

dr inż. Michał Gajdzicki<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-0555-1648

dr inż. Jakub Miszczak, prof. uczelni<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8687-3093

# Określanie wytrzymałości na rozciąganie stali

## na podstawie pomiaru twardości Leeba

### *Determining the steel tensile strength based on Leeb hardness measurement*

DOI: 10.15199/33.2024.03.04

**Streszczenie.** W artykule oceniono, czy na podstawie wyników otrzymywanych z przenośnego twardościomierza Leeba można w dokładny sposób określić wytrzymałość na rozciąganie, która jest podstawowym parametrem pozwalającym na ustalenie gatunku stali. Wykonano pomiary próbek z dwóch różnych gatunków stali, dwóch różnych grubości oraz o dwóch różnych stopniach przygotowania testowanej powierzchni stali. Sprawdzono, czy kierunek wykonywania uderzenia wpływa na otrzymywane wyniki oraz jaka jest zależność pomiędzy twardością stali a stanem naprężeń w badanym elemencie. Otrzymane wyniki na podstawie twardości Leeba porównano z wartością wytrzymałości na rozciąganie uzyskaną z maszyny wytrzymałościowej. Wykazano, że na potrzeby praktyczne możliwe jest ustalenie wytrzymałości na rozciąganie stali na podstawie pomiarów wykonywanych przenośnym twardościomierzem Leeba, wykorzystującym metodę dynamiczną pomiarów.

**Słowa kluczowe:** twardość Leeba; wytrzymałość na rozciąganie stali; gatunek stali; badania nieniszczące; metoda dynamiczna pomiaru twardości.

**Abstract.** In this article, it was decided to check whether, based on the results obtained from a portable Leeb hardness tester, the value of tensile strength could be determined in an equally accurate way, so that it would be possible to determine the steel tensile strength. The measurements were performed for samples made of two different steel grades with different tensile strength, two different thicknesses and two different degrees of preparation of the tested steel surface. It was checked whether the direction of impact affects the results obtained and what is the relationship between the hardness of steel and the level of stress in the tested element. All obtained results based on Leeb hardness were compared with the tensile strength values obtained from the testing machine. It has been shown that for practical purposes it is possible to determine the steel tensile strength based on measurements performed with a portable Leeb hardness tester using the dynamic measurement method.

**Keywords:** Leeb hardness; steel tensile strength; steel grade; non-destructive testing; dynamic hardness measurement method

W praktyce inżynierskiej dość częstym problemem przy wykonywaniu obliczeń istniejących obiektów o konstrukcji stalowej jest brak jakiegokolwiek dokumentacji projektowej, potrzebnej do prawidłowego zamodelowania obiektu. W takiej sytuacji dokładne zinventaryzowanie geometrii konstrukcji, w tym określenie przekrojów poprzecznych głównych elementów nośnych, jest dość pracochłonne, ale jak najbardziej możliwe do wykonania podczas wizji lokalnej. Większym problemem jest ustalenie gatunku stali, z jakiej wykonana została jej konstrukcja, gdyż rzadko zdarzają się sytuacje, gdy możliwe jest wycięcie próbek stalowych potrzebnych do wykonania statycznej próby rozciągania. Zabieg ten jest pracochłonny, wymaga

ingerencji w konstrukcję, na co często nie zgadza się inwestor lub trudno jest znaleźć bezpieczne miejsce, z którego takie próbki można wyciąć. Wówczas coraz częściej wykorzystuje się przenośne przyrządy do pomiaru twardości elementów metalowych, które dają coraz precyzyjniejsze odczyty, a nawet pozwalają na określenie wytrzymałości stali na rozciąganie z dość dużym przybliżeniem.

