

STAN ZACHOWANIA ZABYTKOWYCH KONSTRUKCJI MUROWYCH

– studium przypadku

Daniel Watach, Justyna Jaskowska-Lemańska
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

Stan zachowania zabytkowych konstrukcji murowych zależy od licznych czynników, na jakie narażony jest obiekt w trakcie eksploatacji. Są to jednak obiekty o niezwyklej trwałości, o czym świadczą liczne zabytki budownictwa murowanego nawet sprzed naszej ery.

Z upływem czasu obiekty zabytkowe ulegają procesom destrukcyjnym, których postęp i przebieg jest różnorodny i zależy od wielu czynników. Istotną rolę odgrywa czas – wiek budowli – a w związku z tym wydarzenia historyczne i zdarzenia losowe, które miały miejsce w trakcie funkcjonowania obiektu (pożary, powodzie, działania wojenne). Materiały budowlane narażone są na wiele czynników niszczących, takich jak: zmiany temperatury i wilgotności, obciążenia statyczne i dynamiczne, agresja chemiczna i biologiczna. W aspekcie tych czynników określenie trwałości obiektu, czyli okresu, w którym zachowuje on swoje właściwości użytkowe, jest skomplikowane i wymaga złożonej analizy.

W artykule przedstawiono najważniejsze czynniki wpływające na stan zachowania oraz aktualną nośność zabytkowych konstrukcji murowych na przykładzie zespołu pałacowego w Gorzanowie, który swoją obecną formę przybrał na przełomie XVI i XVII w.

Konstrukcje murowe

Konstrukcje murowe należą oprócz drewna do najstarszych konstrukcji budowlanych. Świadczą o tym zachowane do dziś fragmenty murów, łuków i sklepień oraz zachowane w całości zabytki budownictwa sakralnego, komunikacyjnego czy też obronnego. Doskonałym tego przykładem jest częściowo zachowany akwedukt rzymski koło Nimes we Francji, ukończony w 13 r. p.n.e. Rozwój konstrukcji murowych w różnych rejonach świata uzależniony był od dostępności materiałów i możliwych technik ich obróbki. Konstrukcje murowe składające się z ciosów kamiennych wykonywano już w starożytnym Egipcie, natomiast w Mezopotamii znana i wykorzystywana była cegła suszona. Najwięcej zabytków budownictwa murowanego, które przetrwały do dzisiejszych czasów, to obiekty sakralne, które w epoce rzymskiej wznoszone były w większości z masywnych bloków kamiennych, a w okresie gotyku z cegły ceramicznej.

W obiektach zabytkowych spotykamy dwa rodzaje elementów murowych, którymi są kamień naturalny i elementy ceramiczne (cegły)

układane na tzw. spoiny zwykłe. Wytrzymałość cegieł używanych do wznoszenia budowli na terenie Europy Środkowej między XIV a XIX w. wahała się pomiędzy 2,0÷6,0 MPa [1]. Kamień naturalny stosowany do elementów murowych obiektów zabytkowych pochodził ze skał magmowych (granit, sjenit, andezyt, gabbro i tufy) i osadowych (piaskowiec, dolomit, wapień, anhydryt, trawertyn), najczęściej z kamieniołomów zlokalizowanych w okolicach powstającego obiektu. W obiektach historycznych podstawowym spoiwem w zaprawach było wapno, ale stosowano również gips, glinę i inne materiały wiążące, a od drugiej połowy XIX w. również cement. Stąd właściwości konstrukcji murowych wynikają bezpośrednio z własności materiałów zastosowanych do ich wykonania oraz sposobu ich wykonania [3], [4]. Ta różnorodność zarówno wytrzymałości i odkształcalności elementów murowych, jak i zapraw stosowanych w różnych okresach wznoszenia obiektów budowlanych jest przyczyną znacznych komplikacji w określeniu ich aktualnej nośności [9].

Uszkodzenia

W konstrukcjach murowych uszkodzenia wywołane są najczęściej nierównomiernym osiadcianiem podłoża oraz błędami w eksploatacji – przede wszystkim brakiem konserwacji i instalacji odwadniających lub złym stanem technicznym spinających ściany stropów. Du-

W konstrukcjach murowych uszkodzenia wywołane są najczęściej nierównomiernym osiadcianiem podłoża oraz błędami w eksploatacji – brakiem konserwacji i instalacji odwadniających lub złym stanem technicznym spinających ściany stropów. Duży wpływ ma również oddziaływanie warunków atmosferycznych, wilgoci oraz drgań.

