

# Ocena wytrzymałości stali rur okrągłych ze szwem na podstawie nieniszczących pomiarów twardości Brinella



prof. dr hab. inż.  
**BRONISŁAW GOSOWSKI**  
Politechnika Wrocławska  
ORCID: 0000-0003-3217-2280



dr inż.  
**PIOTR ORGANEK**  
Politechnika Wrocławska  
ORCID: 0000-0002-9066-928X



dr inż.  
**MICHAŁ REDECKI**  
Politechnika Wrocławska  
ORCID: 0000-0003-1469-0164

W artykule omówiono badania doświadczalne przeprowadzone na rurach okrągłych ze szwem, mające na celu wyznaczenie odpowiednich relacji między granicą plastyczności i wytrzymałością doraźną stali, z której wykonano rury, a jej twardością Brinella.

## Wprowadzenie

Bezpośrednie wyznaczenie wytrzymałości obliczeniowej stali [1] z kilku powodów jest zazwyczaj niemożliwe. Jest to m.in. brak opcji pobrania z eksploатовanej konstrukcji dużych kawałków blach lub kształtowników do wykonania próbek do badań niszczących. Dużo większe możliwości daje metoda pośrednia [2], w której parametry wytrzymałościowe stali wyznacza się na podstawie pomiarów twardości Brinella. Chcąc zastosować tę metodę do konstrukcji wykonanych z rur okrągłych, należy poznać odpowiednie relacje między wytrzymałością stali rur a ich twardością Brinella. Relacje te odbiegają od znanych z literatury, wyznaczonych na przykładzie stali niestopowych w stanie surowym lub normalizowanym, w wyrobach płaskich walcowanych na gorąco [3–6]. Wpływają na to zarówno

technologia produkcji rur okrągłych ze szwem, w której wykorzystuje się kształtowanie na zimno, jak i odkształcalność przekroju poprzecznego rur. Nie powinno się ich więc stosować do pośredniej oceny wytrzymałości stali rur w przypadku konstrukcji wykonanych z rur okrągłych.

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na kilku rurach okrągłych ze szwem, o różnych średnicach i grubościach ścianek. Pozwoliło to na wyznaczenie właściwych relacji między granicą plastyczności i wytrzymałością doraźną na rozciąganie stali, z której wykonano rury, a jej twardością Brinella. Twardość była przy tym mierzona zarówno na próbkach wykonanych z rur do badań niszczących na zrywanie, jak i na całych rurach (w sposób nieniszczący).

## Próbki rur i program badań

Badania prowadzono na rurach okrągłych ze szwem  $\varnothing 48,3 \times 3,2$ ,  $\varnothing 76,1 \times 3,2$  i  $\varnothing 88,9 \times 3,6$  mm, wykonanych ze stali nieznanego gatunku, a także  $\varnothing 76,1 \times 3,2$ ,  $\varnothing 76,1 \times 3,6$ ,  $\varnothing 76,1 \times 4,0$  i  $\varnothing 88,9 \times 3,6$  mm ze stali P235TR1 oraz  $\varnothing 88,9 \times 4,0$  mm ze stali S235JRH. Dwie rury  $\varnothing 48,3 \times 3,2$  mm ze stali nieznanego gatunku oraz rury  $\varnothing 88,9 \times 3,6$  i  $\varnothing 88,9 \times 4,0$  mm ze stali znanych gatunków przeszły pełny program badań obejmujący: bezpośrednie badania parametrów wytrzymałościowych stali na próbkach wykonanych z rur, w statycznej próbie rozciągania oraz badania twardości Brinella zarówno na ściankach całych rur, jak i na próbkach do badań niszczących. Dało to możliwość wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych stali



Rys. 1. Badania niszczące próbek stali z rury  $\varnothing 48,3 \times 3,2$  mm: a) widok przed badaniami, b) w trakcie badania, c) po zniszczeniu

w sposób zarówno bezpośredni, jak i pośredni. Na pozostałych rurach przeprowadzono wyłącznie badania twardości Brinella stali *in situ*. Wykonano je na ściankach całych rur za pomocą twardościomierza przenośnego. Pozwoliło to na wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych stali w sposób pośredni.

