dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾

Wpływ zbrojenia na zarysowanie strefy podokiennej muru z betonu komórkowego

The influence of the reinforcement on crack in spandrel walls made of autoclaved aerated concrete

DOI: 10.15199/33.2016.08.38

Streszczenie. W artykule opisano wyniki badań wpływu zbrojenia na powstanie zarysowań i sposobu zniszczenia murów z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) w strefie podokiennej. Badaniu poddano 8 murów bez zbrojenia (4 z wypełnionymi i 4 z niewypełnionymi spoinami czołowymi) oraz 12 murów z dwoma typami zbrojenia układanego w spoinach wspornych. Wykazano, że zbrojenie ma istotny wpływ na naprężenia rysujące i propagację rys. Przy poprawnie sprawdzonym obliczeniowo filarku międzyokiennym o szerokości jednego elementu nie powinno wystąpić zarysowanie strefy podokiennej. Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy (ABK), zarysowanie, strefa podokienna, mur zbrojony.

Abstract. The article describes the results of the reinforcement influence on the cracks and failure methods of spandrel walls made of autoclaved aerated concrete (AAC). The study involved 8 walls without reinforcement (4 with filled perpend joints and 4 nonfilled perpend joints) and 12 of walls with two types of reinforcement in the bed joints. It has been shown that the reinforcement has a significant impact on the level of cracking stress and propagation of cracks. It was found that when properly designed pillar, the crack zone in spandrel walls should not occur.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC), cracks, spandrel panel, reinforced masonry.

brojenie w murowanych ścianach można stosować w celu zwiększenia ich nośności i naprężenia, przy którym powstaje pierwsza rysa [1, 2, 9, 10] oraz w miejscach koncentracji naprężeń [3, 7, 8]. Miejscem koncentracji znacznych naprężeń i obszarem narażonym na wystąpienie zarysowań jest strefa podokienna muru [3, 8]. Na przestrzeni ostatniego stulecia wykonano wiele badań ścian z otworami, ale analizy te dotyczyły najczęściej murów niezbrojonych. Mimo iż w wielu publikacjach znaleźć można informacje na temat pozytywnego wpływu zbrojenia na mur w okolicy otworu okiennego oraz zasady kształtowania takiego zbrojenia [3, 8, 10], to w światowej literaturze trudno znaleźć wyniki badań, opisujące wpływ zbrojenia. Publikacje nie zawierają również informacji, przy jakim wytężeniu muru należy stosować zbrojenie. W miesięczniku "Materiały Budowlane" nr 4/2016 opublikowano artykuł dotyczący badań strefy podokiennej muru wykonanego z silikatów [6]. W tym artykule zaprezentuję podobne badania, lecz wykonane na modelach badawczych z betonu komórkowego (ABK). Wyniki badań, podobnie jak oba materiały, są różne.

Materiały użyte w badaniach

Do badań wykorzystano bloczki z betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL grubości 180 mm, z uchwytem montażowym, przeznaczone do murowania na pióro i wpust (rysunek 1). Wykonano z nich mury na cienkiej spoinie, z niewypełnionymi i wypełnionymi spoinami czołowymi. Zastosowano systemową zaprawę SOLBET klasy M5. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań elementów murowych, zapraw i zbrojonych oraz niezbrojonych murów z bloczków z ABK uzyskano wyniki wytrzymałości na ściskanie elementów murowych, zaprawy i muru, które zamieszczono w [4, 5]. W badaniach zastosowano dwa typy zbrojenia:

• kratowniczkę (fotografia 1), składającą się z płaskowników o przekroju 1,5 x 8 mm w rozstawie co 140 mm, połączonych skratowaniem z drutu średnicy 1,5 mm, wykonane ze stali zwykłej i zabezpieczone przed korozją przez cynkowanie;



Fot. 1. Zbrojenie zastosowane w badaniach: a) typu kratowniczka; b) siatka bazaltowa Photo 1. Reinforcement used in the tests: a) the truss type; b) basaltic mesh



Rys. 1. Element murowy z betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL zastosowany w badaniach Fig. 1. Masonry unit of aerated concrete SOLBET OPTIMAL used in tests

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; lukasz.drobiec@polsl.pl

• siatkę bazaltową składającą się z wątku i osnowy; wątek wykonano z ośmiu włókien o łącznym polu powierzchni przekroju poprzecznego 4 mm²; osnowa składa się z czterech włókien ułożonych równolegle; oczko siatki wynosiło 30 x 30 mm.