ży wpływ ma również oddziaływanie warunków atmosferycznych, wilgoci oraz drgań. Czynniki te wywołują uszkodzenia w postaci zarysowania murów, wykwitów solnych i zawilgoceń oraz uszkodzeń powierzchniowych na poszczególnych elementach. Dlatego też w zespole pałacowym w Gorzanowie zarejestrowano typowe dla obiektów zabytkowych uszkodzenia, które przedstawiono na rysunkach 1–4.

Badania

Rozpoznanie parametrów mechanicznych muru jako materiału dwuskładnikowego (elementu murowego i zaprawy) jest ważnym zagadnieniem przy określeniu jego rzeczywistej wytrzymałości i trwałości. Badania elementów murowych umożliwiają określenie jakości materiału, dokładności wykonania elementu, co ma istotny wpływ na ocenę aktualnego stanu technicznego obiektu oraz przewidywanego okresu jego dalszego użytkowania. Zarówno przy badaniu konstrukcji murowych, jak i jej elementów zwraca się szczególną uwagę nie tylko na ich parametry mechaniczne, lecz także na wielkość spękań i rys, zawilgoceń, zawartość soli oraz wady ukryte, takie jak: kawerny, rozluźnienie spoiwości czy odspojone warstwy licowe [1]. Metody badań konstrukcji murowych można podzielić na trzy grupy:

- badania nieniszczące,
- badania seminieniszczące,
- badania niszczące.

Do badań nieniszczących zaliczamy ocenę makroskopową będącą podstawą wszelkich ocen i ekspertyz dotyczących stanu technicznego obiektu, pomiary wilgotności (wilgotnościomierze elektryczne, badania termograficzne) [11], metody ultradźwiękowe [7], badania sklerometryczne [13] czy też badania próbnego obciążania [8]. Wszystkie te badania pozwalają na jakościową ocenę materiału, jednak nie mogą być podstawą do wnioskowania na temat cech fizyko-mechanicznych elementów murowych, zaprawy czy też całej konstrukcji.

Do badań seminieniszczących elementów murowych możemy zaliczyć badania typu pull-off polegające na pomiarze siły niezbędnej do oderwania krążka od badanej powierzchni [10] oraz badanie konstrukcji murowej metodą poziomą naprężeń ściskających wywołanych przez wprowadzone w spoiny stalowe poduszki z możliwością regulacji ciśnienia [12]. Metody te nie są jeszcze powszechnie stosowane w Polsce, choć coraz większe zapotrzebowanie na ocenę aktualnego stanu technicznego konstrukcji murowych niewątpliwie powoduje ich rozkwit. Do badań seminieniszczących możemy również zaliczyć badania na mało średnicowych odwiertach, głównie są to badania wilgotności i stężenia soli występujących w murach [11].

Badania niszczące to głównie badania laboratoryjne, choć w wyodrębnionych przypadkach prowadzi się badania in situ siłownikami

Rys. 1–4. Zarejestrowane w zespole pałacowym w Gorzanowie typowe dla obiektów zabytkowych uszkodzenia



Rys. 1. Pęknięcia i zarysowania ścian zewnętrznych i wewnętrznych konstrukcji



Rys. 2. Zawilgoceń murów wywołane niesprawnym odwodnieniem oraz brakiem izolacji w poziomie posadowienia



Rys. 3. Uszkodzenia wywołane czynnikami środowiska



Rys. 4. Rozwój korozji biologicznej (grzybów pleśniowych) w pomieszczeniach zlokalizowanych na parterze

hydraulicznymi na wyodrębnionych fragmentach murów przeznaczonych do rozbioru [2], [8]. Badania niszczące mają za zadanie ustalić charakterystyczne własności wytrzymałościowe elementów murowych i zaprawy, co ma doprowadzić do określenia nośności całej konstrukcji murowej. Aktualna normalizacja badań elementów murowych i zaprawy nie jest dostosowana do badań w istniejących obiektach, pobranie i przetransportowanie odpowiednich próbek do badań stanowi duży problem techniczny. Brak odpowiedniej normalizacji spowodował rozwój wielu autorskich metod badań zarówno na pobranych elementach murowych i zaprawach, jak i próbkach obejmujących oba te materiały pobranych w formie rdzeni czy też nawet całych fragmentów muru [5], [6].

