

dr inż. Radosław Jasiński¹⁾

Tarczowe modele zarysowania i zniszczenia ścian ścinanych

Panel models of cracking and destruction of the shear walls

DOI: 10.15199/33.2015.04.04

Streszczenie. Artykuł rozpoczyna cykl kilku publikacji dotyczących zagadnień związanych ze ścinaniem w konstrukcjach murowych. Omówiono kompleksowy tarczowy model zniszczenia ściany scharakteryzowany przez zróżnicowane mechanizmy zniszczenia ściany: ściskanie w narożnych strefach muru, ukośne rozciąganie, ścinanie zaprawy w spoinach wspornych. Atutem tarczowych modeli jest przewidywanie mechanizmu zniszczenia ściany umożliwiające skuteczne zastosowanie wzmocnień lub zmiany schematu statycznego.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, ściany murowe, ściany usztywniające, ścinanie, kryteria zniszczenia, tarczowy model, Eurokod 6.

Abstract. Article begins a series of several publications on issues related to the shear in masonry structures. As a preliminary discussed complex panel model characterized by the destruction of the walls of different mechanisms to destroy the wall: rocking, diagonal cracking, sliding shear. The advantage of panel models is the ability to predict the destruction mechanism for the effective use of wall reinforcements or change the static scheme.

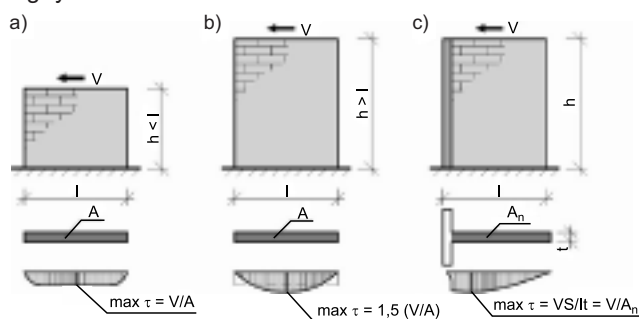
Keywords: masonry structures, masonry walls, stiffening wall, shear, failure criteria, panel model, Eurocode 6.

Ścinanie występuje w zginanych w płaszczyźnie elementach belkowych oraz we wszystkich ścianach nośnych, które przejmują obciążenia pionowe i poziome, a także w ścianach usztywniających, skonstruowanych *stricto* pod kątem zapewnienia sztywności oraz geometrycznej niezmienności ustroju. Stałe dążenie producentów materiałów do zmniejszania grubości ścian, niewielka wytrzymałość muru na ścinanie i rozciąganie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie powoduje, że uszkodzenia powstają znacznie częściej i mogą mieć duży wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji. Niestety postęp w technologii materiałowej znacznie wyprzedził wiedzę projektantów konstrukcji dotyczącą obliczeniowego sprawdzenia warunków stanu granicznego nośności tego typu konstrukcji. Aby zrekompenzować wyraźnie widoczny brak publikacji z tej dziedziny, przedstawię w cyklu trzech artykułów przegląd najciekawszych metod sprawdzania nośności niezbrojonych ścian ścinanych. W tym artykule omówię model tarczowy, następnie prętowe modele nośności granicznej, które można z powodzeniem wykorzystać w pracach badawczo-eksperymentalnych, a na zakończenie autorską propozycję metody sprawdzania warunków ULS wg Eurokodu 6 [1, 2].

Opis modelu

Rozkład naprężeń w poprzecznym przekroju ściany obciążonej w płaszczyźnie zdeterminowany jest proporcjami wysokości h do długości ściany l . Przy pewnym stosunku wysokości h do rozpiętości l nie obowiązuje hipoteza płaskich przekrojów Bernoulliego. Graniczne proporcje wymiarów ściany, przy których rozkład naprężeń normalnych w przekroju nie jest liniowy, wynoszą $h/l > 0,3 - 0,4$. W związku z tym obliczenia muszą być wykonane metodami wg klasycznej teorii sprężystości, częściej jednak wykorzystuje się metody numeryczne. W praktyce stosuje się pewne uproszczenia

umożliwiające określenie stanu naprężenia i bezpieczne obliczanie nośności tego typu elementów tarczowych, m.in. w przepisach niemieckich, u podstaw których leżą rozwiązania Manna [3, 4, 5, 6], uwzględniające zróżnicowanie sposobu zniszczenia muru ścinanego. Przyjmuje się, że w wypadku ścian o przekroju prostokątnym i teowym, przy proporcjach wymiarów $h/l > 1,0$, rozkład naprężeń normalnych jest liniowy, a naprężeń stycznych paraboliczny o wartościach, które można wyznaczyć, jak w ustrojach prętowych. W ścianach krępych o $h/l < 1,0$ można się posługiwać w przypadku naprężeń normalnych klasycznymi metodami teorii sprężystości, natomiast maksymalne naprężenia styczne obliczać wg rysunku 1.



