

dr inż. Adam Piekarczyk¹⁾
 ORCID: 0000-0002-5790-9560

Zginanie muru w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany – wytrzymałość na zginanie

Masonry bending in a plane perpendicular to the wall surface – flexural strength

DOI: 10.15199/33.2021.03.05

Streszczenie. Artykuł jest drugą częścią cyklu omawiającego przypadek zginania ścian murowanych w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni muru. Przedstawiono informacje teoretyczne dotyczące wytrzymałości na zginanie określonej w dwóch ortogonalnych płaszczyznach, w tym w przypadku uwzględnienia wypełnienia i niewypełnienia spoin pionowych w murze wraz z odpowiednimi zależnościami. Podano również sposoby określania wytrzymałości na zginanie, w tym tzw. wytrzymałości zastępczej uwzględniającej czynniki pozytywnie wpływające na obliczeniową nośność muru zginanego.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe; zginanie muru; mechanizmy zniszczenia muru zginanego; wytrzymałość na zginanie muru.

Abstract. The article is the second part of the series discussing the case of masonry bent in a plane perpendicular to the wall plane. This section presents theoretical information on the flexural strength determined in two orthogonal planes, including the filling and unfilling of vertical joints in the wall, along with the appropriate relationships. Methods of determining the flexural strength, including the so-called apparent strengths, taking into account factors positively influencing the design load-bearing capacity of a bending wall, are also given.

Keywords: masonry structures; bending masonry; failure mechanisms of a bent masonry wall; masonry flexural strength.

W [1] analizowano przypadek murów zginanych z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami pionowymi. Jeżeli spoiny pionowe nie są wypełnione zaprawą, to zakłada się, że naprężenia nie zostają przekazane między powierzchniami czołowymi elementów murowych. O wytrzymałości muru na zginanie może wówczas decydować wytrzymałość na zginanie elementów murowych f_{bx} (rysunek 1a). W związku z tym, że przez spoiny pionowe nie zostają przekazane naprężenia σ_x wywołane momentem zginającym m_x , są one przenoszone przez co drugą warstwę elementów murowych. W tej sytuacji dochodzi do zniszczenia w postaci rysy przebiegającej przez elementy murowe i spoiny pionowe, a wytrzymałość na zginanie $f_{x2,a,uf}$ jest równa połowie wytrzymałości na zginanie elementów murowych:

$$f_{x2,a,uf} = 0,5f_{bx} \quad (1)$$

O wytrzymałości na zginanie w przypadku rozpatrywanego położenia płaszczyzny zginania może również decy-

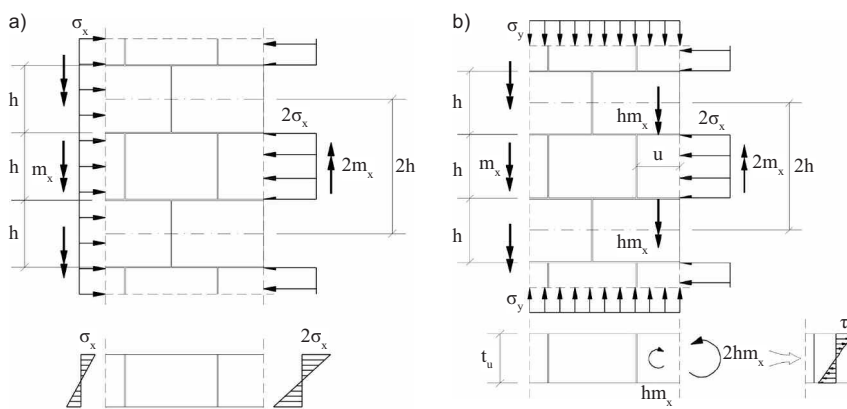
wać dopuszczalne naprężenie styczne τ_u , występujące w spoinie wspornej, a przede wszystkim na styku zaprawy z elementem murowym

$$\tau_u = c + \mu\sigma_y \quad (2)$$

gdzie:

c – kohezja w spoinie wspornej, utożsamiana z wytrzymałością początkową, czyli określoną w sytuacji, gdy nie występują naprężenia ścisające σ_y prostopadłe do płaszczyzny spoiny wspornej;

μ – współczynnik tarcia.