W związku z licznymi uszkodzeniami występującymi w obrębie konstrukcji murowych zespołu pałacowego w Gorzanowie podjęto się zadania określenia ich stanu technicznego i aktualnej nośności w celu zapewnienia bezpieczeństwa obiektu i jego dalszego użytkowania. W trakcie badań wyróżniono podstawowe wątki występujące w ścianach nośnych pałacu. Ściany kondygnacji podziemnych wykonano jako mur cyklopowy z ceglany sklepieniem, z kolei najstarsze części pałacu zostały

wykonane jako mur kamienny dziki. Zdecydowana większość ścian nośnych to mur warstwowy, mieszany kamienno-ceglany, mury powstałe najpóźniej wykonane zostały w całości z cegły ceramicznej z nieregularnym wątkiem główkowo-wozówkowym. Przykładowe wątki przedstawiono na rysunku 5. W pałacu występują liczne przemurowania oraz współczesne wątki muru. Wiele z nich wykonanych jest błędnie. W znaczący sposób utrudnia to określenie wytrzymałości muru na ściskanie, a tym samym projektowanie napraw oraz wzmocnień (rys. 6).

W związku z wytycznymi konserwatorskimi do badań laboratoryjnych pobrano elementy murowe i zaprawę z sześciu lokalizacji. Pobrano próbki w miejscach przeznaczonych do przemurowania. Na pobranych elementach wykonano oznaczenia laboratoryjne cech fizyczno-mechanicznych wg norm [14], [15], [16], [17], [18], [20] (oznaczenie gęstości, wilgotności metodą suszarkowo-wagową oraz wytrzymałości na ściskanie), których wyniki przedstawiono w tabelach 1–2.

Badane próbki ceramicznych elementów murowych zostały przygotowane w formie 32 kostek sześciennych o wymiarach 65 x 65 x 65 mm, natomiast próbki kamiennych

elementów murowych zostały przygotowane w formie 23 kostek sześciennych o wymiarach 50 x 50 x 50 mm. W celu znormalizowania wyników badań kostek sześciennych zastosowano współczynnik wpływu efektu skali $\delta = 0,92$ dla elementów ceramicznych oraz $\delta = 0,85$ dla elementów kamiennych [16].

Zaprawy murarskie pobrano z trzech reprezentatywnych lokalizacji. W toku badań dokonano oceny makroskopowej, wyróżniając dwa podstawowe rodzaje zapraw: zaprawy pochodzące z murów kamiennych, dzikich i cyklopowych oraz zaprawy z murów warstwowych kamienno-ceglanych oraz ceglanych. W całym obiekcie występuje zaprawa wapienna. Badanie wytrzymałości zaprawy na ściskanie wykonano dla próbek pochodzących z murów warstwowych metodą „punch test” [5]. Widok jednej z próbek po zniszczeniu przedstawiono na rysunku 8, a wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

Otrzymane wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie poddano korelacji do wytrzymałości znormalizowanej. Zgodnie z normą PN-EN 1996-1-1 [19] zaprawę określono jako wapienną klasy I M 0,5.

Analiza nośności

Przeprowadzone badania na elementach murowych i zaprawie oraz określenie typowych wątków murów pozwoliły na wyznaczenie ich charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie względem aktualnie obowiązujących przepisów normowych. Zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [19] wzór na wytrzymałość charakterystyczną muru na ściskanie ma postać:

$$f_k = \delta \cdot K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta$$

gdzie:

f_k – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie,

f_b – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementu murowego

f_m – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie zaprawy murarskiej

K – współczynniki zależne od rodzaju elementów murowych i zapraw, przyjęte dla kamienia naturalnego $K = 0,45$, dla cegły ceramicznej pełnej $K = 0,35$,

δ – współczynnik dla murów ze spoiną podłużną $\delta = 0,8$,

α, β – wartości stałe $\alpha = 0,7, \beta = 0,3$.

Wartość charakterystyczną wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowej obliczono dla każdej z lokalizacji, przyjmując tę samą zaprawę wapienną klasy M 0,5. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Wytrzymałość muru na ściskanie, określona na podstawie wytrzymałości elementów murowych i zapraw wyznaczonych w drodze badań laboratoryjnych, waha się w granicach od 0,8 MPa do 7,5 MPa. Różnicowanie wytrzymałości wynika z różnych parametrów elementów murowych zabudowanych w różnych okresach