Istnieją dwie metody badania twardości metali w zależności od prędkości przykładania siły testowej, które polegają na wciskaniu węgelnika (penetratora, np. kulki, stożka, ostrosłupa) w badany materiał, aż do wywołania odkształceń trwałych. Najpowszechniejsza jest metoda testu statycznego, obejmująca skale Brinella, Rockwella, Vickersa, Knoopa, Papa i inne podobne. Większość metod testów statycznych wymaga użycia laboratoryjnego testera twardości, który zapewni dokładne wyniki pomiarów, ale na budowie jest nie-

poręczny, ciężki, a testowanie zajmuje dużo czasu. Ponadto wcięcia twardościomierzy Brinella i Rockwella są dosyć duże, a uszkodzenia materiału widoczne, natomiast przy badaniu typu Vickersa wymagane są precyzyjne pomiary optyczne, co w istotny sposób wpływa na dokładność badania.

Drugą metodą jest metoda badań dynamicznych, obejmująca badania twardości Shore'a i Leeba. Metoda ta nadaje się przede wszystkim do badania twardości ciężkich, dużych i nieruchomych przedmiotów metalowych. Metoda pomiaru twardości metali wg Leeba została opracowana w 1975 r. w Szwajcarii [1]. Twardość Leeba to współczynnik prędkości odbicia i uderzenia masy udarowej pomnożona przez 1000. Twarde metale charakteryzują się większą prędkością odbicia niż miękkie. Twardość Leeba nie jest jednak na tyle rozpowszechniona, aby stosować ją do opisywania cechy materiałów metalowych w dokumentacji technicznej (specyfika-

<sup>1)</sup> Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: michal.gajdzicki@p.lodz.pl

cji wyrobu, półwyrobu), dlatego też twardościomierze te wykorzystywane są przede wszystkim jako konwertery twardości. Metoda pomiaru twardości Leeba została najpierw ustandaryzowana w 1997 r. w normie amerykańskiej ASTM A956 [2], a w 2015 r. opisana w normie ISO 16859-1 [3]. Sposoby konwersji na inne skale zostały podane w normie DIN ISO 18265 [4].

### Twardość stali a wytrzymałość na rozciąganie

Ocena parametrów wytrzymałościowych stali na podstawie nieniszczących badań twardości została po raz pierwszy opisana w Polsce w 1997 r. w artykule [5, 6]. Autorzy wykorzystali w badaniach przenośny twardościomierz Brinella PZ-3, działający statycznie, z kulką o średnicy 5 mm. Na podstawie swoich badań wyprowadzili wzory uwzględniające bezpośrednią zależność między parametrami wytrzymałościowymi stali a jej twardością Brinella HB. Wykazali, że wyteżenie stalowych elementów konstrukcyjnych ma duży wpływ na wynik wykonywanych na nich pomiarów twardości. W przypadku elementów rozciąganych otrzymywali zaniżone wartości twardości, a w elementach ściskanych – zawyżone, w porównaniu z próbkami nieobciążonymi. We wnioskach zaznaczyli, że twardościomierze wykorzystujące metodę badań dynamicznych mogą być obciążone znacznymi błędami wynikającymi z faktu, że badane elementy konstrukcyjne są zazwyczaj cienkościennie. Na początku XXI wieku pojawiły się na rynku dokładniejsze twardościomierze, wykorzystujące metodę dynamiczną, pozwalające na określenie twardości próbek o grubości nawet 3 mm.

Jednym z takich urządzeń jest przenośny twardościomierz Leeba HMM, który został wykorzystany w badaniach opisanych w artykule. W przyrządzie tym, masa uderowa głowicy, zakończona twardą końcówką pomiarową, jest zwalniana za pomocą sprężyny i uderzając w testowaną powierzchnię, dokonuje jej deformacji, co skutkuje spadkiem energii kinetycznej. Spadek ten jest obliczany przez pomiar prędkości, gdy masa uderzeniowa znajduje się dokładnie w odległości 1 mm od testowanej po-

wierzchni, zarówno w fazie uderzenia, jak i odbicia. Stały magnes w masie uderowej generuje indukcję napięcia w pojedynczej sprężynie głowicy uderowej. Napięcie sygnału jest proporcjonalne do prędkości masy uderowej i jest przeliczane na twardość HL. W badaniach wykorzystano głowicę typu D, w przypadku której zgodnie z deklaracją producenta dokładność pomiarów wynosi 6 HL. Urządzenie w sposób automatyczny, przy użyciu wczytanych przez producenta krzywych konwersji, przelicza twardość Leeba HL na wytrzymałość przy rozciąganiu  $f_u$ . Wydaje się zatem, że dostępne obecnie twardościomierze, wykorzystujące metodę dynamiczną, dostarczają na tyle dokładne wyniki twardości, że mogą służyć jako doskonałe narzędzie do określenia wytrzymałości na rozciąganie stali w sposób nieniszczący w trakcie wizji lokalnej na obiekcie.

