

dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾
dr inż. Radosław Jasiński^{1*)}

Wpływ rodzaju zbrojenia na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie murów z betonu komórkowego

Influence of the kind of reinforcement on cracking shear stress and shear strength of AAC masonry

DOI: 10.15199/33.2016.02.08

Streszczenie. Artykuł dotyczy właściwości zbrojonych murów z betonu komórkowego. Prezentuje wyniki badań niewielkich ścian poddanych próbie ukośnego ściskania zgodnie z amerykańską normą ASTM E519-81. Zbadano 18 modeli, w których zastosowano 2 typy zbrojenia, 2 typy zapraw, 3 typy spoin wspornych i 2 typy spoin czołowych (bez lub z zaprawą). Badania wykazały m.in., że najkorzystniejszy wpływ na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie uzyskano, stosując zbrojenie w postaci kratowniczek przy nakładaniu zaprawy na powierzchnię wsporną dolnej warstwy elementów murowych i na dolną powierzchnię wsporną górnej warstwy elementów murowych (taką technologię umownie nazwano podwójną spoiną). Układając zbrojenie w spoinach wspornych na ułożoną wcześniej zaprawę na powierzchniach wspornych dolnej warstwy elementów murowych (taką technologię umownie nazwano jednostronną spoiną), zaobserwowano obniżenie wartości naprężeń rysujących i niszczących w porównaniu z elementami niezbrojonymi.

Słowa kluczowe: zbrojenie spoin wspornych, wytrzymałość muru na ścinanie.

Abstract. In the article on the properties of reinforced AAC walls presented results of a small specimens in an attempt to diagonal compression in accordance with the American code ASTM E519-81. 18 models examined, using two types of reinforcement, two types of mortar, and 3 types of bed joints and two types of head joints (with or without mortar). Research has shown, that the most beneficial effect on cracking shear stresses and shear strength obtained using truss type reinforcement when mortar applying on the upper and down bed surfaces of units (this technology conventionally called double joints). Arranging reinforcement in the mortar applying only on the down surfaces of units (this technology conventionally called single joints) was observed a decrease the cracking and ultimate shear stress to the unreinforced specimens.

Keywords: bed joint reinforcement, masonry shear strength.

W artykule *Wpływ rodzaju zbrojenia na parametry mechaniczne muru z betonu komórkowego* opublikowanym w „Materiałach Budowlanych” nr 12/2015 [2] przedstawiono wyniki badań zbrojonych ścian wykonanych zgodnie z europejską normą PN-EN 1052-1:2000 [5], wykazując korzystny wpływ zbrojenia na podstawowe parametry mechaniczne muru w warunkach jednoosiowego ściskania. Wykonano także badania parametrów ścinania na elementach poddanych próbie ukośnego ściskania wg zaleceń amerykańskiej normy ASTM E519-81 [1], których celem było rozpoznanie wpływów różnego typu zbrojenia na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie f_{vk} murów z bloczków z betonu komórkowego

SOLBET OPTIMAL z zamkami do murowania na pióro i wpust. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie ścian bez zbrojenia, zrealizowanych wg norm PN-EN 1052-3:2004 [6] i ASTM E519-81 [1], przedstawiono w „Materiałach Budowlanych” nr 5/2015 [4] i 6/2015 [3].

W metodzie ukośnego ściskania, wg której badano ściany, omówionej w [3], naprężenia styczne generowane są pośrednio przez siły ściskające zorientowane ukośnie w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. Badania wykonuje się wg norm ASTM E519-81 [1] lub RILEM LUMB 6 [8]. Obydwie normy przyjmują, że w środkowym obszarze muru nie występują naprężenia normalne, tylko naprężenia styczne o wartości obliczonej jako iloraz wypadkowej siły F rozłożonej na ścianę elementu i pola powierzchni poprzecznego przekroju muru A_n . Główne naprężenia rozciągające σ_1 rów-

ne są naprężeniom stycznym i pochylone pod kątem 45° w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. Zniszczenie muru następuje na skutek zarysowania elementów murowych i zaprawy rysą biegnącą zgodnie z kierunkiem głównych naprężeń rozciągających:

$$\sigma_1 = \tau = \frac{\sqrt{2}F}{2A_n} = \frac{0,707F}{A_n} \quad (1)$$

gdzie:

F – siła ściskająca (rozłupująca) [kN];

A_n – pole powierzchni poprzecznego przekroju muru obliczane z zależności $A_n = 0,5(l + h)t$ [cm²];
 l , h , t – odpowiednio: długość, wysokość i grubość muru [cm].

