

Wykorzystanie pomiarów twardości in-situ do oceny wytrzymałości stali z początku XX w. Use of the hardness test in-situ for evaluation of strength of steel from the early 20th century

Bronisław Gosowski¹, Piotr Organek²

¹ Instytut Budownictwa
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: bronislaw.gosowski@pwr.wroc.pl

² Institute of Building Engineering
Wroclaw University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: piotr.organeck@pwr.wroc.pl

Streszczenie

Często w praktyce inżynierskiej chcąc określić parametry wytrzymałościowe stali, z której wykonany jest obiekt budowlany, wykorzystuje się metody pośrednie, gdyż badania niszczące (statyczna próba rozciągania) są niemożliwe do wykonania z powodu braku możliwości pobrania dostatecznej ilości próbek. Powszechnie znane są zależności pozwalające na podstawie twardości próbek stali pobranych z konstrukcji szacować jej parametry wytrzymałościowe. Zależności te uogólniono do takich, które uwzględniają wyężenie elementów konstrukcyjnych i pomiary twardości można przeprowadzać bezpośrednio na elementach obciążonego ustroju budowlanego. W niniejszej pracy zweryfikowano je dla stali z początku XX wieku. Badania wykazały, że stosowanie ich dla stali dawnych, powinno odbywać się z dużą ostrożnością i być obowiązkowo uzupełnione badaniami składu chemicznego.

Abstract

In engineering practice trying to determine parameters of strength of steel that building structure is made of, indirect methods are often used, due to the fact that destructive testing (static tensile test) is impossible to do because of the inability to take a sufficient number of samples. Generally known are correlations, which allow to estimate its strength parameters on the basis of the hardness of steel samples taken from a construction. These correlations have been generalized to those that take into account the effort of structural elements so that hardness measurements can be performed directly on the elements of the loaded construction object. In this paper these correlations for steel from the early twentieth century have been verified. The research has shown that the use of such hardness measurements for historical steel should be done with caution and completed by obligatory testing of chemical composition.

Słowa kluczowe: wytrzymałość stali, stal historyczna, twardość Brinella, badania nieniszczące, wyężenie materiału.
Keywords: strength of steel, historical steel, Brinell hardness, non-destructive testing, effort of material.

1. Wstęp

Opracowując projekty rewitalizacji, remontów lub ewentualnych wzmocnień konstrukcji, często spotykamy się brakiem wiarygodnych danych o zastosowanym gatunku stali. Zazwyczaj nie ma możliwości pobrania wystarczającej liczby próbek z konstrukcji do badań niszczących, a koniecznym jest wyznaczenie wytrzymałości obliczeniowej stali, z której wykonany jest obiekt. W takich sytuacjach możemy skorzystać z zależności pozwalających na podstawie nieniszczących pomiarów twardości Brinella wyężonych elementów ustroju budowlanego szacować parametry wytrzymałościowe stali, z której są wykonane. Takie zależności są dobrze znane dla stali z drugiej połowy XX wieku stosowanych w budownictwie. Pojawia się jednak problem stali historycznych, z których wiele wykonanych obiektów jeszcze istnieje i często wymaga naprawy oraz wzmocnienia.

2. Pośrednia ocena wytrzymałości stali z wykorzystaniem nieniszczących pomiarów twardości Brinella

Stale konstrukcyjne wykorzystywane w budownictwie to głównie stale w stanie surowym lub normalizowanym. Dla takich stali można podać liniowy związek między twardością Brinella a parametrami wytrzymałościowymi [1÷3], tj.: granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie.

1. Introduction

Preparing regeneration projects, renovations or any reinforcement of construction, we often encounter a lack of reliable data on used steel grade. It is usually impossible to take sufficient number of samples from the construction to take destructive tests but it is necessary to determine the strength of steel that the object is made of. In such situations we can use the relationships which enable us on the basis of non-destructive measurements of Brinell hardness of elements effort of the structure, to estimate the strength parameters of steel that they are made of. These relationships are well known for steel used in building from the second half of the 20th century. However, there is a problem connected with concerning which was used in construction historical steel of many objects that still exist and often need to be repair and reinforce.

2. Indirect assessment of the strength of steel with the use of non-destructive measurements of Brinell hardness

Structural steels used in construction are mainly raw or normalized. For such steels a linear relationship between Brinell hardness and strength parameters [1 ÷ 3], i.e.: yield strength and tensile strength can be provided.

