

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9825-6343

dr inż. Wojciech Mazur¹⁾

ORCID: 0000-0001-6382-1496

Wpływ nowego typu zbrojenia na nośność i rysoodporność ściskanych murów z ABK – badania strefy wokół okna

The influence of a new type of reinforcement on the load-bearing capacity and crack resistance of compressed AAC walls – tests of the zone around the window

DOI: 10.15199/33.2022.04.04

Streszczenie. Zbrojenie w konstrukcjach murowych stosuje się w celu ograniczenia zarysowań i zwiększenia nośności ścian. W artykule opisano badania ścian z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) w skali naturalnej, w których zastosowano nowy typ zbrojenia z siatki stalowej. Określono wpływ zbrojenia na strefę wokół okna. Prezentowane badania są kontynuacją wcześniejszych podobnych analiz, opublikowanych w miesięczniku „Materiały Budowlane” [1, 2]. Uzyskane wyniki badań porównano z wynikami opublikowanymi w [1, 2, 3].

Słowa kluczowe: mur z ABK; mur zbrojony; badania ściskania; wpływ otworów; badania w skali naturalnej.

Abstract. Reinforcement in masonry structures is used to reduce cracks' width and increase the load-bearing capacity of walls. The article describes the study of autoclaved aerated concrete (AAC) walls in a full scale. A new type of steel mesh reinforcement was used in the tests. The influence of the reinforcement on the zone around the window was determined. The presented research is a continuation of previous similar analyses published in Building Materials [1, 2]. The obtained tests results were compared with the results published in [1, 2, 3].

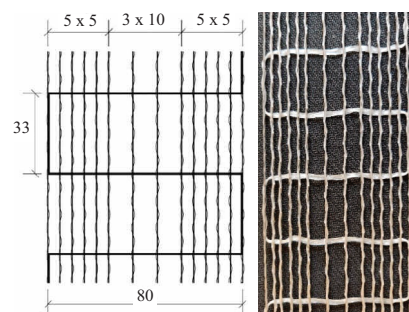
Keywords: AAC masonry; reinforced masonry; compression tests; influence of openings; tests on a full scale.

Otwory w murowanych ścianach generują powstanie lokalnych koncentracji naprężeń. Miejsca wokół otworów są zatem szczególnie narażone na zarysowania [4, 5, 6]. W literaturze można znaleźć analizy numeryczne określające wpływ otworu na zachowanie się murywanej ściany [7, 8, 9], jednak nie wykonano zbyt wielu badań ścian w skali naturalnej, które umożliwiają weryfikację poprawności obliczeń numerycznych [10, 11, 12].

W artykule zamieszczono wyniki badań dwóch ścian z otworami w skali naturalnej z nowym typem zbrojenia w postaci siatki stalowej i przeanalizowano strefę wokół okna. Badania są kontynuacją wcześniejszych podobnych analiz. Wyniki uzyskane z badań dwóch ścian z nowym zbrojeniem porównano z wynikami badań dwóch ścian bez zbrojenia oraz czterech ścian (dwie serie) zbrojonych [1, 2, 3].

Modele ścian

Modele wzniesiono z bloczków z betonu komórkowego o grubości 180 mm, na systemowej zaprawie cienkowarstwowej. Znormalizowana wytrzymałość bloczka wynosiła $f_b = 4,0$ MPa, wytrzymałość zaprawy na ściskanie $f_m = 6,1$ MPa, wytrzymałość muru na ściskanie $f_{test} = 2,97$ N/mm², moduł sprężystości $E = 2040$ MPa, a współczynnik Poissona $\gamma = 0,18$. Badania materiałowe przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN 1052-1:2000 oraz PN-EN 772-1+A1:2015-10 i PN-EN 1015-11:2020-04 [13, 14, 15], związanymi z normą Eurokod 6 [16]. Badano dwie ściany z jednym otworem okiennym, na końcach których były dwa fragmenty ścian prostopadłych o długości 1,22 m. Każdy model, zwieńczony żelbetowym wieńcem, miał długość 4,68 m oraz wysokość 2,63 m (wraz z wieńcem) i był zbrojony w każdej spoinie wspornej siatką stalową szerokości 80 mm (rysunek 1) przeznaczoną do murów z ABK (rozwijano ją z rolki). Siatka w kierunku podłużnym składa się z czternastu wiązek drutów stalowych



