

Jerzy Jasieńko\*, Dariusz Łydźba\*\*, Łukasz Bednarz\*,  
Magdalena Piechówka-Mielnik\*, Magdalena Rajczakowska\*\*

## Wybrane badania betonu Hali Stulecia we Wrocławiu (obiekt UNESCO)

### Selected research on concrete of the Centennial Hall in Wrocław (UNESCO site)

**Słowa kluczowe:** Hala Stulecia, beton, właściwości fizyczne, właściwości chemiczne, mikrostruktura, porowatość, indentacja

**Key words:** Centennial Hall, concrete, physical properties, chemical properties, microstructure, porosity, the indentation technique

#### 1. WPROWADZENIE

Hala Stulecia jest budowlą zaprojektowaną przez architekta i budowniczego Maxa Berga. Konstrukcja żelbetonowa wzniesiona została w latach 1911–1913 przez firmę budowlaną Dyckerhoff & Widmann (ryc. 1). W jej wnętrzach zorganizowano Wystawę Stulecia mającą uczcić setną rocznicę pokonania Napoleona pod Lipskiem. Hala Stulecia jest pionierskim i jednym z najbardziej owocnych osiągnięć inżynierii i architektury początku XX wieku. Powstanie Hali wniosło znamienity wkład w zastosowanie żelazobetonu w praktyce architektonicznej, będąc równocześnie czynnikiem stymulującym zmiany w koncepcji umacniania konstrukcji budowlanych z wykorzystaniem stali [1, 2].

Hala Stulecia ma rzut czteroliścia, który tworzą wewnętrzne koło i otwierające się do niego cztery półkoliste apsydy. Budowla podzielona jest na dwie niezależne konstrukcyjnie części – dźwigającą podstawę i nakrywającą ją, żebrową kopułę. Wysokość Hali Stulecia wynosi 42 m, z czego 19 m przypada na podstawę, a 23 m na prętową kopułę żelbetonową. Podstawa składa się z czterech filarów, tworzących arkady apsyd, o rozpiętości 41 m i wysokości 16,7 m, na które nałożono pierścien

#### 1. INTRODUCTION

The Centennial Hall was designed by Max Berg – an accomplished architect and builder. The structure made of reinforced concrete was built between 1911 and 1913 by a Dyckerhoff & Widmann construction company (fig. 1). The Hall was the venue of the Centennial Exhibition commemorating the 100<sup>th</sup> anniversary of the defeat of Napoleon in the Battle of Leipzig. The Centennial Hall pioneered a new building style and was also one of most complex engineering and architectural achievements of the beginning of the 20<sup>th</sup> century. Construction of the Hall is an important milestone in the application of reinforced concrete in architectural practice and provided an impulse for conceptual changes relating to using steel for strengthening building structures [1, 2].

The Centennial Hall was built upon a quatrefoil floor plan, consisting of an internal circle and four apses which open out towards the circle. The building comprises two structurally independent parts – a load carrying base and a rib dome which covers the base. The Hall is 42 m high, with a 19 m high base and a reinforced concrete 23 m high rod dome. The base comprises four pillars which create arcades of apses, with a span of 41 m and height

\* Zakład Materiałów Budowlanych, Konstrukcji Drewnianych i Zabytkowych, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

\*\* Katedra Geotechniki, Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

\* *Department of Building Materials, Timber and Heritage Structures, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Technology*

\*\* *Geotechnology, Hydrotechnology, Below-ground and Water Building, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Technology*

**Cytowanie / Citation:** Jasieńko J., Łydźba D., Bednarz Ł., Piechówka-Mielnik M., Rajczakowska M. Selected research on concrete of the Centennial Hall in Wrocław (UNESCO site). *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2015;41:18-32

**Otrzymano / Received:** 2015-07-20 • **Zaakceptowano / Accepted:** 2015-08-16

**doi:**10.17425/WK42CENTENNIAL

*Praca dopuszczona do druku po recenzjach*

*Article accepted for publishing after reviews*

o średnicy 65 m zamykający podstawę od góry. Kopuła o lekko spłaszczonej czasy spoczywa na 32 żelbetowych żebrach opartych na głównym pierścieniu, a u góry związanych pierścieniem betonowym o średnicy 14,4 m [2]. Od 13 lipca 2006 roku Hala Stulecia znajduje się na Liście Światowego Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego UNESCO.

W pracy przedstawiono wyniki badań chemicznych i fizycznych betonu w dolnym pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Badania przeprowadzone były w drugiej połowie 2009 roku oraz w pierwszej połowie 2015 roku. Ponadto wykonano dodatkowo badania mikrostruktury betonu przy użyciu tomografu komputerowego oraz na podstawie serii testów nanoindentacji, wykonanych w nanoindenterze. W badaniach wykorzystano mikrotomograf SkyScan 1172 firmy Bruker oraz nanoindenter TTX-NHT firmy CSM.

## 2. BADANIA – METODA

Dotychczasowe badania cech mechanicznych betonu konstrukcji Hali Stulecia (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie (odrywanie) metodą „pull-off”, nasiąkliwość i inne) przedstawiono w pracy [3]. W zależności od miejsca badania w konstrukcji, wartości wytrzymałości na ściskanie wyniosły od 28 MPa do 38 MPa, a wartości wytrzymałości na rozciąganie od 2,8 MPa do 4,5 MPa. Wyniki oznaczenia nasiąkliwości badanego betonu uzyskano w przedziale od 3,9 do 4,8%, przy współczynniku zmienności równym 8%, co świadczy o dużej jednorodności badanego betonu. Uzyskane wyniki nie wykazały istotnych różnic w wartościach wytrzymałości betonu zbadanych na próbkach betonowych pobranych z obiektu w kierunku zgodnym, prostopadłym do kierunku betonowania.

Z dostępnych danych literaturowych wynika, że do produkcji betonu użyto specjalnego cementu, który został wyprodukowany w cementowni Silesia w Opolu. Kruszywo zastosowane do betonu pochodziło z najwyższej jakości granitu strzegomskiego. Przy wznoszeniu Hali Stulecia na placu budowy stanęły stanowiska do produkcji betonu i młyny do wytwarzania kruszywa [2].

Badanie składu fazowego wykonano na próbce betonu wyciętej za pomocą wiertnicy koronkowej z dolnego pierścienia rozciąganego kopuły Hali Stulecia. Próbkę o średnicy 143 mm i wysokości 230 mm wycięta została zgodnie z kierunkiem betonowania (ryc. 2). Próbkę pocięto na pięć części. Grubość wierzchniej warstwy ze śladami powierzchniowego zwiertzenia wyniosła 25 mm, pozostałe cztery warstwy miały wysokość około 50 mm. Krążki zostały ponumerowane kolejno od 1 do 4, przy czym krążek nr 1 był najdalej oddalonym od powierzchni zewnętrznej.

Wykonano następujące badania:

- skład fazowy betonu, wg [5, 6],
- oznaczenie składu tlenkowego betonu oraz jego części nierozpuszczalnych i rozpuszczalnych w HCl,
- oznaczenie zawartości metali metodą absorpcyjnej spektroskopii atomowej (ASA),

of 16.7 m. The top of the base structure consists of a ring 65 m in diameter. The main ring supports 32 reinforced concrete ribs which support a slightly oblate dome. The ribs are bound at the top with a 14.4 m diameter concrete ring [2]. On July 13<sup>th</sup> 2006, the Hall was inducted onto the UNESCO World Cultural and Natural Heritage List.