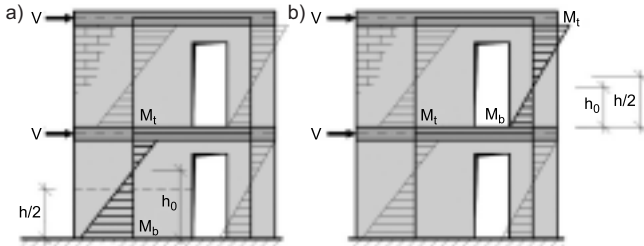
Rys. 1. Rozkład naprężeń stycznych w ścianach wspornikowych o różnych proporcjach wymiarów h/l wg [3, 4, 5, 6]

Fig. 1. Shear stress distribution in the cantilever wall with varying proportions of dimensions h/l acc. to [3, 4, 5, 6]

Pomijając pierwsze modele zniszczenia ścian przedstawione m.in. w [7], na szczególną uwagę zasługuje analiza nośności ścian przedstawiona przez Petrovčiča i Kilara w pracy [8]. Autorzy słusznie założyli, że zarysowanie, a w konsekwencji zniszczenie ściany, zainicjowane zostaje w miejscu, w którym długość strefy ściskanej jest najmniejsza, czyli w miejscu, gdzie moment zginający jest największy. Przy liniowym rozkładzie momentów zginających w ścianie (rysunek 2), gdy punkt zerowych momentów oddalony

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
e-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl

jest o więcej niż $h_0 \geq h/2$ od dolnej podstawy, moment na dolnej krawędzi ściany jest większy od momentu na górnej krawędzi ściany. W przeciwnym wypadku, kiedy $h_0 < h/2$, moment przy górnej krawędzi jest znacznie większy niż na dole ściany.



Rys. 2. Rozkład momentów zginających w ścianach spowodowanych poziomym obciążeniem [8]: a) $h_0 \geq h/2$ i $M_b \geq M_t$; b) $h_0 < h/2$ i $M_b < M_t$

Fig. 2. Distribution of bending moments in the walls due to horizontal load acc. to [8]: a) $h_0 \geq h/2$ i $M_b \geq M_t$; b) $h_0 < h/2$ i $M_b < M_t$

Pomijając wytrzymałość na rozciąganie muru w kierunku prostopadłym do spoin wspornych i dodatkowo zakładając liniowy rozkład naprężeń normalnych w płaszczyźnie spoin wspornych, długość strefy ściskanej w miejscu największego momentu zginającego wynosi:

$$l' = 3 \left[\left(\frac{1}{2} \right) - (Vh_0/Pl) \right] \cdot l = \eta l \quad (1)$$

Wprowadzając tzw. wskaźnik ścinania (shear ratio) α_v w postaci:

$$\alpha_v = M/VI = Vh_0/VI = h_0/l = \psi' h_0/l \quad (2)$$

i oznaczając przez $\sigma_c = P/l$ minimalną siłę ścinającą powodującą zniszczenie muru rysami biegnącymi w spoinach wspornych i czołowych, nośność na ścinanie V_{Rs} oblicza się ze wzoru:

$$V_{Rs} = [(1,5f_{vo} + tg\alpha\sigma_c)/(1+3f_{vo}\alpha_v l \sigma_c)] \cdot lt \quad (3)$$

Wykorzystując model zniszczenia ściany zaproponowany przez Bosiljkova, Page, Bokan-Bosiljkova i Žarnića [9], bazujący na kryterium głównych naprężeń rozciągających i ściskających przy zginaniu oraz kryterium Turnšeka [10] przy ścinaniu, maksymalną poziomą siłę określono jako minimum z warunku zniszczenia ze względu na:

- ściskanie w narożnych strefach muru (rocking) V_r ;
- ukośne rozciąganie (diagonal cracking) V_d ;
- ścinanie zaprawy w spoinach wspornych (shear sliding) V_s .

