

NOŚNOŚĆ ŚCIAN I FILARÓW MUROWYCH W BUDYNKACH ISTNIEJĄCYCH – WYKORZYSTANIE BADAŃ NIENISZCZĄCYCH I MAŁONISZCZĄCYCH W ANALIZIE ZAGADNIENIA

PIOTR MATYSEK, *e-mail: pmatysek@tlen.pl*
Politechnika Krakowska

Streszczenie: W artykule przedstawiono metody badań, które mogą być stosowane w procesie oceny nośności ścian i filarów stanowiących główne elementy konstrukcji istniejących budynków murowych. Ze względu na wartość historyczną niektórych tego typu obiektów preferowane są nieniszczące (NDT) i mało-niszczące (MDT) metody badań. W artykule podano wyniki badań murów in-situ oraz wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych na oryginalnych materiałach historycznych. Wskazano zakresy stosowalności poszczególnych metod NDT i MDT. Szczególną uwagę zwrócono na metodę badań opartą na wykorzystaniu próbek rdzeniowych pobieranych ze ścian i filarów murowych. Podano wytyczne, które mogą być wykorzystane w praktyce przez inżynierów i rzeczoznawców przy opracowywaniu programów badań oraz ich prowadzeniu. Wykonanie badań murów w odpowiednim zakresie ma istotne znaczenie w analizach awarii budynków murowych.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące i mało-niszczące murów, ściany i filary murowe

1. Wprowadzenie

Ocena nośności ścian i filarów murowych w budynkach istniejących, w tym o charakterze zabytkowym, jest w wielu przypadkach podstawowym zagadnieniem w analizach stanu technicznego budynków.

Nośność ścian i filarów zależy od wielu czynników związanych z geometrią konstrukcji murowej, ze sposobem połączenia murów z innymi elementami budynku oraz z rodzajem zastosowanych materiałów i jakością wykonania murów. Wpływ na aktualną nośność ściany czy filara mają również ew. uszkodzenia i nieciągłości struktury muru powstałe w trakcie użytkowania (rysy, pęknięcia, pustki, rozwarstwienia), a także stan zawilgocenia muru i uszkodzenia korozyjne warstw powierzchniowych.

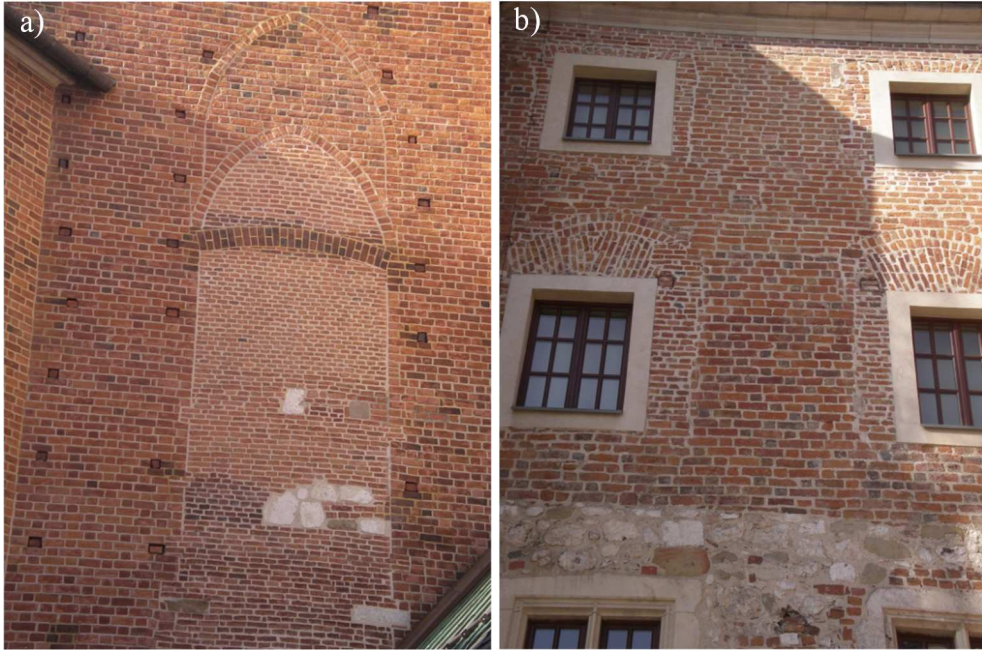
Charakterystyczną cechą konstrukcji użytkowanych od kilkudziesięciu, czy kilkuset lat jest znaczna niejednorodność materiałów i struktury muru nawet w obrębie tej samej ściany rys. 1. Wynika to z przeprowadzanych w przeszłości zmian i napraw konstrukcji obejmujących na przykład zmianę układu otworów okiennych i drzwiowych w ścianach, domurowania ścian wzmacniających pierwotną konstrukcję, przemurowania fragmentów murów uszkodzonych na skutek sytuacji wyjątkowych. Zmiany te niejednokrotnie nie są widoczne gołym okiem na skutek zasłonięcia lica muru wtórnymi warstwami wypraw tynkarskich i innymi materiałami wykończeniowymi.

Ocena konstrukcji polegająca jedynie na jej powierzchniowym przeglądzie, bez wykonania odpowiednich badań, jest niewystarczająca i może prowadzić do przeszacowania nośności ścian i filarów a w ślad za tym do sytuacji awaryjnych.