### Wyznaczenie wytrzymałości obliczeniowej stali rur na podstawie badań na rozciąganie

Właściwości wytrzymałościowe stali, z której zostały wykonane rury  $\varnothing 48,3 \times 3,2$  mm ze stali nieznanego gatunku oraz rury  $\varnothing 88,9 \times 3,6$  i  $\varnothing 88,9 \times 4,0$  mm ze stali znanych gatunków, wyznaczono zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2010, w statycznej próbie rozciągania na zaokrąglonych próbkach pięciokrotnych ze spłaszczonymi poprzeczek przez szczęki maszyny główekami. Statyczne próby rozciągania przeprowadzono na zmodernizowanej maszynie wytrzymałościowej UFP 400. Z dwóch rur  $\varnothing 48,3 \times 3,2$  mm zostało wykonanych dwanaście próbek, po sześć z każdej rury, oznaczonych jako 1/1÷1/6 i 2/1÷2/6, z rur natomiast o średnicy 88,9 mm o znanych gatunkach stali wykonano po trzy próbki, które oznaczono jako 3/1÷3/3 (stal P235TR1) i 4/1÷4/3 (stal S235JRH). Na rys. 1. pokazano próbki 1/1÷1/6 przygotowane do badań, podczas badania i po zniszczeniu. Całość wyników statycznej próby rozciągania w postaci wartości średnich: granicy plastyczności, wytrzymałości doraźnej na rozciąganie i wydłużalności, zestawiono w tab. 1.

Przeprowadzone badania umożliwiają statystyczne wyznaczenie dla stali minimalnych (gwarantowanych) wartości granicy plastyczności  $R_{e,min} = f_y$  i wytrzymałości na rozciąganie  $R_{m,min} = f_u$ . Ze względu na to, że mają to być wartości obliczeniowe zgodne z PN-EN 1993-1-1:2006, wyznacza się je na podstawie wyników otrzymanych z badań doświadczalnych statystycznie, przy założeniu rozkładu normalnego, poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  oraz wadliwości  $\omega = 0,1\%$ , co odpowiada globalnemu współczynnikowi tolerancji  $k_\infty = 3,04$  (por. PN-EN 1990:2004).

Wartość minimalną (gwarantowaną) poszukiwanej wielkości oblicza się według wzoru

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

w którym:  $\bar{R}_i$  to wartość średnia wielkości,  $s_{Ri}$  – empiryczne odchylenie standardowe, a  $k_n$  – wskaźnik tolerancji zależny od liczby  $n$  próbek w zbiorze wyników.

Wartości minimalne granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej stali na rozciąganie, wyznaczone wzorem (1) dla stali rur próbnych 1÷4, zestawiono w tab. 2.

Tab. 1. Właściwości wytrzymałościowe stali, z której wykonano rury próbne nr 1÷4

Próbki stali z rur próbnych nr 1÷4	Granica plastyczności $R_e$ , MPa		Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa		Średnia wydłużalność $A_{5,65}$ , %
	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe	
1/1 ÷ 1/6	369,4	8,43	413,0	5,44	27,4
2/1 ÷ 2/6	383,1	7,21	430,2	5,42	25,1
3/1 ÷ 3/3	357,1	9,55	455,9	1,93	29,8
4/1 ÷ 4/3	336,7	6,65	400,3	2,29	34,4

Tab. 2. Obliczeniowe parametry wytrzymałościowe stali z badań bezpośrednich rur próbnych 1÷4