Rys. 1. Zbrojenie z siatki stalowej zastosowane w badaniach

Fig. 1. Steel mesh reinforcement used in tests

ze stali wysokowęglowej. Cztery wewnętrzne wiązki rozmieszczone są nominalnie co 10 mm, pozostałe znajdują się w rozstawie 5 mm. Każda wiązka podłużna złożona jest z trzech drutów o średnicy 0,54 ($\pm 0,02$) mm, co oznacza, że jej pole powierzchni wynosi 0,69 ($\pm 0,05$) mm². Całkowity przekrój poprzeczny zbrojenia podłużnego to 9,66 mm², natomiast całkowita grubość siatki wynosi 1,7 (-0,2/+ 0,4) mm. Stal zabezpieczona jest cynkową powłoką antykorozyjną o oznaczeniu R20 zgodnie z PN-EN 845-3 [17]. We wcześniej-

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji:

lukasz.drobiec@polsl.pl

szych badaniach [1, 2, 3] zastosowano ponadto zbrojenie typu kratowniczka oraz w postaci siatki bazaltowej. Ściany z **Betonu Komórkowego z Otworem Niezbrojone** oznaczono **BKON**, ściany z **Betonu Komórkowego z Otworem Zbrojone** **Kartowniczką** oznaczono **BKOZK**, ściany z **Betonu Komórkowego z Otworem Zbrojone Siatką Bazaltową** oznaczono **BKOZSB**, natomiast ściany z **Betonu Komórkowego z Otworem Zbrojone Siatką Stalową** – **BKOZSS**.

Badanie

Badanie przeprowadzono w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Modele obciążano za pomocą dwóch siłowników o zakresie 1000 kN, mocowanych do dwóch stalowych ram w płycie wielkich sił, symetrycznie względem otworu okiennego modelu (rysunek 2). Obciążenie z siłowników rozkładano na dwie siły skupione za pomocą stalowych belek trawersowanych w taki sposób, że jedna siła przypadała na strefę muru usytuowaną przy otworze, a druga była nad otworem. Dodatkowo modele obciążano za pomocą układu cięgnowego przez siłowniki tłokowe zamocowane od spodu stropu wielkich sił. Siłowniki te mają zakres 25 kN i w związku z tym na jedną parę przypadało obciążenie 50 kN

nieznacznie zwiększone o ciężar trawersu stalowego.

Obciążenia przykładano najpierw z siłowników tłokowych równomiernie, aż do wyczerpania zakresu siłowników tłokowych, a następnie przez ramy, równomiernie, aż do zniszczenia strefy podporowej. Obciążenie przykładano w sposób jednostajny, zwiększając ciśnienie w siłownikach za pomocą automatycznych pomp. Podczas badań rejestrowano przemieszczenia na bazach pomiarowych (rysunek 2) oraz siły w siłomierzach zabudowanych pod ramami i na cięgnach. Przemieszczenie rejestrowano przy użyciu 34 transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT) o dokładności 0,002 mm. Oprócz pomiaru przemieszczeń wykonano również bezdotkowy pomiar optyczny podczas badania. Ze względów logistycznych badano po dwa modele w odbiciu lustrzanym.

Wyniki badań

W tabeli podano reakcje w nadprożu w pierwszym etapie badań przy siłach rysujących i niszczących. Na rysunkach 3 ÷ 5 zamieszczono wykresy reakcja w nadprożu – odkształcenie, mierzone na ramach pomiarowych usytuowanych przy otworze okiennym (cztery ramki w każdym modelu). Wartości odkształceń pionowych przyjęto, bazując na wskazaniu czterech czujników usytuowanych bezpośrednio przy otworze