Badania

Badania wpływu zbrojenia na powstanie zarysowań i sposobu zniszczenia murów z ABK w strefie podokiennej prowadzono w prasie hydraulicznej o nacisku 600 kN. Konieczne było zaprojektowanie i wykonanie stalowego układu oporowo-cięgnowego (rysunek 2), którego zadaniem było wywołanie poziomych sił, jakie powstają w odcinkach muru pod wpływem ograniczania jego odkształcenia w kierunku długości ściany. Widok modelu na stanowisku badawczym pokazano na fotografii 2. Dzięki zastosowaniu sprężyn przyjęty układ cięgnowo-oporowy umożliwił przekazywanie na model badawczy praktycznie stałej siły poziomej podczas obciążania.

Badaniu poddano dwie serie modeli niezbrojonych oraz dwie serie modeli ze zbrojeniem w spoinach wspornych. Oznaczenia serii nawiązują do sposobu ich wykonania



Rys. 2. Stanowisko do badań: 1 – baza pomiaru przemieszczeń; 2 – cięgna sprężające; 3 – sprężyny w prowadnicach; 4 – siłomierze; 5 – łożysko kuliste; 6 – blachy oporowe; 7 – prasa hydrauliczna

Fig. 2. Test stand: 1 - basis for dislocation measurement; 2 - compression ties; 3 - prings in guides; 4 - dynamometers; 5 - ball bearing;6 - resistant sheet metals; <math>7 - a hydraulic press



Fot. 2. Model na stanowisku badawczym *Photo 2. Model in the test stand*

i zbrojenia. Modele z ABK niezbrojone oznaczono BKN, a modele niezbrojone z niewypełnionymi spoinami pionowymi BKNN. Elementy badawcze ze zbrojeniem w postaci kratowniczki oznaczono symbolem BKZK, natomiast z tym zbrojeniem i z niewypełnionymi spoinami pionowymi BKZKN. Na tej samej zasadzie oznaczano elementy badawcze zbrojone siatką bazaltową z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami pionowymi jako BKZSB i BKZSBN. W symbolu modelu, po oznaczeniu literowym, znajduje się oznaczanie cyframi w układzie 0,X-X, z których pierwsza oznacza wartość poziomych naprężeń ściskających [N/mm²], a druga to numer kolejnego modelu serii. Modele ustawiano bez mimośrodu, centralnie miedzy głowicami maszyny wytrzymałościowej. Zapewniono pełny kontakt między górną i dolną powierzchnią elementów, a powierzchniami głowic maszyny wytrzymałościowej przez zastosowanie stalowych blach na cienkich podlewkach z zaprawy cementowej. Przed właściwym obciążeniem elementu badawczego wykonano wstępne sprężenie modelu. W tym celu obciażono go w pionie (przez prasę) do uzyskania zakładanej wartości naprężenia poziomego, a następnie sprężano poziomo przez dokręcanie śrub na cięgnach sprężających. Sprężyny zamocowane między cięgnami a modelem po-

zwoliły na utrzymywanie stałej wartości naprężenia poziomego podczas badania. W każdej serii stosowano dwa poziomy sprężenia: 0,1 i 0,2 N/mm². Podczas badań prowadzono ciągły pomiar siły sprężającej na dwóch siłomierzach zamontowanych w układzie cięgnowo--oporowym. Po przeprowadzeniu sprężenia poziomego model docelowo obciążano w prasie hydraulicznej. Prowadzono pomiar siły ściskającej za pomocą siłomierza o dokładności 0,01 kN oraz pomiar przemieszczeń pionowych i poziomych przy użyciu transformatorowych przetworników przemieszczeń o dokładności 0,02 mm.