Próbki stali	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]
1/1 ÷ 1/6	369,4	3,33	341,3	413,0	3,33	394,8
2/1 ÷ 2/6	383,1	3,33	359,1	430,2	3,33	412,2
3/1 ÷ 3/3	357,1	3,56	323,1	455,9	3,56	449,0
4/1 ÷ 4/3	336,7	3,56	313,0	400,3	3,56	392,2

Tab. 3. Wyniki badań twardości Brinella stali na próbkach wykonanych z rur do badań niszczących

Badany element	Liczba pomiarów, $n$	Średnia twardość HBW	Odchylenie standardowe $S_{HBW}$	Współczynnik zmienności $v$ , %
$\varnothing 48,3 \times 3,2$ - nr 1	24	125,26	2,30	1,8
$\varnothing 48,3 \times 3,2$ - nr 2	24	135,16	2,70	2,0
$\varnothing 88,9 \times 3,6$ - nr 3	12	135,94	1,31	1,0
$\varnothing 88,9 \times 4,0$ - nr 4	12	122,79	2,37	1,9

Wyniki obliczeń zamieszczone w tab. 1. wskazują, że stale rur próbnych nr 3 i 4 spełniają z nadmiarem wymagania normowe stali P235TR1 i S235JRH. W przypadku stali, z której wykonano rury próbne nr 1 i 2, można je zakwalifikować co najwyżej do stali normowych S275, przy czym w odróżnieniu od granicy plastyczności ( $R_{e,min} > 275$  MPa) wytrzymałość doraźna na rozciąganie ( $R_{m,min} < 430$  MPa) badanej stali jest zbyt niska.

### Badania twardości Brinella stali, z której wykonano rury

Pomiary twardości Brinella stali, z której wykonano rury próbne 1÷4, przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 6506-1:2008 [1], zarówno na próbkach przeznaczonych do statycznej próby rozciągania (przed próbą na rozciąganie), jak i na ściankach całych rur, stacjonarnym twardościomierzem typu B3Cs z zastosowaniem kulki z węglików spiekanych o średnicy 5,0 mm. Ponadto dla większej liczby rur dokonano pomiarów twardości *in situ* przenośnym twardościomierzem Brinella typu PZ-3 firmy Zwick z kulką o średnicy 5,0 mm.

Opracowane statystycznie wyniki pomiarów twardości Brinella stali rur zamieszczono w tab. 3 i 4. W tab. 3. zestawiono wyniki pomiarów twardości Brinella stali na próbkach wykonanych z rur z przeznaczeniem do nisz-

czących badań parametrów wytrzymałościowych. Badania te przeprowadzono w laboratorium na twardościomierzu stacjonarnym. W tab. 4. podano wyniki pomiarów rur próbnych nr 1÷4 wykonanych w laboratorium na twardościomierzu stacjonarnym z użyciem kulki o średnicy 5,0 mm, a także wyniki pomiarów twardościomierzem przenośnym *in situ* na wybranych rurach stanowiących przęty przekrycia dachowego (rys. 2), wykonanych z takiej samej stali jak rury próbne nr 1 i 2 (por. wiersze 5–7) oraz na rurach ze stali P235TR1 (por. wiersze 8–10).

Porównując wyniki z tab. 3 i 4., nietrudno zauważyć, że w przypadku rur próbnych 1÷4 twardość pomierzona na próbkach do badań na rozrywanie jest wyraźnie większa od pomierzonej na ściankach całych rur. To przewyższenie wynosi ok. 20% przy rurach nr 1 i 2, natomiast tylko ok. 12–13% przy rurach nr 3 i 4.

### Relacja między twardością Brinella stali rur a jej parametrami wytrzymałościowymi

Dysponując wynikami badań bezpośrednich granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej na rozciąganie stali rur próbnych 1÷4 (tab. 1.), a także stosownymi badaniami twardości Brinella stali tych rur (tab. 3 i 4.),



można wyznaczyć odpowiednie wartości współczynników konwersji, występujących w znanej zależności (2)

$$R_i = a_i HB_0 \text{ przy } i = e, m, \quad (2)$$

w której:  
 $i = e, m$  – dla granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie, odpowiednio,

$a_i$  – współczynniki konwersji zależne od gatunku stali,

$HB_0$  – twardość Brinella badana na próbce nieobciążonej.

