

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

Zginanie muru w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany – obciążenia i mechanizmy zniszczenia

Masonry bending in a plane perpendicular to the wall surface – actions and failure mechanisms

DOI: 10.15199/33.2021.02.03

Streszczenie. Artykuł jest pierwszą częścią cyklu omawiającego przypadek ścian murowanych zginanych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny muru. Opisano w nim obciążenia prostopadłe do powierzchni ścian, które wywołują omawiany przypadek pracy konstrukcji murowanej. Zaprezentowano mechanizmy zniszczenia muru w dwóch ortogonalnych płaszczyznach oraz ich warianty.

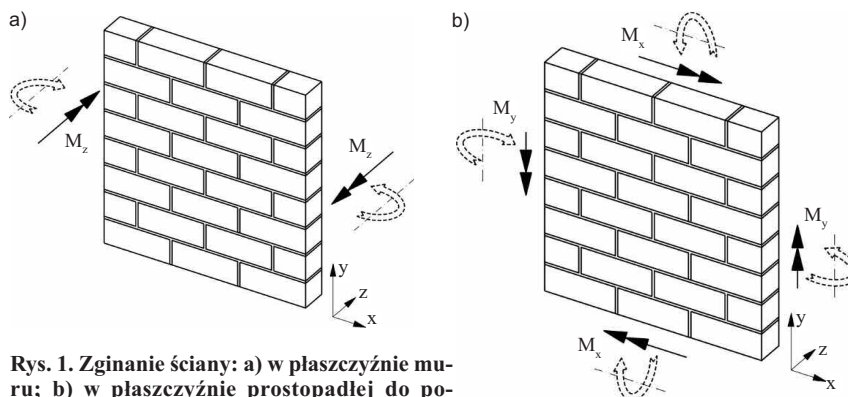
Słowa kluczowe: konstrukcje murowe; zginanie muru; mechanizmy zniszczenia muru zginanego; wytrzymałość na zginanie muru.

Abstract. The article is the first part of the cycle discussing the case of bending masonry walls in a plane perpendicular to the masonry plane. Loads and actions perpendicular to the wall surfaces, which cause the discussed case of masonry structure work, are described. The mechanisms of wall failure in two orthogonal planes and their variants were presented.

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

Przypadek zginania w płaszczyźnie ściany nazywamy często zginaniem tarczowym lub w płaszczyźnie prostopadłej do swojej powierzchni i wówczas możemy mówić o zginaniu płytowym. Podczas zginania tarczowego płaszczyzna oddziaływania momentu zginającego (pary sił) jest równoległa do powierzchni ściany lub w ujęciu wektorowym, kierunek wektora momentu zginającego jest prostopadły do powierzchni ściany. Na rysunku 1a jest to wektor momentu skierowany wzdłuż osi z.

W przypadku zginania płytowego wektory momentów zginających są równoległe do kierunków osi układu współrzędnych wyznaczających płaszczyznę ściany – na rysunku 1b to wektory momentów równoległe do osi x i y. W zależności od sposobu podparcia ścian i proporcji długości boków konstrukcja może być poddana oddziaływaniu jednego z momentów M_x , M_y lub obu momentów jednocześnie. Artykuł dotyczy drugiego przypadku, czyli zginania w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany.



Rys. 1. Zginanie ściany: a) w płaszczyźnie muru; b) w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany

Fig. 1. Wall bending: a) in-plane; b) out-of-plane

Obciążenia

Momenty zginające oddziałujące w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany murowanej wywołane są przez powierzchniowe, liniowe lub skupione obciążenia poziome, gdy kierunek obciążenia lub składowej obciążenia jest prostopadły do ściany. Obciążenia tego rodzaju ścian są zwykle oddziaływaniami zmiennymi o charakterze długotrwałym, w części długotrwałym lub krótkotrwałym. Ściany murowane mogą być również poddane obciążeniom wyjątkowym. Do obciążeń zmiennych długotrwałych zaliczyć należy obciążenie parciem grun-

tu w przypadku ścian zagłębionych w gruncie, np. ścian piwnic lub murowanych konstrukcji oporowych. W niektórych przypadkach parcie gruntu należy również rozpatrywać łącznie z naporem wody gruntowej. W zamkniętych lub otwartych konstrukcjach murowanych pełniących funkcję magazynów, ściany obciążone są parciem składowanych w nich materiałów. Ciężar objętościowy i kąt tarcia wewnętrznego materiałów składowanych podano w normie PN-EN 1991-1-1 [2].