The paper reports on results of chemical and physical testing of concrete sampled from the lower circumferential ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław. Testing was conducted in the second half of 2009 and in the first half of 2015. Additionally, an analysis of the concrete microstructure was undertaken using a computer tomograph and a number of nano-indentation tests were carried out with a nano-indentation device. A SkyScan 1172 microtomograph manufactured by the Bruker company was used for testing, along with a TTX-NHT nano-indentation device manufactured by the CSM company.

## 2. RESEARCH – TESTING METHOD

Tests of the mechanical properties of Centennial Hall structural concrete (compression strength, tensile strength with pull-off method, absorbability and others) undertaken to date are presented in [3]. The compression strength value ranged from 28 MPa to 38 MPa, and the tensile strength value ranged from 2.8 MPa to 4.5 MPa, depending on the test location in the building structure. Absorbability determined for the tested concrete ranged from 3.9 to 4.8%, with the coefficient of variation equal to 8%, which indicates a high homogeneity of tested concrete. The results generated, indicate that there are no significant differences in strength values for tested concrete sampled along and perpendicular to the direction in which it was poured.

Information available in the literature indicates that the concrete was made with a special cement, produced in the Silesia Cement Plant in Opole. Aggregate used for the concrete was from the highest quality Strzegom granite. During construction of the Centennial Hall, a concrete production facility and aggregate milling were located on the building site [2].

An analysis of phase composition was carried out on a sample, which had been cut out of the lower tensile ring of the dome with a drill column. The sample had a diameter of 143 mm and a height of 230 mm and had been cut out in line with the concrete pouring direction (fig. 2). The sample was divided into five specimens. The surface layer was approximately 25 mm thick with traces of surface degradation. The remaining four specimens were approximately 50 mm thick. They were numbered from 1 to 4, with the specimen number 1 being the most distant from the outer surface.

The following tests were carried out:

- phase content of the concrete, in compliance with [5, 6],
- determination of oxide content of the concrete, as well as HCl insoluble and soluble particles,
- determination of metal content using the atomic absorption spectrometry (ASA) method,



Ryc. 1. Hala Stulecia we Wrocławiu, fot. S. Pęczek  
 Fig. 1. The Centennial Hall in Wrocław, photo S. Pęczek



Ryc. 2. Próbkę betonu z zaznaczonymi numerami krążków [4]  
 Fig. 2. Concrete sample with specimen numbers [4]

- analiza ziarnowa kruszywa wraz z oceną poszczególnych frakcji,
- wyznaczenie gęstości, gęstości objętościowej oraz porowatości betonu,
- badania mikrostruktury betonu – oznaczenie kształtu, wielkości i rozmiaru porów.

- grain analysis of the aggregate and assessment of specific fractions,
- determination of density, bulk density and porosity of concrete,
- analysis of concrete microstructure – determination of shape, size and dimensions of pores.

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. Właściwości fizyczne – gęstość, gęstość objętościowa, porowatość

W 2009 roku metodą hydrostatyczną oznaczono gęstość objętościową oraz nasiąkliwość betonu (krążki 1–4). Obliczono również porowatość całkowitą i zamkniętą. Gęstość betonu oznaczono na rozdrobnionej próbce betonu w kolbie Le Chateliera. Gęstość oznaczona na próbce 2 (badania w 2009) wyniosła 2560 kg/m<sup>3</sup> [4]. Podobny wynik uzyskano w roku 2015 dla próbki 4 – wyniósł on 2520 kg/m<sup>3</sup>. Dla próbki 4 oznaczono w 2015 gęstość objętościową, która wyniosła 2203 kg/m<sup>3</sup>. Obliczono ponadto porowatość betonu, która wyniosła 12,6%.

Wyniki badań dla próbek betonu 1–4 wykonane w 2009 roku zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanego betonu, [4]

Numer próbki	Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość całkowita [%]	Porowatość zamknięta [%]	Nasiąkliwość objętościowa [%]	Nasiąkliwość wagowa [%]
1	2180	14,02	5,02	9,20	4,22
2	2220	13,12	4,77	8,36	3,76
3	2250	12,11	4,50	7,61	3,38
4	2300	9,96	3,82	6,14	2,66

#### 3.2. Skład badanego betonu

Ocena składu betonu wykonana została zgodnie z instrukcją ITB [5] dla próbki betonowej 4 (krążek 4). Metoda polegała na oznaczeniu gęstości objętościowej betonu, ilości części nierozpuszczalnych HCl (1:3) i zawartości składników przyłączonych w trakcie hydrolizy, hydratacji i karbonatyzacji spoiwa cementowego oraz wykonaniu odpowiednich

### 3. TEST RESULTS

#### 3.1. Physical properties – density, bulk density, porosity

In 2009, the hydrostatic method was used to determine bulk density and absorbability of the concrete (specimens 1–4). Total porosity and closed porosity were calculated. Concrete density was determined on the basis of a sample of finely crushed concrete in a Le Chatelier flask. Density was determined for specimen 2 (tests conducted in 2009) to be nearly 2560 kg/m<sup>3</sup> [4]. A similar result was obtained in 2015 for specimen 4 – i.e. 2520 kg/m<sup>3</sup>. The bulk density was determined for the specimen 4 in 2015 as 2203 kg/m<sup>3</sup>. Concrete porosity was calculated to be 12.6%.

Test results for specimens 1 to 4 obtained in 2009 are presented in table 1.

Table 1. Physical properties of tested concrete, [4]

Specimen number	Bulk density [kg/m <sup>3</sup> ]	Total porosity [%]	Closed porosity [%]	Bulk absorbability [%]	Weight absorbability [%]
1	2180	14,02	5,02	9,20	4,22
2	2220	13,12	4,77	8,36	3,76
3	2250	12,11	4,50	7,61	3,38
4	2300	9,96	3,82	6,14	2,66

#### 3.2. Composition of tested concrete

Analysis of concrete composition was carried out in accordance with provisions of ITB [5] for concrete sample – specimen 4. The method involved determination of bulk density of concrete, quantity of HCl insoluble particles (1:3) and content of components attached during the process of hydrolysis, hydration and carbonization of the cement binder, making allowance in calculations

obliczeń przy wykorzystaniu tych danych. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 2. Stosunek kruszywa w betonie dla próbki 2 wyniósł około 9:1, natomiast dla próbki 4 około 8:1. Zróżnicowanie w stosunkach objętościowych kruszywa i betonu może wynikać z przyjętej metody formowania, jednakże różnicę tę można uznać za nieznaczną.

Tabela 2. Skład próbki betonu nr 2 i 4

Składnik betonu	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ], próbka 2 (2009)	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ], próbka 4 (2015)
Kruszywo	1941,5	1895
Cement	215	240

Ocenę składu mineralogicznego betonu wykonano wykorzystując wyniki analizy składu tlenkowego. Zawartość tlenków CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O oznaczono metodą absorpcyjnej spektroskopii atomowej (ASA). Skład badanego spoiwa różni się od składu tlenkowego cementu portlandzkiego. Przez zmniejszoną zawartość CaO skład tlenkowy zbliżony jest do składu cementu romańskiego lub hutniczego (tabela 3).