W istniejącej konstrukcji murowej użytkowanej od kilkuset lat nie wszystkie zjawiska i parametry można zdiagnozować. Stosując odpowiedni zakres badań i właściwie interpretując ich wyniki można jednak wielokrotnie zmniejszyć błąd w ocenie nośności ścian i filarów

murowych. Prowadzenie badań materiałów murowych umożliwia również dobór odpowiednich technologii konserwacji i napraw murów.

W odróżnieniu od konstrukcji betonowych, brak jest w Polsce zaleceń normowych podających metody i procedury badawcze w zakresie oceny parametrów materiałów murowych i murów w konstrukcjach istniejących.



Rys. 1. Przykłady zróżnicowania materiałów i struktur murowych w ścianach obiektów historycznych

W zagadnieniach oceny nośności podstawowe znaczenie ma właściwe określenie geometrii ściany lub filara, wytrzymałości na ściskanie, odkształcalności oraz ew. uszkodzeń lub niejednorodności struktury murów. Tym zagadnieniom poświęcono niniejszy artykuł.

2. Badania wstępne

Badania wstępne powinny obejmować: analizę istniejącej dokumentacji technicznej w tym kweryndę materiałów archiwalnych oraz wstępny przegląd konstrukcji połączony z identyfikacją widocznych uszkodzeń i miejsc budzących wątpliwości z uwagi na stan techniczny. Wynikiem badań wstępnych powinno być stworzenie dokumentacji (fotograficznej, ew. rysunkowej), która umożliwi dyskusję nad programem badań koniecznym do realizacji zakładanych celów ekspertyzy technicznej. W przypadku obiektów o złym stanie technicznym, zagrażających bezpieczeństwu, już na etapie badań wstępnych podejmuje się decyzję o tymczasowym zabezpieczeniu konstrukcji budynku. Tymczasowe zabezpieczenia mają na celu niedopuszczenie do awarii konstrukcji oraz muszą umożliwiać bezpieczne przeprowadzenie badań diagnostycznych. Często jako uzupełnienie badań wstępnych wykonuje się pilotażowe badania odkrywkowe oraz wstępne obliczenia przy wykorzystaniu uproszczonych modeli konstrukcji. Dzięki tym działaniom możliwe jest zdiagnozowanie miejsc najbardziej niebezpiecznych, na które powinna zostać zwrócona szczególna uwaga w trakcie badań obiektu.

Program badań wynika z analizy rezultatów badań wstępnych oraz planowanych prac modernizacyjnych i remontowych w budynku. Opracowanie programu badań murów powinno być wynikiem dyskusji prowadzonych przy udziale rzeczoznawcy opracowującego ekspertyzę techniczną, inwestora, projektantów, przedstawicieli służb konserwatorskich i innych specjalistów, którzy będą brali udział w procesie inwestycyjnym. W programie należy określić zakres badań ustalający metody badawcze, czas oraz miejsca prowadzenia badań in-situ ew. miejsca pobierania próbek do badań laboratoryjnych.

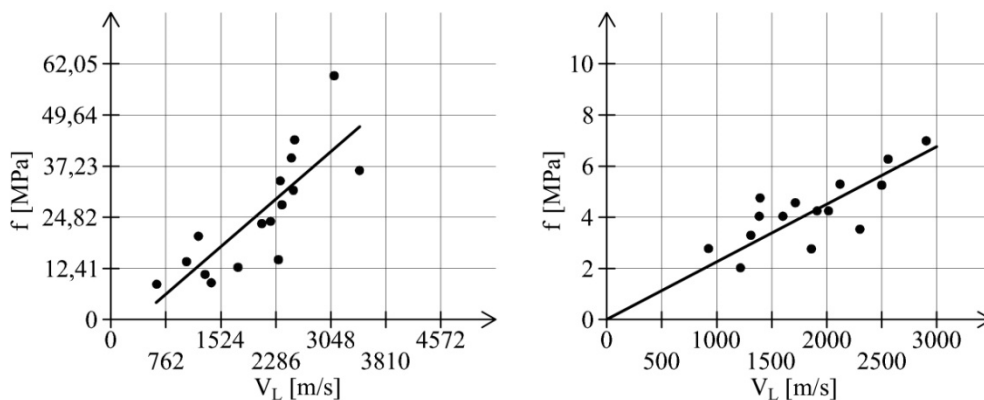
Ze względu na specyfikę konstrukcji historycznych oraz ograniczony zakres badań wstępnych, program ten może ulegać zmianom i modyfikacjom. Badania uzupełniające mogą być konieczne nawet na etapie prowadzenia prac budowlanych, kiedy okaże się, że lokalnie parametry konstrukcji odbiegają od parametrów założonych przy określaniu jej nośności. Dlatego konieczna jest stała współpraca rzeczoznawcy, projektantów i wykonawców inwestycji w okresie prowadzenia robót budowlanych.

3. Badania nieniszczące murów

W diagnostyce konstrukcji murowych stosowanych jest wiele metod nieniszczących wykorzystujących zaawansowane narzędzia diagnostyczne. Literatura przedmiotu w tym zakresie, zwłaszcza zagraniczna, jest bardzo szeroka [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Poniżej przedstawione zostaną nieniszczące metody badawcze, które są najczęściej stosowane w diagnostyce murów, pomocne, zdaniem autora, w ocenie nośności konstrukcji.

