

BUILDER  
FOR THE  
FUTUREBUILDER  
FOR THE  
YOUNG  
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

**Mateusz Moczko**

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Politechnika Wrocławska  
mateusz.moczko@pwr.edu.pl

**OPIEKUN NAUKOWY****prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko**

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Politechnika Wrocławska

Zabytkowe konstrukcje budowlane stanowią niejednokrotnie unikatową wartość dla narodowego dziedzictwa kulturowego. Z tego też względu kontrola ich aktualnego stanu technicznego ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia im należytego bezpieczeństwa przed zagrożeniami będącymi konsekwencją zarówno naturalnego upływu czasu, jak i zmieniających się warunków społeczno-ekonomicznych, w których dany obiekt jest użytkowany. Możliwie szybkie wykrycie i prawidłowe zdiagnozowanie występujących zagrożeń gwarantuje podejmowanie optymalnych decyzji odnośnie do sposobu zabezpieczenia tego rodzaju obiektów, planowania i realizacji niezbędnych prac konserwatorskich, a także zapewnienia warunków prawidłowej ich eksploatacji.

**Monitoring zabytkowych konstrukcji budowlanych**

Monitoring może mieć charakter bieżącej, powtarzanej cyklicznie kontroli aktualnego stanu technicznego, a może mieć także charakter całościowej ekspertyzy technicznej, związanej na przykład z planowaną modernizacją obiektu bądź też wynikającej z zaistnienia nadzwyczajnych okoliczności, stanowiących o wystąpieniu bezpośredniego zagrożenia jego bezpieczeństwa, na przykład w wyniku klęski żywiołowej lub ataku terrorystycznego.

W praktyce inżynierskiej monitoring konstrukcji zabytkowych obejmuje w pierwszej kolejności ocenę wizualną oraz niezbędne badania, przeprowadzane bezpośrednio na obiekcie. Niekiedy badania „in-situ” są, w miarę potrzeby, uzupełniane o niezbędne badania labo-

# JAK MONITOROWAĆ ZABYTKI?

Diagnostyka tego rodzaju konstrukcji jest zadaniem niezwykle złożonym i wymaga zastosowania technik pomiarowych, które nie zagrażają naruszeniem ich integralności strukturalnej.

ratoryjne, takie jak na przykład: badania wytrzymałościowe odwiertów rdzeniowych, badania nasiąkliwości, wodoszczelności czy też badania składu fazowego, realizowane za pomocą analizy termicznej oraz rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej.

Diagnostyka tego rodzaju konstrukcji jest zadaniem niezwykle złożonym ze względu na niepowtarzalny charakter badanych obiektów. Wymaga zastosowania technik pomiarowych, które nie zagrażają naruszeniem ich integralności strukturalnej. Ze zrozumiałych względów na szczególną uwagę zasługują metody badawcze, które umożliwiają przeprowadzenie niezbędnych badań diagnostycznych w sposób nieniszczący bezpośrednio na obiekcie.

**Metody badawcze**

Współczesna technika pomiarowa oferuje szeroki wachlarz aparatury diagnostycznej, która jest wyrazem praktycznego wykorzystania najnowszych osiągnięć myśli technicznej z tego zakresu. Na szczególną uwagę zasługują: metoda termowizyjna, georadar, metoda elektromagnetyczna, DRM – metoda pomiaru oporu wiercenia, metoda „pull-out” oraz „pull-off”, „Impact-Echo”, a także Rainbow-Test, umożliwiający określenie współczynnika pH badanego materiału.

**Inspekcja wizualna**

Inspekcja wizualna jest zazwyczaj pierwszym krokiem w diagnostyce każdej konstrukcji. Jej podstawowym zadaniem jest sprawdzenie ewentualnego występowania potencjalnych uszkodzeń oraz ich szczegółowa inwen-

taryzacja, obejmująca opis stwierdzonych wad wraz z wykonaniem niezbędnej dokumentacji fotograficznej. Integralną częścią tego rodzaju oględzin jest także ocena stopnia zagrożenia bezpieczeństwa obiektu oraz określenie programu niezbędnych do wykonania badań.