Wyniki badań murów pod obciążeniem skupionym

Results of wall tests under concentrated load

Nazwa serii		Reakcja w nadprożu przy	
		zarysowaniu [kN]	zniszczeniu [kN]
BKON (modele niezbrojone)	BKON-1	54	132,9
	BKON-2	53	134,2
BKOZK (ze zbrojeniem typu kratowniczka)	BKOZK-1	61,5	129,2
	BKOZK-2	61,4	132,1
BKOZSB (ze zbrojeniem z siatki bazaltowej)	BKOZSB-1	67,3	143,6
	BKOZSB-1	69,5	144,3
BKOZSS (ze zbrojeniem z siatki stalowej)	BKOZSS-1	59,7	127,3
	BKOZSS-2	58,9	140,6

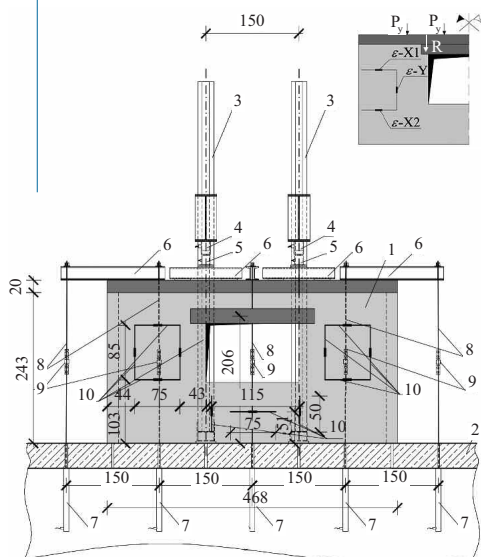
okiennym. Oddzielnie analizowano wartości odkształceń poziomych z czujników zabudowanych wyżej (oznaczone na rysunkach 3 ÷ 5 symbolem X1) oraz niżej (oznaczone symbolem X2).

W badaniach modeli niezbrojonych i zbrojonych uzyskano podobny przebieg zależności $R - \epsilon$. Wykres reakcja w nadprożu – odkształcenie pionowe jest prawie prostoliniowy, aż do momentu zniszczenia. Przemieszczenia poziome, a w efekcie odkształcenia poziome, rejestrowane na niższych czujnikach są znacznie większe w porównaniu z odkształceniami na wyższych poziomach modelu. Może to być związane z tym, że na dolnym poziomie na bazę pomiarową oddziałują już siły z obu punktów przyłożenia obciążenia.

Należy podkreślić, że w elementach zbrojonych na górnej bazie początkowo rejestrowane są skrócenia (ujemny znak odkształceń), a wydłużenia występują dopiero przed zniszczeniem, po zarysowaniu strefy bazy pomiarowej. Świadczy to o wpływie zbrojenia w tym obszarze modelu.

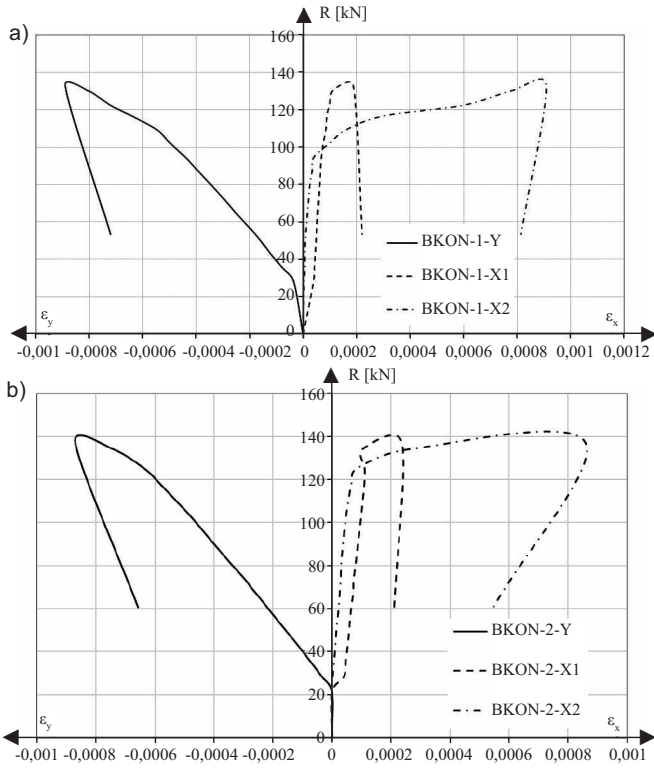
W modelach niezbrojonych pierwsza rysa wystąpiła w nadprożu (przy obciążeniu odpowiadającym reakcji w nadprożu ok. 53,5 kN), natomiast w modelach zbrojonych kratowniczką – w warstwie elementów murowych ponad nadprożem (przy obciążeniu odpowiadającym reakcji w nadprożu ok. 61,4 kN). W modelach zbrojonych siatką stalową uzyskano podobną wartość sił rysujących – średnio 55,3 kN, natomiast w modelach zbrojonych siatką bazaltową rysy powstały w przypadku 68,4 kN. Podczas dalszego obciążania rysy propagowały i pojawiały się kolejne zarysowania najczęściej ukośne w nadprożu przy strefie oparcia i w elementach murowych pod strefą oparcia oraz nad nadprożem. W końcowej fazie badania dochodziło do rozłupania bloczków i odspojenia ich fragmentów licowych. Zjawisko to szczególnie silnie obserwowano w murach zbrojonych kratowniczką. Na fotografii pokazano zarysowanie modelu BKOZSS-1 ze zbrojeniem w postaci siatki stalowej oraz skalę odkształceń modelu [%], rejestrowanych za pomocą bezdotkowego systemu optycznego.