Do oceny parametrów geometrycznych ścian i filarów oraz inwentaryzacji wątków i uszkodzeń murów bardzo przydatna jest metoda skaningu laserowego 3D. Pomiaru tą metodą umożliwiają określenie deformacji płaszczyzn ścian (mapy warstwiczne), co ma podstawowe znaczenie w budowie wiarygodnych modeli obliczeniowych konstrukcji oraz ew. dopasowaniu koniecznych wzmocnień konstrukcji. Skaningu laserowego 3D powinien być podstawową metodą dokumentacji geometrii aktualnego stanu budynku. Wadą tej metody są koszty badań znacząco przekraczające koszty standardowych pomiarów inwentaryzacyjnych, co powoduje, że metoda skaningu laserowego jest stosowana głównie do obiektów o dużej wartości historycznej.

W diagnostyce konstrukcji murowych przydatne są również badania wykonywane aparaturą ultradźwiękową. Podejmowane były próby ustalenia wytrzymałości muru (f) na podstawie pomiaru prędkości przepływu fali ultradźwiękowej podłużnej przez materiał (V_L). Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań w tym zakresie.



Rys. 2. Zależność wytrzymałość na ściskanie murów (f) vs. prędkość przepływu fali ultradźwiękowej (V_L), od lewej odpowiednio dla murów ze współczesnych materiałów [2], dla murów historycznych [3]

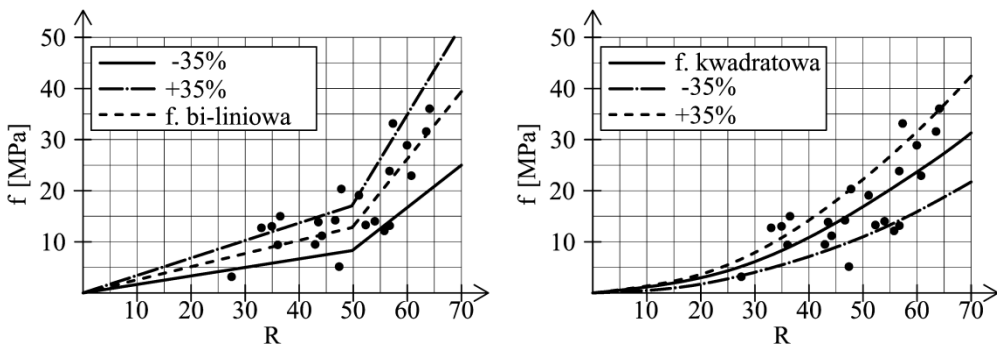
Generalnie dla murów charakteryzujących się większą wytrzymałością na ściskanie uzyskuje się większe prędkości przepływu fali, chociaż należy zaznaczyć, że rozrzuty wyników są bardzo duże. Na rejestrowaną prędkość przepływu fali wpływa wiele czynników związanych zarówno z rodzajem zastosowanych materiałów, strukturą muru, jakością jego wykonania, wilgotnością, stopniem degradacji warstw powierzchniowych. W przypadku analizowanej konstrukcji murowej konieczne jest opracowanie indywidualnych zależności korelacyjnych, co niezmiernie poszerza zakres badań i wpływa na ograniczone zastosowanie w praktyce tej metody do bezpośredniej oceny wytrzymałości muru.

Większe możliwości dają pomiary metodą ultradźwiękową przy ocenie wytrzymałości cegieł, kamieni i zaprawy w murach [4, 5, 6]. Należy jednak zaznaczyć, że pomiary te dotyczą głównie materiałów w warstwach powierzchniowych murów, których właściwości mogą nie być miarodajne dla warstw wewnętrznych konstrukcji.

Metoda ultradźwiękowa może być natomiast z dużym powodzeniem wykorzystywana do określenia grubości muru, jednorodności jego struktury, identyfikacji budowy warstwowej, obecności w masywie elementów stalowych lub drewnianych. Za pomocą ultradźwięków badać można również nieciągłości w strukturze muru, takie jak wewnętrzne rysy i pęknięcia, rozspojenia, a także pustki i kawerny. Są to niezwykle istotne informacje świadczące o lokalnym osłabieniu muru i lokalnym obniżeniu nośności ścian lub filarów.

Przydatne do identyfikacji materiałów w licu i wewnątrz struktury muru a także jego uszkodzeń są również metody wykorzystujące pomiary kamerą termowizyjną i georadarem. Dzięki ich zastosowaniu możliwa jest w konsekwencji redukcja zakresu badań odkrywkowych.

Podjęwane są również próby wykorzystania do badań murów metody sklerometrycznej [7, 8, 9, 10]. Badania z wykorzystaniem sklerometru (młotka Schmidta) są tanie i łatwe do prowadzenia. Opracowano specjalne typy młotków dedykowane konstrukcjom murowym – na przykład młotki typu PM do badań zapraw w spoinach muru. Najczęściej próbuje się wykorzystać młotki typu N stosowane do badań betonów. Badania prowadzi się na ceglach w murze rejestrując liczby odbicia (R). Na rys. 3 przedstawiono zależności $f(R)$ podane w zaleceniach UIC [11] umożliwiające określenie wytrzymałości na ściskanie muru (f) na podstawie odczytu liczby odbicia na ceglach.



Rys. 3. Zależności $f(R)$ dla murów na zaprawach cementowo-wapiennych i cementowych podane w zaleceniach UIC [11]

Podane zależności dotyczą murów na zaprawach cementowo-wapiennych i cementowych. Podobnie jak dla badań ultradźwiękowych rozrzut wyników jest bardzo duży a błąd w ocenie wytrzymałości na ściskanie muru może sięgać ponad 40%. Jeszcze większe błędy można popełnić stosując zależności podane w [11] do oceny wytrzymałości murów na słabych zaprawach wapiennych.