W zaleceniach RILEM LUMB 6 nie sprecyzowano jednoznacznie, jakie powinny być wymiary modeli badawczych oraz w jaki sposób obliczać odkształcenia postaciowe ściany. Informacje takie wraz ze szczegółowym

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

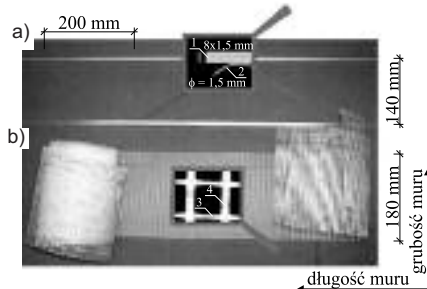
^{*)} Autor do korespondencji;

e-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl

opisem procedury zawarte są natomiast w ASTM E519-81 [6], którą potraktowano jako merytoryczną podstawę przedstawionych badań.

Modele badawcze, program i technika badań

Do wykonania modeli badawczych zastosowano zaprawę murarską **SOLBET do cienkich spoin na cementzie białym – oznaczoną symbolem 0.1** klasy M5 oraz zaprawę murarską **SOLBET do cienkich spoin oznaczoną symbolem Dünnbettmörtel 0,4** klasy M10. Modele wykonywano jako niezbrojone i zbrojone, z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami czołowymi. Zastosowano dwa typy zbrojenia, które układano w każdej spoinie wspornej. Pierwszym typem zbrojenia były stalowe ocynkowane kratowniczkę, wykonane z płaskowników 1,5 x 8 mm i krzyżulców $\phi 1,8$ mm, a drugim siatki z włókien szklanych powleczone tworzywem sztucznym o oczku 5 x 5 mm. W kierunku długości muru układano włókna wiatku, natomiast w kierunku grubości – osnowy. Wątek składał się z dwóch splotów, z których każdy w przekroju poprzecznym zbliżony był do koła średnicy 0,3 mm i miał łączne pole powierzchni przekroju poprzecznego wynoszące 0,141 mm². Osnowa składała się z pojedynczego splotu o przekroju poprzecznym zbliżonym do prostokąta o wymiarach 1,5 x 0,22 mm i polu powierzchni przekroju 0,33 mm². Na fotografii 1 pokazano zbrojenie spoin wspornych zastosowane w badaniach.



Fot. 1. Zbrojenie spoin wspornych wykorzystane w badaniach: a) stalowe kratowniczki typu EFS/Z 140; b) siatki z tworzywa sztucznego; 1 – płaskownik stalowy 1,5 x 8 mm; 2 – pręt okrągły $\phi 1,5$ mm; 3 – włókna wiatku siatki, 4 – włókna osnowy siatki
Photo 1. The reinforcement of bed joints used in the researches: a) steel truss type reinforcement EFS/Z 140; b) plastic grid; 1 – flat steel of 1.5 x 8 mm; 2 – bars $\phi 1,5$ mm; 3 – fibers thread of grid; 4 – warp yarns of grid

Zbrojenie w postaci kratowniczek oznaczono umownie jako Z1, natomiast w postaci siatek z tworzywa sztucznego jako Z2. We wszystkich zbrojonych modelach zarówno kratowniczkę, jak i siatki z tworzywa sztucznego umieszczano w każdej spoinie wspornej w rozstawie równym 243 mm.

Wszystkie modele miały takie same wymiary i kształt. Długość modelu wynosiła $l = 1180$ mm, wysokość $h = 1212$ mm, a grubość odpowiadała grubości pojedynczego elementu murowego $t = 180$ mm. Wykonano 6 serii modeli badawczych, w ramach których zbadano po 3 elementy próbne. Poszczególne serie zróżnicowano pod względem typu zaprawy, wypełnienia spoin wspornych lub zastosowania zbrojenia.

