



PIOTR MATYSEK, *pmatysek@tlen.pl*
MICHAŁ WITKOWSKI, *witkowskipk@tlen.pl*
Politechnika Krakowska

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI I ODKSZTAŁCALNOŚCI XIX-WIECZNYCH MURÓW CEGLANYCH

A STUDY ON THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF XIX CENTURY BRICK MASONRY

Streszczenie W artykule przedstawiono badania cegieł, zapraw i fragmentów murów pobranych z konstrukcji budynku wzniesionego pod koniec XIX wieku na terenie koszar arcyksięcia Rudolfa w Krakowie. Badania obejmowały określenie wytrzymałości materiałów murowych, pomiary i dokumentację geometrii struktury murów (grubość i regularność spoin, imperfekcje), określenie wytrzymałości i odkształcalności murów przy ściskaniu. Badania wytrzymałości i odkształcalności murów prowadzono na filarkach ceglanych wyciętych z konstrukcji ścian zewnętrznych. Rezultaty badań własnych odniesiono do wyników prezentowanych w literaturze przedmiotu. W artykule dyskutowany jest również problem możliwości i sposobu wykorzystania wzorów normowych przy szacowaniu wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych w budynkach istniejących.

Abstract In the paper there are presented tests for bricks, mortars and parts of walls taken from the building constructed at the end of the 19th century on the area of Archduke Rudolph barracks complex in Cracow. Conducted tests included determination of strengths for masonry materials, measurements and documentation of geometry of wall structure (thickness and regularity of joints, imperfections) as well as determination of strength and deformability for masonry under compression. Strength and deformability tests were carried out on pillars cut out from external walls. Tests results were compared with values determined by the other researchers. There is also analyzed in the paper the question of possibility and the way of application of code formulas for estimating the compressive strength of masonry for existing structures.

1. Wprowadzenie

W analizach konstrukcji istniejących często stawiane jest pytanie o wytrzymałość murów. Dotyczy to szczególnie budynków, w których planuje się istotne zmiany polegające rozbudowie obiektu, zmianie funkcji użytkowych, zmianie układu otworów w ścianach. W ostatnich latach przebudowie i modernizacji podlega wiele obiektów pochodzących z XIX wieku, z okresu intensywnej rozbudowy miast. Podstawowy układ konstrukcyjny stanowią w tych budynkach ściany i filary murowane z cegieł na zaprawie wapiennej (pod koniec XIX wieku z dodatkiem cementu), na których oparto stropy typu belkowego (nad piwnicami sklepienia lub stropy odcinkowe). Grubości ścian nośnych i przekroje filarów murowych są w budynkach XIX-wiecznych zdecydowanie większe niż w konstrukcjach realizowanych kilkadziesiąt lat później. W budynkach ze stropami belkowymi drewnianymi lub stalowymi wykonanie ścian o znacznej grubości, kotwienie ścian ze stropami oraz stosowanie odpowiednich ścian poprzecznych usztywniających miało zapewnić odpowiednią sztywność przestrzenną ustroju

konstrukcyjnego. Wykonanie ścian murowych znacznej grubości wynikało również z obserwacji budynków w czasie pożarów. Chodziło o zapewnienie odpowiedniej stateczności ścian murowych, nawet w przypadku zniszczenia stropów belkowych. Znaczne przekroje XIX-wiecznych konstrukcji ceglanych z reguły zapewniało odpowiedni poziom bezpieczeństwa budynków w trakcie eksploatacji. Na skutek przebudowy i zwiększenia obciążeń poziom wyężenia w ścianach i filarach murowych może być zdecydowanie wyższy niż w pierwotnej konstrukcji. Przypadki awarii konstrukcji murowych, które miały miejsce w Polsce przy pracach remontowych wynikały między innymi z niedostatecznego rozeznania wytrzymałości murów w konstrukcji. Ocena tego typu jest zagadnieniem złożonym, bowiem wytrzymałość muru jest determinowana wieloma czynnikami związanymi między innymi z własnościami cegieł i zapraw, geometrią struktury, sposobem i jakością wykonania, stanem zawilgocenia.