Bardziej miarodajne wyniki uzyskać można na podstawie badań sklerometrycznych w zakresie oceny wytrzymałości cegieł, kamieni i zapraw, z których wykonano konstrukcję murową pod warunkiem jednak, że jednocześnie przeprowadzone zostaną badania niszczące materiałów (na przykład na próbkach rdzeniowych) umożliwiające kalibrację funkcji $f(R)$. Posługiwanie się funkcją korelacji ustaloną w badaniach sklerometrycznych cegieł współczesnych może powodować przeszacowanie wytrzymałości cegieł historycznych o 100% [6].

Jeżeli nie prowadzi się badań zmierzających do ustalenia indywidualnych dla danego rodzaju cegieł historycznych funkcji korelacji, to na podstawie liczb odbicia można jedynie oszacować jednorodność cegieł w strefach powierzchniowych murów, co może stanowić jeden z etapów dalszych badań.

Istotnych informacji na temat aktualnego stanu technicznego materiałów murowych dostarczają badania chemiczne. Najczęściej badania dotyczą określenia stopnia zasolenia murów wynikającego z obecności siarczanów, chlorków i azotanów. Wysoki poziom zasolenia murów skutkuje degradacją struktury cegieł, kamienia oraz zapraw i może mieć istotny wpływ na analizowaną nośność konstrukcji.

Obniżenie wytrzymałości materiałów murowych silnie zasolonych jest szczególnie wyraźne w konstrukcjach podlegających w dłuższym okresie czasu silnemu zawilgoceniu. Pomocne w analizie wpływu zawilgocenia i zasolenia na stan techniczny konstrukcji murowej jest wykonanie dokumentacji (map inwentaryzacyjnych) z oznaczeniem rejonów i miejsc silnie zawilgoconych i zasolonych.

4. Badania małoniszczące

Zgodnie z [11] badania na próbkach rdzeniowych wyciętych z konstrukcji dają najbardziej wiarygodne wyniki przy określaniu właściwości materiałów murowych i murów. Szersze stosowanie tego typu badań jest możliwe dzięki obserwowanemu w ostatnim dziesięcioleciu rozwojowi narzędzi i technik wykonywania odwiertów. Aktualnie przy zastosowaniu specjalistycznego sprzętu możliwe jest pobieranie próbek różnych średnic.

Ze względów konserwatorskich w budynkach o znacznej wartości historycznej dopuszczalne jest pobieranie jedynie odwiertów małych średnic. Najczęściej w badaniach cegieł, kamienia i zapraw wykorzystuje się odwierty rdzeniowe o średnicy od 30 do 50 mm [6, 8]. Wykonanie odwiertu o większej długości pozwala na przygotowanie do badań wytrzymałościowych także próbek materiałów budujących warstwy wewnętrzne muru. Zastosowanie videoskopu umożliwia natomiast inwentaryzację wewnętrznej struktury ściany lub filara.

Dobór średnicy odwiertu zależy od struktury materiałów. Na przykład w ceglach historycznych i niektórych rodzajach elementów kamiennych występują liczne ziarna i wtrącenia o wymiarach przekraczających niejednokrotnie 20 mm. W takich przypadkach preferowane są odwierty o średnicy 50 mm. Odwierty z muru o średnicy 50 mm umożliwiają również przygotowanie próbek zapraw do badań metodą double-punch test. Stanowiska do badań wytrzymałościowych materiałów murowych przedstawiono na rys. 4.

Wyników badań prowadzonych jak podano na rys. 4 nie można utożsamiać z wytrzymałością określaną zgodnie z obowiązującymi normami [12, 13].

Z tego powodu zastosowanie wzorów do określania wytrzymałości muru na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy wymaga przeliczenia wyników badań materiałów murowych z uwzględnieniem odpowiednich współczynników. Wytyczne w tym zakresie przedstawiono w pracy [6]. Jeżeli nie prowadzi się szczegółowych analiz, to bezpiecznie przyjąć można dla cegieł i typowych zapraw w spoinach o grubości od 10 do 25 mm:

$$f_b = 0,8 f_B^{0,50} \quad (1)$$

$$f_m = 0,5 f_m^{dpt} \quad (2)$$

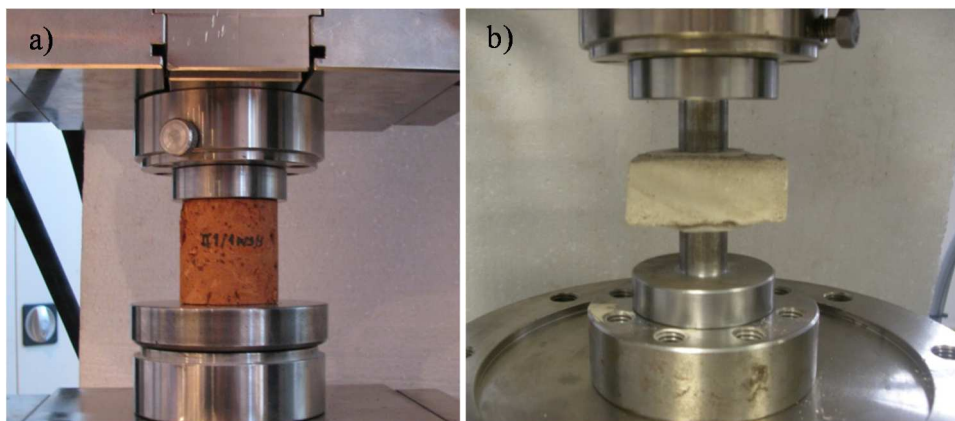
gdzie:

f_b – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie cegieł zgodnie z [12],