Przeprowadzone badania pozwalają na wyznaczenie odpowiednich relacji między parametrami wytrzymałościowymi stali a jej twardością Brinella zmierzoną w warunkach laboratoryjnych oraz w sposób nieniszczą-

cy (bezpośrednio na elementach konstrukcyjnych). W tab. 5. zestawiono wartości średnie interesujących nas wielkości oraz odpowiednie relacje między nimi (współczynniki konwersji do zależności (2)).

Nietrudno zauważyć, że relacja między twardością stali zmierzoną na próbkach wykonanych z rur a jej granicą plastyczności wynosi średnio  $a_e \cong 2,8$ , tzn. jest o ponad 20% większa od wyznaczonych dla walcowanych na gorąco wyrobów płaskich ze stali surowych lub normalizowanych [1–6]. W odróżnieniu od relacji  $a_e$  odpowiednia relacja  $a_m$  ma w tym przypadku wartość bliską tej, jaką wyznaczono w [1–6]. Przyczyną tej różnicy jest przypuszczalnie efekt kształtowania na zimno rur okrągłych ze szwem.

Relacja między twardością stali zmierzoną na ściankach całych rur (*in situ*) a jej granicą plastyczności, wynosząca średnio  $a_e \cong 3,3$ , jest blisko 50% większa od wyznaczonych dla walcowanych na gorąco wyrobów płaskich [1–6]. Podobnie jest z relacją  $a_m$ , która w tym przypadku wynosi średnio  $a_m \cong 3,9$ . Jest więc także większa od wyznaczonej w [1–6], lecz tylko o ponad 20%. Te różnice ujmują zarówno efekt kształtowania na zimno rur ze szwem, jak i wpływ odkształcalności ich przekroju.

### Wyznaczenie wytrzymałości obliczeniowej stali rur na podstawie badań twardości

Przeprowadzone na rurach nieniszczące badania twardości stali, ze względu na licznosc próby, umożliwiają statystyczne wyznaczenie twardości minimalnej  $HB_{rmin}$  na odpowiednim poziomie ufności. Ze względu na to, że ma to być wartość obliczeniowa, wyznacza się ją na podstawie wyników otrzymanych z badań doświadczalnych statystycznie, przy założeniu rozkładu normalnego, poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  oraz wadliwości  $w = 0,1\%$ , co odpowiada globalnemu współczynnikowi tolerancji  $k_\alpha = 3,04$  (por. PN-EN 1990:2004).

Wartość minimalną (obliczeniową) poszukiwanej twardości oblicza się według wzoru

$$HB_{rmin} = \overline{HB}r - k_n \cdot s_{HB}r, \quad (3)$$

w którym:  $\overline{HB}r$  to wartość średnia twardości,  $s_{HB}r$  – empiryczne odchylenie standardowe, a  $k_n$  – wskaźnik tolerancji zależny od liczby  $n$  próbek w zbiorze wyników.

Wyniki obliczeń minimalnej twardości stali rur badanych twardościomierzem przenośnym typu PZ-3, obejmujących pełne zbioru wyników z badań twardości, zestawiono w tab. 6. Oprócz zbiorów dla poszczególnych rur utworzono zbioru ogólniejsze, obejmujące rury pochodzące od tego samego producenta (por. wiersze 4 i 8 w tab. 6.). Utworzenie takich dwóch obszernych zbiorów ułatwiło dobrane odpowiednich współczynników kon-



Rys. 2. Widok twardościomierza PZ-3 podczas pomiaru twardości rury stanowiącej krzyżulec przekroczenia strukturalnego