Ocena wizualna obejmuje między innymi określenie rzeczywistych wymiarów geometrycznych, lokalizację i identyfikację widocznych uszkodzeń, oszacowanie potencjalnego zagrożenia korozyjnego, ocenę stanu zawilgocenia oraz ocenę wielkości istniejących odkształceń. Niejednokrotnie cennym uzupełnieniem oględzin obiektu jest wykonanie odkrywek w celu eksperymentalnej weryfikacji rzeczywistego stanu badanej konstrukcji. Uwaga ta dotyczy w pierwszej kolejności oceny charakteru i wielkości wad wewnętrznych, będących zarówno nieciągłościami strukturalnymi, jak i efektem rozwoju procesów korozyjnych.

**Badania nieniszczące**

Spśród wielu metod badawczych wykorzystywanych w diagnostyce zabytkowych konstrukcji budowlanych na szczególną uwagę zasługuje między innymi metoda termowizji, która, oprócz klasycznego zastosowania do oceny jakości wykonania izolacji termicznej i lokalizacji „mostków termicznych” (metoda pasywna), może być także wykorzystana do lokalizacji i identyfikacji niewidocznych z zewnątrz wad materiałowych dzięki wykorzystaniu dodatkowego źródła ciepła (metoda aktywna), które wywołuje powstanie wewnątrz badanego elementu niestacjonarnego pola temperaturowego. Zjawisko zmiany gradientu temperatury na

powierzchni badanego obszaru jest monitorowane w czasie rzeczywistym przez kamerę termowizyjną [1].

Ta odmiana metody termowizyjnej umożliwiła nieniszczącą lokalizację różnego rodzaju wad wewnętrznych (rys. 1.) oraz wykrycie wszelkich niewidocznych elementów stalowych, takich jak na przykład kotwy czy ściąg stalowe [2], [3].

Inny rodzaj badań diagnostycznych reprezentuje metoda DRM (ang. *Drilling Resistance Measurements*), która jest przede wszystkim wykorzystywana do oceny parametrów mechanicznych elementów drewnianych (rys. 2.). Istota metody polega na pomiarze oporu, jaki stawia wiertło badany materiał. Innymi słowy: korzysta ona z korelacji pomiędzy oporem wiercenia a gęstością i twardością badanego materiału [4].

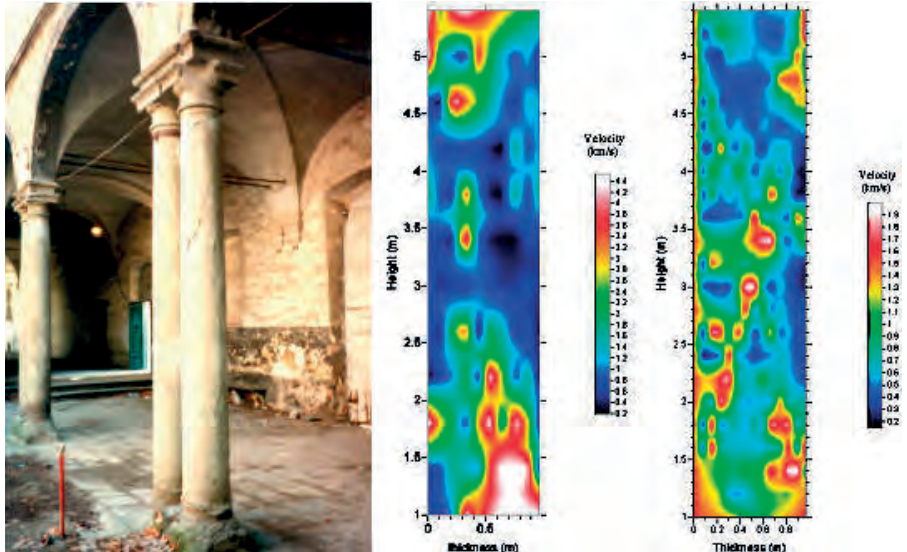
### Metoda DRM (ang. *Drilling Resistance Measurements*)

wykorzystywana jest do oceny parametrów mechanicznych elementów drewnianych i opiera się na korelacji pomiędzy oporem wiercenia a gęstością i twardością badanego materiału.