$$V_u = \min(V_r; V_d; V_s) \quad (4)$$

Poszczególne składniki kryterium (4), tworzące powierzchnię graniczną FMI (Failure Mode Interaction), autorzy zapisali w postaci wzorów:

$$V_r = (\sigma_c/2\alpha_v)[1 - (\sigma_c/kf_c)]lt \quad (5)$$

$$V_d = (f/f_t) [\sqrt{1 + (\sigma_c/f_t)}]lt \quad (6)$$

$$V_{Rs} = [(f_t + tg\alpha\sigma_c)/(1 + 3\tau_o\alpha_v l \sigma_c)]lt \quad (7)$$

gdzie:

- $\sigma_c = N/l$ – pionowe naprężenia ściskające;
- $\lambda = h/l$ – smukłość ściany;
- f – wytrzymałość na ściskanie muru;
- $f_t = 1,5\tau_o$ – wytrzymałość na rozciąganie (ukośne) muru;
- $\tau_o = \zeta f_o$ – początkowa wytrzymałość na ścinanie muru (kohezja);
- $\zeta \in [0,01; 0,1]$ – współczynnik kohezji;
- $tg\alpha \in [0,01; 0,1]$ – współczynnik tarcia zaprawy w spoinie wspornej;
- $\kappa = 0,85$ – współczynnik redukujący wartość naprężeń ściskających w miejscach lokalnych docisków;
- α_v/λ – wskaźnik ścinania;
- $\alpha_o = h_0/h$ gdy $h_0 \geq h/2$, $\alpha_o = 1 - h_0/h$ gdy $h_0 < h/2$ – współczynnik zależny od położenia miejsca zerowego momentu zginającego w ścianie;

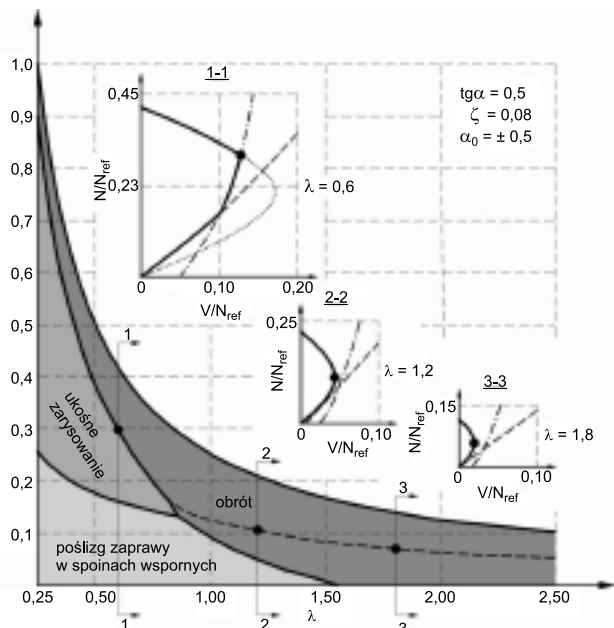
$$\beta = \begin{cases} 1,5 & \text{gdy } \lambda > 1,5 \\ \lambda & \text{gdy } 1,0 \leq \lambda \leq 1,5 \\ 1,0 & \text{gdy } \lambda < 1,0 \end{cases} \quad \text{– współczynnik uwzględniający rozkład naprężeń ścinających w środku wysokości ściany}$$

Wyniki symulacji

Na rysunku 3 przedstawiono kontury znormalizowanej powierzchni FMI, podając wartości sił ściskających odniesione do nośności muru na osiowe ściskanie N/N_{ref} w zależności od smukłości muru $\lambda = 0,25 - 2,5$. Siłę N_{ref} wyznaczono z uwzględnieniem redukcji wytrzymałości na ściskanie oraz smukłości muru

$$N_{ref} = \kappa f_c l t = \kappa f_c l t (h/h) = (\kappa f_c t h)/\lambda \quad (8)$$