Tabela 3. Skład tlenkowy badanej próbki betonu (próbka nr 4)

Oznaczany składnik	Zawartość [%]	Metoda oznaczania
CaO	32,2	ASA
SiO <sub>2</sub>	24,3	ASA
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	ASA
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,3	ASA
MgO	1,2	ASA
Na <sub>2</sub> O	0,2	ASA
K <sub>2</sub> O	1,0	ASA
CO <sub>2</sub>	5,9	Straty prażenia
H <sub>2</sub> O	16,4	Straty prażenia
SO <sub>3</sub>	0,8	Grawimetryczna

Rezultaty wykonanej analizy składu mineralogicznego betonu wykonanej przy zastosowaniu rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej i analizy termicznej dla badanego betonu przedstawiono w pracy [4]. W badanych próbkach wypreparowanego zaczynu cementowego stwierdzono obecność węgla wapnia w formie kalcytu oraz fazę krystaliczną jako portlandyt Ca(OH)<sub>2</sub>. W rentgenowskiej analizie dyfrakcyjnej nie wykazano obecności uwodnionych glinosiarczanów wapnia w postaci ettryngitu C<sub>6</sub>AH<sub>32</sub>, monosiarczanu wapnia C<sub>4</sub>AH<sub>12</sub> oraz uwodnionych krzemianów wapnia C-S-H, które występują w formie amorficznej (ryc. 3). Obecność fazy C-S-H oznaczono w analizie termicznej (DTA, DTG, TG, ryc. 4). W poszczególnych przedziałach temperaturowych wystąpiły efekty endotermiczne, takie jak odwodnienie hydratów krzemianów, glinokrzemianów i glino siarczanów wapnia (temp. 50–350°C), dehydro-

for data obtained in both tests. Test results are presented in table 2. The proportion of aggregate in concrete for specimen 2 was approximately 9:1, whereas for specimen 4 it was approximately 8:1. Variation in the proportion of aggregate content in concrete may be the result of the way the concrete was formed. But the difference can be regarded as not significant.

Table 2. Composition of concrete specimens 2 and 4

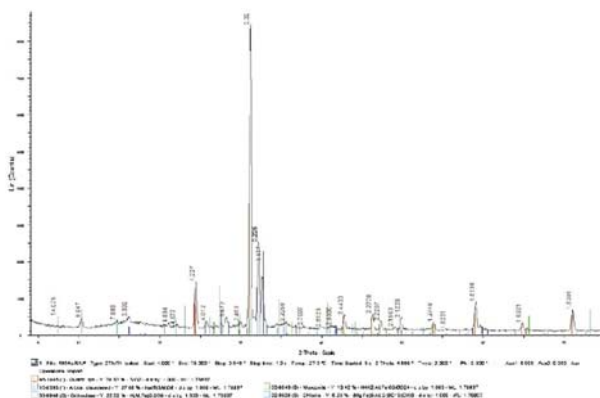
Concrete component	Content [kg/m <sup>3</sup> ], specimen 2 (2009)	Content [kg/m <sup>3</sup> ], specimen 4 (2015)
Aggregate	1 941.5	1 895
Cement	215	240

Analysis of concrete mineral composition was conducted using results of an oxide composition analysis. The content of the following oxides: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O was determined using an atomic absorption spectrometry (ASA) method. The composition of the tested cement differs from the oxide composition of Portland cement. The oxide composition of this cement is close to the composition of Roman cement or blast-furnace cement due to its lower CaO content (table 3).

Table 3. Oxide composition of tested concrete sample (specimen 4)

Component	Content [%]	Determination method
CaO	32,2	ASA
SiO <sub>2</sub>	24,3	ASA
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	ASA
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,3	ASA
MgO	1,2	ASA
Na <sub>2</sub> O	0,2	ASA
K <sub>2</sub> O	1,0	ASA
CO <sub>2</sub>	5,9	Ignition losses
H <sub>2</sub> O	16,4	Ignition losses
SO <sub>3</sub>	0,8	Gravimetric

Analysis of the mineral composition of tested concrete was carried out using an X-ray diffraction method and thermal analysis. The results are reported in [4]. The presence of calcium carbonate in the form of calcite and crystal phase in the form of portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> was discovered in tested samples of cement paste, which had been separated out. The X-ray diffraction analysis did not indicate any presence of hydrated calcium aluminium sulphate in the form of ettringite C<sub>6</sub>AH<sub>32</sub>, calcium mono-sulphate C<sub>4</sub>AH<sub>12</sub> and hydrated calcium silicates C-S-H, which appear in an amorphous form (fig. 3). The presence of the C-S-H phase was determined by means of thermal analysis (DTA, DTG, TG, fig. 4). In specific temperature ranges, endothermic effects were observed, such as: dehydration of hydrates of silicates, aluminium silicates and calcium aluminium sulphates (temp. 50–350°C), Ca(OH)<sub>2</sub> dehydroxylation



Ryc. 3. Analiza fazowa badanego betonu – dyfraktometria rentgenowska, [4]

Fig. 3. Phase analysis of tested concrete – X-ray diffractometry, [4]

ksylacja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (490–510°C), rozkład pochodzącego z procesu karbonatyzacji  $\text{CaCO}_3$  (795–815°C), rozkład pozostałego  $\text{CaCO}_3$  (temp. 800–900°C) [4].

### 3.3. Skład ziarnowy kruszywa

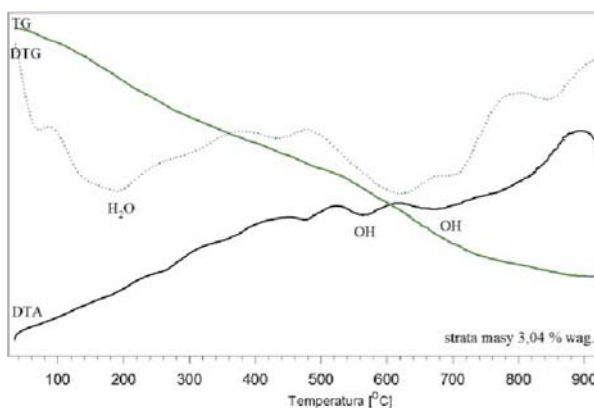
W badaniach wyznaczono krzywą uziarnienia dla kruszywa (próbka nr 3, badanie w 2009 r.) i nr 4 – badanie w 2015 r. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Analiza ziarnowa kruszywa

Sito	Pozostaje na sicie [%]		Przechodzi przez sito [%]	
	próbka 3	próbka 4	próbka 3	próbka 4
31,5	0	0	100	100
16	2,8	17,35	97,2	82,65
8	26,6	25,7	70,6	56,95
4	16,5	10,87	54	46,08
2	10	6,1	44	39,98
1	6,5	6,27	37,5	33,71
0,5	8,9	16,14	28,6	17,57
0,25	23	13,58	5,7	3,99
0,125	3,7	2,86	2	1,13
<0,125	2	1,13	0	0

Badane kruszywo mieści się w obszarze „dobrego uziarnienia” zalecanego dla kruszywa o uziarnieniu poniżej 32 mm. Kruszywo drobne, w obu badanych próbkach, stanowi około 40% kruszywa. Można wnioskować, że kruszywo zostało wzbogacone o mączkę kamienną.

Kruszywo znajdujące się w badanych próbkach to w większości łamany granit. We frakcji 2–4 mm połowę udziału kruszywa w obu badanych próbkach stanowi granit (tabela 5). Wraz ze zmniejszaniem się frakcji kruszywa maleje zawartość kruszywa granitowego. Od tej tendencji odbiega frakcja 31,5–16 dla próbki 4. Można przypuszczać, że spowodowane jest to procesa-



Ryc. 4. Analiza termiczna DTA, DTG, TG badanego betonu, [4]

Fig. 4. DTA, DTG, TG thermal analysis of tested concrete, [4]

(490–510°C), disintegration of  $\text{CaCO}_3$  resulting from the process of carbonization (795–815°C), disintegration of remaining  $\text{CaCO}_3$  (temp. 800–900°C) [4].