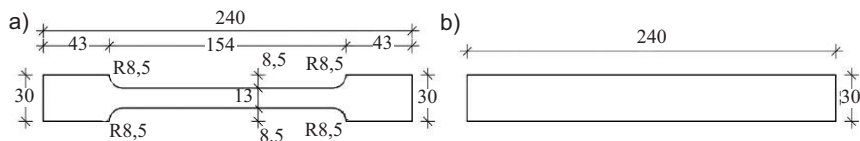
### Opis badań

W celu zbadania, czy otrzymywane wartości wytrzymałości na rozciąganie, ustalone na podstawie konwersji z twardości stali mierzonej metodą Leeba, są wystarczająco dokładne do tego, żeby w sposób nieniszczący określać wytrzymałość na rozciąganie badanej stali, wykonano łącznie 56 próbek ze stali S235 oraz S355 grubości 4 i 6 mm. W każdym zestawie przygotowano 11 elementów o geometrii zgodnej z normą [7], poddanych rozciąganiu oraz 3 próbki prostokątne do określenia twardości przy naprężeniach ściskających (rysunek 1).

Powierzchnia wszystkich próbek została przygotowana w wytwórni przez obróbkę strumieniowo-ścierną (Sa 1), a w części środkowej wyszlifowana do uzyskania metalicznego połysku (Sa 3). Pozwoliło to na uzyskanie wystarczająco pewnego trzymania w zaciskach maszyny wytrzymałościowej i na wykonanie badania twardości w przypadku dwóch rodzajów powierzchni (fotografia 1). W przypadku wszystkich 44 próbek z przewężeniem określono wytrzymałość na rozciąganie  $f_u$ , w maszynie wytrzymałościowej typu Z050 (fotografia 2). Badanie wykonywano z prędkością przyrostu obciążenia 0,008 1/s. Otrzymane średnie wartości  $\bar{f}_u$ , odchylenia standardowe  $s$  oraz współczynniki zmienności  $v$  przedstawiono w tabeli 1 w przypadku próbek ze stali S235 oraz w tabeli 2 – próbek ze stali S355. Wartości te wykorzystano jako porównawcze do wyników otrzymywanych przy użyciu twardościomierza Leeba.

W każdej serii badań, różniące się gatunkiem stali oraz grubością blachy, sprawdzano:

- wpływ jakości przygotowania powierzchni stali na wynik twardości na pierwszych pięciu próbkach z każdej serii;
- wpływ kierunku wykonywania próby na wynik twardości stali na jedenastu próbkach:
  - twardość stali próbek 6 – 11 przy naprężeniach rozciągających 175 MPa oraz 280 MPa w przypadku stali S235 oraz 250 MPa i 400 MPa – stali S355;



Stal	Grubość:	
	4 mm	6 mm
S235	szt. 11 seria S235/4/T	szt. 11 seria S235/6/T
S355	szt. 11 seria S355/4/T	szt. 11 seria S355/6/T

Stal	Grubość:	
	4 mm	6 mm
S235	szt. 3 seria S235/4/C	szt. 3 seria S235/6/C
S355	szt. 3 seria S355/4/C	szt. 3 seria S355/6/C

Rys. 1. Geometria próbek: a) rozciąganych; b) ściskanych  
Fig. 1. Geometry of samples subjected to: a) tension; b) compression



Fot. 1. Sposób przygotowania powierzchni próbek  
Photo 1. Preparation of sample surfaces



**Fot. 2. Pomiar twardości w kierunku poziomym próbki umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej**

*Photo 2. Hardness measurement in the horizontal direction, on a sample placed in a testing machine*

• twardość stali przy naprężeniach ściskających wynoszących -175 MPa w przypadku wszystkich trzech próbek prostokątnych.