Obciążenia poziome w części długotrwałe wynikają z obciążenia ludźmi i wyposażeniem. Są to obciążenia linio-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; Adam.Piekarczyk@polsl.pl

we oddziałujące na ściany działowe lub ograniczające na wysokości nie większej niż 1,2 m. Przedział i wartości zalecane tych obciążeń w zależności od kategorii użytkowania w przypadku pomieszczeń mieszkalnych, socjalnych, handlowych, administracyjnych oraz produkcyjnych i składowania, czyli kategorii od A do E podano w normie [2]. W przypadku kategorii użytkowania F i G, czyli garaży i przestrzeni ruchu pojazdów, określa się siłę poziomą wynikającą z uderzenia pojazdu, którą rozkłada się na dowolnym odcinku ściany o długości 1,5 m na wysokości zderzaka pojazdu.

Obciążenie wiatrem jest najczęściej występującym poziomym obciążeniem zmiennym krótkotrwałym. Najbardziej obciążone są zwykle ściany zewnętrzne najwyższych kondygnacji budynków. Profil zmiany prędkości średniej wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem terenu opisywany jest zwykle zależnością logarymiczną lub potęgowa. Zgodnie z Załącznikiem krajowym do normy PN-EN 1991-1-4 [3], wartość szczytowa ciśnienia prędkości na wysokości 30 m może być o 40–80% większa od wartości ciśnienia oddziałującego na najniższe części budynku, w zależności od kategorii terenu, na którym obiekt jest usytuowany.

Do obciążeń zmiennych o charakterze krótkotrwałym zaliczyć można również oddziaływanie termiczne. Różnica temperatury powierzchni ściany murowanej ciągłej nad podporami prowadzi do powstania momentów zginających. Ich wartość zależy, poza różnicą temperatury, od grubości ściany, współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz sztywności giętej przekroju. Obciążenia termiczne, poza oddziaływaniem temperatury pożarowej, mogą być wywołane nasłonecznieniem powierzchni ścian zewnętrznych, skutkiem procesów technologicznych w budynkach przemysłowych lub ogrzewaniem wewnętrznych powierzchni ścian przez zainstalowane w ich pobliżu źródła ciepła, np. centralnego ogrzewania. W PN-EN 1991-1-5 [4] przedstawiono metody określania składowych obciążenia temperaturą.

Zginanie w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ściany powodują też obciążenia wyjątkowe, do których można zaliczyć uderzenia pojazdów w przypadku, gdy ściany murowane nie stanowią części konstrukcji garaży, parkingów i przestrzeni ruchu pojazdów. Zgodnie z PN-EN 1999-1-7 [5] obciążenie spowodowane uderzeniem wyznacza się na podstawie analizy dynamicznej lub jako reprezentowane przez równoważną siłę statyczną. Podobny charakter mają także obciążenia wyjątkowe wynikające z uderzenia wózka widłowego. Inne obciążenia o charakterze mechanicznym są zwykle trudne do przewidzenia i w praktyce nieuwzględniane. Innym obciążeniem wyjątkowym, które może być uwzględnione przez projektanta, jest gwałtowne zwiększenie ciśnienia wewnętrznego spowodowane wybuchem. Fala uderzeniowa wywołuje w czasie wybuchu parcie skierowane na zewnątrz od centrum wybuchu oddziałujące na stropy i ściany. Efekty wybuchu powinny być uwzględniane przy projektowaniu elementów konstrukcji w pomieszczeniach spalania, przechowywania, transportowania lub przetwarzania gazu, składowania gazów wybuchowych oraz substancji powstających na skutek parowania płynów [8]. Ściany należy projektować z uwzględnieniem wybuchu w przypadku klas konsekwencji zniszczenia CC2 i CC3 zdefiniowanych w PN-EN 1990 [6]. Do sytuacji wyjątkowej należy również oddziaływanie pożaru. W tym przypadku zginanie w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ścian murowanych

może być spowodowane gradientem temperatury w ścianie ogrzewanej jednostronnie oraz odkształceniami termicznymi elementów sąsiadujących, np. wydłużeniem elementów stropów [1].