### 3.3. Aggregate grain composition

The curve of grain size for the aggregate was determined in analysis (specimen 3, tests in 2009) and for specimen 4 – tests in 2015. Test results are presented in table 4.

Table 4. Aggregate grain-size analysis

Sieve	Remaining on the sieve [%]		Passing through the sieve [%]	
	specimen 3	specimen 4	specimen 3	specimen 4
31,5	0	0	100	100
16	2,8	17,35	97,2	82,65
8	26,6	25,7	70,6	56,95
4	16,5	10,87	54	46,08
2	10	6,1	44	39,98
1	6,5	6,27	37,5	33,71
0,5	8,9	16,14	28,6	17,57
0,25	23	13,58	5,7	3,99
0,125	3,7	2,86	2	1,13
<0,125	2	1,13	0	0

The tested aggregate can be classified as ‘well-grained’ aggregate in line with the recommended grain size of less than 32 mm. In both specimens, fine grains were found to constitute approximately 40% of the aggregate. Thus it can be assumed that the aggregate was enriched through addition of stone dust.

The aggregate in tested specimens comprises mainly crushed granite. For the fraction of 2–4 mm, half of the aggregate in both specimens is granite (table 5). The smaller the fraction of the aggregate, the lower the content of granite. This tendency is however not repeated for the 31.5–16 fraction in specimen 4. It can be assumed

mi technologicznymi stosowanymi podczas układania mieszanki betonowej.

Tabela 5. Udział kruszywa granitowego we frakcjach 2–31,5 mm

Frakcja kruszywa [mm]	Udział kruszywa granitowego we frakcji [%]	
	próbka 3	próbka 4
31,5–16	92,79	45,9
8–16	88,77	79,6
4–8	83,45	69,5
2–4	50,5	47

W kruszywie o frakcjach poniżej 8 mm zaobserwowano występowanie żużlu paleniskowego o dużej porowatości oraz wtrącenia w postaci ścinków drewnianych (ryc. 5). Żużel paleniskowy zaobserwowano głównie we frakcji poniżej 4 mm. Obecność drobnych wtrąceń o barwie czarnej potwierdzają dodatkowo zdjęcia wykonane za pomocą nanoindentera TTX-NHT (ryc. 6). Można przypuszczać, że żużel był wprowadzony świadomie do mieszanki betonowej w celu poprawy właściwości mechanicznych betonu. Duża koncentracja fazy C-S-H powstającej jako produkt hydratacji żużla oraz reakcji wodorotlenku wapnia z anionami krzemianowymi powstałymi z hydratacji żużla powoduje występowanie znacznie mniejszej ilości wodorotlenku wapniowego i dużej koncentracji fazy C-S-H w stwardniałym zaczynie cementowym. Faza C-S-H występująca w dużej ilości w postaci zbitego żelu w efekcie powoduje, że mikrostruktura betonu jest bardzo zwarta. Dzięki temu zmniejsza się porowatość kapilarna stwardniałego zaczynu, co utrudnia dyfuzję czynników agresywnych do matrycy cementowej. W związku z tym w zaczynie występuje mniejsza ilość portlandytu oraz glinianów wapniowych, które są nieodporne na korozję. Podane zmiany mikrostruktury zaczynów z cementów żużlowych powodują, że cementy te mają wiele cech korzystniejszych niż cementy portlandzkie bez dodatków, co potwierdzają wyniki badań zamieszczone w [3]. Dodanie żużla paleniskowego do betonu mogło zostać również związane z oczekiwaną poprawą warunków



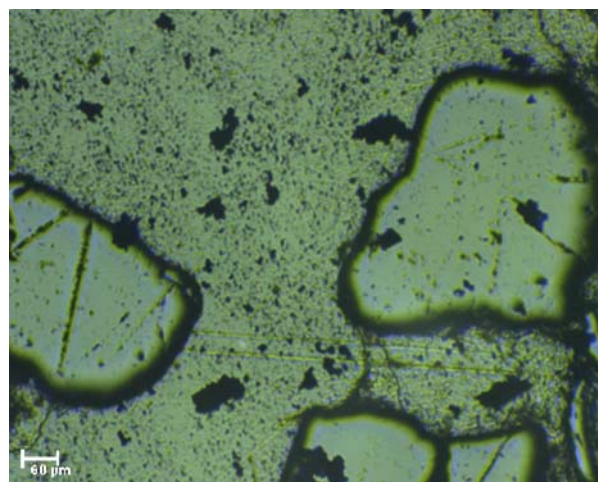
Ryc. 5. Wtrącenia drewniane, [4]  
Fig. 5. Wood inclusion in concrete, [4]

that this situation resulted from technological processes used in pouring the concrete mix.

Table 5. Content of granite aggregate in 2–31.5 mm fractions

Aggregate fraction [mm]	Content of granite aggregate in the fraction [%]	
	specimen 3	specimen 4
31.5–16	92.79	45.9
8–16	88.77	79.6
4–8	83.45	69.5
2–4	50.5	47

In aggregate fractions lower than 8 mm, the presence of high porosity slag and wood chip inclusions was observed (fig. 5). Slag was mainly observed in fractions lower than 4 mm. The presence of fine black inclusions was also confirmed by images taken with the TTX-NHT nano-indentation device (fig. 6). It can be assumed that the slag was intentionally added to the concrete mix in order to improve concrete mechanical properties. High concentration of the C-S-H phase, which is a product of the process of hydration of slag and reaction of calcium hydroxide with silicate anions resulting from the slag hydration, is responsible for a much lower content of calcium hydroxide and higher concentration of the C-S-H phase in the hardened cement paste. The high content of the C-S-H phase, in the form of a dense gel, results in a very dense concrete microstructure. This leads to lower capillary porosity of the hardened cement paste, which obstructs diffusion of aggressive agents into the cement matrix. This in turn translates into a small proportion of portlandite and calcium aluminates, which are not resistant to corrosion. The changes to microstructure of slag cement pastes described are responsible for the fact that slag cements are characterized by a number of more favourable properties than Portland cements without additives. This was confirmed by research reported in [3]. Slag may have been added to the concrete also



Ryc. 6. Badany beton – zdjęcie wykonane za pomocą nanoindentera TTX-NHT  
Fig. 6. Tested concrete – image obtained with the TTX-NHT nano-indenter

wilgotnościowych w procesie wiązania i twardnienia betonu, [4].

W pracy [4] przedstawiono badania mikroskopowe składu ziarnowego. Udział kruszywa o uziarnieniu większym od 2 mm wyznaczono wzdłuż 6 linii prostych. Stanowiły one średnicę powierzchni, a kąt między najbliższymi prostymi wynosił 30°. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Analiza składu kruszywa na powierzchni próbek betonu, [4]

Numer krążka	Kruszywo [%]	Granit [%]	Inne kruszywo [%]
1	46,8	35,7	11,1
2	49,4	35,8	13,6
3	54,4	48,6	5,8
4	61,6	53,7	7,9



a)

in order to improve moisture conditions in the process of concrete setting and hardening, [4].

Microscopic analysis of grain composition was reported in [4]. The content of aggregate with grains larger than 2 mm was investigated along 6 straight lines. They constituted the diameter of a flat surface and the angle between two immediate lines was 30°. Test results are presented in table 6.