Rys. 1. Schemat obciążenia i naprężenia w murze zginanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny spoin wspornych, z niewypełnionymi spoinami pionowymi, gdy o wytrzymałości na zginanie decyduje: a) wytrzymałość na zginanie elementów murowych; b) wytrzymałość spoiny na ścinanie (skręcanie) wg [1]

Fig. 1. Scheme of load and stress in a masonry wall bent in a plane perpendicular to the plane of the bed joints, with unfilled vertical joints, when the flexural strength is determined by: a) flexural strength of the masonry units; b) shear (torsional) strength of the bed joints according to [1]

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; adam.piekarczyk@polsl.pl

nowych. Miarodajną obliczeniowo wytrzymałością na zginanie muru z niewypełnionymi spoinami pionowymi w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny spoin wspornych jest mniejsza z wartości $f_{x2,a,uf}$ i $f_{x2,b,uf}$

W przypadku wypełnionych spoin pionowych możliwe jest przekazywanie naprężenia ściskającego i stycznego przez pionowe powierzchnie czołowe (w przedstawionym modelu Manna [1] nie uwzględnia się przekazywania naprężenia rozciągającego w spoinie czołowej). Można zatem rozważać strefę ściskaną przekroju zginanego o szerokości $2h$ i wysokości x oraz strefę rozciąganą o szerokości h i wysokości $x - t_u$ występującą w elemencie murowym, co pokazano na rysunku 2a.

Warunki równowagi z uwagi na sumę rzutów wypadkowych sił w przekroju ($Z = D$) są spełnione, gdy wysokość strefy ściskanej $x = 0,4142t_u$, a ponadto

$$\sigma_t = \sqrt{2}\sigma_c = \sqrt{2}(3,62 \cdot 2m_x)/(ht_u^2) = (5,12 \cdot 2m_x)/(ht_u^2) = f_{bx} \quad (4)$$

gdzie:

σ_c – naprężenie ściskające w przekroju zginanym;
 m_x – moment zginający na jednostkę wysokości muru;

t_u – grubość muru.

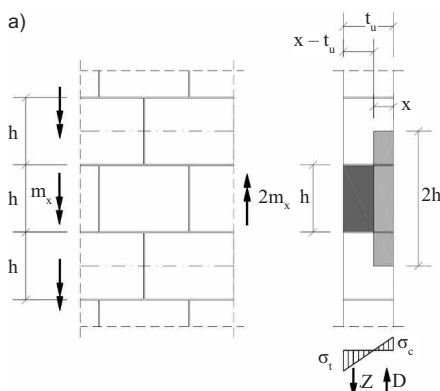
Wartość maksymalnego naprężenia rozciągającego w murze z niewypełnionymi spoinami czołowymi, jest równa:

$$\sigma_x = 6m_x/ht_u^2 = f_{bx} \quad (5)$$

a wytrzymałość na zginanie muru ze spoinami wypełnionymi

$$f_{x2,a,f} = (6/2 \cdot 5,12) f_{x2,a,uf} = 0,586f_{bx} \quad (6)$$

a)



W przypadku zarysowania przebiegającego przez wypełnione spoiny pionowe i spoiny wsporne zakłada się, że naprężenie ściskające przenoszone jest na sąsiednie elementy murowe przez spoiny pionowe, natomiast naprężenia rozciągające tylko przez spoiny wsporne. W tej sytuacji o zniszczeniu decyduje dopuszczalne naprężenie styczneg τ_u wyrażone wzorem (2). Analizując schemat pokazany na rysunku 2b oraz zakładając, że:

$$\tau_u = (c + \mu\sigma_y) = N_t/ut_u + 6 M_t/ut_u^2 \quad (7)$$

$$Z = D = 3m_x h/t_u = 0,5thf_{x2,b,f} \quad (8)$$

$$T = 0,5\mu Z + 0,4142hc \quad (9)$$

$$N_t = 0,5Z \quad (10)$$

$$M_t = 0,1542tZ - 0,5Tu \quad (11)$$

gdzie:

N_t – siła podłużna w płaszczyźnie spoiny wspornej;

M_t – moment skręcający w płaszczyźnie spoiny wspornej;

$Z = D$ – siły wypadkowe w ściskanej i rozciąganej części przekroju zginanego;

T – siła poprzeczna w ściskanej części spoiny pionowej.

Po przekształceniach uzyskuje się wyrażenie na wytrzymałość na zginanie:

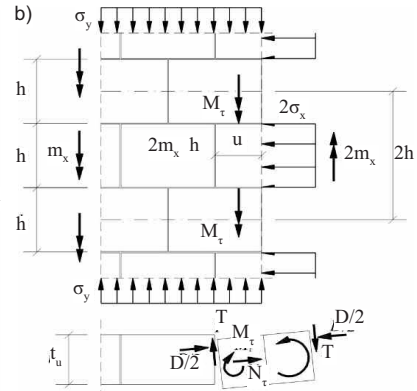
$$f_{x2,b,f} = \frac{c + \mu\sigma_y + 1,24\bar{c} \frac{h}{t} \frac{u}{h}}{0,71 - \mu \frac{u}{t}} \quad (12)$$

gdzie:

\bar{c} – kohezja w spoinach pionowych, zwykle $\bar{c} < c$.

