganie próbek ze stali z początku XX wieku [4]

Numer próbki	Parametry wytrzymałościowe z badań i wyniki obróbki statystycznej [MPa]					
	R_e	\bar{R}_e	s_{Re}	R_m	\bar{R}_m	s_{Rm}
1	289,0	296,63	20,760	372,8	395,40	22,156
2	325,7					
3	289,4					
4.1	281,7					
4.2	281,6					
5.1	279,8					
5.2	282,4					
6.1	331,1					
6.2	324,1					
7.1	324,1					
7.2	316,1					
8.1	278,0					
8.2	274,4					
9.1	287,1					
9.2	285,0					

Tabela 5. Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali z badań bezpośrednich

Numer tabeli	Obliczeniowa granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie					
	\bar{R}_e [MPa]	k_n	$R_{e,min}$ [MPa]	\bar{R}_m [MPa]	k_n	$R_{m,min}$ [MPa]
1	309,4 304,9	4,82 5,16	263,0 282,6	453,2	4,82	425,9
2	344,9 332,6	4,82 5,41	252,3 304,8	466,4 459,6	4,82 5,41	409,7 423,0
3	355,1	4,82	314,0	492,9 455,7	4,82 6,22	292,9 445,3
4	296,6 285,9	4,29 4,59	207,6 235,2	395,4 365,8	4,29 5,74	300,4 336,3

Badania pośrednie

Zależność między parametrami wytrzymałościowymi stali a twardością Brinella, zmierzoną na próbkach nieobciążonych, przedstawia się następująco [1]:

$$R_i = \alpha_i \cdot HB, \text{ przy } i = e, m \quad (3)$$

Wartości współczynników α_i wyznaczonych w pracach [5 ÷ 7] podano w tabeli 6. Dysponując wynikami pomiaru twardości stali HB , minimalną twardość HB_{min} można obliczyć ze wzoru:

$$HB_{min} = \bar{HB} - k_n \cdot s_{HB} \quad (4)$$

a obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali wg zależności (3).

Próbki stali analizowane w poprzednim rozdziale poddane były, przed niszczącymi badaniami na rozciąganie, badaniem

Tabela 6. Wartości współczynników α_i we wzorze (3) różnych gatunków stali wyznaczone na drodze regresji liniowej

Gatunek stali	Zgodnie z [5]		Zgodnie z [6, 7]	
	α_e	α_m	α_e	α_m
St3SX			2,190 (2,190)	3,141 (3,113)
St3SY			2,299 (2,287)	3,288 (3,278)
St3S	2,265	3,305	2,325 (2,333)	3,276 (3,272)
St3SX, St3SY, St3S (S235)			2,271 (2,274)	3,235 (3,227)
10HA (S355W)	2,226	3,158		
18G2 (S355)	2,403	3,452		
18G2A (S355)			2,387 (2,376)	3,114 (3,105)
St3S, 10HA, 18G2	2,305	3,315		

Wartości α_i w nawiasach zostały wyznaczone na drodze regresji wielokrotnej

twardości Brinella [1]. Stosowano przy tym kulkę stalową hartowaną lub z węglików spiekanych średnicy 5 mm, obciążoną siłą 7355 N. Czas obciążenia wynosił 10 – 15 s. Twardość Brinella każdej próbki z tabeli 1 ÷ 3 badana była trzykrotnie, a próbek z tabeli 4 – dwunastokrotnie. Wyniki tych pomiarów, w postaci średniej twardości poszczególnych próbek, zestawiono w tabelach 7 ÷ 10. W dwóch ostatnich kolumnach tabel podano rzeczywiste wartości współczynników α_i wyznaczone z badań.

Bazując na wynikach z tabel 7 ÷ 10 obliczono następnie, wg (4), wartość minimalnej twardości Brinella. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 11, w której podano ponadto obliczeniowe parametry wytrzymałości badanych stali. Obliczono je przy tym na podstawie minimalnej twardości, przyjmując odpowiednie współczynniki α_i z tabeli 6.

