

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-9825-6343

dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4015-4971

dr inż. Wojciech Mazur<sup>1)\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6382-1496

mgr inż. Remigiusz Jokiel<sup>2)</sup>

# Badanie wpływu wzmocnienia powierzchniowego systemem FRM na wytrzymałość na ścinanie murów z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego

## *Research of influence of superficial strengthening with FRM system on shear strength of masonry made of autoclaved aerated concrete units*

DOI: 10.15199/33.2021.05.02

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wzmocnionych powierzchniowo murów z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). Stanowią one kolejny etap badań doświadczalnych mających na celu określenie wpływu wzmocnienia powierzchniowego systemem FRM na wytrzymałość murów z ABK. Badania przeprowadzono wg procedury A zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1052-3 [6]. Program badań obejmował modele wzmocnione z jednej oraz dwóch stron. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań modeli bez wzmocnienia [4].

**Słowa kluczowe:** autoklawizowany beton komórkowy (ABK); wytrzymałość na ściskanie; system FRM; wzmocnienie powierzchniowe.

**Abstract.** This paper describes the results from the test of the shear strength of superficially strengthened walls made of autoclaved aerated concrete (AAC) masonry units. These tests constitute the next stage of experimental research aimed at determining the influence of surface reinforcement with the FRM system on the strength parameters of AAC walls. The tests were carried out in accordance with the procedure A of PN-EN 1052-3 [6]. The research program included models reinforced on one and two sides. The results were compared with the test results of models without reinforcement [4].

**Keywords:** autoclaved aerated concrete (AAC); compressive strength; FRM system; superficial strengthening.

Wzmocnienie powierzchniowe jest najczęściej stosowane w istniejących konstrukcjach, które uległy uszkodzeniu lub wykazano ich zbyt małą nośność do nowego, zwiększonego obciążenia wynikającego ze zmiany sposobu użytkowania obiektu. W przypadku elementów żelbetowych, efektywność wzmocnienia powierzchniowego została zweryfikowana licznymi badaniami doświadczalnymi, a ich zastosowanie skodyfikowano. Efektywność wzmocnienia powierzchniowego w konstrukcjach murowych stanowiła przedmiot wielu badań. Dotyczyły one przede wszystkim murów wykonanych z elementów silikatowych lub ceramicznych (najczęściej murów z cegły).

Na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej podjęto próbę określania wpływu wzmocnienia powierzchniowego na parametry mechaniczne murów z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). Program badań obejmował określenie wpływu wzmocnienia powierzchniowego na wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie murów z ABK. Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm [1, 5], a ich rezultaty przedstawiono w artykułach [2, 3]. W ostatnim etapie wykonano badanie wytrzymałości muru na ścinanie zgodnie z wymaganiami normy [6] zharmonizowanej z Eurokodem 6 [7], a wyniki przedstawiono w artykule i porównano z wynikami modeli bez wzmocnienia [4]. Stosując procedurę A określono początkową i charakterystyczną wytrzymałość muru na ścinanie ( $f_{vo}$  i  $f_{vok}$ ) oraz tangens kąta tarcia wewnętrznej zaprawy w spoinie wspornej ( $0,8 \text{ tg } \alpha$ ).