Z reguły wstępnych oszacowań wytrzymałości muru ceglanoego dokonuje się na podstawie badań własności cegieł i zapraw oraz oceny stanu technicznego. W XX wieku opracowano szereg zależności empirycznych wiążących wytrzymałość muru z wytrzymałością cegieł i zapraw (pierwsze opracowania tego typu są dziełem H. Kreugera [1] i O. Graffa [2]). W Polsce przez wiele dziesięcioleci stosowany był (także w analizach budynków istniejących) wzór L.J. Oniszczyka [3] - w zmodyfikowanej postaci zalecany w normach do projektowania [4],[5]. Aktualnie wielu inżynierów stosuje zależności podane w normie PN-EN 1996-1-1 [6], chociaż norma ta przeznaczona jest do budynków nowoprojektowanych. Powstaje pytanie o zakres stosowania wzorów normowych do oceny wytrzymałości XIX-wiecznych murów ceglanych. Głównym problem w odpowiedzi na to pytanie jest niewielka liczbie badań eksperymentalnych. Badania bezpośrednie in-situ lub w laboratorium na wyciętych z konstrukcji elementach próbnych są trudne do przeprowadzenia. Wynika to ze znacznych wymiarów elementów próbnych (dla zapewnienia reprezentatywności badań) oraz uszkodzeń jakie powstają przy ich pobieraniu. W literaturze przedmiotu prezentowane są nieliczne opracowania na ten temat [7], [8]. Podejmowane są również próby oceny wytrzymałości muru na podstawie metod nieniszczących (badania ultradźwiękowe, badania sklerometryczne) lub małoniszczących (flat-jacks) [9], [10], [11], [12], [13]. Dotychczasowe wyniki wskazują, że metody nieniszczące mogą być przydatne do przede wszystkim oceny jednorodności materiałów, natomiast metoda poduszek ciśnieniowych do oceny poziomu naprężeń i odkształcalności w warstwach zewnętrznych muru.

W artykule prezentowane są badania prowadzone na filarkach wyciętych z konstrukcji ceglanoego XIX-wiecznego budynku przeznaczonego do rozbiórki. Głównym celem badań było określenie wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności oryginalnych murów na zaprawie wapiennej. Dodatkowo wykonano badania cegieł i zapraw, oraz pomiary geometrii struktury murów. Wyniki badań własnych odniesiono do rezultatów prezentowanych w literaturze przedmiotu oraz wzorów normowych.

2. Opis badań

Widok obiektu, z którego pobierano materiał do badań przedstawiono na rys. 1. Budynek zrealizowany pod koniec XIX wieku na terenie koszar arcyksięcia Rudolfa w Krakowie, pełnił w ostatnich dziesięcioleciach różne funkcje (magazyn, garaż, warsztat, pomieszczenia biurowe). Obiekt częściowo podpiwniczony, w podstawowym zarysie posiada dwie kondygnacje nadziemne.



Rys. 1. Widok budynku

Ściany i filary wykonano jako ceglane na zaprawie wapiennej. Na ścianach i filarach oparto stropy belkowe i dach o konstrukcji drewnianej (część belek w stropie nad parterem stalowa). Z uwagi na stan techniczny budynek przeznaczono do wyburzenia. W trakcie prac rozbiórkowych wycięto z filarów w ścianach zewnętrznych elementy muru do badań wytrzymałościowych. Filary, z których wycinano próbki miały wymiary przekroju poprzecznego 60×60 cm. Etap wycinania próbek i charakterystyczne przekroje muru po wycięciu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Etap wycinania elementów próbnych z filarów oraz przykładowe przekroje murów w płaszczyznach cięcia

Wycięto 8 fragmentów muru w postaci filarek o przekroju ok. 24×24 cm i wysokości 5÷6 warstw cegieł i zaprawy. W trakcie transportu do laboratorium 1 filarek uległ uszkodzeniu i nie nadawał się do badań. Powierzchnie elementów próbnych muru (dolną i górną) wyrównano zaprawą cementową, zwracając szczególną uwagę na precyzyjne wypoziomowanie obu płaszczyzn. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w maszynie ZWICK/ROELL 6000 w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej. Widok elementu na stanowisku badawczym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widok stanowiska do badań filarków murowych

Testy ściskania wykonywano ze stałą prędkością przemieszczeń, tak aby czas do osiągnięcia maksymalnej siły zawierał się w przedziale od 15÷30 min. W trakcie obciążania dokonywano pomiaru odkształceń murów (czujniki LVDT).