Table 6. Analysis of aggregate content on the surface of concrete specimens, [4]

Specimen number	Aggregate [%]	Granite [%]	Other aggregate [%]
1	46.8	35.7	11.1
2	49.4	35.8	13.6
3	54.4	48.6	5.8
4	61.6	53.7	7.9



b)



c)



d)

Ryc. 7. Przekroje przez krążki: a) krążek nr 1, b) krążek nr 2, c) krążek nr 3, d) krążek nr 4, [4]

Fig. 7. Specimen cross-sections: a) specimen 1, b) specimen 2, c) specimen 3, d) specimen 4, [4]

### 3.4. Badania mikrostruktury betonu

Do badania porowatości, dzięki silnemu kontrastowi między fazą stałą i powietrzem, zastosowano rentgenowską mikrotomografię komputerową. Metoda ta polega na rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu badanego elementu na podstawie dwuwymiarowych

### 3.4. Analysis of concrete microstructure

Analysis of porosity was carried out using the X-ray micro-CT method, which provides for a sharp contrast between solid and air phases. The method involves a 3D reconstructed image of a tested element, which is based on two-dimension projections obtained through X-ray

projekcji uzyskanych w trakcie skanowania próbki wiązką promieni rentgenowskich. Źródłem promieniowania jest zazwyczaj lampa rentgenowska, w skład której wchodzi dwie elektrody: katoda i anoda, wykonane z materiału o wysokiej liczbie atomowej. Wiązka promieni przechodzi przez próbkę umieszczoną na ruchomym podnośniku. Obrazy rejestrowane są na scyntylatorze, który zamienia energię cząsteczek promieniowania na światło widzialne. Scyntylator połączony jest z matrycą CCD (*Charge Coupled Device*), dzięki której światło przetwarzane jest na sygnał cyfrowy. Efektem skanowania jest zestaw obrazów (projekcji), które następnie mogą być zrekonstruowane do serii przekrojów na wysokości próbki. Z tak otrzymanych danych możliwe jest uzyskanie trójwymiarowej wizualizacji materiału.

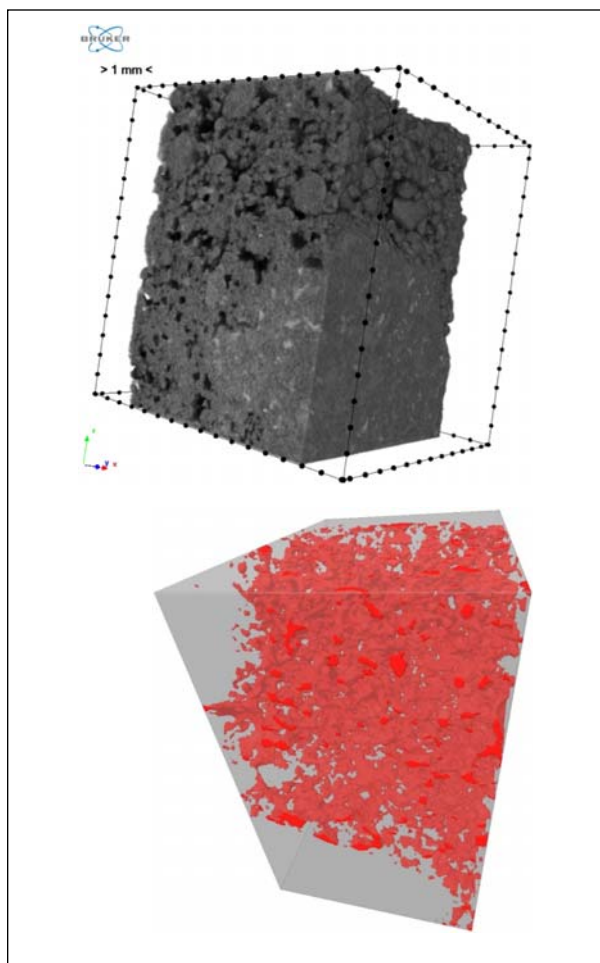
W badaniach użyty został system Skyscan 1172 z kamerą o rozdzielczości 11 Mp (ryc. 8). Do wszystkich skanowań zastosowano maksymalne napięcie lampy (100 kV) oraz stałą moc źródła o wartości 10 W. Ze względu na charakter próbek (materiał o dużej gęstości), zdecydowano się na użycie filtra Al+Cu (glin – 1 mm, miedź – 0,05 mm) do skanowania każdego elementu.

scanning of the specimen. The source of radiation is usually an X-ray tube which comprises two electrodes: cathode and anode, made of material with a high atomic number. A beam of rays passes through the specimen placed on a mobile hoist. Images are registered by a scintillator, which transforms the energy of radiation molecules into visible light. The scintillator is connected to the matrix of the Charge Coupled Device (CCD), which transforms light into a digital signal. Thus, the result of scanning is a set of images (projections) which



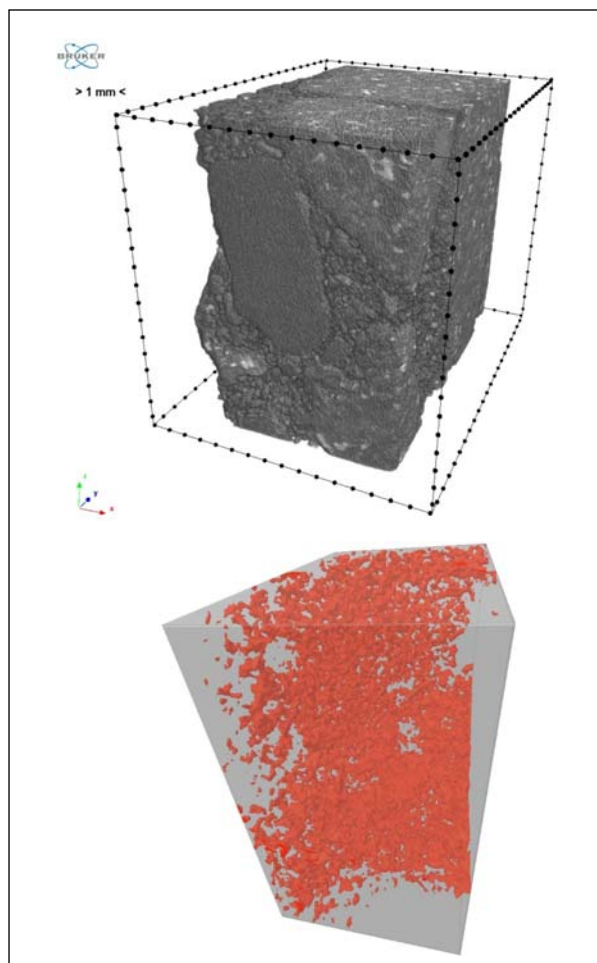
Ryc. 8. Stanowisko badawcze – mikrotomograf SkyScan 1172 firmy Bruker

Fig. 8. Testing station – SkyScan 1172 micro-CT manufactured by the Bruker company



Ryc. 9. Obrazy 3D próbki A betonu uzyskane za pomocą micro-CT: a) obraz bryły próbki pomniejszony o przestrzeń porową, b) obszar wydzielonej części porowej