$f_b^{\phi 50}$ – wytrzymałość na ściskanie cegieł określona na próbkach walcowych o średnicy i wysokości 50 mm wyciętych ze ściany murowej,

f_m – wytrzymałość na ściskanie zaprawy określona zgodnie z [13],

f_m^{dpt} – wytrzymałość na ściskanie zaprawy określona metodą double-punch test na próbkach wyciętych ze spoin muru.



Rys. 4. Stanowiska do badań materiałów murowych, a) badania wytrzymałości cegieł na próbkach rdzeniowych o średnicy i wysokości 50 mm wyciętych z konstrukcji ścian, b) badania wytrzymałości zapraw metodą double-punch test na próbkach zaprawy wyciętych ze spoin muru

W pracy [6] wykazano, że dla murów historycznych wykonanych z cegły zależność do określenia wytrzymałości na ściskanie murów podana w normie PN-EN 1996-1-1 [14] powinna podlegać korekcie do postaci:

$$f_k = \zeta \cdot 0,36 \cdot f_b^{0,70} \cdot f_m^{0,30} \quad (3)$$

gdzie:

ζ – współczynnik korekcyjny uwzględniający geometrię struktury muru istniejącego i jego stan techniczny, a także specyfikę historycznych materiałów murowych.

Określenie wartości współczynnika ζ zależy od wyników badań mających na celu ustalenie uszkodzeń muru, jakości wykonania i niejednorodności jego struktury. Dla typowych murów ceglanych w obiektach z XIX i XX wieku można przyjąć $\zeta = 0,7$ [6].

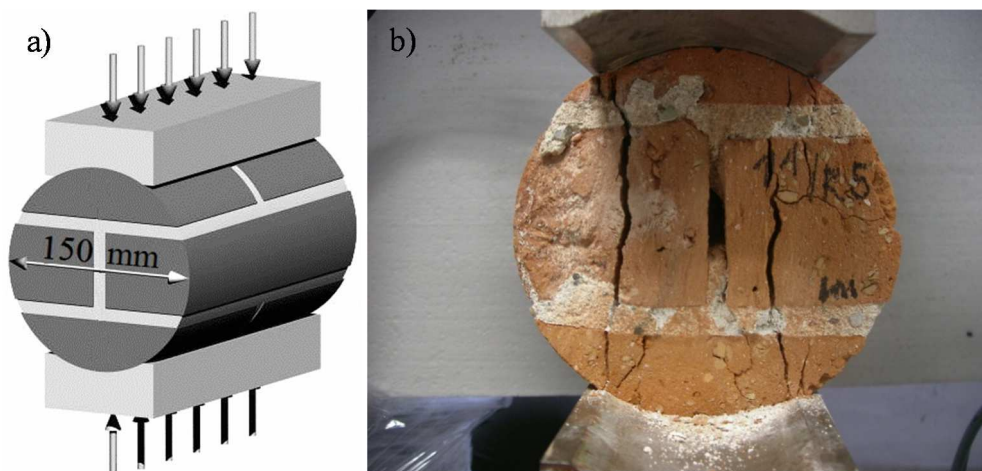
Jeżeli zaprawa w murze ma niską wytrzymałość i nie jest możliwe pobranie odpowiednich próbek, wytrzymałość na ściskanie muru proponuje się określać z uproszczonej zależności:

$$f_k = 0,2 f_b^{0,70} \quad (4)$$

Przedstawiona powyżej metoda oceny wytrzymałości muru na podstawie badań materiałów nie jest optymalna. W przypadkach jednak, gdy nie ma możliwości pobrania do badań próbek większych wymiarów jest podstawową metodą badawczą.

Powyższe zależności dotyczą murów ceglanych jednorodnych. W przeszłości były również realizowane mury warstwowe, w których warstwy zewnętrzne wznoszono z kamienia obrobionego lub cegły a w warstwach wewnętrznych stosowano na przykład kamień nieobrobiony zalewany zaprawą. Często stosowanym rozwiązaniem było również wznoszenie warstw licowych muru z cegieł lub kamienia lepszej jakości, a warstw wewnętrznych z cegieł o zdecydowanie niższych parametrach. Ocena nośności takich murów jest niezwykle trudna i wymaga nie tylko precyzyjnego określenia parametrów mechanicznych materiałów tworzących strukturę muru warstwowego lecz również grubości poszczególnych warstw a także sposobu ich połączenia. Znane są bowiem przypadki nieskutecznego połączenia warstw murowych i powstania rozwarstwień na ich styku, co doprowadziło w konsekwencji do utraty stateczności i awarii ścian murowych. Szczegółowe wytyczne na temat obliczeń różnych rodzajów ścian warstwowych znaleźć można w [15].

Jeżeli dopuszcza się pobranie z murów większych próbek, to dobre rezultaty dają badania odwiertów rdzeniowych zawierających powtarzalny fragment struktury muru. Badania tego typu prowadzone są od lat 80-tych XX wieku. W [11] podano metodę badań bazującą na próbkach rdzeniowych o średnicy 150 mm wyciętych ze ścian ceglanych – rys. 5.