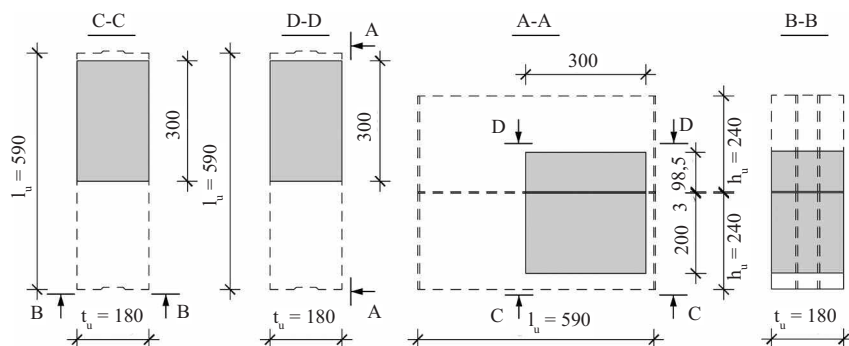
### Modele badawcze i program badań

Modele badawcze wykonano z identycznych materiałów jak mury w badaniach [2, 3]. Zastosowano elementy murowe z ABK długości  $l_u = 590 \text{ mm}$ , szerokości  $t_u = 180 \text{ mm}$  oraz wysokości  $h_u = 240 \text{ mm}$ . Błocki miały znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie  $f_b = 4,0 \text{ N/mm}^2$  oraz klasę gęstości  $600 \text{ kg/m}^3$ . Na powierzchniach czołowych ukształtowano pióra i wpusty. Zastosowano systemową, przygotowaną fabrycznie zaprawę cienkowarstwową o wytrzymałości na ściskanie  $f_m = 6,1 \text{ N/mm}^2$ . Norma [6] wyróżnia dwa typy modeli badawczych (typ I i typ II) w zależności od długości i wysokości elementów murowych. Badane modele zostały wykonane jako elementy próbne typu II i składały się z dwóch odpowiednio dociętych elementów murowych (rysunek 1). Przechowywano je w warunkach laboratoryjnych w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej powietrza  $70 - 85\%$ .

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

<sup>2)</sup> BUDINŻ PB Sp. z o.o. Sp.k.

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: wojciech.mazur@polsl.pl



Rys. 1. Geometria i wymiary modeli badawczych  
Fig. 1. The geometry and dimensions test models

Po 28 dniach od wymurowania wzmocnianych modeli na powierzchni boczne nakładano zaprawę systemową PBO-MX GOLD MASONRY i wtapiano w nią siatkę PBO-MESH GOLD 22/22, a następnie наносzono wierzchnią warstwę zaprawy systemowej PBO-MX GOLD MASONRY. Przyjmując oznaczenia elementów badawczych, nawiązano do oznaczeń stosowanych w badaniach [4] i oznaczano je wielką literą S oraz dodatkowymi wielkimi literami M, F oznaczającymi wzmocnienie powierzchniowe i cyframi 1 lub 2 oznaczającymi wzmocnienie jedno- lub dwustronne. W przypadku każdego sposobu wzmocnienia wykonano po 9 elementów badawczych zgodnie z postanowieniami normy [6]. Program badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie pokazano w tabeli 1.

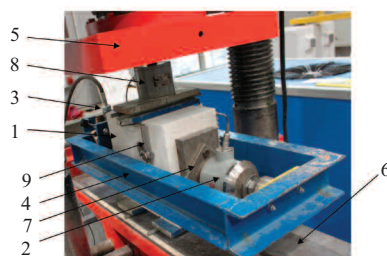
Tabela 1. Program badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie  
Table 1. The research program of the masonry initial shear strength

Oznaczenie serii	Liczba elementów	Rodzaj zaprawy i typ spoiny	Sposób wzmocnienia
SMF1	9	spoina cienko-warstwowa	jedno-stronne
SMF2	9	spoina cienko-warstwowa	dwu-stronne
SM	9	spoina cienko-warstwowa	–

### Stanowisko badawcze i technika badań

Modele murów bez wzmocnienia badano po 28 dniach od wymurowania, a modele ze wzmocnieniem po 28 dniach od naniesienia wzmocnienia. Do wyznaczenia poszukiwanych parametrów wykorzystano procedurę A normy [6], wg której elementy próbne badane są przy różnych wstępnych naprężeniach ściskających prostopadłych do

powierzchni spoin wspornych. Wszystkie elementy badano w specjalnie skonstruowanym stanowisku (6) (fotografia 1), umieszczonym w maszynie wytrzymałościowej (5) o zakresie 3000 kN. Stalowa rama (4) umożliwiała realizację naprężenia normalnego do spoin wspornych elementu badawczego (1) przez siłownik hydrauliczny (3) oraz blachy i przekładki teflonowe (7). Dzięki maszynie wytrzymałościowej wprowadzono obciążenie ścinające, równoległe do spoin wspornych. Pomiaru siły sprężającej i ścinającej dokonywano za pomocą siłomierzy elektrooporowych (2) i (8) o zakresie pomiarowym 100 kN.