Measurements of hardness of the steel as opposed to the

Pomiary twardości stali w przeciwieństwie do statycznej próby rozciągania są badaniami nieniszczącymi, które można przeprowadzać bezpośrednio na elementach konstrukcji, za pomocą przenośnych twardościomierzy. Najlepsze rezultaty zapewnia stosowanie przyrządów działających statycznie. Stosowanie do pomiarów twardości przyrządów działających dynamiczno-plastycznie lub dynamiczno-sprężysto powoduje, że w przypadku badania elementów cienkościennych (a takie są zazwyczaj elementy konstrukcji budowlanych) wyniki są obciążone znacznymi błędami [4].

Zależność podana przez Brinella pozwalająca na podstawie twardości HBW ustalać wytrzymałość stali na rozciąganie R_m jest jedną z ważniejszych zalet pomiarów twardości i dzięki zainteresowaniu innych badaczy została uogólniona również na granicę plastyczności R_e (np. [6]). Normy wielu krajów jak np. PN-H-04357:1993, DIN EN ISO 18265:2004-02, ISO 4964:1984, ASTM E140-86, ISO/TR 10108:1989, dopuszczają szacowanie parametrów wytrzymałościowych stali na podstawie pomiarów twardości Brinella, kiedy nie ma możliwości przeprowadzenia statycznej próby rozciągania lub liczba możliwych do pobrania próbek jest mocno ograniczona.

Najnowsze badania [1÷3] pozwoliły na podanie zależności uwzględniającej dodatkowo wyężenie badanego elementu konstrukcyjnego, które można zapisać w postaci (1) dla regresji liniowej oraz (2) dla regresji wielokrotnej:

$$R_i/HBW = b_{1i} \cdot \sigma + b_{0i} \quad \text{przy } i = e, m \quad (1)$$

$$R_i = b_{2i} \cdot HBW + b_{1i} \cdot \sigma \quad (2)$$

gdzie:

$i = e, m$ – odpowiednio dla granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie,
 b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} – współczynniki regresji,
 σ – wyężenie próbki w trakcie badania,
 HBW – twardość Brinella badana kulką z węglików spiekanych na próbce wyężonej naprężeniami normalnymi σ .

3. Próbki, program, przebieg i rezultaty badań

Próbki (Rys. 1 a, b) wykonano ze środków ceowników zwykłych 100, pobranych podczas prac wzmacniania stalowej konstrukcji dachu w zabytkowej szkole w Wałbrzychu, pochodzącej z początku XX wieku.

Zakres badań [7] obejmował pomiary twardości piętnastu próbek poddanych rozciąganiu i ścisaniu, a po zakończeniu badań twardości wykonaniu statycznej próby rozciągania (zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2010) w celu określenia rzeczywistej granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie badanej stali. Próbki były obciążane siłą podłużną, wywołującą dziesięć poziomów wyężenia σ , tj. cztery przy ścisaniu (-120, -90, -60, -30 MPa), pięć przy rozciąganiu (+150, +120, +90, +60, +30 MPa) i jeden przy zerowym wyężeniu (0 MPa).

Badania twardości przeprowadzano przy użyciu przenośnego twardościomierza PZ-3 firmy Zwick (Rys. 1 c),

static tensile tests are non-destructive test and can be performed directly on the structural elements by means of portable hardness testers.

The best results are obtained by using statically working devices. The use of devices working dynamic-plastically or dynamic-elastically for measuring the hardness causes that in the case of testing thin-walled components (and these are usually elements of construction) the results are subject to substantial errors [4].

The relationship given by Brinell, which allows on the basis of hardness HBW allows to determine the tensile strength of steel R_m , is one of the most important advantages of the hardness measurement and it has been generalized by other researchers to the yield strength R_e (e.g. [6]). Standards in many countries such as PN-H-04357: 1993, DIN EN ISO 18265:2004-02, ISO 4964:1984, ASTM E140-86, ISO/TR 10108:1989, allow to estimate the strength parameters of steel on the basis of measurements of Brinell hardness when there is no possibility of a static tensile test to be conducted or the number of samples, which are possible to taken is very limited.