Za każdym razem, gdy dokonywano pomiaru twardości przy użyciu przeno-

**Tabela 2. Wytrzymałość na rozciąganie próbek ze stali S355 otrzymana w maszynie wytrzymałościowej**

*Table 2. Tensile strength obtained in a testing machine for S355 steel samples*

Próbka	b [mm]	t [mm]	$F_m$ [kN]	$f_u$ [MPa]	$\bar{f}_u$	s	v
S355/4/T/1	13,52	3,66	26,31	532			
S355/4/T/2	13,57	3,55	26,63	553			
S355/4/T/3	13,58	3,72	26,55	526			
S355/4/T/4	13,70	3,71	26,67	525			
S355/4/T/5	13,73	3,55	24,73	507			
S355/4/T/6	13,60	3,69	26,95	537	528,7	11,1	2,09%
S355/4/T/7	13,71	3,79	26,81	516			
S355/4/T/8	13,60	3,68	26,38	527			
S355/4/T/9	13,73	3,71	27,05	531			
S355/4/T/10	13,77	3,71	27,18	532			
S355/4/T/11	13,73	3,76	27,36	530			
S355/6/T/1	14,13	5,81	41,43	505			
S355/6/T/2	14,12	5,83	41,72	507			
S355/6/T/3	13,77	5,80	40,07	502			
S355/6/T/4	13,99	5,90	40,63	492			
S355/6/T/5	14,13	5,85	40,98	496			
S355/6/T/6	13,59	5,87	39,73	498	500,6	4,8	0,96%
S355/6/T/7	14,13	5,89	41,53	499			
S355/6/T/8	14,10	5,61	39,55	500			
S355/6/T/9	13,99	5,88	41,46	504			
S355/6/T/10	14,23	5,83	42,14	508			
S355/6/T/11	14,03	5,84	40,64	496			

śnego twardościomierza Leeba HMM, odczytywano wartości w trzech różnych punktach próbki, a następnie wyznaczano średnią dla danej próbki.

**Tabela 1. Wytrzymałość na rozciąganie próbek ze stali S235 otrzymana w maszynie wytrzymałościowej**

*Table 1. Tensile strength obtained in a testing machine for S235 steel samples*

Próbka	b [mm]	t [mm]	$F_m$ [kN]	$f_u$ [MPa]	$\bar{f}_u$	s	v
S235/4/T/1	13,70	3,80	21,41	411			
S235/4/T/2	13,63	3,82	21,49	413			
S235/4/T/3	13,70	3,78	21,83	422			
S235/4/T/4	13,80	3,77	21,78	419			
S235/4/T/5	13,66	3,85	22,11	420			
S235/4/T/6	13,44	3,81	22,17	433	417,9	13,6	3,26%
S235/4/T/7	13,68	3,71	22,79	449			
S235/4/T/8	13,77	3,97	21,76	398			
S235/4/T/9	13,83	3,94	22,12	406			
S235/4/T/10	13,77	3,89	21,64	404			
S235/4/T/11	13,77	3,92	22,78	422			
S235/6/T/1	13,92	5,74	32,13	402			
S235/6/T/2	13,96	5,60	31,42	402			
S235/6/T/3	13,89	5,74	32,24	404			
S235/6/T/4	13,77	5,41	30,00	403			
S235/6/T/5	13,84	5,70	31,34	397			
S235/6/T/6	13,90	5,82	32,12	397	402,3	3,8	0,94%
S235/6/T/7	13,99	5,63	31,43	399			
S235/6/T/8	13,96	5,63	31,44	400			
S235/6/T/9	13,85	5,67	32,12	409			
S235/6/T/10	13,77	5,76	32,04	404			
S235/6/T/11	14,06	5,66	32,47	408			