Fot. 1. Stanowisko do badania początkowej wytrzymałości muru na ścinanie wraz z modelem (opis w tekście)

Photo 1. The test stand for testing the masonry initial shear strength with the test model (description in text)

W każdej serii badano po 3 elementy próbne obciążane trzema różnymi wartościami naprężeń normalnych prostopadłych do płaszczyzny spoin wspornych. Zgodnie z normą [6] naprężenia w przypadku elementów murowych o  $f_b < 10 \text{ N/mm}^2$  powinny wynosić  $f_{p,i} = 0,1; 0,3; 0,5 \text{ N/mm}^2$  i należy je wyznaczać z zależności:

$$f_{p,i} = F_{p,i} / A_{h,i} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{p,i}$  – wartość wstępnego obciążenia ściskającego;  $A_{h,i}$  – pole przekroju poprzecznego i-tego elementu próbnego.

W celu osiągnięcia zalecanych wartości naprężeń wstępnych w polu poprzecznym każdego elementu badawczego o  $A_{h,i} = 36\,000 \text{ mm}^2$  realizowano obciążenie ściskające  $F_{p,i}$  o wartości odpowiednio 5400; 16 200; 27 000 N. Podczas badania rejestrowano poziome i pionowe obciążenia, a także pionowe przemieszczenie wzajemne połączonych ze sobą dociętych elementów murowych. Pomiar przemieszczeń realizowano za pomocą dwóch indukcyjnych czujników przemieszczeń LVDT (9), o zakresie pomiarowym  $10 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$  zamocowanych z obu stron modeli. Rejestrację wartości sił oraz przemieszczeń realizowano za pomocą automatycznego stanowiska pomiarowego.

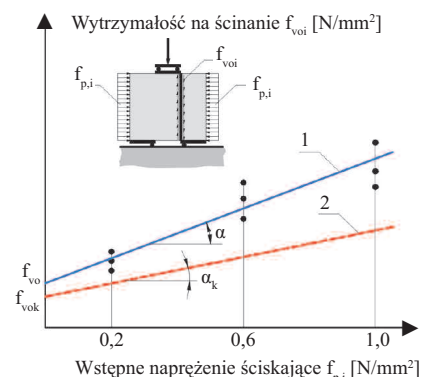
Pomiar przemieszczeń posłużył do wyznaczenia największego obciążenia ścinającego  $F_{i,max}$ , przy którym nastąpił nagły, nieproporcjonalny przyrost przemieszczeń. Wytrzymałość na ścinanie  $f_{voi}$  elementów badawczych wyznaczano z zależności (2) jako iloraz obciążenia  $F_{i,max}$  i podwojonego pola powierzchni wspornej  $2A_{h,i}$ .

$$f_{voi} = F_{i,max} / 2A_{h,i} \quad (2)$$

gdzie:

$F_{i,max}$  – maksymalna siła ścinająca uzyskana dla i-tego elementu próbnego.

Po przeprowadzonym badaniu oględzinom poddano powierzchnie wsporne elementów murowych w celu zaklasyfikowania sposobu zniszczenia próbki zgodnie z wymaganiami normy [6]. Wytrzymałość na ścinanie  $f_{voi}$  obliczoną w przypadku każdego elementu próbnego naniesiono na rysunku 2 w funkcji



Rys. 2. Zasada określania podstawowych parametrów ścinania wg PN-EN 1052-3:2004 [6]: 1 – prosta regresji; 2 – skorygowana prosta regresji

Fig. 2. The rule of determining the basic parameters of the shear according to PN-EN 1052-3:2004 [6]: 1 – regression function; 2 – adjusted regression function

wstępnych naprężeń ściskających  $f_{p,i}$ . W uzyskane wyniki wpisano prostą regresji metodą najmniejszych kwadratów. Następnie, posługując się równaniem prostej, wyznaczono wartość początkowej wytrzymałości na ścinanie oraz kąt tarcia wewnętrznego w punkcie przecięcia prostej z osią pionową. Wartość charakterystyczną początkowej wytrzymałości na ściskanie, tangensa oraz kąta tarcia wewnętrznego obliczono wg zależności:

$$f_{vok} = 0,8 f_{vo} \quad [N/mm^2] \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_k = 0,8 \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

$$\alpha_k = \operatorname{arctg}(0,8 \operatorname{tg} \alpha) \quad (5)$$

gdzie:

$f_{vo}$  – początkowa wytrzymałość muru na ścinanie;  
 $f_{vko}$  – charakterystyczna wartość początkowej wytrzymałości muru na ścinanie;  
 $\alpha$  – kąt tarcia wewnętrznego;  
 $\alpha_k$  – charakterystyczna wartość kąt tarcia wewnętrznego.