Wyniki badań

Wartości modułu sprężystości i współczynnika Poissona określano jako sieczną ze średniej wartości odkształceń uzyskanych z czujników pomiarowych, przy naprężeniu wynoszącym 1/3 naprężenia maksymalnego. W tabeli 1 podano wartości naprężenia, przy którym nastąpiło zarysowanie i zniszczenie elementów próbnych, moduł sprężystości i współczynnik Poissona. Na rysunku 3 pokazano uzyskane w badaniach, uśrednione w ramach serii, zależności naprężenie pionowe σ_{u} – odkształcenie pionowe ε., mierzone w strefie środkowej modelu. W opisach tych wykresów litera Y oznacza kierunek pionowy, natomiast litera X kierunek poziomy pomiaru odkształceń i sił. Zniszczenie elementów próbnych przebiegało w różny sposób. W murach niezbrojonych występowały ukośne zarysowania, których propagacja rozpoczynała się w styku górnego elementu murowego i przemieszczała w kierunku filarka międzyokiennego oraz muru podokiennego. Lokalnie dochodziło również do odspojeń licowych fragmentów muru. W większości modeli obserwowano rozwijanie się zarysowań do poziomu dwóch lub trzech warstw elementów murowych. Nie zauważono istotnych różnic w sposobie zniszczenia murów z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami pionowymi. Mury skrepowane poziomo większą siłą wykazywały mniej zarysowań niż mury przy mniejszym poziomym sprężeniu. Natomiast w murach zbrojonych stwierdzono występowanie mniejszej liczby rys niż bez zbrojenia. Najczęściej zarysowaniu ule-

Fabela	1. V	Vynil	ki bad	ań m	odeli	stref	y podo	okiennej
Table 1	. Re	sults	of the	span	drel p	anel n	nodel	

	Naprężenie		ęży- m²]	Moduł sprężystości	nik
Nr elementu	maksy- malne [N/mm ²]	rysujące [N/mm²]	Moduł spr stości [N/m	wyznaczony na podstawie rozło- żonego naprężenia [N/mm ²]	Współczyn Poisson:
BKN-0,1-1	3,06	2,64	5675	2733	0,16
BKN-0,1-2	2,95	2,78	4184	2015	0,11
BKN-0,2-1	3,88	3,58	4004	1928	0,11
BKN-0,2-2	3,83	3,39	4570	2200	0,11
BKNN-0,1-1	2,57	2,26	3371	1623	0,13
BKNN-0,1-2	2,67	2,54	3424	1649	0,15
BKNN-0,2-1	3,16	2,92	3775	1818	0,16
BKNN-0,2-2	3,04	2,85	3769	1815	0,18
BKZK-0,1-1	2,92	2,63	4311	2076	0,12
BKZK-0,1-2	3,25	2,91	5868	2826	0,13
BKZK-0,2-1	3,12	2,82	5472	2636	0,19
BKZK-0,2-2	3,06	2,78	6375	3070	0,13
BKZKN-0,1-1	2,75	2,63	4950	2384	0,16
BKZKN-0,1-2	2,98	2,54	4212	2029	0,13
BKZKN-0,2-1	3,31	3,01	5540	2668	0,22
BKZK-0,2-2	3,36	3,06	5901	2842	0,17
BKZSB-0,1-1	3,26	3,01	5373	2588	0,15
BKZSB-0,2-1	3,47	3,20	5581	2688	0,22
BKZSBN-0,1-1	2,94	2,64	5264	2535	0,18
BKZSBN-0,2-1	3,47	3,20	5716	2753	0,15

gał górny element murowy imitujący filarek międzyokienny. Rysy rzadko przechodziły na drugą warstwę elementów murowych. Podobnie jak w elementach niezbrojonych im wyższy był poziom sprężania, tym obserwowano mniej rys na powierzchni modelu. Częściej niż w murach niezbrojonych występowały lokalne odspojenia licowych fragmentów muru wzdłuż osi płaskowników zbrojenia. Nie zaobserwowano istotnych różnic w sposobie zniszczenia murów z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami pionowymi. W żadnym z modeli zbrojonych siatką bazaltowa rysy nie przeszły z elementu murowego imitującego filarek na strefę podokienną muru. Lokalnie w pierwszej warstwie pod filarkiem występowały jedynie drobne odspojenia krawedzi w okolicy zbrojenia.