Wartością miarodajną jest mniejsza z wytrzymałości $f_{x2,a,f}$ i $f_{x2,b,f}$

b)



Rys. 2. Schemat obciążenia i naprężenia w murze zginanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny spoin wspornych, z wypełnionymi spoinami pionowymi, gdy o wytrzymałości na zginanie decyduje: a) wytrzymałość na zginanie elementów murowych; b) wytrzymałość spoiny na ścinanie (skręcanie) wg [1]

Fig. 2. Scheme of load and stress distribution in a masonry wall bent in a plane perpendicular to the plane of the bed joints, with filled vertical joints, when the flexural strength is determined by: a) flexural strength of masonry units; b) shear (torsional) strength of the bed joints according to [1]

Wytrzymałość na zginanie muru zgodnie z normami europejskimi

Zgodnie z Eurokodem 6 [2] **wytrzymałość charakterystyczną muru na zginanie f_{xk1} i f_{xk2} należy określać na podstawie wyników badań elementów próbnych**. Mogą być one rezultatem badań przeprowadzonych w przypadku określonego przedsięwzięcia lub pochodzić z bazy danych zawierającej wyniki badań muru zginanego w przypadku odpowiednich kombinacji elementów murowych i zaprawy. Jeżeli projektant nie dysponuje wynikami badań, to odpowiednio wartości może przyjąć z tabelic w Załączniku Krajowym lub punkcie 3.6.4 (3) normy [2]. Należy podkreślić, że w Załączniku Krajowym wytrzymałość na zginanie f_{xk1} muru z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego z cienkimi spoinami określono jako 3,5% wytrzymałości na ściskanie. Oznacza to, że nie przewidziano mechanizmu zniszczenia polegającego na zerwaniu przyczepności między zaprawą i elementami murowymi. W punkcie 3.6.4 (3) normy [2] i draftu [3] oprócz ograniczenia f_{xk1} do $0,035f_b$ podano jeszcze wartość $0,15 \text{ N/mm}^2$. Podobny problem istnieje w przypadku wytrzymałości f_{xk2} , gdzie w Załączniku Krajowym jest ona uzależniona od wytrzymałości elementów murowych i nie dopuszcza się wystąpienia mechanizmu zniszczenia rysą przebiegającą tylko przez spoiny. W normach [2, 3] podano dodatkowo wartość $0,20 \text{ N/mm}^2$. Wytrzymałość na zginanie f_{xk2} podawana przez normy nie zależy od wartości naprężenia ściskającego normalnego do płaszczyzny spoin wspornych σ_y , które uwzględnia się w modelu zniszczenia muru zginanego – wzory (3) i (12).

W normie PN-EN 1996-1-1 [2] wprowadza się pojęcie obliczeniowej zastępczej wytrzymałości na zginanie. W przypadku rozważanego zniszczenia muru zginanego w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych wprowadza się obliczeniową wytrzymałość zastępczą $f_{xd1,app}$, która uwzględnia pozytywny wpływ naprężenia ściskającego σ_y (σ_d) prostopadłego do płaszczyzny spoin wspornych. **Wytrzymałość zastępczą $f_{xd1,app}$ oblicza się ze wzoru:**

$$f_{xd1,app} = f_{xd1} + \sigma_d \quad (13)$$

gdzie:

f_{xd1} – obliczeniowa wytrzymałość muru na zginanie w płaszczyźnie zniszczenia równoległej do spoin wspornych;

σ_d – naprężenie ściskające wyznaczone w przypadku obciążeń obliczeniowych na górnej powierzchni ściany o wartości nie większej niż $0,15 N_{Rd}$, przy czym N_{Rd} to obliczeniowa nośność ściany z uwagi na siłę podłużną.

Warunek ograniczający wartość naprężeń σ_d zapisany w normie [2] jest błędny. Został on skorygowany w drafcie prEN 1996-1-1 [3] i tam zapisany jako $0,15 N_{Rd}/A$. Ponadto w [3] znalazł się zapis, że wartość naprężenia σ_d należy określać nie na górnej powierzchni ściany, lecz w przekroju, w którym wyznacza się $f_{xd1,app}$.

Wytrzymałość zastępczą na zginanie można również określić, zgodnie z aktualną normą [2], gdy rozważane jest zniszczenie w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych muru ze zbrojeniem układanym w spoinach wspornych, skoncentrowanym w przekroju. Wówczas wyznacza się obliczeniową wytrzymałość zastępczą $f_{xd2,app}$, porównując obliczeniową nośność muru ze zbrojeniem rozciągającym skoncentrowanym w przekroju zginanym z nośnością muru niezbrojonego o wytrzymałości na zginanie równej $f_{xd2,app}$ i o tej samej grubości t.