## Wyniki badań

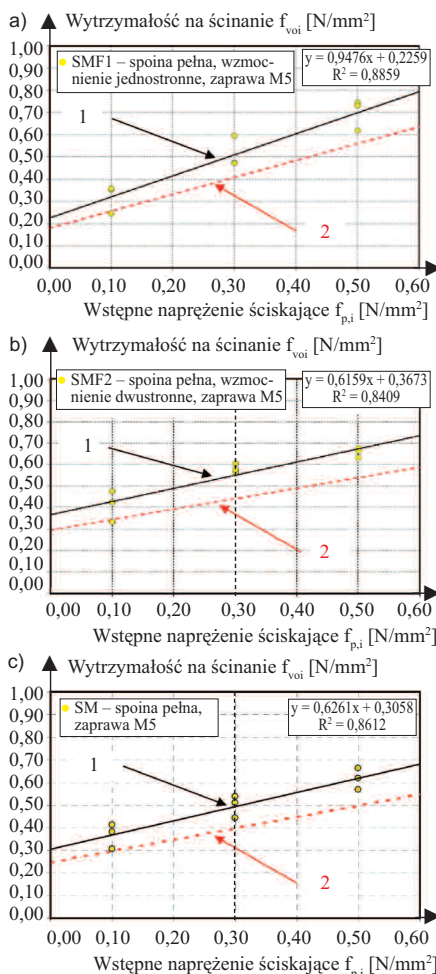
W tabeli 2 przedstawiono parametry wytrzymałościowe zbadanych modeli wzmocnionych powierzchniowo oraz modeli bez wzmocnienia, a na rysunku 3 zależność  $f_{voi} - f_{p,i}$  wszystkich serii badawczych.

**Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników**  
 Table 2. Summary of the test results

Element	$f_{vo}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{vok}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [°]	$0,8 \operatorname{tg} \alpha$	$\alpha_k$ [°]
SMF1	0,23	0,18	43	0,76	37
SMF2	0,37	0,29	32	0,49	26
SM	0,31	0,24	32	0,5	27

W modelach wzmocnionych z jednej strony muru (modele SMF1) uzyskano początkową wytrzymałość muru na ścinanie  $f_{vo} = 0,23 \text{ N/mm}^2$  oraz odpowiadającą jej wytrzymałość charakterystyczną  $f_{vok} = 0,18 \text{ N/mm}^2$ . Wartość kąta tarcia wewnętrznego wyniosła  $\alpha = 43^\circ$ , wartość charakterystyczna  $\alpha_k = 37^\circ$ , a obliczony na tej podstawie charakterystyczny tangens kąta nachylenia  $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,76$ .

W modelach wzmocnionych z dwóch stron muru (modele serii SMF2) uzyskano początkową wytrzymałość muru na ścinanie  $f_{vo} = 0,37 \text{ N/mm}^2$  oraz odpowiadającą jej wytrzymałość charakterystyczną  $f_{vok} = 0,29 \text{ N/mm}^2$ . Wartość kąta tarcia wewnętrznego wyniosła  $\alpha = 32^\circ$ , wartość charakterystyczna  $\alpha_k = 26^\circ$ , a obliczony na tej podstawie charakterystyczny tangens kąta nachylenia  $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,49$ .



**Rys. 3. Wyniki ścinania wg PN-EN 1052-3:2004 [4]: a) SMF1; b) SMF2; c) SM; 1 – prosta regresji; 2 – skorygowana prosta regresji serii modeli**

Fig. 3. Results of shear tests according to PN-EN 1052-3:2004 [4]: a) SMF1; b) SMF2; c) SM; 1 – regression function; 2 – adjusted regression function for series

W modelach, w których nie zastosowano żadnego wzmocnienia powierzchniowego (seria SM), początkowa wytrzymałość muru na ścinanie i odpowiadająca jej wytrzymałość charakterystyczna wyniosły odpowiednio  $f_{vo} = 0,31 \text{ N/mm}^2$  i  $f_{vok} = 0,24 \text{ N/mm}^2$ , natomiast wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\alpha = 32^\circ$ , a wartość charakterystyczna  $\alpha_k = 27^\circ$ . Obliczony charakterystyczny tangens kąta nachylenia  $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,50$ .