Tab. 4. Zestawienie wyników badań twardości Brinella stali na ściankach całych rur

Numer wiersza	Badany element	Liczba pomiarów, n	Średnia twardość HBW	Odchylenie standardowe $S_{HBW}$	Współczynnik zmienności v, %
Twardościomierz stacjonarny typu B3Cs					
1	∅ 48,3×3,2 - nr 1	7	100,83	2,13	2,1
2	∅ 48,3×3,2 - nr 2	8	108,89	1,39	1,3
3	∅ 88,9×3,6 - nr 3	5	118,54	1,87	1,6
4	∅ 88,9×4,0 - nr 4	5	107,97	3,76	3,5
Twardościomierz przenośny typu PZ-3					
5	∅ 48,3×3,2	30	108,05	7,80	7,2
6	∅ 76,1×3,6	30	111,48	7,55	6,8
7	∅ 88,9×3,6	10	106,66	7,33	6,9
8	∅ 76,1×3,2	10	119,78	2,96	2,5
9	∅ 76,1×3,6	10	131,86	7,78	5,9
10	∅ 76,1×4,0	10	133,17	2,53	1,9

Tab. 5. Porównanie twardości Brinella z parametrami wytrzymałościowymi stali badanych rur

Próbki stali rur nr 1÷4	Średnia twardość Brinella, HB		Średnie $R_e$ i $R_m$ , MPa		Relacje względem twardości próbek		Relacje względem twardości ścianek rur	
	rur	próbek	$R_e$	$R_m$	$a_e = R_e/HB_p$	$a_m = R_m/HB_p$	$a_e = R_e/HB_r$	$a_m = R_m/HB_r$
1/1 ÷ 1/6	100,8	125,3	369,4	413,0	2,95	3,30	3,66	4,10
2/1 ÷ 2/6	108,9	135,2	383,1	430,2	2,83	3,18	3,52	3,95
3/1 ÷ 3/3	118,5	135,9	357,1	455,9	2,63	3,35	3,01	3,85
4/1 ÷ 4/3	108,0	122,8	336,7	400,3	2,74	3,26	3,12	3,71

Dokonując *in situ* pomiarów twardości Brinella stali, na elementach konstrukcyjnych wykonanych z rur okrągłych, należy pamiętać o wpływie stanu wyężenia elementów na wyniki pomiarów.

wersji do zależności (2) jako wartości średnie z wyznaczonych w tab. 5.

Znajomość twardości minimalnej  $HBr_{min}$  umożliwia obliczenie na jej podstawie obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych stali rur wzorem (2). W miejsce  $HB_0$  we wzorze (2) należy podstawić  $HBr_{min}$ . Wyniki odpowiednich obliczeń zestawiono w tab. 7. Należy przy tym zaznaczyć, że na wyniki pomiarów twardości ma wpływ stan obciążenia badanego elementu [3–5]. W przypadku elementów ściskanych otrzymuje się wyniki zawyżone, a w elementach rozciąganych – zaniżone. Aby pominąć wpływ wyężenia, pomiary twardości *in situ* wykonano na rurach minimalnie wyężonych.

Wyniki zamieszczone w tab. 7. wskazują, że w przypadku rur ze stali zarówno o nieznanym gatunku (wiersze 1–4), jak i współczesnej P235TR1 (wiersze 5–8), otrzymano parametry wytrzymałościowe pozwalające

Tab. 6. Minimalna twardość Brinella stali rur badanych *in situ*, z uwzględnieniem pełnych zbiorów wyników pomiarów twardości