Cienkie wiertło jest wprowadzane w głąb materiału (np. drewna) ze stałą prędkością, za pomocą specjalnie do tego celu przystosowanej wiertarki. Energia potrzebna do zagłębienia wiertła jest rejestrowana jako funkcja głębokości położenia wiertła i stanowi miarę oporu stawianego wiertłu przez badany materiał. Można w ten sposób określić zarówno jego parametry mechaniczne, jak i zlokalizować fragmenty konstrukcji, które są osłabione, na przykład na skutek szkodliwej działalności szkodników drewna. Omawiana metoda jest także wykorzystywana w badaniach elementów nośnych budowli zabytkowych, które zostały narażone na działanie ognia w trakcie pożaru [5].

Obiekty zabytkowe kojarzone są zwykle jako konstrukcje ceglane, drewniane czy też kamienne. Coraz częściej spotykamy się jednak z budowlami o dużej wartości historycznej, których tworzywem jest beton. Fakt ten powoduje w ostatnim okresie wyraźny wzrost zainteresowania tematyką nieniszczących metod diagnostyki tego rodzaju konstrukcji. Jedną z metod, która zyskała sobie szczególne uznanie w tym zakresie, jest metoda „pull-out”, a w szczególności jej odmiana o nazwie CAPO-Test, która pozwala na szybkie i wiarygodne określenie wytrzymałości betonu na ściskanie, jego podstawowego parametru jakościowego w istniejącej konstrukcji bezpośrednio na obiekcie.

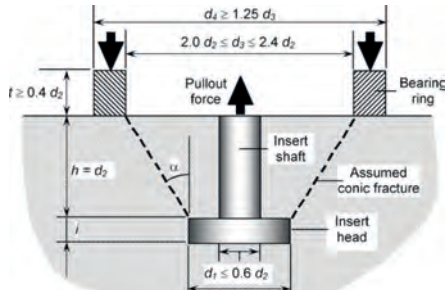
Istota tej metody polega, najogólniej rzecz ujmując, na pomiarze wartości siły niezbędnej do wyrwania z betonu stalowej kotwy, którą stanowi stalowy pierścień rozprężany w specjalnie do tego celu wykonanym frezie (rys. 3.). Na pierw-



Rys. 1. Przykład zastosowania aktywnej metody termowizyjnej pozwalającej na wykrycie wewnętrznych wad w zabytkowych kolumnach kamiennych  
Fig. 1. An example of infrared defectoscopy for localization of internal defects existing inside historical stone of internal defects existing inside historical stone columns



Rys. 2. DRM system dostosowany do badania drewna  
Fig. 2. Resistance drilling system adopted for testing timber structures



Rys. 3. Istota metody „pull-out”  
Fig. 3. General principles of the “pull-out” test

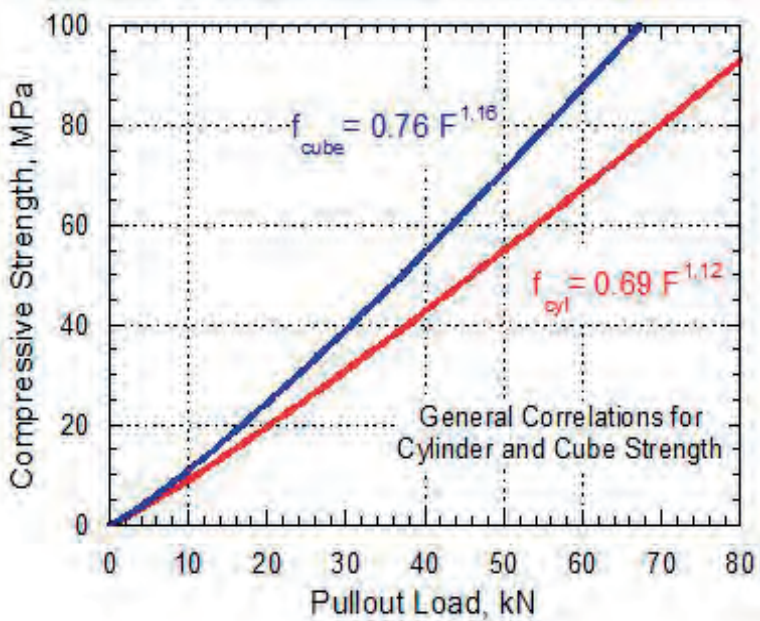


Rys. 4. Przykład realizacji pomiarów metodą „pull-out”  
Fig. 4. Example of execution of the “pull-out” test