Tabela 7. Wyniki badań twardości Brinella próbek ze stali gatunku St3S

Numer próbki	Twardość Brinella, wyniki obróbki statystycznej i współczynniki α_i				
	HBS [HB]	HBS [HB]	s_{HB} [HB]	R_e/HBS	R_m/HBS
3.1	136,59	136,19	2,051	2,379	3,368
3.2	136,59			2,379	3,368
3.3	132,84			2,334	3,350
3.4	138,58			2,165	3,319
3.5	139,53			2,150	3,232
3.6	136,59			2,231	3,321
3.1p	134,64			2,300	3,325
3.2p	134,64			2,246	3,339
3.3p	135,67			2,267	3,327

Tabela 8. Wyniki badań twardości Brinella próbek ze stali gatunku 10HA

Numer próbki	Twardość Brinella, wyniki obróbki statystycznej i współczynniki α_i				
	HBS [HB]	HBS [HB]	s_{HB} [HB]	R_e/HBS	R_m/HBS
10.1	152,20	149,06	3,301	2,168	3,154
10.2	153,28			2,186	3,099
10.3	146,69			2,250	3,156
10.4	147,85			2,201	3,090
10.5	147,85			2,300	3,280
10.6	142,55			2,350	3,297
10.1p	151,13			2,476	3,051
10.2p	151,13			2,461	3,023
10.3p	148,88			2,438	3,023

Tabela 9. Wyniki badań twardości Brinella próbek ze stali gatunku 18G2

Numer próbki	Twardość Brinella, wyniki obróbki statystycznej i współczynniki α_i				
	HBS [HB]	HBS [HB]	s_{HB} [HB]	R_e/HBS	R_m/HBS
18.1	151,13	148,35	3,713	2,316	3,606
18.2	148,88			2,351	3,694
18.3	151,13			2,316	3,156
18.4	143,54			2,201	3,573
18.5	141,58			2,388	3,184
18.6	146,69			2,477	3,325
18.1p	151,13			2,336	3,002
18.2p	148,88			2,383	3,055
18.3p	152,20			2,372	3,003

Tabela 10. Wyniki badań twardości Brinella próbek ze stali z początku XX wieku [4]

Numer próbki	Twardość Brinella, wyniki obróbki statystycznej i współczynniki α_i				
	HBW [HB]	HBW [HB]	s_{HB} [HB]	R_e/HBW	R_m/HBW
1	119,21	122,93	5,338	2,424	3,127
2	127,56			2,553	3,197
3	125,60			2,304	3,330
4.1	126,86			2,221	3,245
4.2	124,66			2,259	3,308
5.1	118,01			2,371	3,100
5.2	115,36			2,448	3,120
6.1	129,29			2,561	3,187
6.2	126,29			2,566	3,265
7.1	128,13			2,529	3,217
7.2	129,78			2,436	3,129
8.1	121,44			2,289	3,361
8.2	120,66			2,274	3,323
9.1	118,21			2,429	3,117
9.2	112,87			2,525	3,207

Tabela 11. Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali z badań pośrednich, wyznaczone na podstawie średnich twardości poszczególnych próbek

Numer tabeli	Wyniki z badań twardości Brinella			Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali			
	HBS [HB]	k_n	HB_{min} [HB]	α_e	$R_{e,min}$ [MPa]	α_m	$R_{m,min}$ [MPa]
7	136,19	4,82	126,30	2,3	290,5	3,3	416,8
8	149,06	4,82	133,15	2,2	292,9	3,2	426,1
9	148,35	4,82	130,45	2,4	313,1	3,1	404,4
10	122,93	4,29	100,03	2,3	230,1	3,2	320,1

Porównanie wytrzymałości obliczeniowych stali wyznaczonych bezpośrednio i pośrednio

W tabeli 12 dokonano porównania obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych badanych stali wyznaczonych bezpośrednio, na podstawie badań próbek na rozciąganie (tabela 5) oraz pośrednio, na podstawie badań twardości Brinella (tabela 11). Procentowa różnica między wynikami została obliczona następująco:

$$\Delta = \frac{R_{i,min}^b - R_{i,min}^p}{R_{i,min}^b} \times 100\% \quad (5)$$