W tabeli 2 zamieszczono porównanie naprężeń niszczących i rysujących w badanych modelach. W badaniach wszystkich modeli (zbrojonych i niezbrojonych, z niewypełnionymi i wypełnionymi spoinami pionowymi) zarysowania występują dopiero w przypadku ok. 90% naprężeń niszczących.

Analiza wyników

Sama analiza stosunku naprężeń rysujących do niszczących może być nieco myląca, ponieważ mury poszczególnych serii niszczyły się przy różnym obciążeniu pionowym. Na rysunku 4 pokazano zależność naprężenie pionowe σ_{i} – naprężenie poziome σ_{v} i zaznaczono poziomy zarysowania i zniszczenia murów niezbrojonych z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami pionowymi. Wypełnienie spoin pionowych zaprawą powoduje zwiększenie naprężeń niszczących o ok. 15 i 24% oraz napreżeń rysujacych o ok. 13 i 21% (w każdym przypadku przy odpowiednio mniejszym i większym naprężeniu poziomym).

Na rysunku 5 porównano średni poziom naprężeń rysujących oraz zniszczenia murów zbrojonych kratowniczkami i siatkami bazaltowymi z murów niezbrojonych. W wy-



 Tabela 2. Wyniki badań modeli strefy podokiennej

 Table 2. Results of spandrel panel models

	J 1	I			
Nr elementu	Naprężenie maksymalne σ _{max} [N/mm ²]	Naprężenie rysujące σ _{cr} [N/mm²]	$\sigma_{\rm cr}^{\prime}/\sigma_{\rm max}^{\prime}$	Średnie σ _{cr} /σ _{max}	
BKN-0,1-1	3,06	2,64	0,86	0.00	
BKN-0,1-2	2,95	2,78	0,94	0,90	
BKN-0,2-1	3,88	3,58	0,92	0.00	
BKN-0,2-2	3,83	3,39	0,89	0,90	
BKNN-0,1-1	2,57	2,26	0,88	0.02	
BKNN-0,1-2	2,67	2,54	0,95	0,92	
BKNN-0,2-1	3,16	2,92	0,92	0.02	
BKNN-0,2-2	3,04	2,85	0,94	0,93	
BKZK-0,1-1	2,92	2,63	0,90	0.00	
BKZK-0,1-2	3,25	2,91	0,90	0,90	
BKZK-0,2-1	3,12	2,82	0,90	0.01	
BKZK-0,2-2	3,06	2,78	0,91	0,91	
BKZKN-0,1-1	2,75	2,63	0,96	0.00	
BKZKN-0,1-2	2,98	2,54	0,85	0,90	
BKZKN-0,2-1	3,31	3,01	0,91	0,91	
BKZK-0,2-2	3,36	3,06	0,91		
BKZSB-0,1-1	3,26	3,01	0,92	-	
BKZSB-0,2-1	3,47	3,20	0,92	-	
BKZSBN-0,1-1	2,94	2,64	0,90	-	
BKZSBN-0,2-1	3,47	3,20	0,92	_	

padku murów z wypełnionymi spoinami pionowymi nie stwierdzono wpływu na zarysowanie i zniszczenie modeli poziomego sprężenia wywołującego naprężenie 0,1 N/mm². Przy większym sprężeniu spadek naprężeń rysujących i niszczących wyniósł ok. 20%. W wypadku murów z niewypełnionymi spoinami pionowymi wartość naprężeń rysujących mury zbrojone odpowiadała mniej więcej wartości naprężeń niszczących mury bez zbrojenia (w zależności od wielkości naprężeń poziomych wzrost rysoodporności wynosił ok. 8 i 6%). Natomiast wzrost naprężeń