## Wyniki badań

**Wpływ przygotowania powierzchni próbki na wynik pomiaru twardości HL.** W badaniach wykorzystano próbki wykonane przez wytwórnictwo konstrukcyjne stalowych, których powierzchnia została przygotowana przez obróbkę strumieniowo-ścierną (Sa 1), a w części środkowej wyszlifowana do uzyskania metalicznego połysku (Sa 3), co pokazano na fotografii 1. W praktyce, w warunkach wizji lokalnej możliwe jest jedynie ręczne usunięcie rdzy lub powłoki malarskiej do stopnia St 1 lub St 2, dlatego też zdecydowano się sprawdzić, jak bardzo wrażliwe są pomiary twardości stali w przypadku różnie przygotowanej powierzchni. W tabeli 3 przedstawiono twardość HLD oraz wyliczoną na jej podstawie wytrzymałość na rozciąganie  $f_u$  w przypadku próbek powierzchni podanej obróbce strumieniowo-ścierną (Sa 1), natomiast w tabeli 4 o powierzchni wyszlifowanej do stopnia Sa 3.

Porównując wartości z tabeli 4 i tabeli 3 stwierdzono, że przy wykonywaniu pomiarów twardościomierzem Leeba bardzo istotne jest przygotowanie testowanej powierzchni. Średni współczynnik zmienności otrzymywanych wyników wytrzymałości na rozciąganie

w przypadku powierzchni wyszlifowanej wyniósł 2,4%, a wyczyszczonej strumieniowo, ale chropowatej, 5,7%. Należy podkreślić, że w przypadku powierzchni chropowatej uzyskuje się również mniejszą twardość, a więc i zaniżoną wartość wytrzymałości na rozciąganie. Prawdopodobnie przy powierzchni czyszczonej ręcznie za pomocą szczotki drucianej współczynnik zmienności byłby jeszcze większy i do otrzymywanych wartości wytrzymałości na rozciąganie należy podchodzić wówczas z jeszcze większą ostrożnością. W ostatniej kolumnie tabel 1 i 2 zestawiono stosunek średniej wytrzymałości na rozciąganie wszystkich pięciu próbek do wartości uzyskanej z maszyny wytrzymałościowej.

**Wpływ kierunku wykonywania próby na wynik pomiaru twardości HL.** Zgodnie z zaleceniami producenta twardościomierza, najdokładniejsze wyniki uzyskuje się, wykonując próbę przy pionowym ustawieniu głowicy, gdy uderzenie jest z góry na dół. Badania wykonywane przy takim ustawieniu głowicy cechują się najmniejszym rozrzutem wy-

**Tabela 4. Twardość i wytrzymałość na rozciąganie próbek z powierzchnią wyczyszczoną do stopnia Sa 3**

*Table 4. Hardness and tensile strength for samples with surfaces prepared to Sa 3 degree*

Próbka	HLD	$f_{u,Sa3}$ [MPa]	$\bar{f}_{u,Sa3}$	s	v	$f_{u,Sa3}/f_u$
S235/4/T/1	415	501				
S235/4/T/2	421	516				
S235/4/T/3	431	542	525,4	14,8	2,81%	1,26
S235/4/T/4	427	531				
S235/4/T/5	429	536				
S235/6/T/1	377	418				
S235/6/T/2	375	415				
S235/6/T/3	389	441	428,9	13,2	3,07%	1,07
S235/6/T/4	392	448				
S235/6/T/5	379	423				
S355/4/T/1	444	574				
S355/4/T/2	448	585				
S355/4/T/3	434	548	575,9	14,6	2,53%	1,09
S355/4/T/4	448	587				
S355/4/T/5	447	585				
S355/6/T/1	438	561				
S355/6/T/2	450	591				
S355/6/T/3	448	587	575,1	12,9	2,24%	1,15
S355/6/T/4	438	560				
S355/6/T/5	444	576				

**Tabela 3. Twardość i wytrzymałość na rozciąganie próbek z powierzchnią wyczyszczoną do stopnia Sa 1**

*Table 3. Hardness and tensile strength for samples with surfaces prepared to Sa 1 degree*

Próbka	HLD	$f_{u,Sa1}$ [MPa]	$\bar{f}_{u,Sa1}$	s	v	$f_{u,Sa1}/f_u$
S235/4/T/1	363	395				
S235/4/T/2	387	440				
S235/4/T/3	402	473	436,3	25,1	5,75%	1,04
S235/4/T/4	386	442				
S235/4/T/5	383	432				
S235/6/T/1	374	414				
S235/6/T/2	347	415				
S235/6/T/3	387	439	422,3	10,6	2,51%	1,05
S235/6/T/4	373	413				
S235/6/T/5	382	430				
S355/4/T/1	416	515				
S355/4/T/2	407	484				
S355/4/T/3	379	426	453,9	38,9	8,58%	0,86
S355/4/T/4	370	430				
S355/4/T/5	374	414				
S355/6/T/1	406	485				
S355/6/T/2	425	527				
S355/6/T/3	409	489	480,9	28,0	5,83%	0,96
S355/6/T/4	392	450				
S355/6/T/5	394	454				

ników. Ze względu na siłę grawitacji, pomiar twardości materiału powinien być skorygowany, jeżeli wykonywany jest w innym kierunku. W praktyce inżynierskiej nie zawsze możliwe jest wykonanie badania w kierunku z góry na dół, dlatego postanowiono sprawdzić, jak wpływa kierunek wykonywania próby na otrzymywane wartości twardości i wyliczoną na ich podstawie wytrzymałość na rozciąganie (fotografia 2). Wszystkie uderzenia wykonano na części wyszlifowanej próbek.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że zmiana kierunku wykonywania uderzenia ma znikomy wpływ na średnią wartość twardości materiału, co świadczy, że współczynniki korekcyjne wprowadzone przez producenta urządzenia przy różnych kierunkach uderzenia są właściwe. Mimo nieznacznej różnicy wartości średnich widać jednak wyraźnie, że przy uderzeniu w kierunku poziomym zwiększają się zdecy-

dowanie odchylenie standardowe i współczynniki zmienności. W związku z tym, o ile to możliwe, pomiar twardości należy wykonywać w kierunku z góry na dół, zgodnie z zaleceniami producenta urządzenia, gdyż wyniki są wtedy najbardziej wiarygodne.

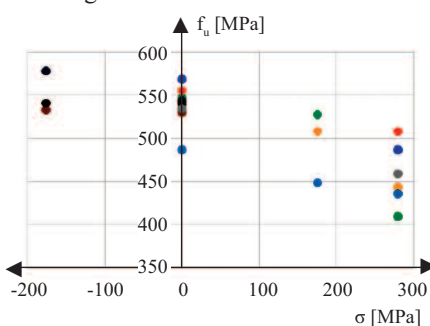
Współczynniki zmienności wyników otrzymywanych w maszynie wytrzymałościowej wynoszą 0,94 – 3,26% (tabele 1 i 2), natomiast w przypadku wytrzymałości na rozciąganie określonej na podstawie pomiarów twardości wahają się w przedziale 1,82 – 8,79%. Potwierdza to, że wyniki ze statycznej próby rozciągania, wykonanej w warunkach laboratoryjnych, obciążone są dużo mniejszą zmiennością niż uzyskane przez konwersję z twardości stali.

**Wpływ stanu naprężeń w materiale na pomiar twardości HLD.** Określając twardość stali w warunkach laboratoryjnych, wykonujemy pomiary na próbkach nieobciążonych, natomiast w trakcie wizji lokalnej na obiekcie ta-