Lp.	Zbiory rur	$n$	$\overline{HBr}$ [HB]	$S_{HBr}$ [HB]	$k_n$	$HBr_{min}$ [HB]
1	∅ 48,3×3,2 mm	30	108,0	7,80	3,13	83,64
2	∅ 76,1×3,6 mm	30	111,5	7,55	3,13	87,86
3	∅ 88,9×3,6 mm	10	106,7	7,32	3,23	83,01
4	Łącznie wiersze 1–3	70	109,3	7,76	3,04	85,72
5	∅ 76,1×3,2 mm	10	119,8	2,96	3,23	110,21
6	∅ 76,1×3,6 mm	10	131,9	7,78	3,23	106,74
7	∅ 76,1×4,0 mm	10	133,2	2,53	3,23	125,01
8	Łącznie wiersze 5–7	30	128,3	7,81	3,13	103,81

w zasadzie zakwalifikować te stale do gatunku S235 (P235). W przypadku rur ze stali P235TR1 z pośredniej oceny wytrzymałości otrzymano taką samą jak w tab. 2. granicę plastyczności oraz zaniżoną o ok. 14% średnią wytrzymałość doraźną stali, lecz wyraźnie większą od minimalnej. W przypadku rur o nieznanym gatunku wyniki porównane z tab. 2. wskazują, że w badaniach pośrednich granica plastyczności stali została zaniżona o ok. 14%, lecz jest wyraźnie większa od minimalnej, natomiast wytrzymałość doraźna jest zaniżona o ok. 18%, przy czym jest ona zbyt mała jak dla stali S235 ( $R_{m,min} < 360$  MPa).

Chcąc wyjaśnić przyczynę tak znacznego zaniżenia parametrów wytrzymałościowych stali rur nieznanego gatunku, można przepro-

wadzić dlań dodatkowe analizy statystyczne, w których uwzględnia się zbiory z wynikami pomiarów twardości pomniejszone o wartości znacznie przekraczające wartości średnie. Ma to wpływ na zmniejszenie wartości średniej i odchylenia standardowego, co w konsekwencji prowadzi z reguły do zwiększenia minimalnej twardości, a więc także parametrów wytrzymałościowych. Liczba pomijanych wyników nie może być zbyt duża. W zasadzie nie powinna ona być większa niż 10 do 15% zawartości pełnego zbioru.

Przedstawione w tab. 8. i 9. wyniki tych dodatkowych analiz statystycznych dowodzą, że poprzez pominięcie niedużej liczby wyników pomiarów twardości przekraczających wartości średnie można w niewielkim

REKLAMA



ul. Przemysłowa 16  
32-300 Olkusz  
tel. 32 754 63 25  
biuro@rapid.krakow.pl

**WYKONUJEMY KOMPLEKSOWE REALIZACJE  
W ZAKRESIE REMONTÓW, MODERNIZACJI  
ORAZ WZNOŚZENIA KONSTRUKCJI  
PRZEMYSŁOWYCH**

chłodnie kominowe | kominy przemysłowe  
obiekty hydrotechniczne  
hale przemysłowe | zbiorniki paliwowe

**REALIZUJEMY PONADTO USŁUGI  
SPECJALISTYCZNE**

lekkie obudowy | betony natryskowe  
zabezpieczenie antykorozyjne stali i betonu  
izolacje i iniekcje

www.rapid.krakow.pl



stopniu powiększyć parametry wytrzymałościowe stali. W konsekwencji tego postępowania zmniejszeniu uległ stopień zaniżenia w ocenie pośredniej granicy plastyczności stali z 14 do 10%, a wytrzymałości doraźnej z 18 do 14%, w porównaniu z wynikami oceny bezpośredniej (por. tab. 2.). Warto podkreślić, że aktualnie minimalna wytrzymałość doraźna tej stali jest o ok. 2% mniejsza od normowej dla stali S235.