szym etapie, po zlokalizowaniu zbrojenia i wyrównaniu powierzchni, w istniejącej konstrukcji wykonuje się otwór, wewnątrz którego, na głębokości 25 mm, wycina się wewnętrzne wyżłobienie (frez), w którym następnie rozpręża się specjalny pierścień stanowiący głowicę kotwy.

Obciążenie przekazywane jest za pośrednictwem siłownika hydraulicznego (rys. 4.). Siłownik z jednej strony przekazuje siłę wyrządzającą na trzpień kotwy, z drugiej zaś dociska powierzchnię betonu za pośrednictwem centrycznego pierścienia oporowego. Pierścień ten,





Rys. 5. Krzywe korelacyjne wyznaczone dla pomiarów metodą „pull-out”  
Fig. 5. General correlation curves defined for “pull-out” measurements



Rys. 6. Hala Stulecia we Wrocławiu – widok po renowacji  
Fig. 6. Centennial Hall in Wrocław – view after renovation

Jedną z metod, która zyskała sobie szczególne uznanie, jest metoda „pull-out”, a w szczególności jej odmiana o nazwie CAPO-Test, która pozwala na szybkie i wiarygodne określenie wytrzymałości betonu na ściskanie w istniejącej konstrukcji bezpośrednio na obiekcie.

dzięki właściwemu doborowi proporcji swoich wymiarów w stosunku do głębokości położenia kotwy oraz wymiarów samej kotwy, wymusza złożony stan naprężenia, który w efekcie prowadzi do zniszczenia charakteryzującego się ścisłą korelacją pomiędzy rejestrowaną siłą wyrwywającą kotwę a wytrzymałością betonu na ściskanie. Korelacja ta ma charakter ogólny, tzn. za wyjątkiem betonów na kruszywach

lekkich oraz betonów o uziarnieniu kruszywa przekraczającym 32 mm, jest w zasadzie niezależna od wpływu parametrów materiałowych i technologicznych (rys. 5).

### Wyniki badań

Jednym z obiektów o dużej wartości użytkowej, który w okresie kilku ostatnich lat przeszedł szczegółowe badania diagnostyczne

oraz stał się przedmiotem wszechstronnej oceny stanu technicznego, jest wrocławska Hala Stulecia (rys. 6.), która jest powszechnie uważana za jeden z kamieni milowych konstrukcji betonowych w Europie. Ta unikalna konstrukcja projektu niemieckiego architekta Maxa Berga została oddana do użytku w roku 1913, z okazji zorganizowanej we Wrocławiu (poprzednio Breslau) Wystawy Stulecia, a od lipca 2006 roku znajduje się na UNESCO World Heritage List.

Ponieważ obiekt wymagał renowacji i modernizacji po upływie tak długiego czasu eksploatacji, w okresie kilku ostatnich lat został zrealizowany specjalny program badawczy, którego celem było dokonanie całościowej ekspertyzy aktualnego stanu technicznego obiektu i podjęcie stosownych decyzji odnośnie do niezbędnych prac remontowych. Więcej szczegółów dotyczących przeprowadzonych badań można znaleźć między innymi w pracach [6], [7] i [8]

Autor niniejszego artykułu miał możliwość uczestniczyć w realizacji tych badań w zakresie oceny aktualnych, po upływie stu lat, parametrów wytrzymałościowych betonu. Wybrane wyniki tych badań zostały przedstawione poniżej.