Recent studies [1÷3] have allowed to provide relationships regarding additionally the effort of testing structural element. They can be written in the form (1) for linear regression and (2) for multiple regression:

where:

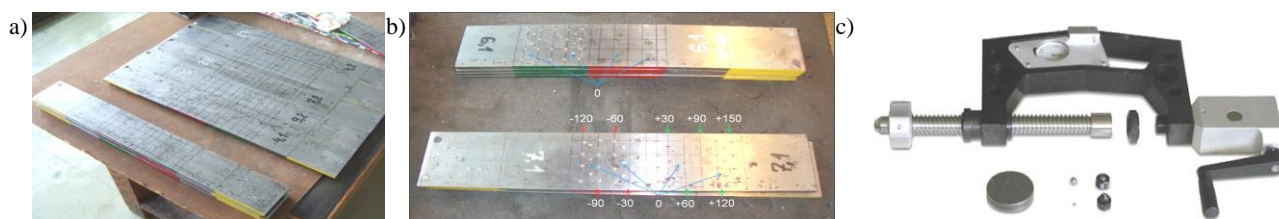
$i = e, m$ – respectively for the yield strength and tensile strength,
 b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} – regression coefficients,
 σ – effort of the sample during the test,
 HBW – Brinell hardness test cemented carbide ball on a sample of intense stress normal σ .

3. Samples, program, course and results of research

Samples (Fig. 1a, b) made of the web channel sections 100, have been taken during the work reinforcing steel roof structure at historic school in Wałbrzych which is dated from the early twentieth century.

The scope of research [7] included the hardness measurements of fifteen samples subjected to tension and compression. After completion of hardness test. The static tensile test (according to PN-EN ISO 6892-1:2010) to determine the actual yield strength and tensile strength of the tested steel was conducted. Samples were loaded with longitudinal force, causing ten levels of effort σ , i.e.: four in compression (-120, -90, -60, -30 MPa), five tensile strength (150, +120, +90, +60, +30 MPa) and the efforts of the one at zero (0 MPa).

Hardness tests were performed with a portable hardness tester PZ Zwick-3 (Fig. 1 c), accordance with the European



Rys. 1. Przygotowane próbki a) przed badaniem, b) po pomiarach twardości oraz c) przenośny twardościomierz PZ-3.

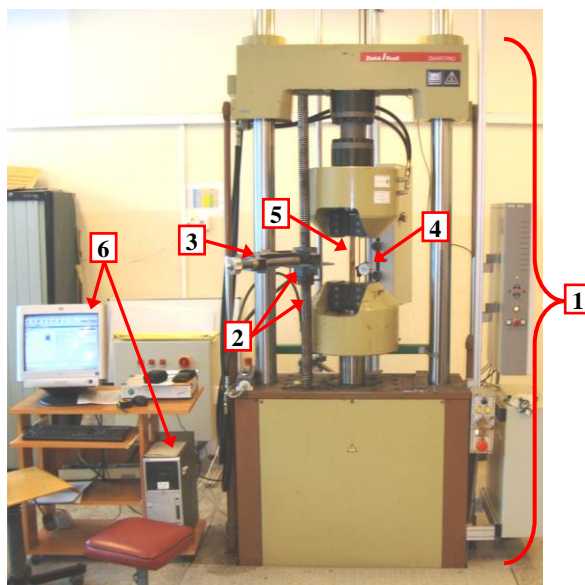
Fig. 1. Prepared samples a) before the test, b) after the hardness test and c) portable Brinell hardness testing machine PZ-3.

zgodnie z normą europejską PN-EN ISO 6506-1:2008, czterokrotnie na każdym poziomie wyężenia oraz trzykrotnie w czterech miejscach przy zerowym obciążeniu. Łącznie wykonano $15 \cdot (9 \cdot 4 + 4 \cdot 3) = 720$ obserwacji. Węglbnik stanowiła kulka z węglków spiekanych o średnicy $D = 5$ mm, wciskana w powierzchnię próbek siłą obciążającą równą $F = 7355$ N.

Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym pokazanym na Rys. 2.

standard PN-EN ISO 6506-1:2008, four times at each level of effort and three times in four places at zero load. In total $15 \cdot (9 \cdot 4 + 4 \cdot 3) = 720$ observations have been done. A carbide ball of diameter $D = 5$ mm served as an indenter and pressed into the surface of the samples force equal to $F = 7355$ N.

The study was conducted on the test bench shown in Fig. 2.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: 1 – maszyna wytrzymałościowa UFP 400, 2 – stolik podtrzymujący przenośny twardościomierz, 3 – przenośny twardościomierz Brinella PZ-3, 4 – analogowy zegar pomiarowy, 5 – badana próbka, 6 – komputer sterujący.