### Wnioski i zalecenia

W przypadku rur okrągłych ze szwem, wykonanych ze stali niestopowych z blach walcowanych na gorąco, poprzez kształtowanie na zimno, współczynniki konwersji w zależności (2), wyznaczone na przykładzie rur o średnicach: 48,3, 76,1 i 88,9 mm wyniosły:  $a_e \cong 3,3$ ,  $a_m \cong 3,9$ . Współczynnik  $a_e$  jest więc większy o ok. 50%, natomiast współczynnik  $a_m$  – tylko o ponad 20% od wyznaczonych w [1–6] dla wyrobów płaskich walcowanych na gorąco. Nie należy więc stosować tych ostatnich w przypadku pośredniej oceny wytrzymałości stali, z której wykonane są rury okrągłe ze szwem, gdyż prowadzi to do znacznego zaniżenia ich parametrów wytrzymałościowych.

Dokonyując *in situ* pomiarów twardości Brinella stali, na elementach konstrukcyjnych wykonanych z rur okrągłych, należy pamiętać o wpływie stanu wyężenia elementów na wyniki pomiarów [3–5]. W badaniach twardości Brinella *in situ* wskazane jest stosowanie kulki o średnicy  $D = 5,0$  mm. Zastosowanie kulki o  $D = 2,5$  mm spowoduje wprawdzie zmniejszenie wpływu odkształcalności przekroju na wyniki pomiarów, ale będzie wymagać staranniejszego przygotowania powierzchni w miejscach pomiarów oraz zwiększenia ich liczby.

### Bibliografia

- [1] Gosowski B., Kubica E.: Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych. Wydanie IV zaktualizowane i rozszerzone. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [2] Gosowski B., Organek P., Redeki M.: Bezpośrednie i pośrednie wyznaczanie wytrzymałości obliczeniowej stali zastosowanej w konstrukcjach budowlanych. „Materiały Budowlane”, nr 3/2014, s. 56–59.
- [3] Gosowski B., Dudkiewicz J.: Hardness of longitudinally loaded steel elements and its relationship to strength. „Archives of Civil Engineering”, vol. 43, nr 1/1997, s. 23–36
- [4] Dudkiewicz J., Gosowski B.: Generalizations of relations between strength and hardness of steel in structural elements under longitudinal load. „Archives of Civil Engineering”, vol. 50, nr 1/2004, s. 45–67.
- [5] Dudkiewicz J., Gosowski B.: Wykorzystanie nieniszczących badań twardości do oceny wytrzymałości stali w konstrukcjach budowlanych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2006, s. 48–52
- [6] Gosowski B., Organek P.: Wykorzystanie nieniszczących pomiarów twardości do oceny parametrów wytrzymałościowych stali z początku XX wieku. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 2/2016, s. 74–77.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8051

### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Gosowski Bronisław, Organek Piotr, Redeki Michał, 2022, Ocena wytrzymałości stali rur okrągłych ze szwem na podstawie nieniszczących pomiarów twardości Brinella, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8051

Tab. 7. Wyniki obliczeń wytrzymałości obliczeniowej stali rur badanych *in situ*, z uwzględnieniem pełnych zbiorów wyników pomiarów twardości

Lp.	Zbiory rur	$n$	$HBr_{min}$ [HB]	$a_e$	$R_{e,min}$ [MPa]	$a_m$	$R_{m,min}$ [MPa]
1	∅ 48,3×3,2 mm	30	83,64	3,6	301,1	4,0	334,6
2	∅ 76,1×3,6 mm	30	87,86	3,6	316,3	4,0	351,4
3	∅ 88,9×3,6 mm	10	83,01	3,6	298,8	4,0	332,0
4	Łącznie wiersze 1–3	70	85,72	3,6	<b>308,6</b>	4,0	<b>342,9</b>
5	∅ 76,1×3,2 mm	10	110,21	3,1	341,6	3,8	418,8
6	∅ 76,1×3,6 mm	10	106,74	3,1	330,9	3,8	405,6
7	∅ 76,1×4,0 mm	10	125,01	3,1	387,5	3,8	475,0
8	Łącznie wiersze 5–7	30	103,81	3,1	<b>321,8</b>	3,8	<b>394,5</b>