Wykonano również badania cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji. Badania cegieł przeprowadzono zarówno na próbkach złożonych z dwóch połówek cegieł spojonych i wyrównanych zaprawą (zgodnie z normą PN-70-B-12016 [14]) jak również na całych cegłach szlifowanych (według PN-EN 772-1[15]) i połówkach cegieł wyrównanych zaprawą. Dla każdego rodzaju próbek zbadano co najmniej 8 elementów.

W trakcie prac rozbiórkowych murów możliwe było pobranie większych fragmentów zaprawy ze środkowej części filarów. W laboratorium z fragmentów tych doszlifowano na sucho próbki prostopadłościenną o bokach od 35÷45 mm (łącznie zbadano 8 próbek zaprawy). Materiały murowe i filary murowe badano w stanie powietrzno-suchym, po okresie przechowywania przez co najmniej 2 miesiące w pomieszczeniu o temperaturze powyżej 18°C i wilgotności nie przekraczającej 65%.

3. Wyniki badań i ich analiza

Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych cegieł, zapraw i murów przedstawiono w tablicy 1. Wytrzymałość na ściskanie cegieł określona zgodnie z normą na całych cegłach szlifowanych była 1,6 razy większa niż wytrzymałość z badań próbek złożonych z dwóch połówek cegieł połączonych i wyrównanych zaprawą oraz 1,25 razy większa niż wytrzymałość z badań pojedynczych połówek wyrównanych cienką warstwą zaprawy cementowej. Biorąc pod uwagę wymiary cegieł XIX-wiecznych (285÷295 mm; 137÷145 mm; 64÷67 mm) można ocenić ich znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie na poziomie $f_b = 22,4$ MPa (całe cegły szlifowane). Badane cegły charakteryzowały się więc bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi.

Próbki zaprawy pobierano z różnych filarów, mimo to jednorodność materiału okazała się dobra. Odniesienie badań zapraw wapiennych prezentowanych powyżej do obowiązujących procedur normowych jest jednak niezwykle trudne. Wynika to nie tylko z faktu różnic w kształcie próbek. Istotne znaczenie odgrywają również takie czynniki jak czas oraz warunki wiązania zapraw a także specyfika surowców użytych do ich przygotowania. W pracy [16] wykazano, że wytrzymałość zapraw na bazie wapna rośnie w czasie wolniej niż zapraw cementowych, ale proces ten trwa przez wiele lat i w konsekwencji wytrzymałość na ściskanie zapraw wapiennych może być wielokrotnie wyższa niż badana po 28 dniach. Z drugiej strony w rzeczywistej XIX-wiecznej konstrukcji użytkowanej przez ponad sto lat, na skutek

oddziaływań środowiskowych, może następować szereg procesów powodujących degradację struktury zaprawy (zwłaszcza w strefach powierzchniowych murów). Interpretacja wyników badań wytrzymałościowych zapraw pobranych z konstrukcji istniejących jest więc zagadnieniem bardzo złożonym a rezultat jest z reguły obarczony znacznie większym błędem niż w przypadku cegieł.