Tab. 1. Zestawienie cech fizyko-mechanicznych elementów murowych

| Element | Liczba próbek [szt.] | Gęstość [kg/m ³] | Wilgotność [%] | Odchylenie standardowe [%] | Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa] | Średnia znormalizowana wytrzymałość na ściskanie [MPa] | Odchylenie standardowe [MPa] |
|-----------------|----------------------|------------------------------|----------------|----------------------------|---|--|------------------------------|
| Lok. 1 – cegła | 6 | 1831,10 | 6,95 | 0,24 | 6,21 | 5,72 | 2,30 |
| Lok. 2 – cegła | 6 | 1693,99 | 2,38 | 0,62 | 16,38 | 15,07 | 1,82 |
| Lok. 3 – cegła | 5 | 1871,97 | 3,37 | 0,40 | 34,30 | 31,56 | 4,49 |
| Lok. 4 – cegła | 5 | 2037,63 | 12,47 | 0,07 | 6,65 | 6,10 | 0,11 |
| Lok. 5 – cegła | 5 | 1918,45 | 13,38 | 1,14 | 15,04 | 13,83 | 0,19 |
| Lok. 6 – cegła | 5 | 1988,69 | 8,87 | 0,34 | 20,39 | 18,76 | 1,31 |
| Lok. 1 – kamień | 7 | 2332,71 | 0,67 | 0,09 | 107,61 | 95,62 | 10,74 |
| Lok. 2 – kamień | 5 | 2184,17 | 1,67 | 0,26 | 36,37 | 30,91 | 4,52 |
| Lok. 3 – kamień | 11 | 2079,26 | 1,49 | 0,33 | 36,94 | 31,40 | 3,68 |

Tab. 2. Wytrzymałość na ściskanie zapraw murarskich

| Nr próbki | Wilgotność [%] | Wytrzymałość na ściskanie f_M [MPa] | Wytrzymałość wg F. Wenzel f_M^* [MPa] | Wytrzymałość wg M. Matner f_M^* [MPa] |
|-----------|----------------|---------------------------------------|---|---|
| 1 | 20,60 | 1,28 | 0,64 | 0,70 |
| 2 | 19,60 | 1,20 | 0,60 | 0,67 |
| 3 | 18,47 | 1,53 | 0,76 | 0,80 |
| | 19,55 | 1,33 | 0,66 | 0,72 |

Tab. 3. Wytrzymałość charakterystyczna konstrukcji murowych

| Element | Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementu murowego [MPa] | Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie zaprawy [MPa] | Wartość współczynnika K | Charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie muru w danej lokalizacji [MPa] |
|-----------------|--|--|-------------------------|--|
| Lok. 1 – cegła | 5,72 | 0,6 | 0,35 | 0,81 |
| Lok. 2 – cegła | 15,07 | 0,6 | 0,35 | 1,60 |
| Lok. 3 – cegła | 31,56 | 0,6 | 0,35 | 2,69 |
| Lok. 4 – cegła | 6,12 | 0,6 | 0,35 | 0,85 |
| Lok. 5 – cegła | 15,08 | 0,6 | 0,35 | 1,61 |
| Lok. 6 – cegła | 13,84 | 0,6 | 0,35 | 1,51 |
| Lok. 1 – kamień | 95,62 | 0,6 | 0,45 | 7,52 |
| Lok. 2 – kamień | 30,91 | 0,6 | 0,45 | 3,41 |
| Lok. 3 – kamień | 31,40 | 0,6 | 0,45 | 3,45 |

historycznych oraz o zróżnicowanej wilgotności. Podkreślić należy znaczne zróżnicowanie typów murów występujących w konstrukcji nawet w obrębie jednego pionu – np. dla rozpatrywania nośności filarów międzyokiennech. Określona wytrzymałość jest wartością charakterystyczną, wg normy PN-EN 1996-1-1 [19] współczynnik materiałowy dla rozpatrywanych konstrukcji wynosi $\gamma_m = 2,5$.

Na tej podstawie można wnioskować o nośności przekrojów charakterystycznych w obrębie pałacu. Analizie poddano filary międzyokienne w kondygnacji parteru oraz pierwszego piętra. Ze względu na znaczne przekroje nośność wszystkich filarów jest zapewniona, a wyłączenie nie przekroczyło 70% nawet w przypadku murów o najmniejszej wytrzymałości.

Wnioski

Stan zachowania zabytkowych konstrukcji murowych, zależy od licznych czynników, na jakie narażony jest obiekt w trakcie eksploatacji. Są to jednak obiekty o niezwyklej trwałości, o czym świadczą liczne zabytki budownictwa murowanego nawet sprzed naszej ery. Należy jednak podkreślić, że właśnie najczęściej w obrębie konstrukcji murowych występują katastrofy budowlane, wg statystyki GUNB aż 60% wszystkich katastrof w roku 2014 stanowiły katastrofy konstrukcji nośnej murowej. Stąd tak ważne są prawidłowa ocena stanu technicznego konstrukcji murowych oraz ich prawidłowa eksploatacja.

Obecny stan możliwości technicznych prowadzenia badań in situ nad wytrzymałością konstrukcji murowych nie jest wystarczający, wymaga on znacznego naruszenia struktury obiektu, co w przypadku konstrukcji zabytkowych zazwyczaj nie jest dopuszczalne. Liczne opracowania prezentują możliwości badań seminieniszczących i nieniszczących, jednak żadna z tych metod nie powinna być stosowana bez weryfikacji w zestawieniu z wynikami badań laboratoryjnych, gdyż błąd ich interpretacji może sięgać nawet 50% [9].

Wielowątkowość obiektów zabytkowych o konstrukcji murowej powoduje konieczność prowadzenia badań w różnych lokalizacjach obiektu. Niejednokrotnie ocena makroskopowa nie wskazuje na znaczne zróżnicowanie parametrów mechanicznych w różnych fragmentach konstrukcji murowej, stąd należy ją wspierać metodami nieniszczącymi, które przez wyniki jakościowe wskażą zmienne cechy muru.

Przeprowadzone studium przypadku wykazało, że mimo znacznych różnic w charakterystycznych wytrzymałościach na ściskanie murów z różnych okresów nośność konstrukcji jest zapewniona. Występujące uszkodzenia nie stanowią zagrożenia dla bezpiecznego użytkowania obiektu pod warunkiem przeprowadzenia podstawowych prac remontowych. ■



Rys. 5. Mur kamienny dziki i ceglane sklepienia i mur warstwowy, mieszany kamienno-ceglany



Rys. 6. Elewacja zewnętrzna północna z widocznymi licznymi przemurowaniami



Rys. 7. Wygląd części próbek z elementów ceramicznych przygotowanych do badań

Abstract. Condition of historic masonry structures – case study. Construction materials are exposed to many destructive factors, such as change of temperature, humidity, static and dynamic loads, biological and chemical impact. Therefore, the determination of the object's durability – which is defined as a period of the keeping serviceability, is complicated and requires a complex analysis. The article presents the most important factors affecting the capacity of historic masonry structures on the example of the palace in Gorzanow.



Rys. 8. Wygląd próbki zaprawy murarskiej po zniszczeniu

Literatura:

- [1] Borusiewicz W., *Konserwacja zabytków budownictwa murowanego*, Warszawa 1985.
- [2] Corradi M., Borri A., Vignoli A., *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998*, „Construction and Building Materials” 2002, nr 16.
- [3] Janowski Z., Hojdis L., Krajewski P., *Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych* [w:] *Awarie budowlane 2007*, Międzyzdroje 2007.
- [4] Łukaszewicz J., *Badania konserwatorskie stanu zachowania zabytków architektonicznych, ceglanych murów i ruin* [w:] *Trwała ruina II: Problemy utrzymania i adaptacji*, Lublin-Warszawa 2010.
- [5] Matysek P., *Uwagi o szacowaniu wytrzymałości murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy*, „Materiały Budowlane” 2010, nr 9.
- [6] Matysek P., *Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących*, Kraków 2014.
- [7] Stawiska N., *Rewaloryzacja murów w obiektach zabytkowych*, „Wiadomości Konserwatorskie” 2005, nr 18.
- [8] Runkiewicz L., Sieczkowski J., *Stosowanie obciążeń próbnych do oceny stanu technicznego budynków*, „Przegląd Budowlany” 2015, nr 7-8.
- [9] Runkiewicz L., Rodzik W., *Badania nieniszczące wytrzymałości murowych obiektów zabytkowych*, „Inżynieria i Budownictwo” 1990, nr 2.
- [10] Tkacz P., *Niekonwencjonalne sposoby określania wytrzymałości cegły i zaprawy w istniejących murach*, „Materiały Budowlane” 2010, nr 3.
- [11] Trochonowicz M., *Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych*, „Budownictwo i Architektura” 2010, nr 7.
- [12] Żółtowski M., *Operacyjna analiza modalna w badaniu konstrukcji budowlanych*, Bydgoszcz 2012.

Normy:

- [13] WTA Merkblatt 4-5-99 *Beurteilung von Mauerwerk. Mauerwerkdiagnostik*
- [14] PN-EN 771-1 *Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 1: Elementy murowe ceramiczne*
- [15] PN-EN 771-6 *Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 6: Elementy murowe z kamienia naturalnego*
- [16] PN-EN 772-1 *Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie*
- [17] PN-EN 772-13 *Metody badań elementów murowych – Część 13: Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym (z wyjątkiem kamienia naturalnego)*
- [18] PN-EN 1936 *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*
- [19] PN-EN 1996-1-1 *Eurokod 6 Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych*
- [20] PN-EN ISO 12570 *Ciepłota-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie wilgotności przez suszenie podwyższonej temperaturze*