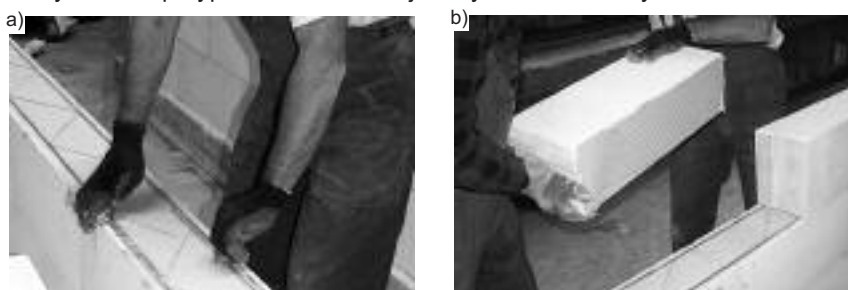
Seria modeli zbrojonych kratowniczkami bez wypełnionych spoin czołowych oznaczona została jako RL-S-Z1 i składała się z 3 modeli podobnie jak seria RL-S-Z1W, w której wypełniono spoiny czołowe. Zbrojenie umieszczano w nałożonej na dolną warstwę elementów murowych warstwie zaprawy (spoina jednostronna). Dodatkowo w przypadku serii RL-S-Z1 wykonano trzy elementy, w których zastosowano zaprawę układaną na górnej powierzchni dolnej warstwy elementów murowych i dolną powierzchnię górnej warstwy elementów murowych umownie nazywaną podwójną spoiną (fotografia 2). W przypadku, gdy stosowano siatkę z tworzywa sztucznego, zbadano 2 trójelementowe serie oznaczone jako RL-S-Z2 i RL-S-Z2W z wypełnionymi spoinami czołowymi. Siatki osadzano w zaprawie, stosując spoinę jednostronną. Do wykonania elementów zastosowano zaprawę systemową klasy M5. W przypadku dodatkowej

serii oznaczonej jako RL-S-Z1-N10 zastosowano systemową zaprawę klasy M10. Nasycenie zbrojeniem wszystkich elementów wynosiło 0,05% i odpowiadało minimalnemu stopniowi zbrojenia zalecanego przez EC-6 [7]. Program badań ścian zbrojonych przedstawiono w tabeli 1.

Elementy zbadano w stanowisku, którego opis zamieszczono w [3], umożliwiającym ścisłanie ścian siłą skupioną przyłożoną wzdłuż przekątnej. W trakcie badań dokonywano pomiaru siły ściskającej, a następnie na tej podstawie obliczano wg wzoru (1) naprężenia styczne τ_x .

Wyniki badań

Zniszczenie wszystkich elementów badawczych miało charakter gwałtowny, tzn. podczas obciążenia nie pojawiały się rysy na powierzchni muru, słyszalne były jedynie pojedyncze i niezbyt intensywne trzaski. Zniszczenie elementów polegało na utracie przyczepności między elementami murowymi a zaprawą w spoinach wspornych i wórnym zarysowaniu elementów murowych w środkowym obszarze muru. W elementach, w których wypełniono spoiny czołowe, pierwsze rysy tworzyły się w elementach murowych. W ścianach ze zbrojeniem, w których zaprawę nakładano w sposób jednostronny, obserwowano utratę przyczepności między elementami murowymi a zbrojeniem (fotografia 3a i b). W modelach zbrojonych kratowniczkami, w których zaprawę nakładano na dolną i górną powierzchnię wsporną elementów murowych (podwójna spoina), charakter zniszczenia uległ zmianie. W pierwszej kolejności powstały zarysowania elementów murowych w środkowym obszarze muru,

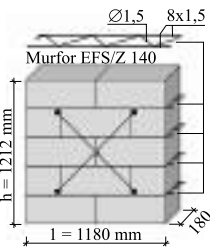
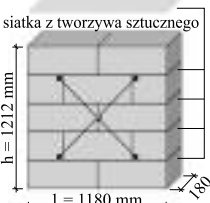


Fot. 2. Wykonywanie elementów badawczych: a) osadzanie zbrojenia typu kratowniczka – spoina jednostronna; b) osadzanie zbrojenia typu kratowniczka – podwójna spoina

[Fot. R. Jasiński]

Photo 2. The workmanship of test specimens: a) embedding the truss type reinforcement (single application of mortar); b) embedding the truss type reinforcement in double application of mortar
[Photo – R. Jasiński]