Rys. 4. Wykres zależności naprężenie pionowe σ_y – naprężenie poziome σ_x z naniesionymi wartościami naprężeń rysujących i niszczących uzyskanych z badań murów niezbrojonych

Fig. 4. Graph of vertical stress – horizontal stress marked values of crack stress and destructive stress obtained from research unreinforced masonry

Rys. 3. Zależności σ-ε badanych serii murów: a) niezbrojonych z wypełnionymi spoinami pionowymi; b) niezbrojonych z niewypełnionymi spoinami pionowymi; c) ze zbrojeniem typu kratowniczka i wypełnionymi spoinami pionowymi; d) ze zbrojeniem typu kratowniczka i niewypełnionymi spoinami pionowymi; e) ze zbrojeniem w postaci siatki bazaltowej i wypełnionymi spoinami pionowymi, f) ze zbrojeniem w postaci siatki bazaltowej i niewypełnionymi spoinami pionowymi

Fig. 3. σ - ε dependencies of tested wall series: a) non-reinforced with filled prepend joints;, b) non-reinforced with nonfilled prepend joints; c) reinforced with trusses with filled prepend joints; d) reinforced with trusses with nonfilled prepend joints; e) reinforced with basaltic mesh with filled prepend joints, f) reinforced with basaltic mesh with nonfilled prepend joints



Rys. 5. Wykresy zależności $\sigma_y - \sigma_x z$ naniesionymi wartościami naprężeń rysujących i niszczących uzyskanych z badań murów niezbrojonych i zbrojonych: a) kratowniczkami z wypełnionymi spoinami czołowymi; b) kratowniczkami z niewypełnionymi spoinami czołowymi; c) siatką bazaltową z wypełnionymi spoinami czołowymi; d) siatką bazaltową z wypełnionymi spoinami czołowymi

Fig 5. Graph of vertical stress – horizontal stress obtained from tests of unreinforced and reinforced masonry: a) non-reinforced with filled prepend joints; b) non-reinforced with nonfilled prepend joints; c) reinforced with trusses with filled prepend joints; d) reinforced with trusses with nonfilled prepend joints; e) reinforced with basaltic mesh with filled prepend joints; f) reinforced with nonfilled prepend joints

niszczących wynosił odpowiednio ok. 9 i 7%. W wypadku murów zbrojonych siatkami bazaltowymi z wypełnionymi spoinami pionowymi nie stwierdzono wpływu na zarysowanie i zniszczenie modeli przy poziomym sprężeniu wywołującym naprężenie 0,1 N/mm2. Wzrost nośności i rysoodporności po zastosowaniu zbrojenia wynosił ok. 10%. Przy większym sprężeniu odnotowano ok. 10% spadek naprężeń rysujących i niszczących. W wypadku murów z niewypełnionymi spoinami pionowymi wartość naprężeń rysujących mury zbrojone odpowiadała mniej więcej wartości naprężeń niszczących mury bez zbrojenia (w zależności od wielkości naprężeń poziomych zwiększenie rysoodporności wynosiło ok. 10 i 11%). Wzrost naprężeń niszczących wynosił natomiast ok. 12%.

Analizując uzyskane wyniki stwierdzono, że zastosowanie zbrojenia pozytywnie wpływa na nośność i rysoodporność muru, ale wpływ ten jest niewielki i wynosi ok. 10%. Podobny wpływ uzyskuje się przez wypełnienie spoin czołowych zaprawą, a przy dużych wartościach naprężeń poziomych wypełnienie spoin zaprawą powoduje nawet ponad 20% wzrost naprężeń rysujących i niszczących. W murach z wypełnionymi spoinami pionowymi i zbrojeniem układanym w spoinach wspornych, przy dużych wartościach naprężeń poziomych, w zależności od typu zastosowanego zbrojenia, odnotowano spadki nośności i poziomu naprężeń rysujących o ok. 20 i 10%. We wszystkich badanych murach zbrojenie ograniczyło propagację rys i zmniejszyło ich rozwarcie.

