

dr hab. inż. Valeryj Derkacz<sup>1)</sup>  
 prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz<sup>2)</sup>  
 dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ<sup>3)</sup>\*

# Wytrzymałość i odkształcalność muru z bloczków z ABK na zaprawie z piany poliuretanowej

## *Strength and deformability of the wall made of AAC blocks on a polyurethane mortar*

DOI: 10.15199/33.2019.11.01

**Streszczenie.** W artykule podano wyniki badań próbek murew z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) na zaprawie z piany poliuretanowej prowadzonych na Białorusi. Ustalono wytrzymałość muru na ściskanie, ścinanie i rozciąganie przy zginaniu. Porównano te wyniki z otrzymanymi podczas badań próbek na spoinach cementowo-polimerowych oraz z wynikami badań prowadzonych na Politechnice Śląskiej.

**Słowa kluczowe:** badania wytrzymałościowe; spoiny; piany poliuretanowa.

**Abstract.** The article presents the results of tests of masonry samples of autoclaved aerated concrete (AAC) on polyurethane mortar carried out in Belarus. Compressive strength, shear and tensile strength during bending of the masonry samples were determined. The test results were compared with sample tests on thin cement-polymer as well as with the research results conducted at the Silesian University of Technology.

**Keywords:** strength tests; masonry joints; polyurethane mortar.

W praktyce od lat podejmuje się próbę stosowania zaprawy murarskiej w postaci piany poliuretanowej [1, 2]. Pozwala to uzyskać dużą wydajność prac murarskich, dobre parametry termoizolacyjne ścian i obniżyć koszty. Brak jest jednak doświadczenia w stosowaniu murów wznoszonych na pianie poliuretanowej. Czynnikiem ograniczającym powszechne wykorzystanie klejów poliuretanowych jest również brak norm. Podjęto próbę określenia wytrzymałości na ściskanie, ścinanie i rozciąganie przy zginaniu muru z bloczków z betonu komórkowego (ABK) łączonych klejem poliuretanowym.

### Badanie wytrzymałości na ściskanie

Wykonano trzy próbki muru na kleju poliuretanowym TITAN PROFESSIONAL [3], które oznaczono symbolem Sp, oraz jedną na zaprawie cementowo-polimerowej M75 oznaczoną Sc. Użyto bloczków z betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m<sup>3</sup> i wymiarach 600 × 400 × 250 mm.

<sup>1)</sup> Centrum Naukowo-Techniczne „Instytut Białoruski” Republiki Białoruś

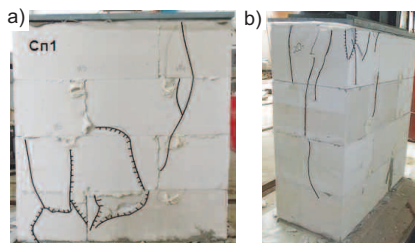
<sup>2)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; Wydział Budownictwa i Architektury

<sup>3)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

\* Adres do korespondencji: lukasz.drobiec@polsl.pl

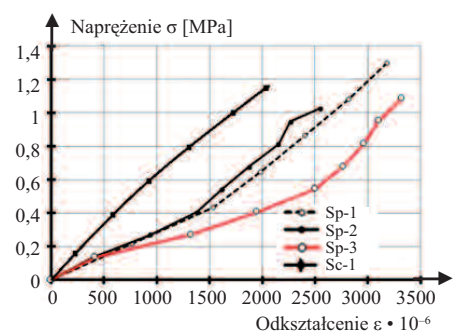
Średnia wytrzymałość próbek na ściskanie wynosiła  $f_b = 2,5$  MPa. Podczas ściskania próbek wykonanych na kleju poliuretanowym pierwsze pęknięcia powstały przy obciążeniu  $F_{crc} = 0,4 \div 0,58 F_{max}$ . Zniszczenie próbek miało charakter plastyczny i nastąpiło w wyniku zmiażdżenia ABK przy naprężeniu  $\sigma = 1,2 \div 1,4$  MPa. W próbce na zaprawie cementowo-polimerowej pierwsze zarysowania powstały przy obciążeniu  $F_{crc} \approx 0,44 F_{max}$ , natomiast zniszczenie próbki odnotowano przy naprężeniu ściskającym  $\sigma = 1,25$  MPa w wyniku zmiażdżenia ABK, czemu towarzyszyło powstawanie pionowych pęknięć na powierzchniach czołowych próbki (fotografia 1).