Rys. 5. Badania wytrzymałości muru na próbkach rdzeniowych o średnicy 150 mm wyciętych z konstrukcji istniejących, a) sposób badania próbek, b) postać zniszczenia próbki muru wykonanego na zaprawie wapiennej

Próbki o średnicy 150 mm zawierają spoiny wsporne i spoiny pionowe. Odwierty są pobierane z muru w kierunku prostopadłym do jego lica. Kierunek obciążenia próbki jest zgodny z kierunkiem obciążenia ściskającego w murze. Wytrzymałość na ściskanie muru określa się z zależności:

$$f = \eta \frac{P_{ult}}{d \cdot l} \quad (5)$$

gdzie:

P_{ult} – maksymalna siła,

l – długość próbki,

d – średnica próbki,

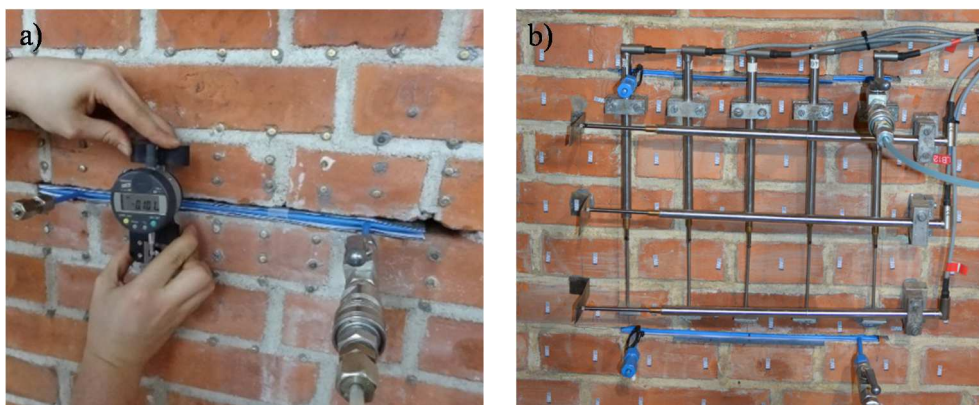
η – współczynnik przeliczeniowy o wartości 1,8 lub 2,2 – wartość 2,2 dotyczy murów z cegieł o wysokiej wytrzymałości.

Wartości współczynnika η kalibrowane były w oparciu o badania murów wykonanych w laboratorium ze współczesnych materiałów. Badania własne przeprowadzone na próbkach wycinanych z budynków wzniesionych w XIX i XX wieku wykazały, że wartości współczynnika η dla badań tego typu konstrukcji powinny być przyjmowane nieco mniejsze. Proponuje się przyjmować bezpieczną wartość $\eta = 1,65$.

Podstawowy problem w prowadzeniu badań na próbkach rdzeniowych muru o średnicy 150 mm stanowi wycięcie, transport i przygotowanie próbek do badań. Nie można stosować metod przyjmowanych dla próbek betonowych. Zastosowanie takich procedur prowadzi do utraty spójności próbki muru podczas wiercenia lub transportu. Odwierty w konstrukcjach murowych, szczególnie wzniesionych na słabych zaprawach, wymagają dużej uwagi, specjalistycznego sprzętu i doświadczenia w wykonywaniu badań.

W ostatnich latach prowadzi się prace badawcze, które mają wykazać możliwości oszacowań wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie badań odwiertów rdzeniowych o średnicy 100 mm. Zaletą tej metody jest zdecydowanie mniejszy zakres uszkodzeń powstających na skutek pobierania próbek. Otwory o średnicy 100 mm dają się również łatwiej zamaskować. Nie bez znaczenia jest również możliwość prowadzenia odwiertów bez montażu statywu do ściany oraz zastosowanie wiercenia na sucho z pneumatycznym odprowadzeniem zwiercin. Wadą jest natomiast brak w próbce spoin pionowych, co powoduje konieczność stosowania dodatkowych współczynników korekcyjnych [16].

Popularną metodą badań murów, zwłaszcza w zachodniej Europie i USA, jest metoda flat-jack. Badania prowadzi się za pomocą poduszek ciśnieniowych instalowanych w spoinach muru – rys. 6.



Rys. 6. Badanie murów metodą flat-jack (Fot. D. Łątka), a) określanie poziomu naprężeń ściskających w ścianie ceglanej, b) badanie modułu sprężystości muru

W USA opracowano normy do badań murów metodą flat-jack [17, 18]. Zalecenia w tym względzie wydano również w Europie [19, 20].

Po przeprowadzeniu testów, fragmenty spoin, które zostały usunięte na czas prowadzenia badań, są rekonstruowane. W związku z tym mur nie doznaje większych uszkodzeń. Metoda ta jest wykorzystywana głównie do oceny poziomu naprężeń ściskających w ścianie (badanie 1 poduszką) lub do określenia modułu sprężystości muru (badanie dwiema poduszkami fragmentu muru pomiędzy nimi).

W badaniu poziomu naprężeń ściskających w ścianie murowej w pierwszym etapie usuwa się jedną spoinę wsporną, co prowadzi do lokalnego odciążenia muru. Następnie w spoinie

umieszcza się poduszkę i zwiększa w niej ciśnienie do momentu aż na bazach przemieszczeń uzyskane zostaną początkowe wartości. Na podstawie poziomu ciśnienia w poduszce oblicza się naprężenie w ścianie murowej.