Tabela 1. Program badań zbrojonych ścian ściskanych ukośnie
Table 1. The research program of the reinforced masonry diagonally compression

Kształt, wymiary modelu	Nazwa serii	Rodzaj zaprawy	Rodzaj spoiny	Rodzaj zbrojenia	Liczba elementów badawczych
	RL-S-Z1	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru; spoina jednostronna	zbrojenie typu kratowniczką	3
	RL-S-Z1W	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru (spoina jednostronna), wypełniona spoina czołowa	zbrojenie typu kratowniczką	3
	RL-S-Z1-4-6	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru; podwójna spoina	zbrojenie typu kratowniczką	3
	RL-S-Z1-N10	Solbet 0.4 M10	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru; spoina jednostronna	zbrojenie typu kratowniczką	3
	RL-S-Z2	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru; spoina jednostronna	zbrojenie typu siatka z tworzywa sztucznego	3
	RL-S-Z2W	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru (spoina jednostronna), wypełniona spoina czołowa	zbrojenie typu siatka z tworzywa sztucznego	3
Razem:				18	

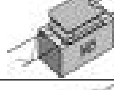
a przy wzroście obciążenia następowała wtórna utrata przyczepności między elementami murowymi i zaprawą. Widok pierwszych zarysowań muru zbrojonego kratowniczką z podwójnie nakładaną zaprawą pokazano na fotografii 3c.

W tabeli 2 zestawiono średnie wyniki naprężeń w chwili zarysowania $\tau_{cr, mv}$ i zniszczenia $\tau_{u, mv}$ wszystkich zbadanych elementów. W modelach zbrojonych kratowniczkami wykonanych

na zaprawie klasy M5 przy jednostronnym nakładaniu zaprawy uzyskano najniższą wartość naprężeń rysujących i niszczących równą $\tau_{cr, mv} = 0,141$ MPa i $\tau_{u, mv} = 0,157$ MPa. Co istotne, uzyskane wartości naprężeń przy takiej technologii wykonywania muru były mniejsze od uzyskanych w ścianach bez zbrojenia (rysunek 1). Stosując zaprawę w spoinach czołowych, podwójną spoinę oraz zaprawę klasy M10, wartości naprężeń rysujących wyraźnie

wzrosły do poziomu $\tau_{cr, mv} = 0,240$ MPa. Największe naprężenia niszczące w tej sytuacji uzyskano, stosując podwójną spoinę $\tau_{u, mv} = 0,269$ MPa i zaprawę klasy M10 $\tau_{u, mv} = 0,285$ MPa. W przypadku zastosowania zbrojenia w postaci siatek z tworzywa sztucznego i spoiny jednostronnej wartości naprężeń rysujących i niszczących były także mniejsze od uzyskanych w przypadku analogicznych modeli bez zbrojenia (rysunek 2). Identycznie jak w elementach z kratowniczkami w przypadku zastosowania siatek z tworzywa sztucznego i wypełnienia spoin czołowych uzyskano wyraźny wzrost naprężeń rysujących i niszczących.

Tabela 2. Zbiórce zestawienie wyników badań
Table 2. Summary of the test results

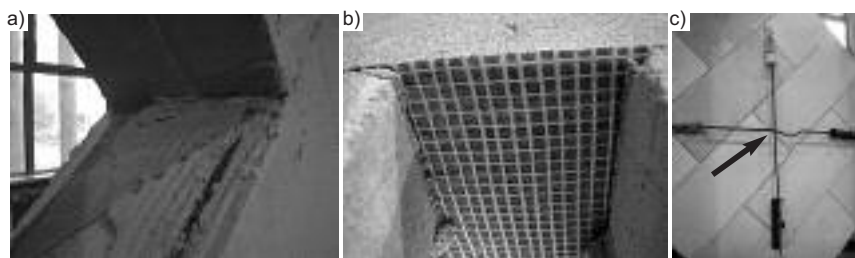
Lp	Seria	$\tau_{cr, mv}$ [MPa]	$\tau_{u, mv}$ [MPa]
1		0,141	0,157
2		0,241	0,242
3		0,241	0,269
4		0,240	0,285
5		0,126	0,130
6		0,182	0,186

Wnioski

Przeprowadzone badania parametrów wytrzymałościowych murów pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

■ w stosunku do mechanizmu zarysowania i zniszczenia:

– we wszystkich elementach, w których zastosowano zaprawę mineralną M5 i M10 nakładaną tylko z jednej strony powierzchni wspornej, proces zarysowania i zniszczenia elementów przebiegał w sposób gwałtowny. Zniszczenie polegało na utracie przyczepności między elementami murowymi i zaprawą; sporadycznie pojawiały się zarysowania elementów murowych w środkowym obszarze mode-

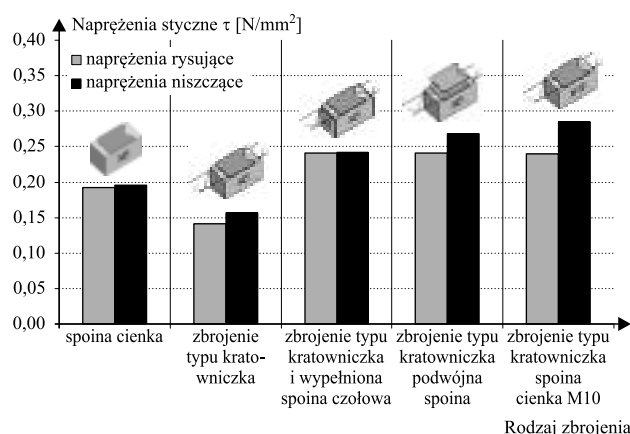


Fot. 3. Typowe zarysowanie ścian: a) elementy zbrojone kratowniczkami ze spoiną jednostronną; b) elementy zbrojone siatkami z tworzywa sztucznego ze spoiną jednostronną; c) proces zarysowania ścian zbrojonej kratowniczkami z podwójną spoiną

[Fot. R. Jasiński]

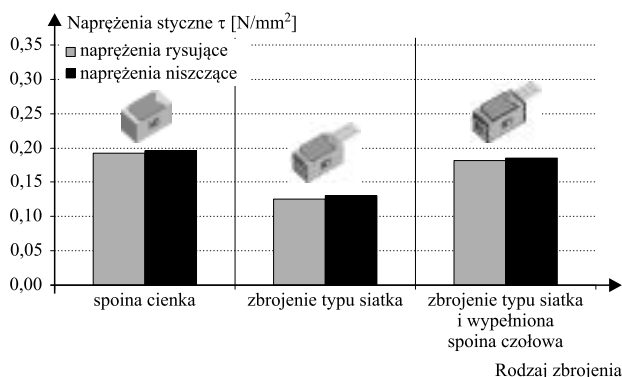
Photo 3. Typical cracking patterns: a) specimens reinforced with truss type reinforcement with single application of mortar; b) specimens reinforced with plastic grid with single application of mortar; c) cracking of specimens reinforced with truss type reinforcement with double application of mortar

[Photo – R. Jasiński]



Rys. 1. Porównanie wartości naprężeń rysujących $\tau_{cr,mv}$ i niszczących $\tau_{u,mv}$ elementów zbrojonych kratowniczkami

Fig. 1. Comparisons of cracking $\tau_{cr,mv}$ and ultimate $\tau_{u,mv}$ shear stress specimens reinforced with truss type reinforcement



Rys. 2. Porównanie wartości naprężeń rysujących $\tau_{cr,mv}$ i niszczących $\tau_{u,mv}$ elementów zbrojonych siatką z tworzywa sztucznego

Fig. 2. Comparisons of cracking $\tau_{cr,mv}$ and ultimate $\tau_{u,mv}$ shear stress specimens reinforced with plastic grid

lu. Wyjątek stanowiły elementy zbrojone kratowniczkami z podwójną spoiną, w których w pierwszej kolejności powstały zarysowania elementów murowych, a następnie nastąpiła utrata przyczepności między elementami murowymi i zaprawą;

■ w stosunku do wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania $\tau_{cr,mv}$:

– w modelach zbrojonych, w których zaprawę układano tylko z jednej strony spoiny wspornej, wartości naprężeń w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr,mv} = 0,141$ MPa, gdy stosowano kratowniczkę oraz $\tau_{cr,mv} = 0,126$ MPa, gdy użyto siatek z tworzywa sztucznego. Wartości naprężeń rysujących w modelach zbrojonych były o 27% i 35% mniejsze niż w murach ze spoiną o szerokości równej grubości muru. Wzrost wartości naprężeń rysujących modeli zbrojonych odnotowano, gdy zastosowano wypełnione spoiny czołowe i zbrojenie w postaci kratowniczek.