Fig. 2. Measuring position: 1 – testing machine, 2 – table supporting a portable hardness testing machine, 3 – portable Brinell hardness testing machine PZ-3, 4 – analog clock measuring, 5 – test sample, 6 – control computer.

Wyniki pomiarów opracowano statystycznie za pomocą programu STATISTICA firmy StatSoft wykorzystując modele prostej regresji liniowej i regresji wielokrotnej liniowej.

Wyprowadzone formuły dla stali z początku XX wieku drogą regresji liniowej oraz regresji wielokrotnej (Tabela 1) okazały się słabymi estymatorami parametrów wytrzymałościowych (stosowne wykresy zostaną przedstawione w trakcie konferencji). Wyprowadzone formuły dla granicy plastyczności wyjaśniają ok. 40% i 70% wyników pomiarów. Natomiast dla wytrzymałości na rozciąganie – ok. 55% i 80%. Wyniki pomiarów charakteryzuje duży rozrzut wzdłuż linii regresji lub w przypadku regresji wielokrotnej wzdłuż płaszczyzny regresji. W związku z tym otrzymujemy duże odchylenia niewyjaśnione (błędy), a co za tym idzie, niskie wartości statystyk F, mówiących o sensowności przyjętego modelu oraz niskie współczynniki korelacji r i determinacji r^2 , które informują jak silny jest związek między zmiennymi i jaki procent wyników wyjaśnia model.

The measurement results were analyzed statistically by means of the STATISTICA StatSoft software using simple linear regression and multiple linear regression models.

The derived formulas for steel from the early twentieth century by linear regression and multiple regression (Table 1) proved to be weak estimators of strength parameters (appropriate graphs will be presented during the conference). The derived formulas for the yield explain about 40% and 70% of the results and for tensile strength – about 55% and 80%. The results of measurements have high dispersion along the regression line, or in the case of multiple regression along the plane. Therefore, we obtain large unexplained deviations (errors), and hence, the low value of the F statistics, talking about the reasonableness of the adopted model, and low coefficients of correlation r and determination r^2 that tell how strong the relationship between variables is and what percentage of the results the model explains.

Tabela 1. Wyniki badań statystycznych zależności $R_i / HBW = f(\sigma)$ oraz $R_i = f(\sigma, HBW)$ dla stali z początku XX wieku.
Table 1. Statistical results relationships $R_i / HBW = f(\sigma)$ and $R_i = f(\sigma, HBW)$ for steel from the early 20th century.

Coefficients: regression $b_{0i}, b_{1i}, b_{2i},$ i correlation $ r $	Linear regression $R_i / HBW = b_{1i} \cdot \sigma + b_{0i}$		Multiple regression $R_i = b_{2i} \cdot HBW + b_{1i} \cdot \sigma$	
	$i = e$	$i = m$	$i = e$	$i = m$
b_{0i}	2,418	3,224	–	
b_{1i}	$5,716 \cdot 10^{-4}$	$7,627 \cdot 10^{-4}$	0,070	0,093
b_{2i}	–		2,417	3,221
$ r $	0,402	0,545	0,719	0,821

Wartości otrzymanych współczynników przy HBW w formułach określających parametry wytrzymałościowe wynoszą w przypadku wytrzymałości stali na rozciąganie 3,22, a granicy plastyczności 2,42, zarówno dla regresji liniowej, jak i wielokrotnej. Zawierają się one w zakresach podawanych w literaturze (por. np. [3, 5]).

4. Uwagi ogólne i wnioski

Badana stal była wyprodukowana w latach 30. ubiegłego wieku przez Friedenshütte (dzisiejsza Huta Pokój w Rudzie Śląskiej) w procesie tomasowskim lub martenowskim, bowiem takimi liniami technologicznymi wówczas dysponowała. Wyniki składu chemicznego stali (Tabela 2) mocno różnią się od siebie głównie w zakresie procentowej zawartości węgla – pierwiastka mającego dominujący wpływ na strukturę i własności stali niestopowych (węglowych).

Tabela 2. Skład chemiczny stali historycznej wyznaczony dla trzech losowo pobranych próbek.
Table 2. Chemical composition of historical steel specified for three samples taken at random.