Tabela 12. Porównanie obliczeniowej wytrzymałości stali wyznaczonej bezpośrednio i pośrednio dla uśrednionych pomiarów twardości

Numery tabel	Minimalna granica plastyczności $R_{e,min}$ [MPa], wyznaczona:			Minimalna wytrzymałość na rozciąganie $R_{m,min}$ [MPa], wyznaczona:		
	bezpośrednio	pośrednio	$\Delta\%$	bezpośrednio	pośrednio	$\Delta\%$
1, 7	263,0 282,6	290,5	-10,5 -2,80	425,9	416,8	2,14
2, 8	252,3 304,8	292,9	-16,1 3,90	409,7 423,0	426,1	-4,00 -0,73
3, 9	314,0	313,1	0,29	292,9 445,3	404,4	-38,1 9,18
4, 10	207,6 235,2	230,1	-10,8 2,17	300,4 336,3	320,1	-6,56 4,82

Porównanie dokonane w tabeli 12 wskazuje, że w przypadku statystycznego opracowywania wyników badań niszczących (próbek stali na rozciąganie) potrzeba nie mniej niż trzy, a najlepiej minimum sześć próbek. Ponadto w przypadku dużych odchył standardowych pełnych zbiorów z wynikami, tzn. przekraczających 2,5% wartości średniej, celowe jest dokonanie obliczeń dla ograniczonego zbioru, podobnie jak to zrobiono w tabeli 5. Problemów takich nie ma w przypadku szacowania wytrzymałości stali na podstawie badania twardości Brinella, szczególnie wówczas, gdy wykonuje się pomiary nieniszcząco na istniejącej konstrukcji. Nie ma w tym przypadku konieczności ograniczania liczby pomiarów, co jest korzystne z punktu widzenia obliczeń statystycznych. Wyznaczona statystycznie, z uwzględnieniem rzeczywistej liczby próbek, minimalna twardość stanowi wiarygodną podstawę do wyznaczenia obliczeniowych wartości parametrów wytrzymałościowych stali, z której została wykonana konstrukcja. Podana w tabeli 12 różnica między odpowiednimi wartościami obliczeniowej granicy plastyczności nie przekracza 4%, natomiast wytrzymałości na rozciąganie – 10%. Jest to dokładność zadowalająca z punktu widzenia zastosowania w praktyce.

Warto dodać, że wyniki podane w tabeli 11 otrzymano na podstawie średniej twardości z pomiarów poszczególnych próbek. Ogólna liczba pomiarów z tabeli 7 ÷ 9 wynosi po 27, a z tabeli 10 – 180. Jeśli weźmie się pod uwagę wszystkie wyniki pomiarów twardości, to obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali z badań pośrednich będą się nieco różniły od podanych w tabeli 11 (tabela 13). Porównanie wyników otrzymanych bezpośrednio (tabela 5) i pośrednio (tabela 13) przedstawiono w tabeli 14. W tym przypadku różnica między odpowiednimi wartościami obliczeniowej granicy plastyczności, podobnie jak poprzednio, nie przekracza 4%, natomiast wytrzymałości na rozciąganie uległa zmniejszeniu do 7%. Wynika z tego wniosek, że korzystniej jest opracowywać statystycznie wyniki pomiarów twardości, bazując na całym zbiorze z wynikami pomiarów.

Tabela 13. Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali z badań pośrednich, wyznaczone na podstawie wszystkich wyników pomiaru twardości

Numer tabeli	Wyniki z badań twardości Brinella			Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali			
	HB [HB]	k_n	HB_{min} [HB]	α_e	$R_{e,min}$ [MPa]	α_m	$R_{m,min}$ [MPa]
7	136,19	3,89	126,1	2,3	290,0	3,3	416,1
8	149,31	3,89	134,6	2,2	296,1	3,2	430,7
9	148,82	3,89	134,6	2,4	323,0	3,1	417,3
10	123,09	3,29	98,2	2,3	225,9	3,2	314,2