Tablica 1. Wyniki badań wytrzymałościowych murów, cegieł i zapraw wapiennych

Rodzaj elementu	Wytrzymałość na ściskanie		
	przedział wartości [MPa]	wartość średnia [MPa]	współczynnik zmienności [%]
filary murowe	2,5÷3,8	3,3	13,5
cegły	c.sz.	19,7÷42,1	29,9
	p.s.w.z.	13,2÷24,5	18,4
	p.w.z.	18,3÷34,1	23,8
zaprawa	1,2÷2,0	1,5	19,1

c.sz. – całe cegły szlifowane [15]; p.s.w.z. – połówki cegieł spojone i wyprawione zaprawą [14], p.w.z. – pojedyncze połówki wyprawione cienką warstwą zaprawy [15]

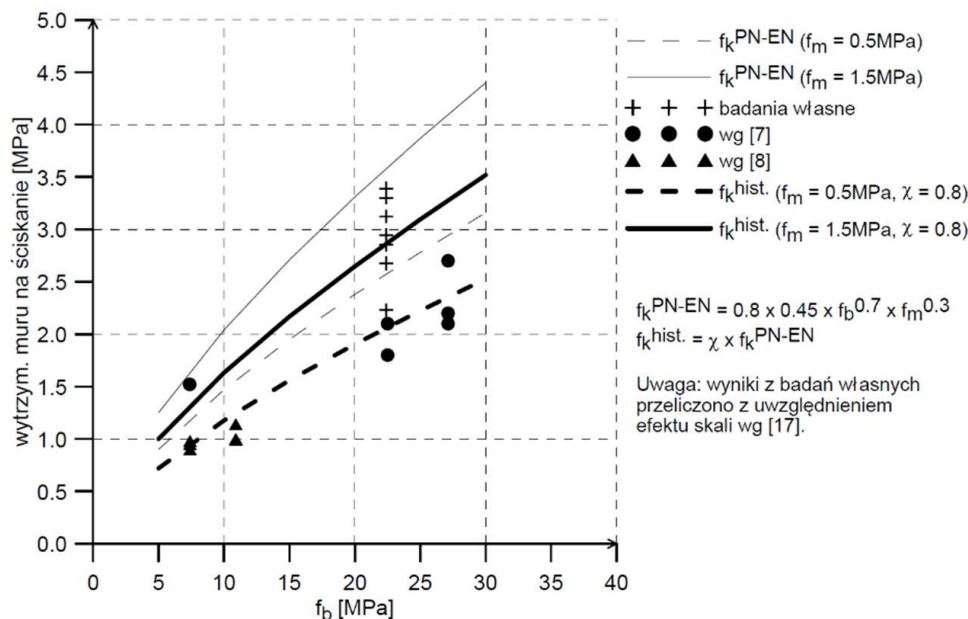
W badaniach filarów murowych poddanych ściskaniu rejestrowano typowe formy zniszczenia (rys. 4).



Rys. 4. Uszkodzenia filarek murowych przy wysokich poziomach obciążeń

Ze wzrostem siły pojawiały się pionowe zarysowania, które rozwijały się stopniowo obejmując kilka warstw cegieł i zaprawy. Na wytrzymałość określoną na filarkach miały wpływ niewątpliwie czynniki wynikające z programu i sposobu prowadzenia badań takie jak: wielkość i smukłość elementów próbnych, sposób przyłożenia obciążenia, imperfekcje geometryczne filarów. Trudną do jednoznacznej oceny rolę odegrał również proces wycinania fragmentów muru z konstrukcji i transportu do laboratorium. Badano jedynie filary, które nie wykazywały uszkodzeń wywołanych pozyskaniem materiału do badań (rozwarstwień, spękań). Wycinanie na mokro elementów z konstrukcji powodowało jednak lokalne powierzchniowe ubytki w spoinach, co w efekcie wpłynęło na obniżenie wytrzymałości muru.

Na rys. 5 przedstawiono porównanie wyników badań doświadczalnych na murach ceglanych wyciętych z konstrukcji budynków istniejących z wytrzymałościami określonymi ze wzoru podanego w PN-EN 1996-1-1 [6].