kiej sytuacji nie mamy. Inżynier korzystający z przenośnego twardościomierza musi mieć wiedzę, czy wykonuje uderzenie w materiał rozciągany, czy ściskany i jaki ma to wpływ na pomiarową twardość. W zależności od stanu naprężeń w elemencie stalowym, jego twardość może zwiększać się lub zmniejszać, co wykazano w artykułach [5 i 6], wykorzystując przenośny twardościomierz Brinella PZ-3. Oczywiście jest, że choć twardość materiału zależy od stanu naprężeń, to wytrzymałość stali jest wielkością stałą i w tym przypadku otrzymujemy jedynie wartość przekonwertowaną, obciążoną pewnym błędem pomiarowym. W celu określenia, jak wpływa obciążenie rozciągające i ściskające na twardość HLD, a w konsekwencji na określoną na tej podstawie wytrzymałość na rozciąganie, wykonano serię badań twardości na próbkach umieszczonych w maszynie wytrzymałościowej, w której zatrzymano przyrost obciążenia na odpowiednim poziomie. W ten sposób możliwe było wykonanie uderzeń przy naprężeniach rozciągających w próbce

wynoszących 175 i 280 MPa w przypadku stali S235 (rysunki 2 i 3) oraz 250 i 400 MPa – stali S355 (rysunki 4 i 5). Ze względu na możliwość utraty stateczności cienkich próbek prostokątnych pomiary przy sile ściskającej wykonano jedynie przy jednym poziomie naprężeń wynoszącym 175 MPa, w przypadku obu gatunków stali.

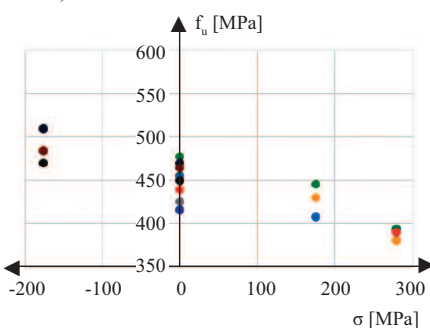
Przedstawione wyniki potwierdzają, że w przypadku elementów stalowych poddanych obciążeniom ściskającym, twardość stali zwiększa się, natomiast przy rozciąganiu zmniejsza. Powoduje to, że wartości wytrzymałości na rozciąganie stali wyliczone na podstawie jej twardości obarczone są błędem i mogą prowadzić do niewłaściwego określenia gatunku stali.



Oznaczenia: ● S235/4/T/6; ● S235/4/T/7;  
● S235/4/T/8; ● S235/4/T/9; ● S235/4/T/10;  
● S235/4/T/11; ● S235/4/C/1; ● S235/4/C/2;  
● S235/4/C/3

**Rys. 2. Zależność wyliczonej wytrzymałości na rozciąganie od stanu naprężeń w próbce ze stali S235, grubości 4 mm**

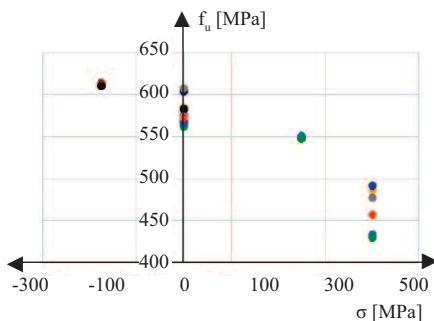
Fig. 2. Relationship of the calculated tensile strength to the stress level in a sample of S235 steel, 4 mm thick



Oznaczenia: ● S235/6/T/6; ● S235/6/T/7;  
● S235/6/T/8; ● S235/6/T/9; ● S235/6/T/10;  
● S235/6/T/11; ● S235/6/C/1; ● S235/6/C/2;  
● S235/6/C/3

**Rys. 3. Zależność wyliczonej wytrzymałości na rozciąganie od stanu naprężeń w próbce ze stali S235, grubości 6 mm**

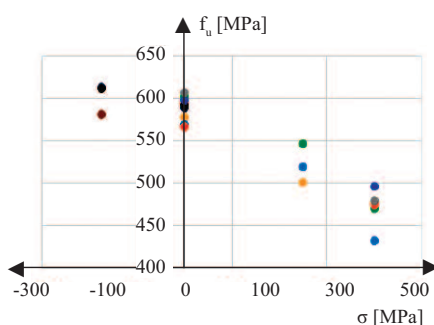
Fig. 3. Relationship of the calculated tensile strength to the stress level in a sample of S235 steel, 6 mm thick