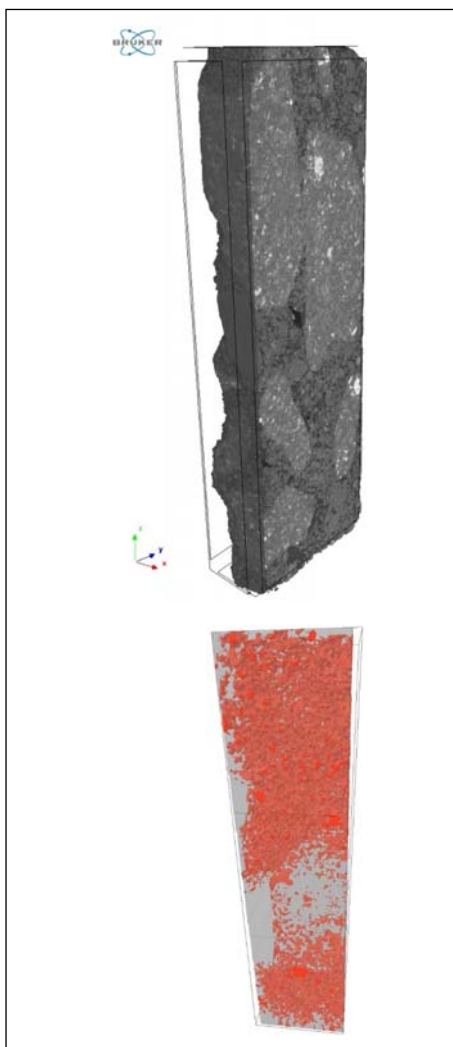
Fig. 9. 3D images of concrete sample A obtained with micro-CT: a) image of the sample solid reduced by pore space, b) isolated pore space



Ryc. 10. Obrazy 3D próbki B betonu uzyskane za pomocą micro-CT: a) obraz bryły próbki pomniejszony o przestrzeń porową, b) obszar wydzielonej części porowej

Fig. 10. 3D images of concrete sample B obtained with micro-CT: a) image of the sample solid reduced by pore space, b) isolated pore space



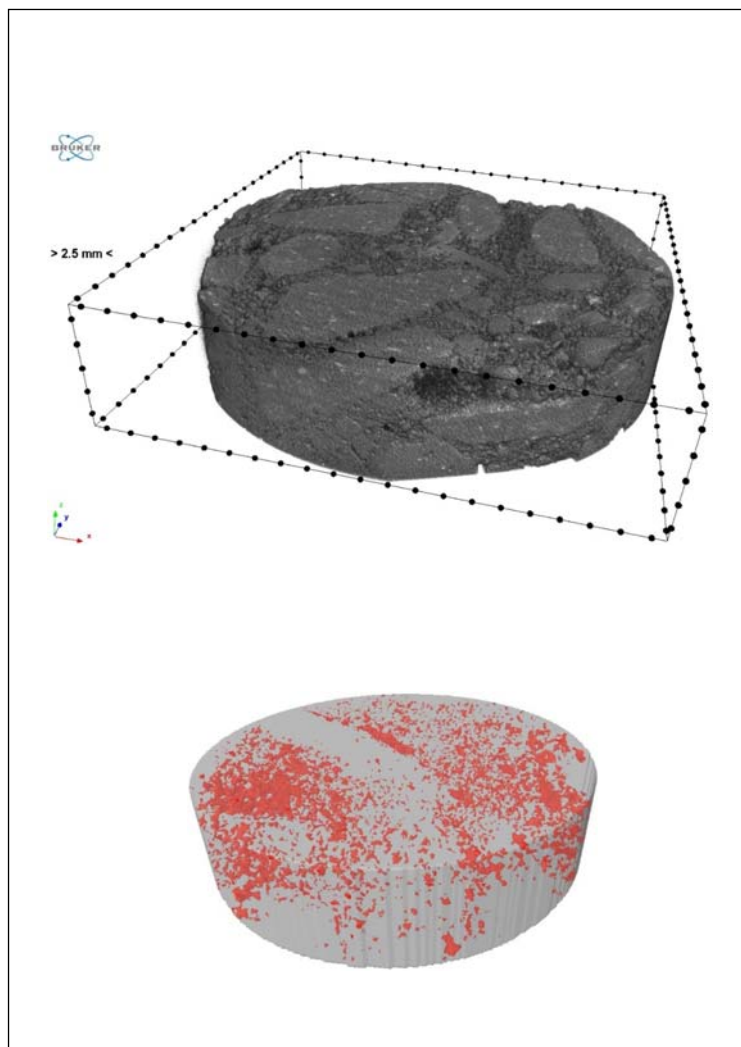


Ryc. 11. Obrazy 3D próbki C betonu uzyskane za pomocą micro-CT:

a) obraz bryły próbki pomniejszony o przestrzeń porową, b) obszar wydzielonej części porowej

Fig. 11. 3D images of concrete sample C obtained with micro-CT:

a) mage of the sample solid reduced by pore space, b) isolated pore space



Ryc. 12. Obrazy 3D próbki D betonu uzyskane za pomocą micro-CT:

a) obraz bryły próbki pomniejszony o przestrzeń porową, b) obszar wydzielonej części porowej

Fig. 12. 3D images of concrete sample D obtained with micro-CT:

a) mage of the sample solid reduced by pore space, b) isolated pore space

Zastosowano jednostkowy krok obrotu próbki równy  $0,15^\circ$ . Rekonstrukcje obrazów wykonano za pomocą programu NRecon bazującego na algorytmie Feldkampa. W efekcie badania uzyskano serię obrazów o rozdzielczości  $6,8 \mu\text{m}$  na 1 piksel.

Do badań mikrostruktury betonu pobrano cztery fragmenty betonu z próbki 4, które oznaczono A, B, C i D. Na podstawie otrzymanych wyników analizowano rozkład kształtu, wielkości oraz średnice porów. Obrazy badanych w mikrotomografii próbek przedstawiają ryciny 9–12. Na rysunkach dla poszczególnych, rozpatrywanych próbek betonu w kolorze czerwonym oznaczono rozłożenie porów, które równomiernie wypełniają objętość badanego betonu.

Wyniki analizy sferyczności występujących porów w badanych próbkach przedstawiono na ryc. 13. Niezależnie od badanej próbki uzyskano podobne wyniki. Najczęstszą wartością sferyczności porów jest  $0,6\text{--}0,7$ , co

can be subsequently reconstructed into a series of specimen sections. On the basis of this data, a 3D visualisation of the material can be obtained.

The Skyscan 1172 device with a 11 Mp resolution camera (fig. 8) was used for testing. All scans were carried out with maximum lamp voltage (100 kV) and a constant power of the source of 10 W. An Al+Cu (aluminium – 1 mm, copper – 0.05 mm) screen was used for scanning all elements due to the properties of specimens (high density material). The individual rate of specimen rotation was equal to  $0.15^\circ$ . The images were reconstructed with the NRecon software using the Feldkamp algorithm. The test resulted in a series of images with a resolution of  $6.8 \mu\text{m}$  per 1 pixel.