W badaniu modułu sprężystości muru na kolejnych krokach obciążenia dokonuje się odczytu przemieszczeń na czujnikach zainstalowanych pomiędzy poduszkami.

Podjęmowane były również próby oceny tą metodą wytrzymałości na ściskanie muru, ale nie dawały zadowalających rezultatów. Natomiast metodą flat-jack można przeprowadzić „obciążenie próbne muru”, to znaczy sprawdzić przewidywany poziom naprężeń w konstrukcji, który może wystąpić po realizacji planowanych modernizacji. Wadą metody flat-jack jest cena specjalistycznego sprzętu, który obejmuje nie tylko sam zestaw badawczy lecz również odpowiednie piły i statywy do precyzyjnego wycinania fragmentów spoin.

Prowadzi się również badania murów innymi metodami małonośnymi. Próbuje się na przykład oszacować wytrzymałość cegieł, kamieni czy zapraw mierząc opór jaki stawiają te materiały przy nawiercaniu [21]. Błąd w oszacowaniu wytrzymałości materiałów historycznych tą metodą może wynieść nawet 40%. Metoda daje dobre wyniki dla materiałów o homogenicznej strukturze, natomiast w historycznych ceglach czy zaprawach występuje wiele rys, pęknięć i innych wewnętrznych nieciągłości strukturalnych. Z tego powodu rejestrowany jest duży rozrzut wyników, o czym wspomniano powyżej.

5. Zakres badań

Zakres badań koniecznych do oceny nośności ścian i filarów zależy od rodzaju i wartości historycznej konstrukcji, jej stanu technicznego oraz zakresu planowanych zmian, które mogą powodować mniej lub bardziej istotne zwiększenie działających obciążeń.

W Polsce nie ma norm budowlanych odnoszących się do metod oceny nośności konstrukcji istniejących oraz do metod badawczych, które w takich analizach powinny być stosowane. W normie austriackiej ÖNORM B 1996-3 [22] podano wytyczne do sprawdzania nośności murów wzniesionych przed wejściem w życie postanowień normy EN 1996-1-1. Zgodnie z postanowieniami normy na każde 1000 m² powierzchni budynku murowego wymaga się wykonania serii badań, przy czym liczba serii nie powinna być mniejsza od 2. Jako jedną serię badań należy rozumieć:

- minimum 3 próbki wycięte z muru zawierające przynajmniej 4 spoiny poziome – mniejsze fragmenty są dopuszczalne (na przykład próbki rdzeniowe) po zastosowaniu odpowiednich współczynników korekcyjnych,
- badania próbek cegieł i zaprawy pobranych w minimum 3 miejscach – przynajmniej 5 próbek cegieł i 10 próbek zaprawy z jednego miejsca do badań wytrzymałościowych,
- nieniszczące badania cegieł i zapraw w minimum 6 miejscach – w jednym miejscu minimum 10 prób.

Przy takim programie badań dopuszczalne jest w budynkach ceglanych przyjmowanie współczynnika materiałowego $\gamma_M = 2,5$.

Zakres badań wytrzymałościowych powinien zostać uzupełniony inwentaryzacją geometrii konstrukcji murowej oraz dokumentacją jej uszkodzeń, a także badaniami dodatkowymi o ile zachodzi podejrzenie (na przykład po kwerendzie materiałów archiwalnych), że lokalnie konstrukcja może być osłabiona.

Podany zakres badań nie zawsze może być zastosowany. Trudno bowiem na przykład w konstrukcji o znacznej wartości historycznej zaproponować wycinanie próbek większych rozmiarów. W takich przypadkach ograniczenie programu badań powinno być jednak związane z przyjęciem większych wartości współczynników bezpieczeństwa γ_M .

Niezwykle istotny w badaniach jest wybór miejsc prowadzenia testów. Miejsca te powinny być z jednej strony reprezentatywne dla konstrukcji z drugiej zaś prowadzenie badań nie może w konsekwencji osłabiać ściany czy filara. Często ustalenie miejsc badań (na przykład miejsc pobrania próbek) wymaga nie tylko przeprowadzenia badań wstępnych (patrz rozdz. 2) lecz również wykonania wstępnych obliczeń konstrukcji. Nie ma w tym względzie rozwiązań uniwersalnych, a przypadek każdego obiektu należy traktować indywidualnie.

Należy podkreślić, że badania prowadzone w określonych miejscach konstrukcji murowych reprezentują jej lokalne właściwości. Szacowanie nośności ściany, czy filara murowego powinno się odbywać z zachowaniem dużego zakresu bezpieczeństwa. Z tego powodu należy, zdaniem autora, stosować odpowiednio wysokie współczynniki materiałowe dla muru ($\gamma_M \geq 2,5$).

6. Wnioski

W artykule przedstawiono metody badań nieniszczących (NDT) i małoniszczących (MDT), które mogą być wykorzystane w analizach nośności ścian i filarów murowych w budynkach istniejących.