mentach niezbrojonych;

■ w stosunku do wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia $\tau_{u,mv}$:

– w modelach zbrojonych, w których zaprawę układano tylko z jednej strony spoiny wspornej, wartości naprężeń w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{u,mv} = 0,157$ MPa, gdy stosowano kratowniczkę oraz $\tau_{u,mv} = 0,130$ MPa, gdy użyto siatek z tworzywa sztucznego. Wartości naprężeń rysujących w modelach zbrojonych były o 20% i 34% mniejsze niż w murach ze spoiną o szerokości równej grubości muru. Wzrost wartości naprężeń niszczących modeli zbrojonych odnotowano, gdy zastosowano wypełnione spoiny czołowe i zbrojenie w postaci kratowniczek. W murach ze zbrojeniem w postaci kratowniczek wartości naprężeń niszczących wynosiły $\tau_{u,mv} = 0,242$ MPa, a z siatką z tworzywa sztucznego $\tau_{u,mv} = 0,186$ MPa;

– analogicznie jak w modelach na zaprawie M5, gdy zastosowano zbroje-

nie w postaci kratowniczek, a zaprawę nakładano podwójnie, uzyskano naprężenia rysujących wynoszące $\tau_{cr,mv} = 0,241$ MPa, a z siatką z tworzywa sztucznego $\tau_{cr,mv} = 0,182$ MPa; – gdy do wykonania modeli użyto zaprawy klasy M10, w modelu bez zbrojenia ze spoiną wsporną o szerokości równej grubości muru uzyskano wartość naprężeń rysujących równą $\tau_{cr,mv} = 0,180$ MPa, czyli mniejszą niż w elementach na zaprawie klasy M5; – analogicznie jak w modelach na zaprawie M5, kiedy zastosowano zbrojenie w postaci kratowniczek, a zaprawę nakładano podwójnie, uzyskano naprężenia rysujące wynoszące $\tau_{cr,mv} = 0,240$ MPa, które były o 33% większe niż w ele-

mentach niezbrojonych.

Wnioski o charakterze ogólnym wynikające z przeprowadzonych badań:

- stosowanie zbrojenia w spoinach wspornych, gdy zaprawa ułożona jest tylko na jednej powierzchni wspornej elementów murowych (spoina jednostronna), obniża wartości naprężeń rysujących i niszczących w stosunku do wartości uzyskanych w murach niezbrojonych;

- korzystny wpływ zbrojenia na parametry wytrzymałościowe uzyskano tylko wtedy, gdy zaprawa układana była podwójnie (spoina podwójna) na dwóch powierzchniach wspornych elementów murowych.

Autorzy badań wyrażają szczególne podziękowania głównemu mecenasowi programu badań, firmie Solbet sp. z o.o. za podjęcie współpracy z Katedrą Konstrukcji Budowlanych oraz merytoryczną i materialną pomoc przy realizacji badań konstrukcji murowych. Niewątpliwym wkład w realizację badań miała także firma Nova sp. z o.o., która przekazała zbrojenie do badań, za co Autorzy są niezmiennie wdzięczni.

Literatura

- [1] ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry Assemblages.
- [2] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński 2015. „Wpływ rodzaju zbrojenia na parametry mechaniczne muru z betonu komórkowego”. *Materiały Budowlane* 520 (12): 58 – 60. DOI: 10.15199/33.2015.12.18.
- [3] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów poddanych ścinaniu – rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie”. *Materiały Budowlane* 514 (6): 92 – 96. DOI: 10.15199/33.2015.06.37.
- [4] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu”. *Materiały Budowlane* 513 (5): 106 – 109. DOI: 10.15199/33.2015.05.44.
- [5] PN-EN 1052-1:2000: Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na ściskanie.
- [6] PN-EN 1052-3:2004/A1:2009 Metody badań murów. Część 3: Określanie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.
- [7] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05/NA:2014-03: Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [8] RILEM LUMB 6: 1991 Diagonal Tensile Strength Tests of Small Wall Specimens. TC 76 – LUM.

Przyjęto do druku: 12.12.2015 r.