Four samples of concrete, marked as A, B, C and D were taken from specimen 4 for testing. Results enabled analysis of the patterns, shape, size and diameter of pores. The images of samples analysed with the micro CT device

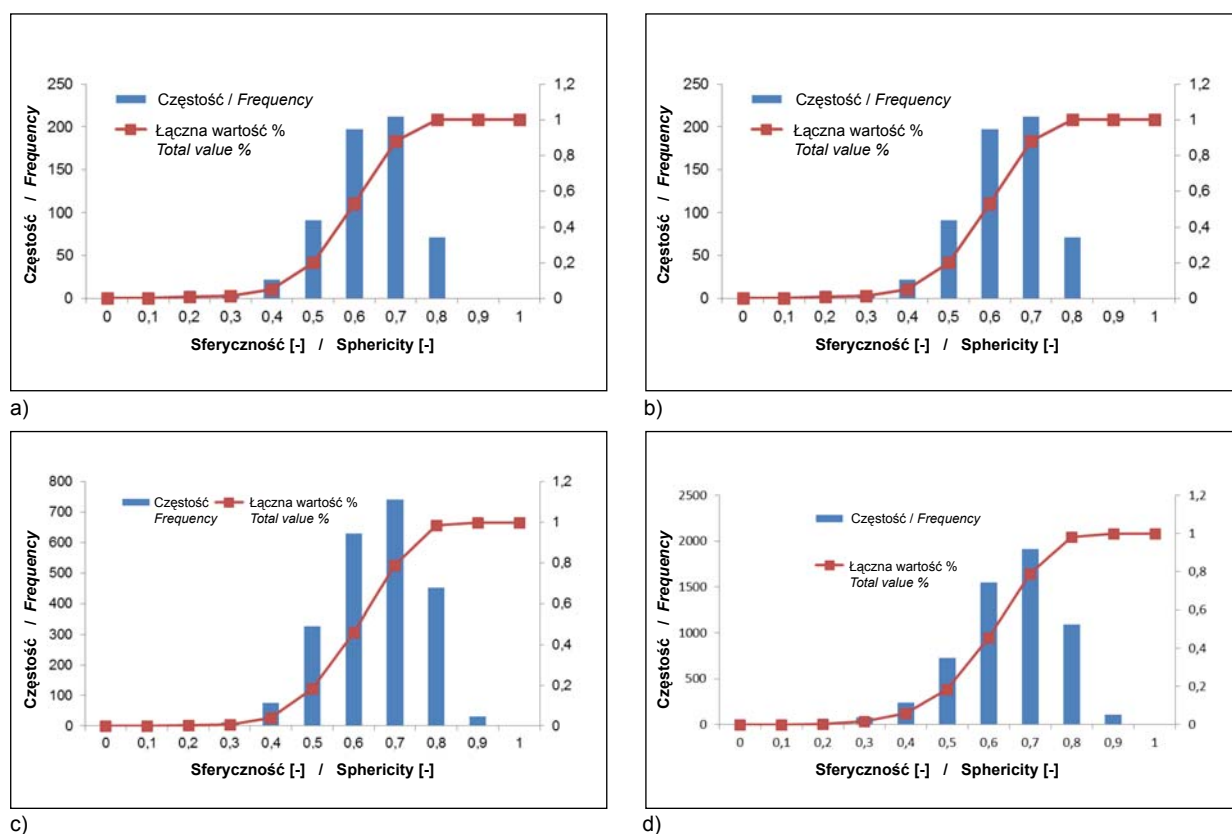
świadczy o tym, że pory nie posiadają kształtu zbliżonego do kulistego, a są nieznacznie wydłużone.

Na właściwości betonu ma wpływ zarówno całkowita objętość porów, jak i rozkład ich wymiarów, równomierność rozłożenia oraz kształt. Strukturę porów powietrznych można scharakteryzować za pomocą następujących parametrów: całkowitej zawartości powietrza, powierzchni właściwej systemu porów powietrznych, rozkładu wielkości porów powietrznych oraz zawartości mikroporów  $< 300 \mu\text{m}$ .

are presented in figs. 9–12. In the pictures, the distribution of pores, which are uniformly spread in the volume of the tested concrete, is marked in red for each tested sample.

Results of the analysis of sphericity of pores in the tested samples are presented in fig. 13. The results obtained for all samples were comparable. The most frequent value of the pore sphericity is 0,6–0,7, which means that the pores shape is not almost spherical but slightly elongated.

Concrete properties depend on the following: total volume of pores, spread of their sizes, uniformity of



Ryc. 13. Rozkład kształtu porów: a) próbka A, b) próbka B, c) próbka C, d) próbka D  
 Fig. 13. Pore shape spread: a) sample A, b) sample B, c) sample C, d) sample D

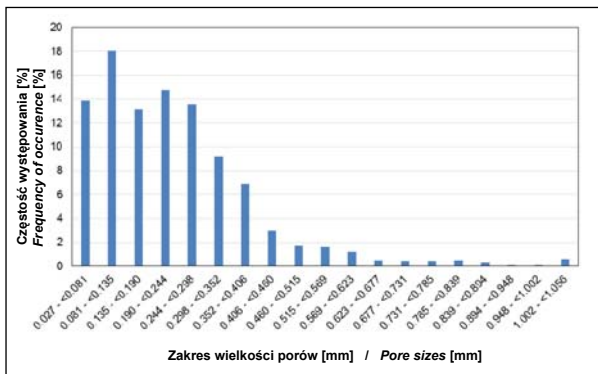
Struktura porowatości, wielkość porów i ich rozmieszczenie, a także kształt mają duży wpływ na właściwości betonu, takie jak przewodność cieplna, mrozoodporność, nasiąkliwość i przesiąkliwość, kapilarność i wytrzymałość. Wielkość porów w badanym betonie przedstawiono na ryc. 14, a ich rozkład średnic na ryc. 15. Na podstawie wykresów można wnioskować, że w badanym betonie przeważają drobne pory kapilarne.

W tabeli 7 zestawiono wyniki badań porowatości dla próbek A, B, C i D. Dla próbek B–D całkowita zawartość powietrza wynosi ok. 10%, natomiast dla próbki A jest o połowę mniejsza. Powierzchnia właściwa systemu porów powietrznych dla wszystkich rozpatrywanych próbek wyniosła ok.  $40 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ . Drobne, regularnie rozmieszczone pory powietrzne o wielkości od  $10 \mu\text{m}$  do  $300 \mu\text{m}$  podwyższają mrozoodporność. Można je zauważyć nieuzbrojonym okiem.

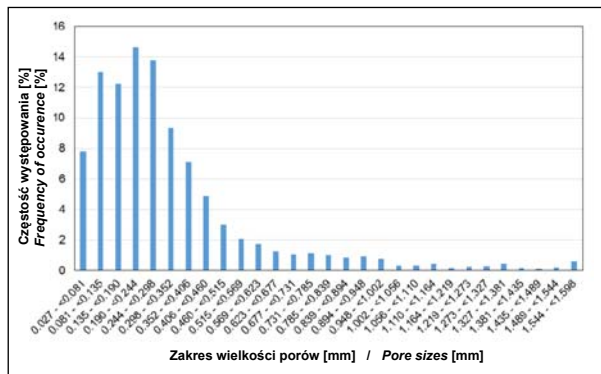
distribution and shape. The air pore structure can be characterized by the following parameters: total air content, specific surface area of the air pore system, spread of the air pore sizes and the content of micropores  $< 300 \mu\text{m}$ .

Pore structure, size, shape and distribution influence concrete properties such as: thermal conductivity, frost resistance, absorbability and percolation, capillarity and strength. Sizes of pores in tested concrete have been presented in fig. 14, and the spread of pore diameters in fig. 15. Based on the graphs presented, it can be assumed that fine-sized capillary pores prevail in the tested concrete.

