

Mateusz Moczko*, Krzysztof Raszczuk**

Analiza stanu technicznego historycznej konstrukcji betonowej

Analysis of the technical condition of historical concrete structure

Słowa kluczowe: konstrukcje zabytkowe, Hala Stulecia, beton, wytrzymałość, nasiąkliwość, karbonatyzacja

Key words: heritage structures, Centennial Hall, concrete, strength, water absorbability, carbonation

1. WPROWADZENIE

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 jakich 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 zabytkowej konstrukcji budowlanej może mieć charakter bieżącej, powtarzanej cyklicznie kontroli jej 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 jej bezpieczeństwa, na przykład w wyniku klęski żywiołowej lub ataku terrorystycznego.

W praktyce inżynierskiej monitoring konstrukcji zabytkowych obejmuje w pierwszej kolejności ocenę

1. INTRODUCTION

Heritage building structures in many situations constitute a unique value of national cultural heritage. For this reason, assessment of their current technical condition is of key importance in ensuring that they are protected in an appropriate manner against problems which are a consequence of both time passing, and of changing socio-economic conditions, in which a particular structure is used. The possibility of determining and diagnosing potential risks relatively quickly guarantees that optimal decisions can be taken regarding protecting such structures, as well as planning and implementing essential conservation work, while assuring the right conditions for their further use.

Monitoring of heritage building structures can be provided as regular assessment of their technical condition, or it can involve a comprehensive technical expertise, which is related to planned modernisation or arises from unusual circumstances associated with a risk of building safety as a consequence of, for example, a natural disaster or terrorist attack.

In engineering practice, monitoring of heritage structures involves a visual assessment, in the first stage. A visual inspection is typically the first step in the diagnosis of every structure. The basic task is to check for possible damages and to carry out a detailed identifi-

* mgr inż., Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

** dr inż., Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

* *mgr inż., Civil Engineering Faculty, Wrocław University of Science and Technology*

** *dr inż., Civil Engineering Faculty, Wrocław University of Science and Technology*

Cytowanie / Citation: Moczko M., Raszczuk K. Analysis of the technical condition of historical concrete structure. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2018;54:57-66

Otrzymano / Received: 15.02.2018 • **Zaakceptowano / Accepted:** 30.03.2018

doi:10.17425/WK54CONCRETE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

wizualną. Inspekcja wizualna jest zazwyczaj pierwszym krokiem w diagnostyce każdej konstrukcji. Jej podstawowym zadaniem jest sprawdzenie ewentualnego występowania potencjalnych uszkodzeń oraz ich szczegółowa inwentaryzacja, obejmująca opis stwierdzonych wad, wraz z wykonaniem niezbędnej dokumentacji fotograficznej.

Ocena wizualna obejmuje także określenie rzeczywistych wymiarów geometrycznych, 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.

Integralną częścią tego rodzaju oględzin jest także ocena stopnia zagrożenia bezpieczeństwa obiektu oraz określenie programu niezbędnych do wykonania badań bezpośrednio na obiekcie. Niekiedy badania *in situ* są, w miarę potrzeby, uzupełniane o niezbędne badania laboratoryjne, takie jak na przykład badania wytrzymałościowe odwiertów rdzeniowych, badania nasiąkliwości, wodoszczelności czy też badania składu fazowego, wykonywane za pomocą analizy termicznej oraz rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej.

Diagnostyka tego rodzaju konstrukcji jest zadaniem złożonym ze względu na niepowtarzalny charakter badanych obiektów i wymaga zastosowania technik pomiarowych, które nie zagrażają integralności strukturalnej. Ze zrozumiałych względów na szczególną uwagę zasługują metody badawcze, które umożliwiają przeprowadzenie niezbędnych badań diagnostycznych w sposób nieniszczący bezpośrednio na obiekcie [1, 2]. Współczesna technika pomiarowa oferuje szeroki wachlarz aparatury diagnostycznej, która jest wyrazem praktycznego wykorzystania najnowszych osiągnięć myśli technicznej z tego zakresu [3].

2. OPIS BADAŃ

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań cech mechanicznych i fizycznych betonu z górnego pierścienia żelbetowej konstrukcji kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu (ryc. 1). Przedstawione wyniki dokumentują aktualne cechy mechaniczno-fizyczne betonu, po upływie ponad 100 lat od wzniesienia obiektu w 1912 r. przez niemiecką firmę budowlaną Dyckerhoff & Widmann, na podstawie projektu niemieckiego architekta i konstruktora Maksa Berga. Obiekt został oddany do użytku w 1913 roku, jako główna atrakcja zorganizowanej we Wrocławiu Wystawy Stulecia, mającej uczcić setną rocznicę zwycięstwa nad Napoleonem.

Wrocławską Hala Stulecia jest uznawana za jeden z kamieni milowych betonowego budownictwa europejskiego. W dniu 13 lipca 2006 roku Hala Stulecia została wpisana na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO

and description of the existing irregularities and to make essential photographic documentation as well.

The visual inspection includes also determination of the actual geometric dimensions, estimation of the potential corrosion risk, checking dampness of structure and assessment of the existing deflection and deformation.

In many cases, a valuable addition to visual inspection can be assessment of technical openings made in order to verify experimentally the actual technical condition of the structure being under investigation. This relates in the first instance to assessment of the internal defects which can be both structural discontinuities or the result of the development of corrosion processes.

An integral part of this type of inspection is also an assessment of the safety risk of the structure and determination of the testing programme necessary to carry out directly on site. The *in situ* testing, depending on need, is often supplemented by laboratory testing, for example: strength tests of core samples extracted from testing structure, absorbability measurements, water permeability resistance, or phase structure analysis carried out by means of thermal analysis or diffraction X-ray analysis.

The diagnosis of this type of structures is a complex task because of the unique character of the investigated objects. It usually requires application of testing techniques, which do not influence structural integrity. For obvious reasons, non-destructive measurements carried out directly on site are of special interest [1, 2]. Modern measurement techniques offer a wide range of diagnostic equipment, which utilize latest technical achievements in this regard for practical application in engineering practice [3].

2. DESCRIPTION OF TESTING

The paper presents results of tests carried out to determine the mechanical and physical parameters of concrete in the upper reinforced concrete ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław (fig. 1). The results showed the current mechanical and physical properties of the concrete after one hundred years. This unique structure was built in 1912 by the German construction company 'Dyckerhoff & Widmann', according to a design by the German architect and builder Max Berg. The structure was brought into use in 1913 as the main attraction of the Centennial Exhibition in Wrocław, which was organised to celebrate the hundredth anniversary of the victory over Napoleon.

The Centennial Hall in Wrocław is recognised as one of the milestones of the European concrete construction. On the 13th of July 2006, the Centennial Hall was included in the UNESCO World Heritage List as a pioneering engineering and architectural achievement of the 20th century (fig. 2). Its structure comprises two independent reinforced concrete structural systems. The base structure is made up of four main supporting pillars, which form four great apse arcades with a span



Ryc. 1. Hala Stulecia we Wrocławiu
Fig. 1. Centennial Hall in Wrocław

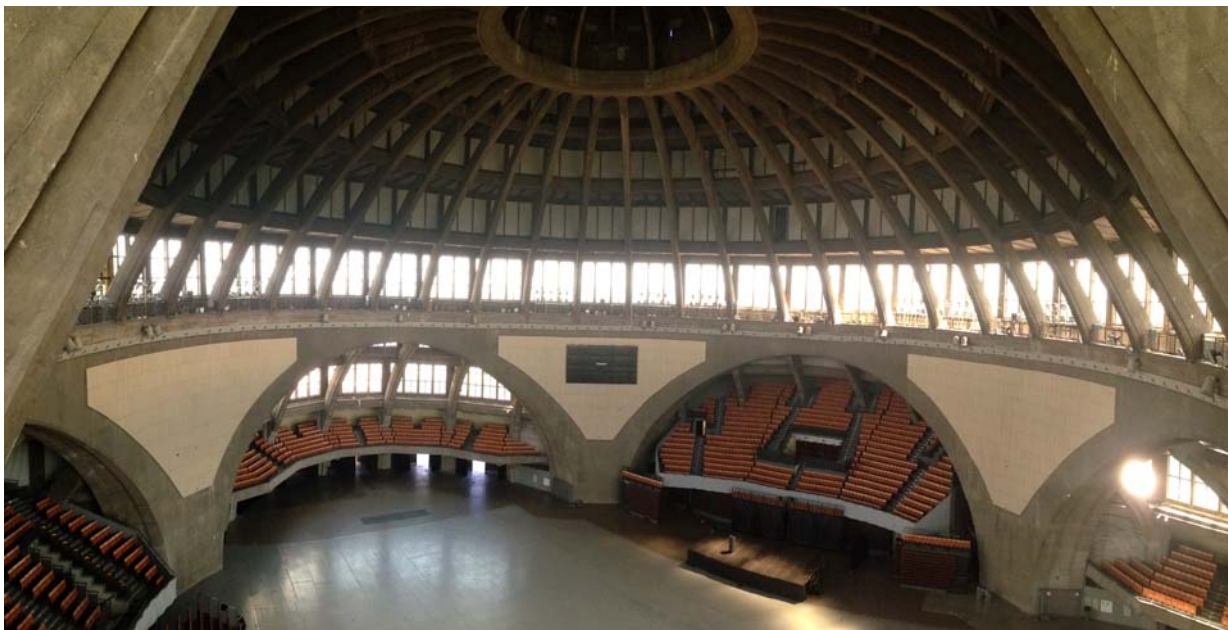
jako pionierskie osiągnięcie inżynierii i architektury XX stulecia (ryc. 2). Jej konstrukcję stanowią dwa niezależne od siebie żelbetowe układy konstrukcyjne. Podstawę stanowi układ czterech głównych filarów podporowych, tworzących cztery wielkie arkady absyd o rozpiętości 41 m i wysokości 16,7 m. Górną część konstrukcji stanowi kopuła o średnicy 65 m i wysokości 23 m, składająca

of 41 m and height of 16.7 m. The upper part of the structure comprises a dome 65 m in diameter and 23 m high, made up of 32 reinforced concrete ribs which are supported on the main tensile ring at the bottom, and joined together at the top with a concrete compression ring of 14.4 m in diameter [4].

As the structure was in need of renovation and modernization after a long period of use, a special research programme has been carried out over the past few years, with the aim of completing a comprehensive assessment of the current technical condition of the structure as a basis for decision-making on essential renovation work. More details concerning the research carried out can be found in the following publications [5, 6, 7, 8].

Examination of concrete quality in the upper ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław, results of which are presented in this paper, were focussed on the following:

- determining concrete compressive strength by means of laboratory testing of core samples extracted from structure,



Ryc. 2. Hala Stulecia we Wrocławiu – widok od środka
Fig. 2. Centennial Hall in Wrocław – view from inside

się z 32 żelbetowych żeber opartych u dołu na rozciągającym pierścieniu głównym, a u góry połączonych w ścisłanym pierścieniu betonowym o średnicy 14,4 m [4].

Ponieważ obiekt wymagał renowacji i modernizacji po upływie tak długiego okresu 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 odnośnie do przeprowadzonych badań można znaleźć między innymi w pracach [5, 6, 7, 8].

Badania betonu w górnym pierścieniu kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu, których wyniki zostały przed-

- determining concrete tensile strength using the “pull-off” method,
- verifying the depth of carbonation of the near-surface layers of the concrete,
- carrying out laboratory assessment of the water absorbability of the concrete.

3. TEST RESULTS

3.1 Testing of core specimens

Testing program prepared for evaluation of the mechanical properties of the concrete from which the upper ring of the dome of Centennial Hall was made

stawione w niniejszej pracy, obejmowały następujące zagadnienia:

- określenie wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie laboratoryjnych badań odwiertów rdzeniowych,
- określenie wytrzymałości betonu na rozciąganie metodą „pull-off”,
- sprawdzenia głębokości karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu,
- dokonanie laboratoryjnej oceny nasiąkliwości badanego betonu.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1 Badania odwiertów rdzeniowych

Opracowano program badań cech mechanicznych betonu, z którego została wykonana konstrukcja górnego betonowego pierścienia kopuły Hali Stulecia, który przewidywał między innymi pobranie odwiertów rdzeniowych o średnicy zbliżonej do 100 mm w 10 miejscach pomiarowych, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie tego pierścienia. Wszystkie odwierty pobrano w kierunku zgodnym z kierunkiem betonowania, wycinając je pionowo w dół na górnej powierzchni badanego pierścienia.

Przeprowadzone oględziny pozyskanych odwiertów kontrolnych wykazały, że badany beton został wykonany na kruszywie bazaltowym z niewielkim dodatkiem kruszywa naturalnego i charakteryzuje się dobrym uziarnieniem (ryc. 3).

Z pozyskanych odwiertów rdzeniowych wycięto próbki laboratoryjne o wymiarach $h \approx f \approx 100$ mm. Oznaczenia poszczególnych próbek do badań przyjęto analogicznie do oznaczenia odwiertów, z których zostały one wycięte, przy czym w przypadku odwiertu TR-1 udało się wyciąć dwie próbki do badań, oznaczając je odpowiednio: TR-1/A (zewnątrzny fragment odwiertu TR-1) oraz TR-1/B (fragment odwiertu położony głębiej – od 10 do 20 cm). Do badań wytrzymałościowych w próbie ściskania osiowego przeznaczono próbki oznaczone jako TR-1/A, TR-2, TR-4, TR-7, TR-8 i TR-10.

Pozostałe próbki, oznaczone jako TR-1/B, TR-3, TR-5, TR-6 oraz TR-9, wykorzystano do oznaczenia nasiąkliwości badanego betonu. Na powierzchni świeżych przełomów wszystkich próbek określono zasięg karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu.

Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone przy zapewnieniu równoległości powierzchni czołowych badanych próbek, dostosowując je do badań za pomocą kapslowania nakładkami piaskowymi. Szczegółowe wyniki badania cech mechanicznych betonu, uzyskane w czasie laboratoryjnych badań odwiertów rdzeniowych, zestawiono w tabeli 1.

Otrzymane wyniki pozwoliły na określenie następujących parametrów:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is} = 27,7$ MPa
- najmniejsza uzyskana wartość wytrzymałości $f_{is, lowest} = 21,7$ MPa

involved among other things, extracting cores of up to 10 mm in diameter in ten testing locations, spaced regularly along the perimeter of the ring. All the cores were taken in parallel to the direction of casting, cutting them vertically down from the top surfaced of the tested ring.

The inspection of the cores extracted from the existing structure showed that the tested concrete was made using basalt aggregate with a small addition of natural aggregate and is characterised by good granular structure (fig. 3).



Ryc. 3. Widok struktury badanego betonu – odwiert TR-8

Fig. 3. View of examined concrete structure – core number TR-8

Laboratory samples of $h \approx f \approx 100$ mm were cut from the extracted cores. The identification of the particular specimens corresponded to the identification of the locations from which they were cut, with one exception of core TR-1, from which two specimens were prepared for testing, marked as TR-1/a (outer part of core, representing part of core close to surface TR-1) and TR-1/B (part of the core located at a deeper level – from 10 to 20 cm). Samples designated for axial compressive strength testing were identified as: TR-1/A, TR-2, TR-4, TR-7, TR-8 and TR-10.

The remaining specimens, marked as: TR-1/B, TR-3, TR-5, TR-6 and TR-9, were used to determine the water absorbability of the tested concrete. On the fresh fracture surfaces of all specimens the depth of carbonation process was determined as well.

The strength measurements was carried out in a way that the parallelism of the front faces of the specimens were assured by means of sandy cap overlays. The detailed results of the mechanical properties examination, obtained from laboratory testing of cores are presented in table 1.

The obtained results allowed to determine following mechanical parameters:

- average concrete compressive strength $f_{cm, is} = 27.7$ MPa
- the lowest value of strength $f_{is, lowest} = 21.7$ MPa
- standard deviation of strength results $s = 4.45$ MPa
- coefficient of strength variability $v = 16.1\%$

- odchylenie standardowe wytrzymałości $s = 4,45 \text{ MPa}$
- współczynnik zmienności wytrzymałości $v = 16,1\%$
- gęstość objętościowa betonu $\rho = 2339 \text{ kg/m}^3$

- volumetric density of the concrete $\rho = 2339 \text{ kg/m}^3$

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych odwiertów rdzeniowych

Nazwa próbki	Powierzchnia [mm ²]	Siła [kN]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
odwiert TR-1/A	7003	170	2313	24.3
odwiert TR-2	7028	244	2383	34.7
odwiert TR-4	7018	152	2346	21.7
odwiert TR-7	7020	202	2345	28.8
odwiert TR-8	7006	202	2346	28.8
odwiert TR-10	7013	195	2302	27.8

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

$$f_{ck, is, cube} \leq f_{cm(n), is} - k$$

oraz

$$f_{ck, is, cube} \leq f_{is, lowest} + 4$$

$$f_{ck, is, cube} \leq 27,7 - 7 = 20,7 \text{ MPa}$$

oraz

$$f_{ck, is, cube} \leq 21,7 + 4 = 25,7 \text{ MPa}$$

Na podstawie uzyskanych wyników badań wartość wytrzymałości charakterystycznej badanego betonu można przyjąć jako nie większą niż 21,0 MPa i oszacować jego klasę jako C20/25.

3.2. Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie metodą „pull-off”

Oceny wytrzymałości betonu na rozciąganie dokonano w celu ustalenia możliwości ewentualnego zastosowania do napraw powierzchniowych materiałów naprawczych typu PCC. W badaniach wykorzystano metodę „pull-off”, której istotą jest pomiar siły potrzebnej do oderwania przyklejonego do badanego elementu metalowego krążka o znanym polu powierzchni (ryc. 4). Najczęściej stosowane są krążki o średnicy 50 mm. Wokół krążka wykonuje się nacięcie o głębokości 10–15 mm za pomocą wiertnicy koronkowej. Siła rozciągająca przekazywana jest za pośrednictwem specjalnego urządzenia mechanicznego albo siłownika hydraulicznego. Siła odrywająca jest rejestrowana przez

Table 1. Results of concrete compressive strength obtained by testing cores

Sample Identification	Surface [mm ²]	Force [kN]	Volumetric density [kg/m ³]	Compressive strength [MPa]
core TR-1/A	7003	170	2313	24.3
core TR-2	7028	244	2383	34.7
core TR-4	7018	152	2346	21.7
core TR-7	7020	202	2345	28.8
core TR-8	7006	202	2346	28.8
core TR-10	7013	195	2302	27.8

In accordance with the European Standard (PN-EN 13791:2008), it was assumed that the characteristic strength of the examined concrete, equivalent to the strength indicated for cubic samples of 150 × 150 × 150 mm ($f_{ck, is, cube}$), was the lower one of the two values presented below:

$$f_{ck, is, cube} \leq f_{cm(n), is} - k$$

and

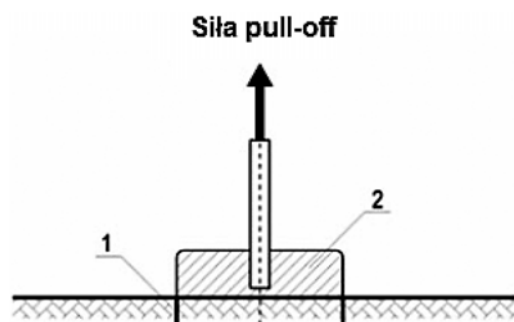
$$f_{ck, is, cube} \leq f_{is, lowest} + 4$$

$$f_{ck, is, cube} \leq 27.7 - 7 = 20.7 \text{ MPa}$$

and

$$f_{ck, is, cube} \leq 21.7 + 4 = 25.7 \text{ MPa}$$

Based on the obtained results, the value of the characteristic compressive strength for tested concrete could be determined as no larger than 21.0 MPa and considered as equivalent of the C20/25 strength class.



Ryc. 4. „Pull-off” – istota metody; 1 – nacięcie wokół krążka, 2 – krążek metalowy przyklejony do powierzchni

Fig. 4. „Pull-off” – the principle of the testing method; 1 – notch, 2 – steel disc glued to the surface



Ryc. 5. Widok urządzenia DYNA w czasie pomiarów
Fig. 5 DYNA system during measurements

urządzenie pomiarowe i korelowana z wytrzymałością na rozciąganie, poprzez podzielenie zmierzonej siły przez pole przekroju poprzecznego krążka.

Wśród wielu urządzeń umożliwiających tego typu pomiary dwa rozwiązania znalazły najszersze zastosowanie w praktyce inżynierskiej: szwajcarska aparatura „DYNA” oraz duński zestaw pomiarowy „BOND-Test”. W omawianych badaniach wykorzystano urządzenie o nazwie DYNA (ryc. 5). Pomiary przeprowadzono w pięciu losowo wybranych punktach pomiarowych. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2.

Zgodnie z wytycznymi technicznymi fragment konstrukcji poddany badaniu może zostać naprawiony przy zastosowaniu materiałów do napraw powierzchniowych typu PCC, pod warunkiem spełnienia następujących warunków:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie nie może być mniejsza niż 25 MPa,
- średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie nie może być mniejsza niż 1,5 MPa,
- minimalna wartość pojedynczego pomiaru wytrzymałości na rozciąganie musi być nie mniejsza niż 1,0 MPa.

Badania metodą „pull-off” są usankcjonowane europejską normą EN 1542 oraz amerykańską normą ASTM C1583 (*Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension*).

Tabela 2 Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie metodą „pull-off”

Numer pomiaru	Siła odrywająca [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
TR-B-1	6.40	3.25
TR-B-2	5.50	2.80
TR-B-3	5.20	2.65
TR-B-4	6.10	3.10
TR-B-5	5.30	2.70

Uzyskane wyniki pomiaru wytrzymałości na rozciąganie w pełni potwierdziły dobrą jakość betonu

3.2. Testing tensile strength of the concrete using the “pull-off” method

Assessment of the tensile strength of the examined concrete was performed mainly to determine the potential possibilities for applying PCC-type repair materials for renovation works. The “pull-off” method was used. The principle is basing on measuring the force which is necessary to pull off a metal disc, of known dimensions, that was glued onto the tested element (fig. 4). Discs of 50 mm diameter are usually used for this purpose. An 10–15 mm deep notch is made around the disc using a diamond drilling bit. The tensile force is transmitted via special mechanical device or by hydraulic jack. The pull-off force is recorded by measuring system and correlated with the concrete tensile strength by dividing the measured force by the area of the cross-section of the disc.

Among the many different types of equipment available for this kind of measurement, two solutions is particularly popular in engineering practice: the Swiss “DYNA” equipment and the Danish “BOND-Test” measuring system. For the testing program presented in this paper, the DYNA equipment was used (fig. 5). Measurements were made in five randomly selected locations. The results obtained are presented in table 2.

In accordance with the technical specifications, the part of the structure subjected to testing can be repaired by using PCC-type materials for surface repairs, provided the following conditions are met:

- the average compressive strength of the concrete cannot be lower than 25 MPa,
- the average tensile strength from at least 5 measurements cannot be lower than 1.5 MPa,
- the minimum value of a single tensile strength measurement can be no less than 1.0 MPa.

Testing using the “pull-off” method is in accordance with the European Standard EN 1542 and the US standard ASTM C1583 (*Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension*).

Table 2 Results obtained by means of “pull-off” measurements

Measurement number	Pull-off force [kN]	Tensile strength [MPa]
TR-B-1	6.40	3.25
TR-B-2	5.50	2.80
TR-B-3	5.20	2.65
TR-B-4	6.10	3.10
TR-B-5	5.30	2.70

The obtained results of tensile strength measurements, confirmed the good quality of concrete in the upper ring of the dome of the Centennial Hall. The average value of 2.9 MPa allows successfully to apply PCC-type surface repair materials.

w górnym pierścieniu kopuły Hali Stulecia. Uzyskana wartość średnia, równa 2,9 MPa, w pełni gwarantuje możliwość zastosowania napraw powierzchniowych typu PCC.

3.3 Ocena zagrożenia korozyjnego

Bardzo ważnym aspektem w ochronie historycznych konstrukcji wykonanych z żelbetu jest również ocena zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej. Bardzo pomocne są w tym przypadku badania określające stopień karbonatyzacji badanego betonu. Mogą być one przeprowadzone w laboratorium lub bezpośrednio na badanym obiekcie.

Badania te są najczęściej wykonywane na powierzchni odwiertów rdzeniowych, bezpośrednio po ich wycięciu z konstrukcji oraz w miejscach, gdzie wykonano odkrywkę stali zbrojeniowej. Tradycyjnie stosowaną metodą badawczą jest tzw. test fenoloftaleinowy, który najogólniej rzecz biorąc sprowadza się do spryskania alkoholowym roztworem fenoloftaleiny powierzchni świeżego przełomu betonowego. Interpretacja uzyskiwanych wyników jest w tym przypadku bardzo prosta. Fenoloftaleina ma bowiem tę właściwość, że przy pH równym 8,5–9,5 powoduje zmianę koloru czerwonego na bezbarwny. Warstwa betonu ulegająca odbarwieniu uznawana jest za warstwę skarbonatyzowaną, która utraciła zdolności pasywacyjne w stosunku do stali zbrojeniowej.

Bardziej nowoczesną metodą pomiarową jest tzw. „Rainbow-Test” (ryc. 6), który polega na wykonaniu aerozolowego natrysku badanej powierzchni betonu roztworem specjalnie dobranej kompozycji odczynników chemicznych, identyfikujących poszczególne wartości pH w zakresie od 5 do 13 (ryc. 7). Odczyn pH równy 11, uznawany powszechnie za wartość graniczną, poniżej której obniża się naturalna zdolność betonu do pasywacji zbrojenia, odpowiada zabarwieniu betonu na fioletowo. Przejście palety barw z koloru fioletowego w zielony (pH = 9) sygnalizuje spadek pH poniżej wartości uznawanej za graniczną i potencjalne zagrożenie korozyjne zbrojenia. Zmiana koloru z zielonego na żółty oznacza wartość współczynnika pH równą około 7, natomiast kolor pomarańczowy odpowiada wartości tego współczynnika równej około 5. W obu tych przypadkach mamy do czynienia z silnie kwasowym odczynem, co stanowi bezpośrednie zagrożenie korozyjne stali zbrojeniowej.

Przeprowadzone badania, zrealizowane za pomocą testu fenoloftaleinowego, wykazały, że grubość przypowierzchniowej warstwy betonu, która uległa procesowi karbonatyzacji w badanych próbkach, jest zbliżona i wynosi średnio około 35 mm. Poniżej zestawiono uzyskane wyniki badań:



Ryc. 6. Test tęczowy
Fig. 6. Rainbow-Test

3.3 Assessment of corrosion risk

A very important aspect of protection of historic structures made from reinforced concrete is assessment of corrosion risk of reinforcing steel bars. In this case test determining the depth of carbonation front are very helpful. Such tests can be carried out in the laboratory or directly on site.

Carbonation measurements are usually performed on the surfaces of the cores, immediately after they have been extracted from the structure and in the places where openings of the reinforcing steel bars has been made. The traditional testing method is the so-called Phenolphthalein test, which in the most general terms is to spray a fresh fractured concrete surface with an alcohol solution of phenophthalein.

The interpretation of obtained results in this case is very simple. Phenolphthalein has the property that at a pH coefficient equal to 8.5–9.5 its colour turns from red into colourless. The concrete layer that loses its colour is recognised to be carbonated, which as a consequence indicates the loss of the ability of the concrete to protect reinforcing steel bars against corrosion.

A more modern testing method is the so-called “Rainbow-Test” (fig. 6), which consists in aerosol spraying of the tested concrete surface with a solution of a specially selected chemical reagents composition, identifying individual values of pH coefficient in the range from 5 to 13 (fig. 7). A pH value equal to 11 is commonly considered to be a boundary value, below which the natural capability of concrete for passivity of reinforcement is reduced. This value of pH coefficient corresponds with violet colour visible on the concrete surface. Moving through the colours from violet to green (pH = 9) indicates a reduction of pH below the value considered a boundary and potentially means possible corrosion of the steel bars. The colour change from green to yellow indicates the value of pH of approximately 7, whereas orange indicates the pH value of about 5. In both cases, we are dealing with a strongly acid environment, which constitutes a direct corrosion risk of the reinforcement.

The tests carried out revealed that the thickness of the near-surface concrete layer, which had been

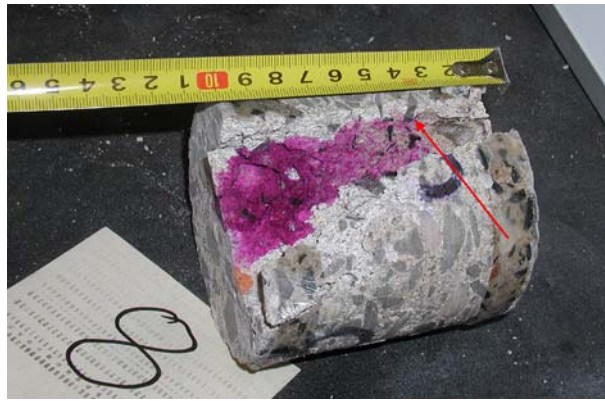


Ryc. 7. Test tęczowy – skala kolorów odpowiadająca wartości współczynnika pH

Fig. 7 Rainbow-Test – color scale related to pH coefficient



Ryc. 8 Odwiert TR-4 – głębokość karbonatyzacji około 42 mm
Fig. 8. Core number TR-4 – depth of carbonation app. 42 mm



Ryc. 9 Odwiert TR-8 – głębokość karbonatyzacji około 39 mm
Fig. 9. Core number TR-8 – depth of carbonation app. 39 mm

- odwiert TR-1/A → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 35 mm
- odwiert TR-2 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 22 mm
- odwiert TR-3 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 25 mm
- odwiert TR-4 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 42 mm (ryc. 8)
- odwiert TR-7 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 40 mm
- odwiert TR-8 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 39 mm (ryc. 9)
- odwiert TR-10 → grubość warstwy skarbonatyzowanej: około 37 mm.

3.4 Badanie nasiąkliwości betonu

Badania przeprowadzono na pięciu próbkach, wyciętych z odwiertów rdzeniowych, pobranych z górnego pierścienia kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Stosowne przeliczenia wykonano zgodnie z podaną poniżej zależnością:

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100\%$$

gdzie:

G_1 – masa próbki suchej,

G_2 – masa próbki nasyconej wodą

n_w – nasiąkliwość

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki oznaczenia nasiąkliwości betonu

Oznaczenie próbki	Masa próbki nasyconej [g]	Masa próbki w stanie suchym [g]	Nasiąkliwość [%]
próbka TR-1/B	1594,8	1513,0	5,41
próbka TR-3	1355,0	1299,8	4,25
próbka TR-5	1236,0	1174,8	5,21
próbka TR-6	1332,8	1268,2	5,09
próbka TR-9	1755,8	1670,4	5,11

carbonated, was approximately equal to 35 mm. The detailed test results are presented below:

- core sample TR-1/A → thickness of carbonated layer: approx. 35 mm
- core sample TR-2 → thickness of carbonated layer: approx. 22 mm
- core sample TR-3 → thickness of carbonated layer: approx. 25 mm
- core sample TR-4 → thickness of carbonated layer: approx. 42 mm (fig. 8)
- core sample TR-7 → thickness of carbonated layer: approx. 40 mm
- core sample TR-8 → thickness of carbonated layer: approx. 39 mm (fig. 9)
- core sample TR-10 → thickness of carbonated layer: approx. 37 mm.

3.4 Testing of concrete water absorbability

Tests were carried out on 5 specimens cut from cores taken from the upper ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław. Calculations were made in accordance with the relation showed below:

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100\%$$

where:

G_1 – dry mass of the specimen,

G_2 – mass of the specimen saturated with water

n_w – water absorbability

The obtained results are presented in table 3.

Table 3. Results of water absorbability measurements

Specimen identification	Saturated mass of specimen [g]	Dry mass of specimen [g]	Absorbability [%]
specimen TR-1/B	1594.8	1513.0	5.41
specimen TR-3	1355.0	1299.8	4.25
specimen TR-5	1236.0	1174.8	5.21
specimen TR-6	1332.8	1268.2	5.09
specimen TR-9	1755.8	1670.4	5.11

Uzyskane wartości nasiąkliwości betonu wahają się w przedziale od 4,25 do 5,41% przy współczynniku zmienności równym 8,9%, który świadczy o dużej jednorodności tej cechy betonu. Średnia wartość nasiąkliwości badanego betonu wyniosła około 5,0%, co zazwyczaj świadczy o wysokiej jakości struktury badanego betonu.

4. PODSUMOWANIE

Podsumowując uzyskane wyniki badania cech mechanicznych i fizycznych betonu, z którego wykonano górny pierścień żelbetowej konstrukcji kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu, należy stwierdzić, że jego jakość, uwzględniając dostępne na początku XX wieku możliwości technologiczne, jest zaskakująco dobra. Interesującym jest fakt, iż w tym fragmencie konstrukcji zastosowano kruszywo bazaltowe, w odróżnieniu od dolnego pierścienia obwodowego, wykonanego na bazie kruszywa granitowego. Na podkreślenie zasługuje także wysoka jakość i dobre uziarnienie zastosowanego kruszywa.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe wykazały, że parametry mechaniczne badanego betonu odpowiadają wymaganiom stawianym przez aktualnie obowiązujące normy przedmiotowe klasie wytrzymałościowej C20/25. Wysoką jakość betonu w górnym pierścieniu kopuły potwierdziły także wyniki pomiaru wytrzymałości na rozciąganie. Uzyskana wartość średnia, równa 2,9 MPa, w pełni gwarantuje możliwość zastosowania napraw powierzchniowych typu PCC.

Istotnym elementem oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych, mających wartość historyczną, jest ocena występującego zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej. Przeprowadzone badania wykazały między innymi, że grubość przypowierzchniowej warstwy betonu, która uległa procesowi karbonatyzacji, jest zbliżona i wynosi średnio około 35 mm, co uwzględniając wiek betonu (ponad 100 lat), świadczy o wysokiej jakości jego struktury wewnętrznej. Powyższy fakt potwierdzają także wyniki pomiarów nasiąkliwości badanego betonu. Uzyskane wartości zawierają się w przedziale od 4,25 do 5,41%, co potwierdza wysoką jego szczelność. Należy ponadto zauważyć, że stwierdzony współczynnik zmienności uzyskanych wartości nasiąkliwości nie przekracza 9%, co wskazuje na dużą jednorodność strukturalną badanego betonu.

The values for water absorbability of the concrete range from 4.25 to 5.41% with a variability coefficient equal to 8.9%, which indicates that the concrete has a large homogeneity with respect to this property. The average water absorbability of the examined concrete was approx. 5.0%, which usually indicates high quality concrete internal structure.

4. CONCLUSION

Based on the results obtained regarding the mechanical and physical properties of the concrete, used in the construction of the reinforced concrete upper ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław, it can be stated that, considering the technological possibilities available at the beginning of the 20th century, the quality of examined concrete is surprisingly good. It is interesting to note that basalt aggregate was used in this part of the dome structure, in contrast to the bottom perimeter ring, which was made using granite aggregate. It is also important to note the high quality and good granular structure of the aggregate used.

The strength testing, which was carried out, indicated that the mechanical parameters of the tested concrete meet the requirements of current standards of the C20/25 strength class. The high quality of the concrete in the upper ring of the dome was confirmed also by the results of tensile strength measurements. The average value obtained, was equal to 2.9 MPa what allowed to apply PCC-type surface repair materials for renovation works.

A key element in the assessment of the technical condition of reinforced concrete structures, which are of historical value, is the assessment of the corrosion risk to the reinforcing steel. The tests which were carried out, showed among other things, that the thickness of concrete layers, which was carbonated amounts in average to about of 35 mm. Considering the age of the concrete (more than 100 years), the obtained results indicate the high quality of its internal concrete structure. This fact has been also confirmed by the results of the water absorbability measurements. The values obtained ranged from 4.25 to 5.41%, which confirms its high water tightness. It is also important to note, that the variability coefficient in this case does not exceed 9%, which proves high structural homogeneity of the examined concrete.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Binda L., Lualdi M., Saisi A., Zanzi L., Gianinetto M., Roche G. NDT applied to the diagnosis of historic buildings – A case history. In: Proc. of 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair. London, 2003.
- [2] Binda L., Zanzi L., Lualdi M., Condoleo P. Complementarity of non destructive techniques in the diagnosis of damaged historic structures. In: Proc. of 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair. London, 2003.

- [3] Moczko M. Jak monitorować zabytki? *Builder* 2017;5:74–77.
- [4] Ilkosz J. Hala Stulecia i Tereny Wystawowe we Wrocławiu – dzieło Maxa Berga. Muzeum Architektury we Wrocławiu, Wrocław, 2005.
- [5] Jasińko J., Moczko A., Moczko M., Dżugaj R. Badanie cech mechanicznych i fizycznych betonu w pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. *Wiadomości Konserwatorskie* 2010;28: 21–34.
- [6] Jasińko J., Moczko A., Moczko M., Wala D. Beton Hali Stulecia (UNESCO List) we Wrocławiu. *Wiadomości Konserwatorskie* 2011;30:168–177.
- [7] Onysyk J., Biliszczyk J., Prabucki P., Sadowski K., Toczkiwicz R. Strengthening the 100-year-old reinforced concrete dome of the Centennial Hall in Wrocław. *Structural Concrete* 2014;1:30–37.
- [8] Jasińko J., Moczko A., Moczko M. Badania cech betonu w konstrukcji wsporczej kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. *Materiały Budowlane* 2015; 11:99–100.
-

Streszczenie

W pracy 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. W pracy przedstawiono także wybrane wyniki badań własnych, dotyczących oceny wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie oraz oceny nasiąkliwości i zagrożenia korozyjnego w górnym pierścieniu żelbetowej konstrukcji kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu.

Abstract

The paper discusses the basic conditions required for assessing the technical condition of heritage building structures. Attention is given to the utility of non-destructive testing for this purpose, which allows essential diagnostic testing to be carried out directly on site, with only minimal intervention into its structural integrity. The paper presents also the results of own research regarding assessment of concrete compressive and tensile strength, as well as assessment of water absorbability and risk of corrosion in the upper reinforced concrete ring of the dome structure of the Centennial Hall in Wrocław.