Charakterystyczną wytrzymałość muru na ściskanie  $f_{vk,EC6}$  należy określić na podstawie zawartego w normie [7] wyrażenia:

$$f_{vk,EC6} = 0,5f_{vok,EC6} + 0,4\sigma_d = 0,5f_{vok,EC6} + 0,8 \operatorname{tg} \alpha_{EC6}\sigma_d \quad (6)$$

Wytrzymałość na ścinanie nie może być jednak większa niż

$$f_{vk,EC6} = 0,045f_b \quad (7)$$

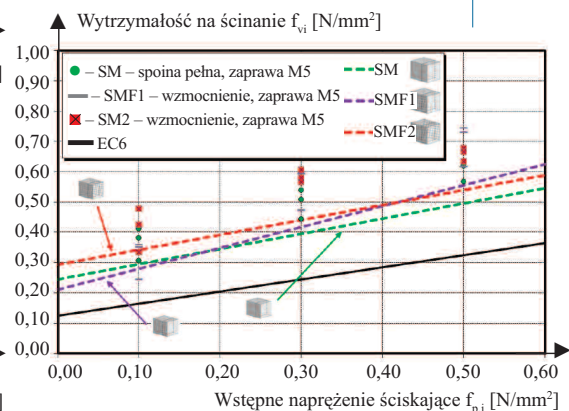
lub

$f_{vk,EC6} = 0,7$  wartości granicznej podanej w tabeli 3.1 normy [7].

W tabeli 3 oraz na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań oraz wyznaczone charakterystyczne wartości wytrzymałości na ścinanie, które zostały porównane z parametrami określonymi w normie EC6 [7].

**Tabela 3. Porównanie wyników badań**  
 Table 3. Comparison of the test results

Element	$f_{vok}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{vok,EC6}$	$f_{vok}/f_{vok,EC6}$	$0,8 \operatorname{tg} \alpha$	$0,8 \operatorname{tg} \alpha_{EC6}$	$0,8 \operatorname{tg} \alpha / 0,8 \operatorname{tg} \alpha_{EC6}$
SMF1	0,18	0,25	0,72	0,76	0,4	1,90
SMF2	0,29	0,25	1,16	0,49	0,4	1,23
SM	0,24	0,25	0,96	0,5	0,5	1,25



**Rys. 4. Porównanie wyników badań z zależnością proponowaną w EC6 [7] (wg wzoru (6))**  
 Fig. 4. Comparison of test results to the equation proposed in the EC6 [7] (according to the formula (6))

We wszystkich elementach zaobserwowano zniszczenie typu A polegające na ścięciu zaprawy na styku z elementami murowymi z rozdziałem na dwie powierzchnie elementów murowych (fotografia 2a) lub z zaprawą na jednej powierzchni (fotografia 2b). Na wszystkich wzmocnionych powierzchniach elementów serii SMF1 i SMF2 powstało zarysowanie matrycy cementowej wzdłuż spoiny (fotografia 2c) przy braku zerwania włókien siatki.

Uzyskana w badaniach murów wzmocnionych z dwóch stron (seria SMF2) początkowa wytrzymałość na ścinanie była większa o 16% od wartości normowej. Natomiast w przypadku murów wzmocnionych z jednej strony (seria SMF1) oraz bez wzmocnienia (seria SM) odnotowano wartości mniejsze od normowych odpowiednio o 28% i 4%.



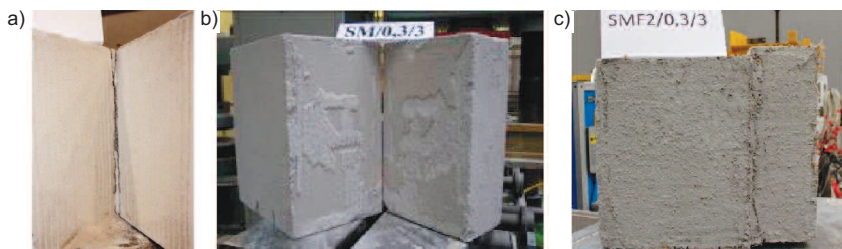


## CANASTOL – Water under Control

– kompletny hydrofobizator do systemów mineralnych,  
– prosty w dozowaniu,  
– sprawdzony w działaniu