Rys. 5. Wyniki badań murów ceglanych na zaprawach wapiennych (próbki wycięte z konstrukcji) odniesione do wzorów normowych

Podkreślić należy, że wzory normowe kalibrowane były w oparciu o badania przeprowadzone zgodnie z PN-EN 1052-1 [19] na murach, w których używano zapraw współczesnych o wyższych wytrzymałościach. Bezpośrednie ich zastosowanie w praktyce, bez odpowiedniej modyfikacji z uwagi na specyfikę materiału historycznego i efekt skali nie powinno mieć miejsca. Obecność spoin podłużnych w murach uwzględniono wprowadzając redukcję wytrzymałości o 20%.

Mniejsze wytrzymałości muru ustalone w badaniach filarków wycinanych z konstrukcji są spowodowane prawdopodobnie uszkodzeniami powstałymi w procesie wycinania próbek i ich transportem do laboratorium (o czym wspomniano już powyżej), a także większą grubością spoin oraz większą niejednorodnością cegieł w porównaniu do aktualnych wymagań. Spoiny wsporne (poziome) w badanych murach XIX-wiecznych miały grubość od 12÷26 mm, a więc znacznie więcej niż współczesne wymagania w tym zakresie. Obniżenie wytrzymałości muru spowodowane większą grubością spoin można szacować na około 20% [18]. Nie bez znaczenia jest również ponad stuletni okres użytkowania budynku oraz sam proces odciążenia próbki pozyskiwanej z konstrukcji. Wyniki badań podane na rys. 5 wskazują na potrzebę stosowania współczynnika korekcyjnego (χ) uwzględniającego specyficzne cechy muru historycznego, jego struktury, wpływu długotrwałego działania obciążenia a także niepewność w oszacowaniu wytrzymałości cegieł i zaprawy. Wartość tego współczynnika przyjmowana w obliczeniach nie powinna być większa niż 0,8.

Wytrzymałość na ściskanie murów ceglanych w budynkach XIX-wiecznych ($f_k^{hist.}$), po wprowadzeniu współczynników redukcyjnych, proponuje się określać z zależności:

$$f_k^{hist.} = 0,36 \chi f_b^{0,7} f_m^{0,3} \quad (1)$$

$$\chi \leq 0,8 \quad (2)$$

gdzie:

f_b – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie cegieł,
 f_m – wytrzymałość zaprawy w spoinie muru.

Dla słabych zapraw wapiennych, przy braku możliwości pobrania odpowiednich próbek zaprawy do badań, przyjąć można $f_m = 0,5$ MPa i wówczas zależność (1) upraszcza się do postaci:

$$f_k^{hist.} = 0,29 \chi f_b^{0,7} \quad (3)$$

Mury na zaprawie wapiennej charakteryzowały się znaczną odkształcalnością pod wpływem obciążenia ściskającego. Moduły sprężystości badanych murów określone dla poziomu obciążenia ok. 0.33 maksymalnej siły wynosiły od 1,0÷2,4 GPa (wartość średnia 1,6 GPa, współczynnik zmienności 35,1%). Odkształcenia pionowe murów ceglanych na słabych zaprawach wapiennych są determinowane przede wszystkim odkształcalnością samych zapraw oraz grubością i jakością spoin - stąd znaczne różnice w modułach sprężystości murów. Wpływ zaprawy wapiennej na moduł sprężystości muru jest wyraźnie większy niż na jego wytrzymałość na ściskanie.