Metody nieniszczące są przydatne głównie do pomiarów geometrii struktury konstrukcji murowej, ustaleniu grubości murów (i grubości warstw w murach warstwowych), uszkodzeń murów w postaci rozwarstwień, pęknięć i rys a także lokalizacji w masywie ścian i filarów elementów z innych materiałów (na przykład drewnianych lub stalowych). Badania NDT umożliwiają również inwentaryzację pustek i wnęk w ścianach oraz przemurowań ścian, które wykonano w przeszłości na przykład zmieniając układ otworów. Metody NDT nie dają natomiast wystarczająco dokładnych wyników w zakresie oszacowania wytrzymałości murów na ściskanie. W tym zakresie mogą być stosowane jedynie do badań wstępnych i jako uzupełnienie badań wytrzymałości muru innymi metodami.

W ocenie parametrów wytrzymałościowych materiałów murowych i murów w budynkach, w których nie ma możliwości pobrania próbek odpowiednio dużych wymiarów, najlepsze rezultaty dają badania na próbkach rdzeniowych wycinanych ze ścian murowych. W próbkach muru pobranych z konstrukcji zachowana jest bowiem oryginalna struktura zarówno pod względem materiałowym jak i geometrycznym, a także historia oddziaływań.

W ocenie nośności ścian i filarów murowych zaleca się kompilację nieniszczących i małoniszczących metod badawczych. Zastosowane odpowiednio empiryczne metody identyfikacji parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych murów dają udokumentowane wyniki i mogą być podstawą obliczeń inżynierskich w odróżnieniu od stosowanej dość powszechnie metody intuicyjnej. Intuicja doświadczonego inżyniera czy rzeczoznawcy nie jest bez znaczenia, ale powinna być zweryfikowana wynikami badań.

Literatura

1. Maierhofer, Ch.: Zerstörungsfreie prüfung zur Beurteilung von Mauerwerk – Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk. Teil 3, Mauerwerk-Kalender 2007.
2. Atkinson R.H., Noland J.L., Kingsley G.R.: Application of NDE to Masonry Structures. Conservation of Historic Brick Structures, Donhead Publishing Ltd, 1998.
3. Binda L.: Learning from failure – Long-term behaviour of heavy masonry structures. WIT Press, Southampton, Boston 2008.
4. Runkiewicz L., Rodzik W.: Badania nieniszczące wytrzymałości murowanych obiektów zabytkowych. Inżynieria i Budownictwo 2/90.
5. Stawiska, N., Stawiski, B.: Rewaloryzacja murów w obiektach zabytkowych. Wiadomości Konserwatorskie 18/2005.

6. Matysek P.: Identyfikacja wytrzymałości i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.
7. Olek J., Śliwiński J.: Możliwości badania pełnych cegieł ceramicznych metodami nieniszczącymi. *Czasopismo Techniczne* 1/1977.
8. Egermann R.: Zur Nachträglichen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln. SFB 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990, Berlin: Ernst & Sohn.
9. Schrank R.: Materialeigenschaften historischen Ziegelmauerwerks im Hinblick auf Tragfähigkeitsberechnungen am Beispiel der Leipziger Bundwand. *Das Mauerwerk – Zeitschrift für Technik und Architektur*, 10/2002.
10. Matysek P., Łątka D.: Comments on the application of the sclerometric method in the diagnostics of brick masonry. *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed), DWE 2012, Wrocław*.
11. UIC – International Union of Railways: UIC Code. Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges. Final draft 2008.
12. PN-EN 772-1:2001. Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie. 2001.
13. PN-EN 1015-11:2001. Metody badań zapraw do murów – Część 11: Określenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie stwardniałej zaprawy. 2001.
14. PN-EN 1996-1-1. Projektowanie konstrukcji murowych, Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych. 2010.
15. Warnecke P.: Load bearing capacity of historical masonry, Proceedings of the 11th International Brick Block Masonry Conference, Shanghai, China 1997.
16. Matysek P., Stryszewska T., Kańska S.: Experimental research of masonry compressive strength in the Auschwitz II – Birkenau former death camp buildings, *Engineering Failure Analysis*, 2016, Vol. 68.
17. ASTM Standard C1196-91. In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1991.
18. ASTM Standard C1197-91. In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1991.
19. RILEM Recommendation MDT.D.4. In-situ stress tests based on the flat-jack. *Materials and Structures*, RILEM Publications SARL, Vol. 37, 2004.
20. RILEM Recommendation MDT.D.5. In situ stress-strain behaviour tests based on the flat-jack. *Materials and Structures*, RILEM Publications SARL, Vol. 37, 2004.
21. Fernandes F.; Lourenco P.B.: Evaluation of the compressive strength of ancient clay bricks using microdrilling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 09/2007.
22. ÖNORM B 1996-3:2009. Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten.

LOAD-BEARING CAPACITY OF THE MASONRY WALLS AND PILLARS IN EXISTING BUILDINGS – THE USE OF NON-DESTRUCTIVE AND MINOR-DESTRUCTIVE TESTING IN ANALYSIS OF THE PROBLEM

Abstract: In this paper test methods that can be used in the evaluation of the load-bearing capacity of masonry walls and pillars in existing buildings are presented. Due to the historical value of some of these buildings, non-destructive (NDT) and minor-destructive (MDT) test methods are preferred. This paper presents the results of in-situ and laboratory tests that were conducted on the original historical masonry materials and structures. The range of applicability of NDT and MDT methods are described. The author mostly focused on the testing methods based on the use of core samples collected from the masonry walls and pillars. The recommendations which might be useful in developing research programs are proposed. Conducting research for the appropriate range is important in the analysis of failure of masonry buildings.

Keywords: non-destructive and minor-destructive tests, masonry walls and pillars