Tab. 8. Minimalna twardość Brinella stali rur badanych *in situ*, z uwzględnieniem ograniczonych zbiorów wyników pomiarów twardości

Lp.	Zbiory rur	$n$	$\overline{HBr}$ [HB]	$S_{HBr}$ [HB]	$k_n$	$HBr_{min}$ [HB]
1	∅ 48,3×3,2 mm	27 (26)	106,3 (105,9)	6,06 (5,71)	3,14 (3,14)	87,30 (87,95)
2	∅ 76,1×3,6 mm	26 (24)	109,7 (109,0)	6,41 (6,19)	3,14 (3,14)	89,59 (89,61)
3	∅ 88,9×3,6 mm	10 (9)	106,7 (105,5)	7,32 (6,65)	3,23 (3,25)	83,01 (83,84)
4	Łącznie wiersze 1–3	63 (59)	107,8 (107,1)	6,52 (6,16)	3,05 (3,06)	87,91 (88,24)

Tab. 9. Wyniki obliczeń wytrzymałości obliczeniowej stali rur badanych *in situ*, z uwzględnieniem ograniczonych zbiorów wyników pomiarów twardości

Lp.	Zbiory rur	$n$	$HBr_{min}$ [HB]	$a_e$	$R_{e,min}$ [MPa]	$a_m$	$R_{m,min}$ [MPa]
1	∅ 48,3×3,2 mm	27 (26)	87,30 (87,95)	3,6	314,3 (316,6)	4,0	349,2 (351,8)
2	∅ 76,1×3,6 mm	26 (24)	89,59 (89,61)	3,6	322,5 (322,6)	4,0	358,4 (358,4)
3	∅ 88,9×3,6 mm	10 (9)	83,01 (83,84)	3,6	298,8 (301,8)	4,0	332,0 (335,4)
4	Łącznie wiersze 1–3	63 (59)	87,91 (88,24)	3,6	316,5 (317,7)	4,0	351,6 (353,0)

**Streszczenie:** W artykule omówiono badania doświadczalne przeprowadzone na rurach okrągłych ze szwem, mające na celu wyznaczenie odpowiednich relacji między granicą plastyczności i wytrzymałością doraźną stali, z której wykonano rury, a jej twardością Brinella. Twardość była mierzona na próbkach wykonanych z rur do badań na zrywanie i na całych rurach (w sposób nieniszczący). Porównanie parametrów wytrzymałościowych wyznaczonych w badaniach niszczących próbek poddanych rozciąganiu z twardością zmierzoną na próbkach oraz na rurach w sposób nieniszczący pozwoliło na określenie odpowiednich relacji, które umożliwią poprawne wyznaczanie parametrów wytrzymałościowych stali rur okrągłych ze szwem na podstawie nieniszczących (*in situ*) pomiarów twardości Brinella. Pracę zakończono wnioskami i zaleceniami o charakterze praktycznym.

**Słowa kluczowe:** konstrukcja stalowa, badanie nieniszczące, twardość Brinella, rury okrągłe

**Abstract:** ULTIMATE STRENGTH OF SEAMED STEEL TUBES BASED ON THE NON-DESTRUCTIVE BRINELL HARDNESS TESTS. The experimental tests carried out on seamed steel tubes is aimed at determining the appropriate relations between the yield point and the ultimate tensile strength of the steel from which the sections are made, and with comparison to its Brinell hardness. The Brinell hardness was measured both on the samples dedicated to the tensile tests and on the whole tubes (in the non-destructive way). Comparison of the strength parameters of steel sections, determined in destructive tests of samples subjected to tension, with the hardness measured on the samples and sections in a non-destructive manner, allowed to determine the appropriate relations that will allow for the correct determination of the strength parameters of steel tubes with seams on the basis of non-destructive (*in situ*) Brinell hardness measurements. The paper was summarized with conclusions and recommendations of a practical nature.

**Keywords:** steel structure, non-destructive test, Brinell hardness, tube