Przedmiotem badań był między innymi dolny pierścień obwodowy kopuły Hali. Zasadniczą częścią szerokiego programu badawczego było określenie wytrzymałości na ściskanie betonu za pomocą metody „pull-out”. Zrealizowano je na górnej powierzchni badanego pierścienia, w 10 losowo wybranych miejscach pomiarowych, rozmieszczonych równomiernie po obwodzie badanego pierścienia. Szczegółowe wyniki badań zestawiono w tabeli. Dla porównania: każdorazowo w wierszu zawierającym wyniki pomiarów wytrzymałościowych metodą „pull-out” dla danego miejsca pomiarowego zamieszczono także wartości wytrzymałości uzyskane w wyniku laboratoryjnych badań odwiertów rdzeniowych.

Otrzymane wyniki pozwoliły na określenie następujących parametrów:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{cm, is} = 35.6 \text{ MPa}$
- najmniejsza uzyskana wartość wytrzymałości  $f_{is, lowest} = 25.9 \text{ MPa}$
- odchylenie standardowe wytrzymałości  $s = 5.65 \text{ MPa}$
- współczynnik zmienności wytrzymałości  $v = 15.9\%$

Zgodnie normą PN-EN 13791:2008 przyjęto, że wytrzymałość charakterystyczna badanego betonu, odpowiadająca wytrzymałości oznaczanej na próbkach sześciennych o wymiarach 150 x 150 x 150 mm ( $f_{ck, is, cube}$ ), jest mniejszą z dwóch poniższych wartości:

$$f_{ck, is, cube} \leq f_{cm(n), is} - 1,48 \cdot s \text{ i } f_{ck, is, cube} \leq f_{is, lowest} + 4$$

$$f_{ck, is, cube} \leq 35,6 - 1,48 \cdot 5,65 = 27,2 \text{ MPa}$$

$$\text{oraz } f_{ck, is, cube} \leq 25,9 + 4 = 29,9 \text{ MPa}$$

Tabela 1. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie metodą „pull-out”  
Table 1. Results of concrete compressive strength obtained by “pull-out” measurements

Nr miejsca pomiarowego	Wytrzymałość na ściskanie badana na odwiertach	punkt pomiarowy	siła wyrywająca [kN]	rzeczywista siła wyrywająca [kN]	$f_{c,15}$ [MPa]	$f_{cm,15}$ [MPa]
1	odwiert O1/A 38.7 MPa	C-28	28.5	28.3	37.1	
		C-29	28.7	28.5	37.4	36.9
		C-30	27.7	27.7	36.2	
2	odwiert O2/A 33.8 MPa	C-1	25.5	25.5	33.1	
		C-2	26.7	26.7	34.8	33.4
		C-3	25.0	25.0	32.4	
3	odwiert O3/A 40.2 MPa	C-4	30.3	30.2	39.8	
		C-5	28.0	27.8	36.4	38.1
		C-6	29.2	29.0	38.1	
4	odwiert O4/A 34.4 MPa	C-7	25.7	25.7	33.4	
		C-8	22.2	22.2	28.4	31.2
		C-9	24.6	24.6	31.9	
5	odwiert O5/A 28.4 MPa	C-10	20.8	20.7	26.4	
		C-11	24.5	24.5	31.7	31.3
		C-12	27.4	27.4	35.7	
6	odwiert O6/A 43.2 MPa	C-13	32.4	32.1	42.4	
		C-14	35.6	35.1	46.6	44.0
		C-15	32.8	32.5	43.0	
7	odwiert O7/A 25.6 MPa	C-16	20.8	20.7	26.4	
		C-17	20.5	20.4	25.9	27.0
		C-18	22.5	22.4	28.8	
8	odwiert O8/A 44.3 MPa	C-19	30.7	30.6	40.2	
		C-20	32.1	31.9	42.1	43.4
		C-21	36.6	36.1	48.0	
9	odwiert O9/A 35.3 MPa	C-22	29.0	28.9	37.9	
		C-23	30.0	29.9	39.3	37.7
		C-24	27.6	27.4	35.8	
10	odwiert O10/A 35.1 MPa	C-25	26.8	26.8	35.0	
		C-26	24.7	24.7	32.1	33.0
		C-27	24.6	24.6	31.9	

Na podstawie uzyskanych wyników badań wartość wytrzymałości charakterystycznej badanego betonu można przyjąć jako nie większą niż 27.2 MPa i oszacować jego klasę jako C20/25.