Steel	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	Ti
Sample A	0,154	0,409	0,0	0,048	0,035	0,0	0,076	0,0	<0,001	0,0	0,003
Sample B	0,017	0,414	0,0	0,046	0,022	0,011	0,048	0,047	<0,001	0,001	0,003
Sample C	0,008	0,378	0,0	0,058	0,027	0,011	0,047	0,049	<0,001	0,001	0,003

Na podstawie składu chemicznego stali jednoznacznie można stwierdzić, że była ona odtleniana tylko przy użyciu manganu. Taką stal nazywamy nieuspokojoną, bowiem krzepnie ona we wlewkę niespokojnie, wydzielając gazy. Zakrzepły wlewek zawiera liczne pęcherze i charakteryzuje się dużą zawartością zanieczyszczeń w strefie środkowej.

Powyższe powoduje, że produkowana stal miała niską jakość i cechowała się dużą niejednorodnością. Bezpośrednio przełożyło się to na otrzymywane wyniki pomiarów twardości. Nawet w dość bliskim sąsiedztwie punktów pomiarów, liczbowe wartości twardości Brinella mocno różniły się od siebie. Wskutek tego wszystkie przeprowadzone analizy statystyczne cechowało duże rozproszenie wyników na wykresach regresji. Zatem wyprowadzone formuły są słabymi oszacowaniami jej parametrów wytrzymałościowych i zalecane jest ostrożne ich stosowanie do celów praktycznych. Wykorzystując sposób pośredniego szacowania parametrów wytrzymałościowych stali dawnych powinno się bazować na kilkudziesięciu pomiarach twardości oraz obowiązkowo rozszerzyć analizy o badania składu chemicznego.

Literatura • References

- [1] Dudkiewicz J., Gosowski B.: Wykorzystanie nieniszczących badań twardości do oceny wytrzymałości stali w konstrukcjach budowlanych. *Inżynieria i budownictwo* 2006, nr 1, str. 48-52.
- [2] Gosowski B., Dudkiewicz J.: Hardness of longitudinally-loaded steel elements and its relationship to strength. *Archives of Civil Engineering*, 1997, Vol. 43, No. 1, pp. 23-36.
- [3] Dudkiewicz J., Gosowski B.: Generalizations of relations between strength and hardness of steel in structural elements under longitudinal load. *Archives of Civil Engineering*, 2004, Vol. 50, No. 1, pp. 45-67.
- [4] Gosowski B., Kubica E.: Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych. Wydanie IV zaktualizowane i rozszerzone. Wrocław: Oficyna Wydawnicza PWR, 2012.
- [5] Błazewski S., Mikoszewski J.: Pomiary twardości metali. Warszawa: WNT, 1981.
- [6] Markowiec M. P.: Opriedielenieje miechaniczeskich swojstw mietalow po twiordosti. Moskwa: Maszynostrojenije, 1979.
- [7] Organek P.: Weryfikacja zależności między twardością a wytrzymałością dla stali z początku XX wieku. Praca Magisterska. Wrocław: Politechnika Wroclawska 2013.

The values of coefficients standing at HBW in formulas defining the strength parameters are equal for tensile strength of steel 3,22 and for yield strength 2,42 for both linear regression and multiple regression. They are contained in the ranges given in the literature (cf. e.g. [3, 5]).

4. General comments and conclusions

The test steel was produced in the thirties the last century by Friedenshütte (now Stellworks Pokój in Ruda Śląska) in the Bessemer-Thomas process or Siemens-Martin process because then it had such technological lines. The results of the steel chemical composition (Table 2) strongly differ from each other mainly in the percentage of carbon – an element, which has a dominant effect on the structure and ownership non-alloy steel (carbon).

On the basis of steel chemical composition it is possible to state unambiguously that it was deoxidized by using only manganese. This steel is called rimmed steel because the steel solidifies in the ingot restlessly, giving off gases. Solidified ingot comprises a plurality of blisters and high content of impurities in the central zone.

Accordingly, produced steel was of low quality and of high heterogeneity. This had a direct impact on obtained results of the hardness measurement. Even in a close proximity to points of measurements, numerical values of Brinell hardness strongly differ from each other. As a result, all performed statistical analyzes were characterized by a large scattering of the graphs of regression. Thus, the derived formulas estimate weakly its strength parameters and caution is recommended while using their for practical purposes. When using the indirect method of estimating the strength parameters of historical steel one should base on dozens of hardness measurements and mandatory extend the analysis of chemical composition.