cd. na str. 22 ►

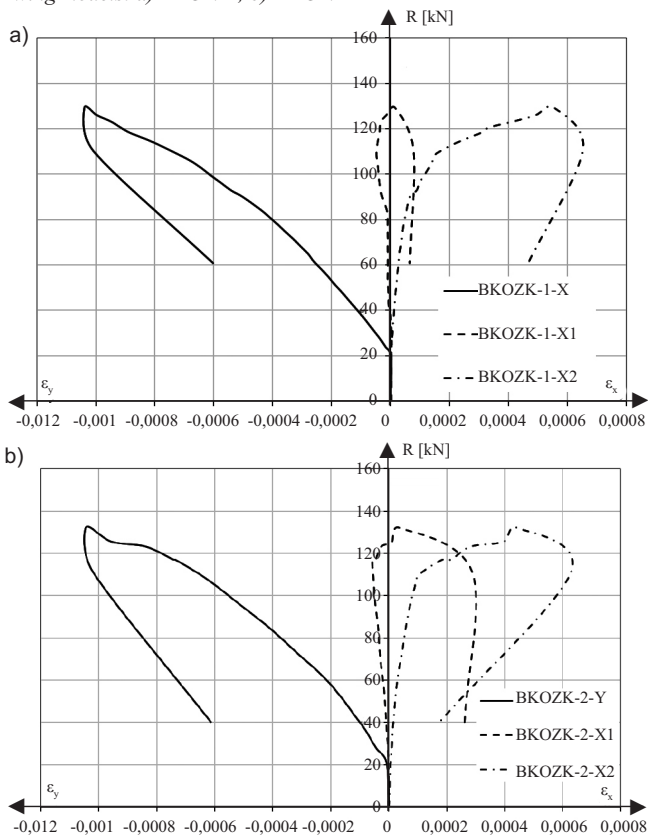


Oznaczenia: 1 – model badawczy; 2 – płyta wielkich sił; 3 – rama stalowa; 4 – siłownik; 5 – siłomierz bębnowy; 6 – trawers; 7 – siłownik tłokowy; 8 – cięgno; 9 – siłomierz; 10 – baza pomiaru przemieszczeń