Wnioski

Przedstawione badania wykazały pozytywny wpływ zbrojenia na zabezpieczanie ścian strefy podokiennej przed powstaniem zarysowań. Analiza wyników badań pozwala jednak przypuszczać, że zbrojenie takie nie jest zawsze potrzebne. Średni poziom naprężeń, przy których następowało zarysowanie modeli niezbrojonych, to 90% naprężeń niszczących te modele. Nośność muru sprawdza się na wartościach obliczeniowych. Ponieważ częściowe współczynniki bezpieczeństwa oddziaływań wynoszą najczęściej 1,35 ÷ 1,5, a współczynnik częściowy wytrzymałości muru 1,7 ÷ 2,5, to rzeczywisty poziom analizowanych obliczeniowo naprężeń jest znacznie mniejszy od uzyskiwanych w badaniach. Można wysnuć wniosek, że przy poprawnie sprawdzonym obliczeniowo filarku międzyokiennym o szerokości jednego elementu zarysowanie strefy podokiennej nie

powinno wystąpić. Należy jednak pamiętać, że zarysowanie strefy podokiennej może wynikać nie tylko z obciążeń pionowych, ale również z wpływów reologicznych (skurcz materiału, odkształcenia termiczne). Najczęściej zarysowania są wynikiem kombinacji kilku czynników. Zastosowanie zbrojenia powinno zatem wpłynąć pozytywnie na strefę podokienną i należy je stosować przy dużych wytężeniach filarków międzyokiennych, gdy materiał cechuje się dużym skurczem i nie planuje się docieplać ścian. Przeprowadzone badania pozwoliły ponadto na sformułowanie następującego ważnego wniosku: zastosowanie zbrojenia spoin wspornych w strefie podokiennej znacznie ogranicza propagację rys i wpływa na zmniejszenie ich rozwarcia.

Literatura

[1] Drobiec Łukasz, Jan Kubica. 2002. "Influence of Some Types of Bed Joint Reinforcement on Mechanical Properties of Masonry Under Compression". *Proceedings of the British Masonry Society. Published by the Society Stoke-on-Trent* (9): 99 – 104.

[2] Drobiec Łukasz. 2004. "Analiza murów z cegły pełnej ze zbrojeniem w spoinach wspornych poddanych obciążeniom pionowym". *Praca doktorska*. Gliwice.

[3] Drobiec Łukasz. 2013. "Przeciwdziałanie zarysowaniu ściskanych murów zbrojeniem spoin wspornych". *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Seria Monografie nr 452*, Gliwice.

[4] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. "Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ściskaniu". *Materiały Budowlane* 512 (4): 3 – 7. DOI: 10.15199/33.2015.05.02.

[5] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. "Wpływ rodzaju zbrojenia na parametry mechaniczne ściskanego muru z betonu komórkowego". *Materiały Budowlane* 520 (12): 58 – 60. DOI: 10.15199/33.2015.12.18.

[6] Drobiec Łukasz. 2016. "Ograniczenie zarysowania strefy podokiennej muru z silikatów". *Materiały Budowlane* 524 (4): 82 – 86. DOI: 10.15199/33.2016.04.21.

[7] Jäger Wolfram, Łukasz Drobiec. 2006. "Mauerwerk mit Lagerfugenbewehrung unter zentrischer Druckbeanspruchung". *Mauerwerk* (6): 252–257.

[8] Murauer Thomas. 2006. "Edelstahl im zweischaligen Mauerwerk – Sicherheit im Hintergrund". *Mauerwerk* (6): 230 – 234.

[9] Ohler A., N. Göpfert. 1982, "The effect of lateral joint reinforcement on the strength and deformation of brickwork piers". *Proceedings of the 6th International Brick/Block Masonry Conference*. Rome, 677 – 687.

[10] Schubert Peter. 2004, "Mauerwerk. Risse vermeiden und instandsetzen". *Fraunhofer IRB Verlag*. Stuttgart.

Autor dziękuje firmie Solbet za wsparcie i przekazanie materiałów do badań.

Przyjęto do druku: 22.06.2016 r.