4. Podsumowanie

Właściwa ocena stanu technicznego i wytrzymałości murów ceglanych ma podstawowe znaczenie w analizie konstrukcji budynków XIX-wiecznych. Błędy popełnione w tym zakresie mogą skutkować awarią konstrukcji. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na oryginalnych materiałach murowych i filarkach pobranych z konstrukcji XIX-wiecznego budynku. Badania wykazały dobrą jakość cegieł i zaprawy wapiennej. Wytrzymałość na ściskanie murów określona na filarkach ceglanych wyciętych ze ścian zewnętrznych wynosiła 3,3 MPa (wartość średnia), natomiast współczynnik zmienności był równy 13,5%. Wyniki badań własnych odniesiono do wzorów normowych podanych w [6] oraz prezentowanych w literaturze przedmiotu badań XIX-wiecznych murów na zaprawach wapiennych, zwracając uwagę na specyfikę murów historycznych. Dotychczasowe badania wskazują, że do określenia wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych w obiektach XIX-wiecznych można stosować wzór podany w normie PN-EN 1996-1-1 [6] pod warunkiem uwzględnienia odpowiednich współczynników redukcyjnych (zależność 1). Należy stosować współczynniki redukcyjne z uwagi na występowanie spoin podłużnych (redukcja o 20%) oraz stan techniczny analizowanej konstrukcji murowej ($\chi \leq 0,8$). Oszacowanie wytrzymałości murów na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy ze wzoru (1) wymaga badań uzupełniających (metodami nieniszczącymi) ustalających stopień niejednorodności murów w zakresie geometrii ich struktury, jakości materiałów i stopnia uszkodzeń, a w uzasadnionych przypadkach (przewidywana znacząca zmiana wyężenia ścian i filarów) badań weryfikacyjnych na próbkach rdzeniowych wyciętych z konstrukcji [20].

Literatura

1. Kreüger, H.: Brickwork tests and formulas for calculation, The Clay Worker, London, 07/08, 1917.
2. Graf, O.: Versuche mit grossen Mauerpfeilern, Bautechnik, Band 4, Hefte 16/17, 1926
3. L.J. Oniszczuk. Kamiennyje konstrukcji, Stroizdat 1939.
4. PN-67/B-03002 Konstrukcje murowe z cegły, Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-87/B-03002 Konstrukcje murowe, Obliczenia statyczne i projektowanie.
6. PN-EN 1996-1-1:2009 Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

7. Schrank R.: Materialeigenschaften historischen Ziegelmauerwerks im Hinblick auf Tragfähigkeitsberechnungen am Beispiel der Leipziger Bundwand, *Das Mauerwerk – Zeitschrift für Technik und Architektur*, 10/2002.
8. Li X.; Gu X.L.; Gao Z.N.; Ouyang Y.; Liu N.K.: Determination of mechanical properties of historical brick masonry materials, *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed), 2012 DWE, Wrocław, Poland.*
9. Atkinson R.H.; Noland J.L.; Kingsley G.R.: *Application of NDE to masonry structures, Conservation of Historic Brick Structures, Donhead Publishing Ltd 1998.*
10. Runkiewicz L.: Ocena jakości materiałów w obiektach zabytkowych, *Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej REW.-INŻ.*, Kraków 1998.
11. Gregorczyk P.; Lourenco P.B.: A review on flat-jack testing, *Engenharia Civil, Universidade do Minho, 9/2000.*
12. Binda L.: *Learning from failure – Long-term behaviour of heavy masonry structures. WIT Press, Southampton, Boston 2008.*
13. Matysek, P., Łątka, D. 2012. Comments on the application of the sclerometric method in the diagnostics of brick masonry, *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed), DWE, Wrocław, pp. 2471-2479.*
14. PN-70-B-12016 *Wyroby ceramiki budowlanej – Badania techniczne.*
15. PN-EN 772-1:2001. *Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie.*
16. Waldum A.M.: *Mortars for restoration of old masonry structures. Guidelines for the preparation and curing of hydrated lime mortars, Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures, Proceedings of the Joint International Workshop proposed by RIILEM TC 127-MS Tests for Masonry Materials and Structures and CIB W23 Wall Structures, Padua, 1995.*
17. Krefeld W.: *The effect of shape of specimens on the apparent compressive strength of brick masonry, Proceedings of American Society for Testing and Materials, Vol. 38, Part I, 1938.*
18. Matysek P.: Uwagi o szacowaniu wytrzymałości na ściskanie murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy, *Materiały Budowlane 9/2010.*
19. PN-EN 1052-1:2001 *Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na ściskanie.*
20. Gruszczyński M.; Matysek P.: Ocena wytrzymałości murów ceglanych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych, *Czasopismo Techniczne, seria Budownictwo, nr 3-B/201.*