Oznaczenia: ● S355/4/T/6; ● S355/4/T/7;  
● S355/4/T/8; ● S355/4/T/9; ● S355/4/T/10;  
● S355/4/T/11; ● S355/4/C/1; ● S355/4/C/2;  
● S355/4/C/3

**Rys. 4. Zależność wyliczonej wytrzymałości na rozciąganie od stanu naprężeń w próbce ze stali S355, grubości 4 mm**

Fig. 4. Relationship of the calculated tensile strength to the stress level in a sample of S355 steel, 4 mm thick



Oznaczenia: ● S355/6/T/6; ● S355/6/T/7;  
● S355/6/T/8; ● S355/6/T/9; ● S355/6/T/10;  
● S355/6/T/11; ● S355/6/C/1; ● S355/6/C/2;  
● S355/6/C/3

**Rys. 5. Zależność wyliczonej wytrzymałości na rozciąganie od stanu naprężeń w próbce ze stali S355, grubości 6 mm**

Fig. 5. Relationship of the calculated tensile strength to the stress level in a sample of S355 steel, 6 mm thick

W przeprowadzonych badaniach, przy stanie naprężeń ściskających wynoszącym ok. 40% wytrzymałości na rozciąganie badanej stali, otrzymywano o 2 – 6% większą wytrzymałość na rozciąganie niż w przypadku próbek nieobciążonych. Natomiast w przypadku próbek rozciąganych, przy naprężeniach wynoszących ok. 50% wytrzymałości na rozciąganie badanej stali, uzyskiwano zaniżone wyniki o 5 – 11%, a przy zwiększeniu naprężeń do ok. 75% wytrzymałości na rozciąganie, były one zaniżone nawet do 20% w porównaniu z próbkami nieobciążonymi.

## Wnioski

Przyjmując za najbardziej dokładne średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie, podane w tabelach 1 i 2, okre-

ślone w statycznej próbie rozciągania oraz porównując je ze wszystkimi wartościami średnimi  $f_u$  wyliczonymi na podstawie pomiaru twardości stali stwierdzono, że mniejsze wartości niż te z maszyny wytrzymałościowej uzyskano jedynie przy pomiarze:

- na chropowatej powierzchni w przypadku dziesięciu z dwudziestu próbek (próbki S235/4/T/1, S355/4/T/1 do 5, S355/6/T/1 oraz S355/6/T/3 do 5);

- w kierunku poziomym w przypadku trzech próbek z 44 (próbki S235/4/T/3, S235/6/T/1 oraz S355/4/T/5);

- na próbkach silnie rozciąganych w przypadku osiemnastu z 23 (próbki S235/4/T/1 oraz wszystkie próbki S235/6/T, S355/4/T, S355/6/T).

Stosując przenośny twardościomierz Leeba do określenia wytrzymałości na rozciąganie stali w sposób nieniszczący, należy pamiętać, aby pomiary były wykonywane na powierzchni wyszlifowanej do stopnia Sa 3, a uderzenie z góry na dół. Wskazane jest wykonywanie pomiarów na elementach rozciąganych, gdyż twardość stali wtedy maleje, a co za tym idzie, przeliczona na tej podstawie wytrzymałość na rozciąganie również. Należy jednak pamiętać, że w przypadku elementów silnie rozciąganych, wytrzymałość na rozciąganie otrzymywana na podstawie twardości, może być zaniżona nawet o 20%.

## Literatura

- [1] Leeb D. New dynamic method for hardness testing of metallic materials, VDI-Report No. 308, pp. 123-128, 1978.
- [2] ASTM-International A956-12, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products.
- [3] ISO 16859-1 Metallic materials – Leeb hardness test – Part 1: Test method.
- [4] DIN ISO 18265 Metallic Conversion of hardness values.
- [5] Gosowski B, Dudkiewicz J. Hardness of longitudinally-loaded steel elements and its relationship to strength, Archives of Civil Engineering, 1997; 43 (1): 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, 2004; 50: 45 – 67.
- [7] PN-EN ISO 6892-1 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.

Przyjęto do druku: 18.01.2024 r.