Zależność naprężenie-odkształcenie ściskanych próbek przedstawiono na rysunku 1. W przypadku próbki ze spoinami



**Fot. 1.** Próbki na zaprawie: a) z piany poliuretanowej; b) cementowo-polimerowej po badaniu wytrzymałości na ściskanie

Photo 1. Masonry samples with mortar made of: a) polyurethane foam; b) cement-polymer foam, after compression strength test



**Rys. 1.** Zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  w przypadku ściskanych próbek na zaprawie z piany poliuretanowej (Sp-1, Sp-2, Sp-3) i cementowo-polimerowej (Sc-1)

Fig. 1.  $\sigma$ - $\epsilon$  relationships for compressed samples made on polyurethane mortar (Sp-1, Sp-2, Sp-3) and cement-polymer mortar (Sc-1)

cementowo-polimerowymi jest prawie liniowa. W próbkach ze spoinami poliuretanowymi odkształcenia nieliniowe obserwuje się już na początkowym etapie obciążania. W przypadku naprężenia  $\sigma \geq 0,6f_k$  kąt nachylenia krzywych  $\sigma$ - $\epsilon$  dla próbek na spoinach poliuretanowych i cementowo-polimerowych był podobny. Wartość siecznego modułu sprężystości muru na cienkich spoinach cementowo-polimerowych była 2,8 razy większa niż modułu sprężystości muru na spoinach z kleju poliuretanowego. Współczynnik Poissona w murze ze spoinami cementowo-polimerowymi  $\nu_{xy}$  był również większy niż wartość  $\nu_{xy}$  w mu-

rze na spoinach poliuretanowych. Przytoczone wyniki są zgodne z uzyskanymi w badaniach prowadzonych na Politechnice Śląskiej [4, 5].

## Badanie wytrzymałości na ścinanie

W przypadku odkształcenia postaciowego ścian murowych praktyczne znaczenie ma ścinanie w płaszczyźnie spoin wspornych. Wówczas stan graniczny nośności można określić na podstawie kryterium:

$$\theta_{sd} \leq \theta_{adm} \quad (1)$$

gdzie:

$\theta_{adm}$  – wartość graniczna odkształceń postaciowych muru.

Odkształcenia postaciowe muru  $\theta_{sd}$  określają się ze wzoru:

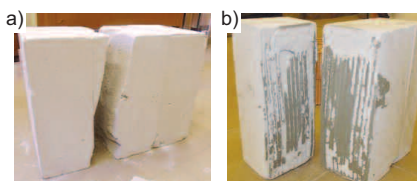
$$\theta_{sd} = \tau_{xy}/G = V_k/(G \cdot F) \quad (2)$$

gdzie:

$V_k$  – wartość charakterystyczna siły poprzecznej;  
 $G$  – moduł Kirchofa;  
 $F$  – powierzchnia pozioma przekroju muru.