Nośność na zginanie muru niezbrojonego o jednostkowej wysokości przyjmuje się zgodnie ze wzorem (14)

$$M_{Rd} = f_{xd2,app} Z = f_{xd2,app} t^2/6 \quad (14)$$

gdzie:

Z – sprężysty wskaźnik zginania na jednostkę wysokości ściany.

Nośność na zginanie muru ze zbrojeniem skoncentrowanym w spoinach wspornych można obliczyć ze wzoru

$$M_{Rd} = F_s z = A_s f_{yd} z \quad (15)$$

gdzie:

A_s – sumaryczne pole powierzchni, skoncentrowanego w przekroju spoin wspornych zbrojenia na wysokości jednego metra;

f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności stali zbrojeniowej;

z – ramię sił wewnętrznych w przekroju zginanym.

Porównując wzory (14) i (15), można określić wartość obliczeniowej wytrzymałości zastępczej na zginanie w postaci zależności:

$$f_{xd2,app} = 6 A_s f_{yd} z / t^2 \quad (16)$$

Normy serii PN-EN 771 [4 ÷ 7] w przypadku murów wykonanych z elementów z betonu kruszywowego, autoklawizowanego betonu komórkowego oraz kamienia naturalnego i sztucznego zalecają deklarowanie tzw. wytrzymałości spoiny na zginanie na podstawie badań wykonywanych zgodnie z normą PN-EN 1052-2 [8].

Zdziwienie może budzić fakt, że w przypadku muru wykonanego z siliikatowych lub ceramicznych elementów murowych wymaga się jedynie deklarowania tzw. wytrzymałości spoiny na ścinanie. Czy takie konstrukcje murowe nie mogą być zginane w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny muru?

Przykładowo, w normie [5] dotyczącej wymagań stawianych elementom murowym z autoklawizowanego betonu komórkowego stwierdza się, że deklaracja wytrzymałości spoiny na zginanie powinna zawierać wytrzymałość charakterystyczną na zginanie muru albo w płaszczyźnie prostopadłej do spoiny poziomej, albo w płaszczyźnie równoległej do spoiny poziomej, albo obu wraz ze specyfikacją zaprawy, której deklaracja dotyczy. Zapis ten oznacza, że można zadeklarować tylko jedną wytrzymałość na zginanie, co z inżynierskiego punktu widzenia jest niewystarczające. Rzadko mamy bowiem do czynienia tylko z jednokierunkowym płytowym zginaniem ścian murowanych. Wątpliwości budzić może również nazwa deklarowanego parametru. Jak wykazano, jedyny mechanizm zniszczenia, który można utożsamiać z „wytrzymałością spoiny na zginanie”, to zerwanie przyczepności między elementami murowymi i zaprawą w przypadku zniszczenia w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych. W pozostałych

przypadkach zniszczenia muru obciążonego prostopadle do swojej powierzchni, o wytrzymałości na zginanie decyduje wytrzymałość na zginanie elementów murowych lub „wytrzymałość spoiny na ścinanie”.

Przyczepność z uwagi na rozciąganie (zginanie) między elementami murowymi a zaprawą w spoinach wspornych można również określać eksperymentalnie na podstawie badań zgodnie z normą PN-EN 1052-5 [9]. Choć wydaje się, że uzyskana w ten sposób przyczepność powinna odpowiadać wytrzymałości na zginanie muru w płaszczyźnie zniszczenia równoległej do spoin wspornych f_{x1} , to taka zgodność jest raczej teoretyczna, głównie ze względu na efekt skali stosowanych w badaniach elementów badawczych.

Literatura

- [1] Mann W. 1991. Tensile and Flexural Strength of Masonry. Theoretical basis and Comparison with Test Results, Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin 13-16 October 1991, Vol. 3, pp 1292-1301.
- [2] PN-EN 1996-1-1 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [3] prEN 1996-1-1: 2020 Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- [4] PN-EN 771-3 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 3: Elementy murowe z betonu kruszywowego (z kruszywami zwykłymi i lekkimi).
- [5] PN-EN 771-4 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.
- [6] PN-EN 771-5 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 5: Elementy murowe z kamienia sztucznego.
- [7] PN-EN 771-6 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 6: Elementy murowe z kamienia naturalnego.
- [8] PN-EN 1052-2 Metody badań murów. Część 2: Określanie wytrzymałości na zginanie.
- [9] PN-EN 1052-5 Metody badań murów. Część 5: Określanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu metodą skręcania w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny i przy zniszczeniu w spoinie wspornej.

Przyjęto do druku: 28.01.2021 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl