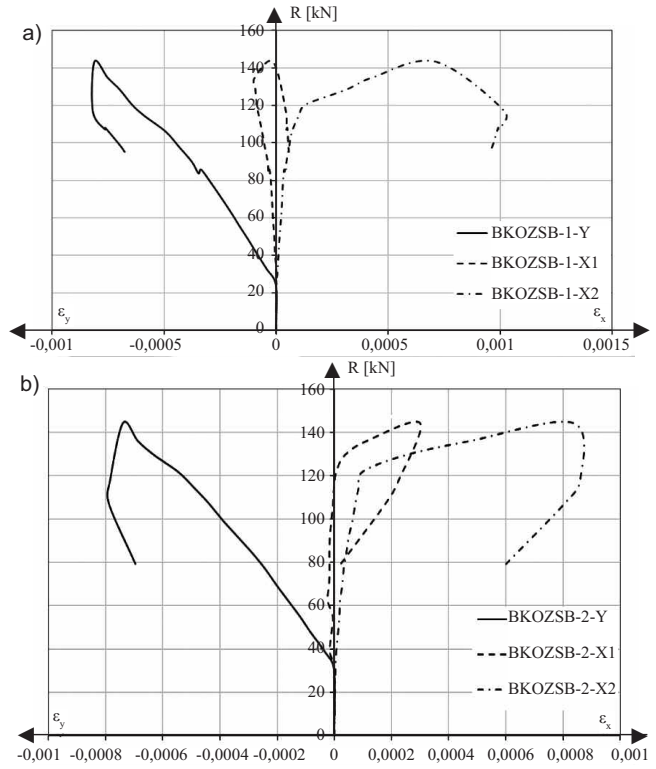
Rys. 2. Stanowisko badawcze
Fig. 2. Test stand



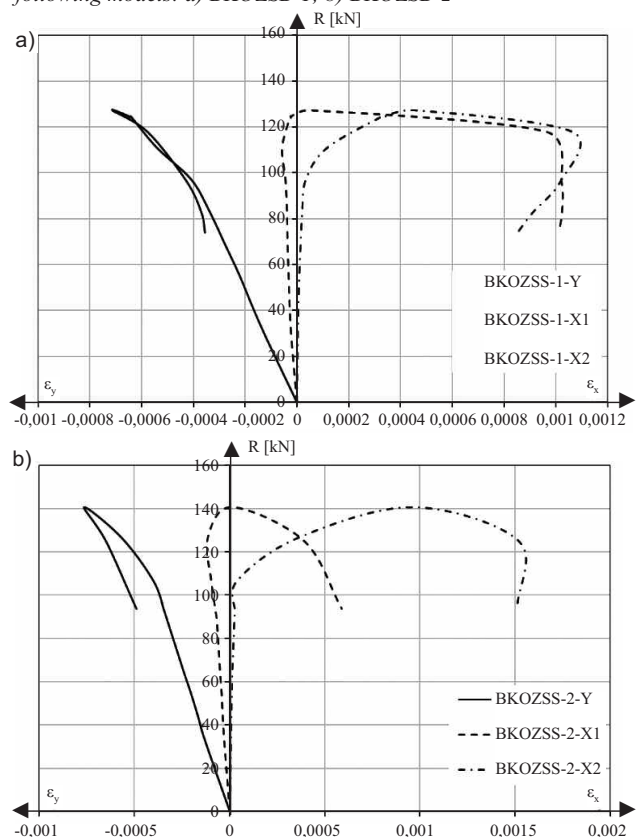
Rys. 3. Zależność siła-odkształcenie uzyskana z badań modeli:
a) BKON-1; b) BKON-2
Fig. 3. Force-deformation diagrams obtained from the tests of the following models: a) BKON-1; b) BKON-2



Rys. 4. Zależność siła-odkształcenie uzyskana z badań modeli:
a) BKOZK-1; b) BKOZK-2
Fig. 4. Force-deformation diagrams obtained from the tests of the following models: a) BKOZK-1; b) BKOZK-2



Rys. 5. Zależność siła-odkształcenie uzyskana z badań modeli:
a) BKOZSB-1; b) BKOZSB-2
Fig. 5. Force-deformation diagrams obtained from the tests of the following models: a) BKOZSB-1; b) BKOZSB-2



Rys. 6. Zależność siła-odkształcenie uzyskana z badań modeli:
a) BKOZSS-1; b) BKOZSS-2
Fig. 6. Force-deformation diagrams obtained from the tests of the models: a) BKOZSS-1; b) BKOZSS-2

ARBOCEL – The Power of Progress

– włókna na bazie celulozy o charakterze mikrobrojącem, zagęszczającym oraz strukturotwórczym w produktach chemii budowlanej



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl



Zarysowanie modelu BKOZSS-1 rejestrowane za pomocą systemu optycznego

The scratch of the BKOZSS-1 model recorded with an optical system

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań ścian w rejonach koncentracji naprężeń stwierdzono, że:

- zastosowanie zbrojenia daje znacznie lepsze wyniki niż jego użycie w murach obciążonych równomiernie;
- zbrojenie w mniejszym stopniu wpływa na nośność, a w większym na rysoodporność muru;
- wpływ zbrojenia na nośność w rejonie koncentracji naprężeń sięga 10%. W miejscach, gdzie o nośności muru decyduje wytrzymałość elementu murego na ściskanie, zastosowanie zbrojenia może nawet lokalnie nieznacznie zmniejszyć nośność (o 10%);
- zbrojenie może zwiększać poziom naprężeń nawet o ok. 30%, przy których w murze pojawi się pierwsza rysa.

Literatura

- [1] Drobiec Ł. Badania ścian z ABK w skali naturalnej poddanych ścisaniu – analiza strefy wokół okna. Cz. 1. Materiały Budowlane. 2018; 9: 75 – 77. DOI: 10.15199/33.2018.09.20.
- [2] Drobiec Ł. Badania ścian z ABK w skali naturalnej poddanych ścisaniu – analiza strefy wokół okna. Cz. 2. Materiały Budowlane. 2018; 10: 118 – 120. DOI: 10.15199/33.2018.10.37
- [3] Drobiec Ł. Analysis of AAC walls subjected to vertical load/Analyse von vertikal belasteten Porenbeton-Wänden. Mauerwerk. 2019; 23, 6: 387 – 403. DOI: 10.1002/dama.201900021.
- [4] Seung-Hyeon H, Sanghee K, Keun-Hyeok Y. In-plane lateral load transfer capacity of unreinforced masonry walls considering presence of openings. Journal of Building Engineering. Volume 47, 2022; 103868, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103868>.
- [5] Leal-Graciano JM, Quiñónez B, Rodríguez-Lozoya HE, Pérez-Gavilán JJ, Lizárraga-Pereda JF. Use of GFRP as retrofit alternative for confined masonry walls with window opening su-

bjected to in-plane lateral load. Engineering Structures. 2020; 223, 111148, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111148>.

[6] Chang L-Z, Rots JG, Esposito R. Influence of openings on two-way bending capacity of unreinforced masonry walls. Journal of Building Engineering. 2022; 51: 104222. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104222>.

[7] CXi Ch, Yi L. Numerical study of in-plane behaviour and strength of concrete masonry infills with openings. Engineering Structures. 2015; 82, 226 – 235.

[8] Howlader MK, Masia MJ, Griffith MC. Numerical analysis and parametric study of unreinforced masonry walls with arch openings under lateral in-plane loading. Engineering Structures. 2020; 208, 110337, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110337>.

[9] Jasiński R. Research of bed joints reinforced masonry walls with openings made of calcium silicate units horizontally sheared. 16th International Brick and Block Masonry Conference. Trends, innovations and challenges. 16th IBMAC, 26-30 June 2016, Padova, Italy. Boca Raton: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2016, 2303 – 2311.

[10] Khaleghi M, Salimi J, Farhangi V, Moradi MJ, Karakouzian M. Evaluating the behaviour of centrally perforated unreinforced masonry walls: Applications of numerical analysis, machine learning, and stochastic methods. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13, 3, 101631, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.026>.

[11] Veronese RBA, Medeiros WA, Parsekian GA, Shrive N G. Numerical analysis of eco-friendly ductile cementitious composite influence on structural masonry reinforcement. Engineering Structures. 2022; 252, 113686, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113686>.

[12] Gobbin F, de Felice G, Lemos JV. Numerical procedures for the analysis of collapse mechanisms of masonry structures using discrete element modelling. Engineering Structures. 2021, 246, 113047. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113047>.

[13] PN-EN 1052-1:2000 Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na ściskanie.

[14] PN-EN 772-1+A1:2015-10 Metody badań elementów murowych. Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie.

[15] PN-EN 1015-11:2020-04 Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.

[16] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

[17] PN-EN 845-3 + A:2016-10 Specyfikacja wyrobów dodatkowych do murów. Część 3: Stalowe zbrojenie do spoin wspornych.

Przyjęto do druku: 28.03.2022 r.