Tabela 14. Porównanie obliczeniowej wytrzymałości stali wyznaczonej bezpośrednio i pośrednio na podstawie wszystkich wyników pomiaru twardości

Numery tabel	Minimalna granica plastyczności $R_{e,min}$ [MPa], wyznaczona:			Minimalna wytrzymałość na rozciąganie $R_{m,min}$ [MPa], wyznaczona:		
	bezpośrednio	pośrednio	$\Delta\%$	bezpośrednio	pośrednio	$\Delta\%$
1, 7	282,6	290,0	-2,60	425,9	416,1	2,30
2, 8	304,8	296,1	2,85	423,0	430,7	-1,82
3, 9	314,0	323,0	-2,87	445,3	417,3	6,29
4, 10	235,2	225,9	3,95	336,3	314,2	6,57

Wnioski

W artykule przedstawiono metodykę statystycznego wyznaczenia obliczeniowych parametrów stali z uwzględnieniem rzeczywistej liczby próbek, która jest z reguły zdecydowanie mniejsza od nieskończonej wielkości. Pokazano, jak to należy zrobić w przypadku przeprowadzenia z reguły kilku lub kilkunastu badań niszczących oraz w sposób pośredni przez badania twardości stali [1]. Ten sposób jest godny polecenia w przypadku stali stosowanej w konstrukcjach budowlanych, która występuje z reguły w stanie surowym lub normalizowanym.

W odróżnieniu od sposobu bezpośredniego, badania twardości stali można przeprowadzać na istniejącej konstrukcji w sposób nieniszczący, co umożliwia pozyskanie dowolnej liczby wyników i jest korzystne w przypadku ich obróbki statystycznej. Prowadząc jednak nieniszczące badania twardości na eksploatowanej konstrukcji, należy pamiętać o takich czynnikach, jak wyteżenie elementów konstrukcyjnych i odkształcalność ich cienkich ścianek, ponieważ wpływają one na wyniki pomiaru twardości [1].

Porównanie bezpośredniego i pośredniego wyznaczenia obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych czterech różnych gatunków stali wykazało zadowalającą zgodność wyników końcowych. Omówiony więc pośredni sposób wyznaczenia obliczeniowej granicy plastyczności i wytrzymałości stali na rozciąganie, przez nieniszczące pomiary twardości Brinella, należy uznać za godny polecenia w przypadku braku możliwości dokonania tego w sposób bezpośredni. Podczas pomiaru twardości Brinella zaleca się stosować twardościomierze działające statycznie z kulą średnicy nie mniejszej niż 5 mm. Spośród sposobów dynamicznych, zalecane są przyrządy działające dynamiczno-plastycznie.

Literatura

[1] Gosowski B., Kubica E.: Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
 [2] Giżejowski M.: Nośność sprężysto-plastycznych belek ciągłych o przekrojach otwartych. KILiW PAN, Studia z Zakresu Inżynierii nr 24, PWN, Warszawa-Lódź 1986.
 [3] Smirnow N. W., Dunin-Borkowski I. W., Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych. Biblioteka Naukowa Inżyniera, PWN, Warszawa 1973.
 [4] Gosowski B., Gosowski M., Kasprzak T.: Odbudowa po katastrofie sufitu sali gimnastycznej zabytkowej szkoły poddanej termomodernizacji. Wiadomości Konserwatorskie nr 26/2009, s. 547–558.
 [5] Gosowski B., Dudkiewicz J., Hardness of longitudinally-laded steel elements and it relationship to strength, Archives of Civil Engineering, 43 (1997), s. 23–36.
 [6] Dudkiewicz J., Gosowski B., Generalizations of relations between strength and hardness of steel in structural elements under longitudinal load, Archives of Civil Engineering, 50 (2004), s. 45–67.
 [7] Dudkiewicz J., Gosowski B., Wykorzystanie nieniszczących badań twardości do oceny wytrzymałości stali w konstrukcjach budowlanych, Inżynieria i Budownictwo nr 1/2006, s. 48–52.