**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: arbolcel@jrs.pl



Fot. 2. Widok modeli po badaniu: a) SMF1; b) SM; c) SMF2  
Photo 2. A view of models after tests: a) SMF1; b) SM; c) SMF2

Znacznie lepsze wyniki uzyskano w przypadku kąta tarcia wewnętrznego zaprawy w spoinie wspornej  $0,8 \text{ tg } \alpha$ , w przypadku którego we wszystkich seriach badawczych odnotowano wartości większe od normowych  $0,8 \text{ tg } \alpha = 0,4$ . Największa różnica (ok. 90%) została odnotowana w modelach wzmocnionych z jednej strony. Wzrost o 25% uzyskano w przypadku murów bez wzmocnienia. Najmniejszy wpływ na wzrost współczynnika tarcia stwierdzono w przypadku murów wzmocnionych z dwóch stron (ok. 23%), większy w przypadku murów wzmocnionych dwustronnie, analogicznie jak w przypadku badania ukośnego ściskania [3], w których jednostronne wzmocnienie nie spowodowało wyraźnego wzrostu obciążenia niszczącego.

### Wnioski

Początkowa wytrzymałość na ścinanie modeli murów wykonanych na zaprawie mineralnej i wzmocnionych z jednej strony wyniosła  $f_{vo} = 0,23 \text{ N/mm}^2$ , a określona na jej podstawie wytrzymałość charakterystyczna  $f_{vok} = 0,18$ . W przypadku murów wzmocnionych z dwóch stron początkowa wytrzymałość na ścinanie wynosiła  $f_{vo} = 0,37 \text{ N/mm}^2$ , a odpowiadająca jej wytrzymałość charakterystyczna  $f_{vok} = 0,29 \text{ N/mm}^2$ . Wszystkie elementy badawcze uległy zniszczeniu na skutek ścinania na styku zaprawy z elementem murowym (typ A).

Na podstawie porównania uzyskanych wyników badań oraz zależności określonych w normie EC6 stwierdzono, że:

- charakterystyczna początkowa wytrzymałość na ścinanie murów wzmocnionych z jednej strony osiągnęła wartość o 28% mniejszą od wartości normowej wynoszącej  $f_{vok,EC} = 0,25 \text{ N/mm}^2$ . Zastosowanie wzmocnienia powierzchniowego z obu stron modeli pozwoliło na uzyskanie charakterystycznej począt-

kowej wytrzymałości na ściskanie murów większej o 16% od wartości normowej;

- w obu seriach modeli murów ze wzmocnieniem odnotowano większą wartość kąta tarcia wewnętrznego w spoinie w porównaniu z wartością normową  $0,8 \text{ tg } \alpha = 0,4$ . Wzrost na poziomie 90% i 23% odnotowano odpowiednio w modelach wzmocnionych z jednej oraz z dwóch stron;

- zastosowanie wzmocnienia powierzchniowego pozwoliło na łagodniejsze zachowanie modeli badawczych w porównaniu z modelami niewzmocnionymi;

- uzyskane w badaniach wartości wytrzymałości na ścinanie były większe od wartości normowych określonych wg zależności (6) pomimo uwzględnienia normowej redukcji wytrzymałości o 50%.

### Literatura

- [1] ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry Assemblages.
- [2] Drobiec Łukasz, Wojciech Mazur, Remigiusz Jokiel. 2020. „Studies on the effects of superficial strengthening with FRMC system on compressive strength of AAC masonry”. *Budownictwo i Architektura* 19 (3): 021 – 030. DOI: 10.35784/bud-arch.2169.
- [3] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński, Wojciech Mazur, Remigiusz Jokiel. 2020. „The effect of the strengthening of AAC masonry walls using FRMC system”. *Cement Wapno Beton*, 25 (5), 376 – 389. DOI: <https://doi.org/10.32047/CWB>. 2020.25.5.4
- [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 1052-3:2004/3:2009 Metody badań murów. Część 3: Określenie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.
- [7] PN-EN 1996-1-1+3:2013-05/NA:2014-03: Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

Przyjęto do druku: 06.04.2021 r.