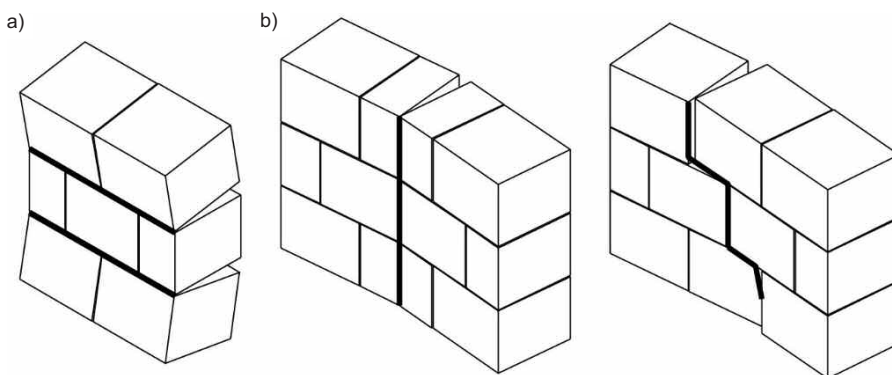
Mechanizmy zniszczenia

W zależności od orientacji płaszczyzny, w której dojdzie do zniszczenia muru obciążonego prostopadłe do jego powierzchni wyróżnia się dwa przypadki (rysunek 2). W pierwszym (rysunek 2a) do zniszczenia dochodzi w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych muru. W PN-EN 1996-1-1 [7] z tym mechanizmem zniszczenia powiązana jest wytrzymałość na zginanie oznaczona symbolem f_{xk1} . Zasadniczo wiąże się ona z trzema możliwymi formami zniszczenia:

- **adhezyjnym** w płaszczyźnie styku elementu murowego i zaprawy, na skutek przekroczenia naprężeń przyczepności ze względu na rozciąganie (fotografia 1a);

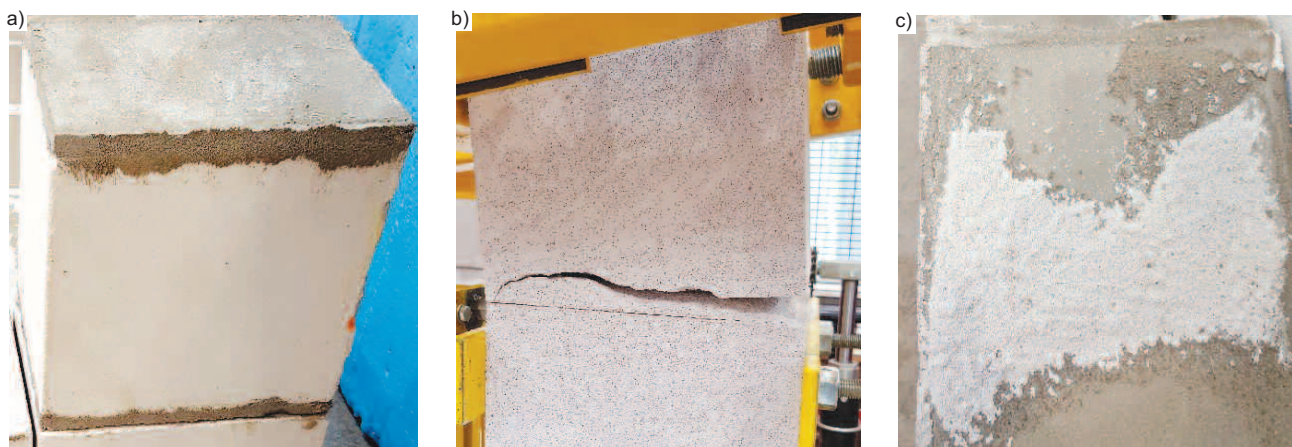
- **kohezyjnym** polegającym na zniszczeniu elementu murowego. W tej sytuacji przekroczona jest wytrzymałość na zginanie elementu murowego (fotografia 1b), która jest mniejsza niż przyczepność między zaprawą i elementami murowymi. Najmniej prawdopodobne, w zasadzie hipotetycznie możliwe tylko w przypadku muru ze spoinami normalnej grubości, jest zniszczenie kohezyjne przebiegające w płaszczyźnie zaprawy w spoinie wspornej;

- **o charakterze mieszanym**; na fotografii 1c widoczna jest powierzchnia zniszczenia badanych zginanych ele-



Rys. 2. Mechanizm zniszczenia muru obciążonego prostopadłe do jego powierzchni, gdy do wyczerpania nośności dochodzi w płaszczyźnie: a) równoległej; b) prostopadłej do płaszczyzny spoin wspornych

Fig. 2. The failure mechanism of a wall loaded perpendicular to its surface, when the plane of failure is: a) parallel; b) perpendicular to the plane of the bed joints



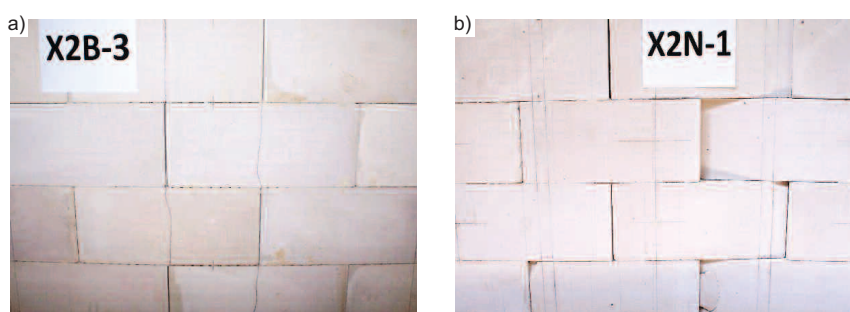
Fot 1. Formy zniszczenia muru zginanego w przypadku płaszczyzny zniszczenia równoległej do spoin wspornych: a) w płaszczyźnie styku elementów murowych i zaprawy; b) przekroczenie wytrzymałości na rozciąganie elementu murowego; c) zniszczenie mieszane na skutek przekroczenia przyczepności oraz wytrzymałości na rozciąganie elementu murowego

Photo 1. Failure of bending masonry when the plane of failure is parallel to the bed joints: a) in the contact plane of the masonry units and mortar; b) exceeding the tensile strength of the masonry units; c) mixed failure due to exceeding the adhesion and tensile strength of the masonry units

mentów próbnych z cienkimi spoinami, która częściowo przebiega na styku zaprawy i elementów murowych, natomiast na pozostałym obszarze przekroczona została wytrzymałość na rozciąganie materiału elementu murowego.

W drugim przypadku płaszczyzna zniszczenia jest prostopadła do płaszczyzny spoin wspornych (rysunek 2b). W tej sytuacji wytrzymałość charakterystyczna na zginanie muru, zgodnie z normą [8], oznaczona jest jako f_{xk2} . Wyróżnić można dwa mechanizmy. W pierwszym płaszczyzna zniszczenia przebiega przez elementy murowe i spoiny pionowe (fotografia 2a), natomiast drugi mechanizm polega na zniszczeniu w postaci rysy przebiegającej przez spoiny wsporne i spoiny pionowe (fotografia 2b). W przypadku zniszczenia w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych o wytrzymałości muru na zginanie decyduje zatem wytrzymałość elementów murowych na zginanie lub dopuszczalna wartość naprężenia stycznego w płaszczyźnie kontaktu elementów murowych i zaprawy w spoinach wspornych.

W praktyce zdarza się często, że wszystkie wymienione mechanizmy



Fot 2. Zniszczenie muru zginanego w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych przebiegające przez: a) elementy murowe i spoiny pionowe; b) spoiny wsporne i spoiny pionowe

Photo 2. Failure of bending masonry when the plane of failure is perpendicular to the bed joints and runs through: a) masonry units and vertical joints; b) bed and vertical joints

zniszczenia występują jednocześnie w pojedynczej ścianie murowanej obciążonej prostopadłe do swojej powierzchni. Może to mieć miejsce przede wszystkim w przypadku ścian zginanych podpartych na trzech i czterech krawędziach. Więcej informacji na ten temat zostanie przedstawionych w kolejnych artykułach.

Literatura

- [1] Małyszko L., R. Orłowicz. 2000. *Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy*. Olsztyn. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.
- [2] PN-EN 1991-1-1 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.

- [3] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- [4] PN-EN 1991-1-5 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- [5] PN-EN 1991-1-7 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-7: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wyjątkowe.
- [6] PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [7] PN-EN 1996-1-1 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [8] Rawska-Skotniczy A. 2013. *Obciążenia budynków i konstrukcji budowlanych według Eurokodów*. Warszawa. Wydawnictwo Naukowe PWN.

Przyjęto do druku: 28.01.2021 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl