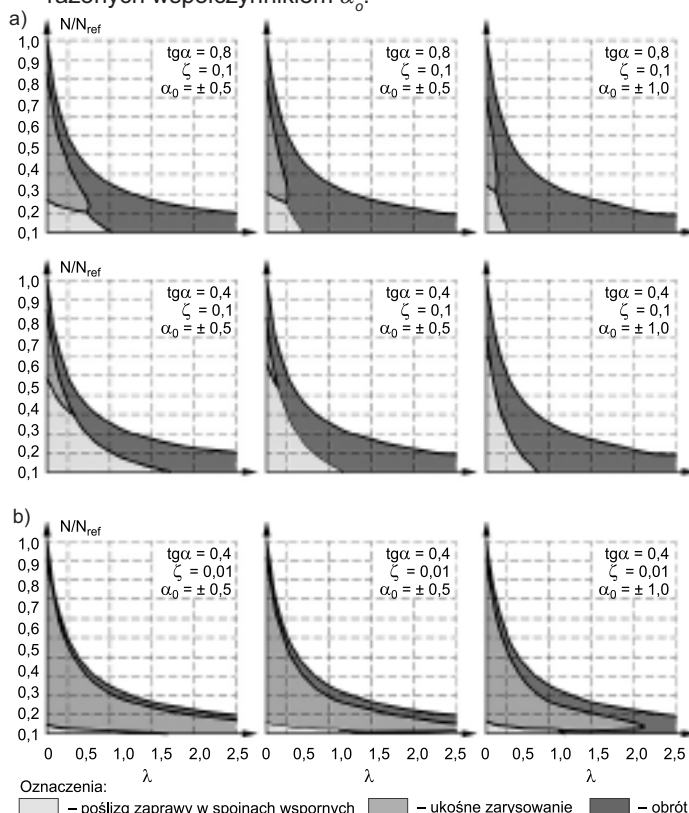
Współrzędne powierzchni granicznej wyznaczono, przyjmując współczynnik tarcia zaprawy w spoinach wspornych $\mu = 0,5$, współczynnik kohezji $\zeta = 0,08$ oraz $\alpha_o = \pm 0,5$. Przy smukłości muru $\lambda = 0,6; 1,2$ i $1,8$ wykonano przekroje przez powierzchnię i określono wartości N/N_{ref} w funkcji znormalizowanej nośności na ścinanie V/N_{ref} . Na rysunku 3 zaznaczono obszary, w których występują różne mechanizmy zniszczenia muru oraz lokalne ekstrema nośności ściany. Granice obszarów określono na podstawie wykonanych przekrojów poprzecznych przez powierzchnię graniczną, w których wyznaczono minimalne nośności muru na ścinanie przy różnych wartościach V/N_{ref} . Na wykresie wyróżnić można trzy obszary zróżnicowane pod względem sposobu zniszczenia, zależnie od smukłości. W tym konkretnym przypadku zniszczenie, spowodowane przez ściskanie przy obrocie (rocking), zaistnieć może przy każdym stosunku h/l , przy czym w ścianach o dużej smukłości $\lambda > 1,5$ zniszczenie występuje przy niewielkich obciążeniach poziomych. Przy smukłości mniejszej wystąpić mogą także mechanizmy zniszczenia związane z zarysowaniem elementów mурowych (diagonal cracking) i zaprawy oraz poślizgiem zaprawy w spoinach wspornych (sliding). Przykładowo w ścianie krępej przy smukłości $\lambda = 0,6$, przy wzroście naprężeń ściskających, ekstremum nośności występuje przy $N/N_{ref} = 0,3$,



Rys. 3. Powierzchnia graniczna FMI wg [8]

Fig. 3. Failure surface FMI (Failure Mode Interaction) acc. to [8]

a zniszczenie muru następuje przez ukośne zarysowanie lub ściskanie. W ścianach smukłych, gdy smukłość wynosi $\lambda = 1,2$, przy niewielkim stosunku $N/N_{ref} = 0,1$ zniszczenie związane jest z obrotem muru i lokalnych docisków. Wystąpić mogą jednak jeszcze ukośne zarysowania w spoinach wspornych. Przy smukłości muru $\lambda = 1,5$ obserwuje się wyłącznie zniszczenie ze względu na ściskanie wywołane obrotem ściany. Na rysunku 4 przedstawiono symulację obliczeniową nośności ścian ścinanych poziomo w zależności od położenia miejsca zerowych momentów zginających, wyrażonych współczynnikiem α_o .



Rys. 4. Powierzchnia graniczna FMI w zależności od wartości współczynnika α_o .
Fig. 4. Failure surface FMI according to the values of the α_o coefficient

Przy pełnym zamocowaniu ściany, tzn. gdy przy $\alpha_o = \pm 0,5$ i położeniu miejsca zerowych momentów zginających w połowie wysokości ściany, przy stosunkowo dużej wartości współczynnika tarcia 0,8 i początkowej wytrzymałości na ścinanie $0,1f_c$ oraz przy smukłości rzędu 1,0, spodziewać się można zniszczenia wywołanego tylko obrotem i zmiążdżeniem muru. Wraz ze zmniejszeniem współczynnika tarcia do 0,4 graniczna smukłość zwiększa się do 1,5. Natomiast dziesięciokrotne zmniejszenie kohezji powoduje, że dominującym zniszczeniem będzie ukośne zarysowanie elementów. Kiedy położenie miejsca zerowego momentów zginających znajduje się bliżej dolnej lub górnej krawędzi, czyli przy $\alpha_o = \pm 0,75$, a współczynnik tarcia oraz kohezja są równe odpowiednio $\mu = 0,8$, $\tau_o = 0,1f_c$, to smukłość, przy której występuje zniszczenie spowodowane obrotem ściany, wynosi 0,75. Graniczna smukłość występowania zróżnicowanych uszkodzeń jest w tym wypadku równa 0,5. Zmniejszenie współczynnika tarcia o połowę (do wartości 0,4)

powoduje, że graniczna smukłość wzrasta do 1,2, a przy dziesięciokrotnym zmniejszeniu kohezji dominować będzie zniszczenie przez ukośne zarysowanie elementów mурowych. W zasadzie sytuacja nie zmienia się istotnie, kiedy $\alpha_o = \pm 1,00$, tzn. gdy ściana pracuje w schemacie wspornikowym. Widoczne jest zmniejszenie granicznej smukłości do $\lambda = 0,5$, gdy o zniszczeniu decyduje docisk muru do wieńców wywołany obrotem ściany. Natomiast przy zmniejszeniu współczynnika tarcia o połowę nie występuje mechanizm zniszczenia wywołany ukośnym zarysowaniem ściany, tylko poślizg zaprawy w spoinie wspornej. Dziesięciokrotne zmniejszenie kohezji sprawia, że oprócz dominującego zniszczenia, którym w tej sytuacji jest także ukośne zarysowanie, wystąpić może obrót ściany, ale przy większej smukłości równej $\lambda = 2,0$.

Podsumowanie

Zaproponowany model zniszczenia, a właściwie jego poszczególnych składników opisujących różne schematy zniszczenia, weryfikowano eksperymentalnie, uzyskując zadowalające rezultaty (porównanie wyników badań można znaleźć w dokumencie źródłowym [9] lub w pracy [7]). Mankamentem przedstawionego modelu oraz pozostałych modeli tarczowych jest linearyzacja rozkładów naprężeń normalnych, co nie wyklucza wcale możliwości ich stosowania po odpowiedniej eksperymentalnej walidacji. Natomiast niewątpliwym atutem jest możliwość predykcji mechanizmu zniszczenia ściany, co w wypadku przekroczenia warunków ULS pozwala na skuteczne zastosowanie wzmocnień lub zmiany schematu statycznego. Poprawne rozpoznanie mechanizmu zniszczenia ścian w warunkach in situ może umożliwić projektantowi lub rzeczoznawcy znalezienie przyczyn uszkodzeń i właściwie zareagować.

Literatura

- [1] PN-EN 1996-1-1:2010/AC 2009 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji mурowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji mурowych.
- [2] PN-EN 1996-3:2010/AC 2009 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji mурowych – Część 3: Uproszczone metody obliczania mурowych konstrukcji niezbrojonych.
- [3] Mann W., Müller H.: Bruchkriterien für Querkraftbeanspruchtes Mauerwerk und ihre Anwendung auf Gemauerte Windscheiben. Die Bautechnik. No. 12, 1973, s. 421 + 425.
- [4] Mann W., Müller H.: Failure of Shear-Stressed Masonry-An Enlarged Theory, Tests And Application to Shear Walls. Proceedings of The British Ceramic Society, No. 30, 1982, s. 223 + 235.
- [5] Mann W., Müller H.: Schubtragfähigkeit von Gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen Windnachweises. Mauerwerk-Kalender 1985, s. 95 + 113.
- [6] Müller H.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Querkraftbeanspruchtem Mauerwerk. Bruchverhalten und Bruchtheorie, Auswertung bekannter Sherversuche, Zusätzliche Einflüsse bei Windscheiben. Dissertation, Technischen Hochschule Darmstadt, D17, Darmstadt, 1974.
- [7] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Konstrukcje mурowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom. II. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2014.
- [8] Petrović S., Kilar V.: Seismic failure mode interaction for the equivalent frame modeling of unreinforced masonry structures. Engineering Structures, Vol. 54, 2013, str. 9–22.
- [9] Bosiljkov V., Page A., Bokan-Bosiljkov V., Žarnić R.: Performance Based Studies of In-plane Loaded Unreinforced Masonry Walls. Masonry International. Vol. 16, No. 2, 2003, str. 39-50.
- [10] Turnšek V., Čačovič F.: Some experimental results on the arial of trick walls. Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference. Stoke-on-Trent 1971. str. 149-156.

Otrzymano 12.03.2015 r.