### Podsumowanie i wnioski

Współczesne metody nieniszczące mogą być z powodzeniem wykorzystywane w diagnostyce zabytkowych konstrukcji budowlanych.

Przeprowadzone niezależne badania wytrzymałości betonu na ściskanie metodą „pull-out” wykazały dużą zbieżność z wynikami badania odwiertów rdzeniowych, co jest potwierdzeniem wiarygodności tej metody badawczej.

Analiza wyników badań uzyskanych za pomocą metody „pull-out” wykazała, że badany beton, pomimo upływu stu lat, charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi, które pozwalają na oszacowanie jego klasy wytrzymałościowej jako C20/25.

### Bibliografia

- [1] Maierhofer C., Ziebolz A., Kopp C.: ONSITEFORMASONRY – A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry. Proc. of Int. Symp. of Non-Destructive Testing in civil Engineering, Berlin 2003.
- [2] Binda L., Lualdi M., Saisi A., Zanzi L., Gianinetto M., Roche G.: NDT applied to the diagnosis of historic buildings – A case history. Proc. of 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, London 2003.
- [3] Binda L., Zanzi L., Lualdi M., Condoleo P.: Complementarity of non destructive techniques in the diagnosis of damaged historic structures.. Proc. of 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, London 2003.
- [4] Kasal B., Tannert T.: In-situ assessment of structural timber – State of the Art Report of the RILEM Tech. Com. 215, Springer 2010.
- [5] Felicetti R.: The drilling resistance test for the assessment of the thermal damage in concrete. Fib Task Group 4.3 Workshop - Fire Design of Concrete Structures. What now? What next? Milan 2004.
- [6] Jasieńko J., Moczko A., Moczko M., Dżugaj R.: Badanie cech mechanicznych i fizycznych betonu w pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Wiadomości Konserwatorskie. 2010, Nr 28, str. 21–34.
- [7] Jasieńko J., Moczko A., Moczko M., Wała D.: Beton Hali Stulecia (UNESCO List) we Wrocławiu. Wiadomości Konserwatorskie. 2011, Nr 30, str. 168–177.
- [8] Jasieńko J., Moczko A., Moczko M.: Badania cech betonu w konstrukcji wsporczej kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Materiały Budowlane. 2015, Nr 11.

**Streszczenie:** W artykule omówiono podstawowe uwarunkowania oceny stanu technicznego zabytkowych konstrukcji budowlanych. Zwrócono uwagę na przydatność do tego celu badań nieniszczących, które umożliwiają przeprowadzenie niezbędnych badań diagnostycznych bezpośrednio na obiekcie, przy minimalnej ingerencji w jego integralność strukturalną. Scharakteryzowano wybrane metody badawcze wykorzystywane w diagnostyce tego rodzaju obiektów. Przedstawiono między innymi metodę termowizyjną, metodę DRM (pomiar oporu wiercenia) oraz metodę „pull-out”. Przedstawiono także wybrane wyniki badań własnych, dotyczących oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w dolnym pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych przeprowadzonych metodą „pull-out” wykazały między innymi, że badany beton, pomimo upływu stu lat, charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje zabytkowe, monitoring, metody nieniszczące, beton, wytrzymałość

### Abstract. MONITORING OF TECHNICAL STATE OF HISTORICAL BUILDING STRUCTURES.

The paper discusses the basic conditions for the assessment of the technical condition of historical building structures. Attention has been paid to the NDT measurements which allow to carry out necessary examinations directly on the object with relatively small interference in its structural integrity. Some selected test methods, used for technical evaluation of such structures, have been presented. Among other things, infrared thermography, DRM (drilling resistance measurements) and “pull-out” method have been introduced. The paper presents also selected results of author’s research carried out in the bottom perimeter ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław. The obtained results performed by means of “pull-out” method, showed that the current mechanical parameters of tested concrete, although almost 100 years have passed, should be regarded as very good.

**Keywords:** historical structures, monitoring, non-destructive tests, concrete, strength