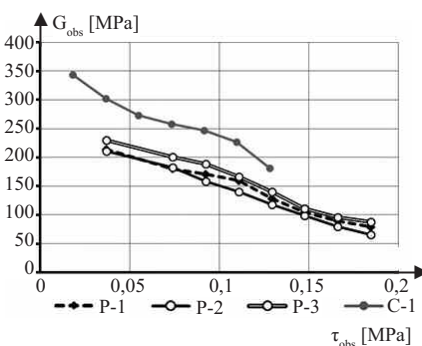
Zgodnie z Eurokodem [6] przyjmuje się, że wartość  $G$  muru na cienkich zaprawach cementowo-polimerowych stanowi 40% jego modułu sprężystości  $E$ . W przypadku muru na spoinach poliuretanowych wartość  $G$  jest nieznaną. W związku z tym przeprowadzono badania wytrzymałości próbek na ścinanie. Stosowano bloczki z ABK o tych samych wymiarach i gęstości jak w przypadku badań wytrzymałości na ściskanie. Zniszczenie próbek ze spoinami z kleju poliuretanowego następowało w wyniku ścinania betonu komórkowego (fotografia 2a). Średnia początkowa wytrzymałość na ścinanie  $f_{v0}$  wynosiła 0,23 MPa, a charakterystyczna  $f_{vok} = 0,18$  MPa, co jest wartością większą niż  $f_{vok} = 0,065f_b = 0,16$  MPa, którą przyjęto w EC-6 [6]. Zniszczenie próbek na zaprawie cementowo-polimerowej następowało w wyniku ścinania zaprawy (fotografia 2b). Średnia i charakterystyczna początkowa wytrzymałość na ścinanie była zbliżona do wartości  $f_{v0}$  i  $f_{vok}$  próbek wykonanych na kleju poliuretanowym.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność modułu  $G_{obs}$  od naprężeń ścinających  $\tau_{obs}$  w murze. Moduł  $G_{obs}$  maleje ze wzrostem naprężeń ścinających  $\tau_{obs}$ .



Fot. 2. Zniszczone próbki na zaprawie: a) z piany poliuretanowej; b) cementowo-polimerowej po badaniu wytrzymałości na ścinanie

Photo 2. Damaged samples made on: a) polyurethane mortar; b) cement-polymer mortar, after the shear strength test



Rys. 2. Zależność  $G_{obs}$  -  $\tau_{obs}$  w przypadku ścinanych próbek wykonanych na zaprawie z piany poliuretanowej (P-1, P-2, P-3) i cementowo-polimerowej (C-1)

Fig. 2.  $G_{obs}$  -  $\tau_{obs}$  graph for shear samples made of polyurethane mortar (P-1, P-2, P-3) and cement-polymer mortar (C-1)

W przypadku  $\tau_{obs} = 0,33 \tau_{max}$  dla próbek na spoinach poliuretanowych średnia wartość  $G_{obs} = 158$  MPa, co stanowiło ok. 50% modułu sprężystości  $E$  [7]. W przypadku próbek na spoinach cementowo-polimerowych  $G_{obs} = 0,35E = 250$  MPa. Wartości modułów  $G_{obs}$  uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych są zbliżone do wartości  $G = 0,4E$ , ustalonej w EC-6 [6], a także w aprobacie technicznej [3]. Warto nadmienić, że wartość graniczna odkształceń postaciowych próbek na spoinach poliuretanowych wynosiła  $\theta_{adm} = 0,70 \cdot 10^{-3}$  i była 1,75 razy większa niż wartość  $\theta_{adm} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  dla murów na spoinach cementowo-polimerowych. W przypadku muru na cienkich spoinach cementowo-polimerowych  $\theta_{adm} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ , a moduł  $G = 359$  MPa. W badaniach prowadzonych na Politechnice Śląskiej [8, 9] uzyskano zbliżone wartości kąta odkształcenia postaciowego.

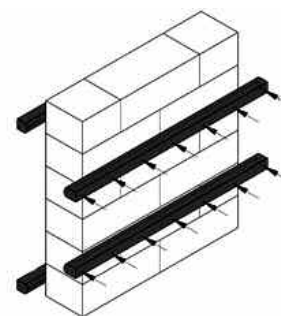
Zniszczenie próbek z bloczków z ABK o wytrzymałości  $f_b = 2,5$  MPa i gęstości  $400 \text{ kg/m}^3$  na kleju poliuretanowym było spowodowane ścinaniem betonu komórkowego. W tym przypad-

ku charakterystyczna początkowa wytrzymałość muru na ścinanie wyniosła  $f_{vok} = 0,18$  MPa i była większa od wartości ustalonej w EC-6 –  $f_{vok} = 0,16$  MPa [6]. W przypadku naprężenia ścinającego w murze na spoinach poliuretanowych wynoszącego  $\tau_{obs} = 0,33 \tau_{max}$  wartość średnia modułu  $G_{obs} = 158$  MPa, co stanowi ok. 50% siecznego modułu sprężystości  $E$ . Graniczne odkształcenie postaciowe muru na spoinach poliuretanowych  $\theta_{adm} = 0,70 \cdot 10^{-3}$  było 1,75 razy większe niż wartość  $\theta_{adm} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  w przypadku murów na spoinach cementowo-polimerowych. Ugięcie ścian z podatnymi wspornymi spoinami poliuretanowymi będzie większe niż w przypadku sztywnych spoin cementowo-polimerowych, a co za tym idzie ich rysoodporność również będzie większa [10].

## Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Szczególny przypadek ścian zginanych z płaszczyzny stanowią zewnętrzne ściany wypełniające w budynkach o konstrukcji szkieletowej. Ich nośność przy oddziaływaniu wiatru może określać się wytrzymałością muru na rozciąganie przy zginaniu w przekrojach spoin wspornych lub w przekrojach prostopadłych do tych spoin [11].

Na podstawie badań próbek ze spoinami poliuretanowymi (zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3) ustalono, że ich zniszczenie następowało na skutek pęknięcia betonu komórkowego w obrębie spoin wspornych (fotografia 3a). Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w tym przypadku wynosiła  $f_{x1} = 0,23$  MPa.



Rys. 3. Schemat badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie spoin wspornych

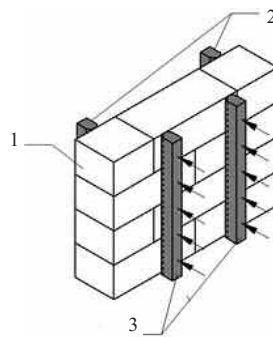
Fig. 3. Scheme of tensile test in bending in the plane of bed joints

Zniszczenie próbki muru na cienkich spoinach cementowo-polimerowych nastąpiło w wyniku pęknięcia spoiny bez naruszenia bloczków z betonu komórkowego (fotografia 3b). W tym przypadku wytrzymałość muru na rozciąganie przy zginaniu wynosiła  $f_{x1} = 0,04$  MPa i była 5,8 razy mniejsza niż wartość  $f_{x1}$  próbek na spoinach poliuretanowych. Wartość charakterystyczną wytrzymałości przy zginaniu muru z bloczków z ABK na cienkich spoinach określa się jako  $f_{xk1} = 0,035f_b$  (przy  $f_b = 2,5$  MPa,  $f_{xk1} = 0,09$  MPa). Zatem wartość doświadczalna  $f_{xk1}$  próbek na spoinach poliuretanowych była 1,7 razy większa niż wartość  $f_{xk1} = 0,035f_b$  próbki na spoinach cementowo-polimerowych.

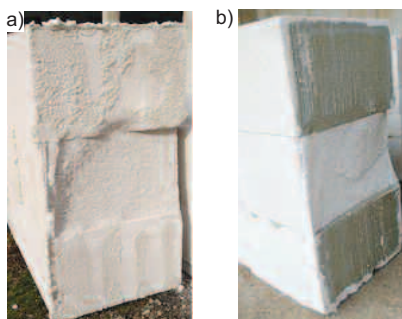


**Fot. 3. Zniszczenie próbek na zaprawie:** a) z piany poliuretanowej; b) cementowo-polimerowej podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  
*Photo. 3. Destruction of samples made on: a) polyurethane mortar; b) cement-polymer mortar; after tensile strength during bending test*

Podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w kierunku prostopadłym do spoin wspornych ich kruche zniszczenie występowało w przekrojach pokrywających się z pionowymi spoinami niezależnie od rodzaju materiału spoin (rysunek 4). W próbkach na kleju poliuretanowym obserwowano pęknięcie poliuretanu lub jego odspojenie od ABK (fotografia 4a), natomiast ze spoinami cementowo-polimerowymi występowało niszczenie zaprawy bez naruszenia jej przyczepności do ABK (fotografia 4b). Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $f_{x2}$  w próbkach na kleju poliuretanowym była o 40% większa od wytrzymałości próbki na zaprawie cementowo-polimerowej. W badaniach prowadzonych na Politechnice Śląskiej określano wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu



**Rys. 4. Schemat badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych: 1 – próbka; 2, 3 – miejsce przyłożenia obciążenia**  
*Fig. 4. Scheme of tensile test in bending in the perpendicular plane of the bed joints: 1 – sample; 2, 3 – places of load application*



**Fot. 4. Zniszczenie próbek podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych: a) próbka na zaprawie z piany poliuretanowej; b) próbka na zaprawie cementowo-polimerowej**  
*Photo. 4. Destruction of samples during the tensile bending test perpendicular to the bed joints: a) sample on polyurethane mortar; b) sample on cement-polymer mortar*

w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych murów z ABK na cienkowarstwowej zaprawie cementowej [12, 13]. Uzyskano wówczas wartość  $f_{x2} = 0,11$  MPa.

Wartość stosunku  $f_{x2}/f_{x1}$ , który charakteryzuje stopień anizotropii wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu muru na spoinach poliuretanowych, wynosiła 0,57. W przybliżeniu takie same wartości  $f_{x2}/f_{x1}$  muru na połączeniach poliuretanowych podano w [1]. W aprobacie technicznej [3] w przypadku stosowania kleju poliuretanowego w murach z bloczków z betonu komórkowego  $f_{x2}/f_{x1} = 0,66$ . Zgodnie z [6] w przypadku murów

z bloczków z ABK o wytrzymałości  $f_b = 2,5$  MPa w spoinach cienkich  $f_{xk2} = 0,035f_b = 0,09$  MPa ze spoinami pionowymi wypełnionymi zaprawą. W przypadku braku wypełnienia spoin pionowych zaprawą  $f_{xk2} = 0,025f_b = 0,06$  MPa.

## Literatura

- [1] Jäger A., C. Kuhlemann, E. Habian, M. Kasa, S. Lu. 2011. „Verklebung von Planziegelmauerwerk mit Polyurethanklebern”. *Mauerwerk* 15: 223 – 231.
- [2] Aldoghaim E. 2012. „Untersuchungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Mauerwerk durch Elastomerlager”. *Mauerwerk* 16: 93 – 102.
- [3] Poliuretanowa Zaprawa Murarska TBM w postaci piany do cienkich spoin. Aprobata Techniczna ITB AT-15-9365/2014.-14s.
- [4] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ścisnaniu”. *Materiały Budowlane* 512 (4): 3 – 7. DOI: 10.15199/33.2015.04.02.
- [5] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński, T. Rybarczyk. 2016. „The influence of the type of mortar on the compressive behaviour of walls made of Autoclaved Aerated Concrete (AAC)”. *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges*. Taylor & Francis Group: 1531 – 1538.
- [6] PN-EN 1996-1-1. Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1. Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [7] Mann W. 1973. Bruch kriterien für querkraft beanspruchtes Mauerwerk und ihre Anwendung auf gemauerte Windscheiben. *Die Bautechnik*. nr. 5: 421 – 425.
- [8] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie murów z betonu komórkowego”. *Materiały Budowlane* 514 (6): 92 – 96. DOI: 10.15199/33.2015.06.37.
- [9] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie murów z betonu komórkowego – odkształcalność postaciowa”. *Materiały Budowlane* 515 (7): 116 – 119. DOI: 10.15199/33.2015.07.32.
- [10] Derkacz Valerij, Romuald Orłowicz. 2012. „Rysoodporność murowych ścian działowych”. *Budownictwo Mieszkaniowe (Żiliszcznoestroitelstvo, Rosja)* nr. 4: 1 – 4.
- [11] Schmidt U., W. Jäger, W. Brameshuber, T. Baeker. 2015. „Biegezugfestigkeit von Mauerwerk”. *Mauerwerk* 19: 27 – 39.
- [12] Piekarczyk A. 2017. Influence of grid reinforcement placed in masonry bed joints on its flexural strength. IOP Conference Series: Science and Engineering, Vol. 245. DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032085.
- [13] Piekarczyk A. 2018. Flexural Strength of AAC Masonry with Bed Joint Reinforcement. Ce/papers Ernst & Sohn, A Wiley Brand. DOI: 10.1002/cepa887.

Przyjęto do druku: 14.10.2019 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