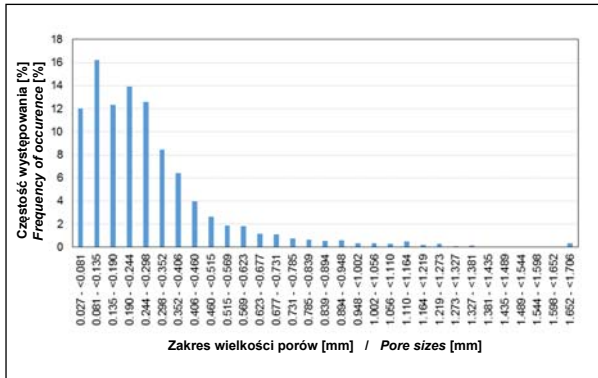
Table 7 presents the results of a porosity analysis carried out for samples A, B, C and D. In the case of samples B–D, the total air content is approximately 10%, but it is half of this value for sample A. The specific surface area of the air pores system in all tested samples amounts to approximately  $40 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ . Fine-sized, regularly distributed air pores with dimensions ranging



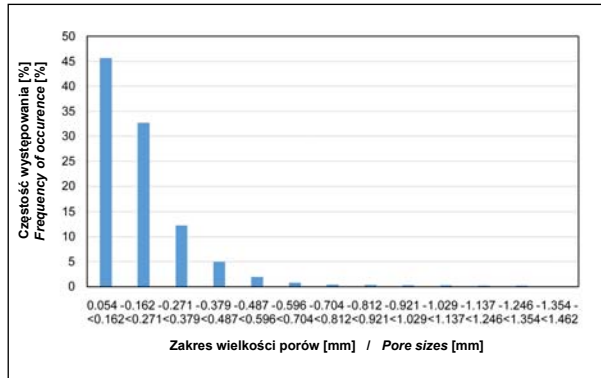
a)



b)



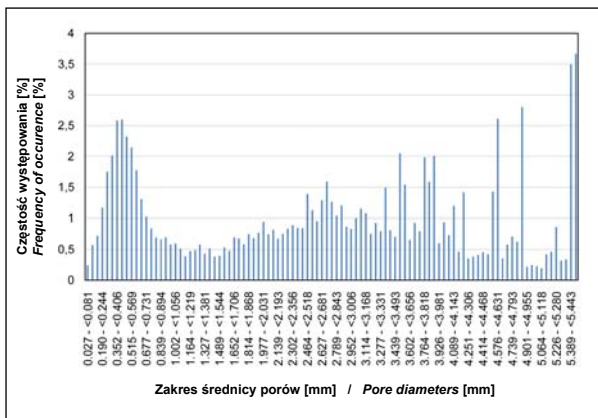
c)



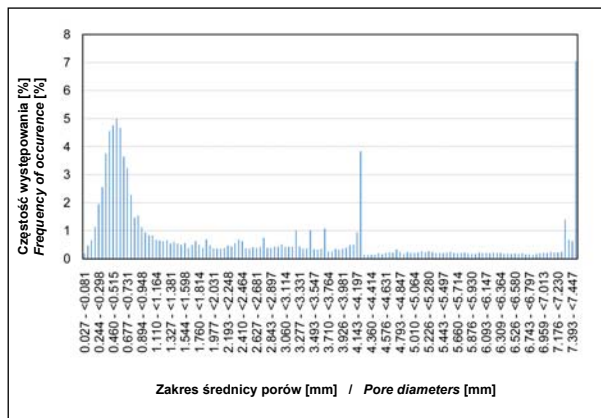
d)

Ryc. 14. Rozkład wielkości porów w próbce: a) próbka A, b) próbka B, c) próbka C, d) próbka D

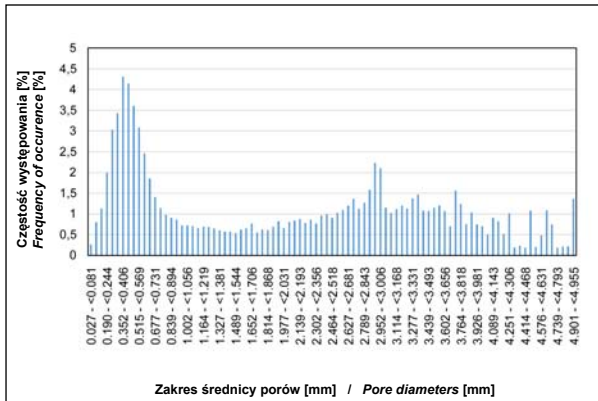
Fig. 14. Pore size spread: a) sample A, b) sample B, c) sample C, d) sample D



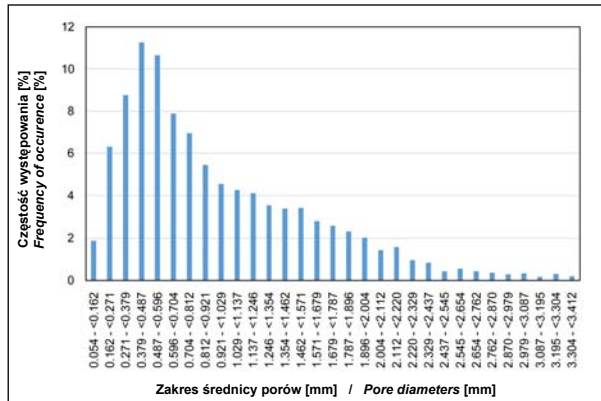
a)



b)



c)



d)

Ryc. 15. Rozkład średnicy porów w próbce: a) próbka A, b) próbka B, c) próbka C, d) próbka D

Fig. 15. Pore diameter spread: a) sample A, b) sample B, c) sample C, d) sample D

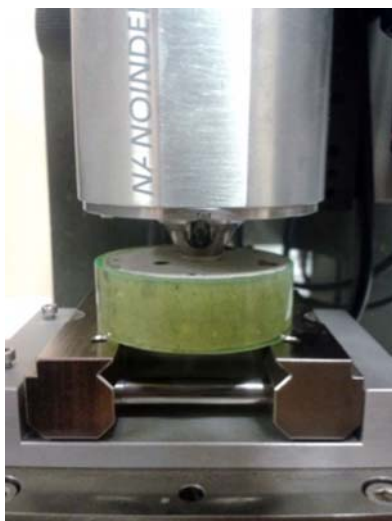
Tabela 7. Porowatość betonu (próbki A-D)

	A	B	C	D
Całkowita zawartość powietrza [%]	5,82	10,15	9,36	10,84
Powierzchnia właściwa systemu porów powietrznych [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]	41,73	32,87	45,42	37,65
Zawartość mikroporów < 300 μm [%]	73,45	61,53	67,12	90,68

### 3.5. Oznaczenie twardości oraz modułu sprężystości badanego betonu za pomocą indentacji

Indentacja jest powszechną techniką pozwalającą na mierzeniu parametrów mechanicznych materiału. Pozwala na wyznaczenie twardości analizowanego materiału oraz modułu sprężystości na bazie krzywej „obciążenie-odkształcenie”. W badaniach użyto przyrządu – nanoindentera TTX-NHT firmy CSM (ryc. 16a).

Podstawą działania nanoindentacji jest zagłębienie twardej diamentowej końcówki o znanej geometrii (w tym przypadku – ostrosłup) w próbkę. Obciążenie jest zwiększane aż do granicznej ustalonej wartości  $P_{max}$ ,



Ryc. 16. a) Nanoindenter TTX-NHT, b) typowa krzywa wgłębniowa – obciążenie  $P$  w funkcji przemieszczenia  $h$  z zaznaczonymi parametrami:  $h_f$  – zagłębienie pozostające,  $h_i$  – głębokość kontaktu,  $h_{max}$  – maksymalne zagłębienie,  $S$  – całkowita sztywność, [10]

Fig. 16. a) Nano-Indenter TTX-NHT, b) typical indenter curve – loading  $P$  in function of displacement  $h$  with marked parameters:  $h_f$  – remaining indentation,  $h_i$  – depth of contact,  $h_{max}$  – maximum indentation,  $S$  – total rigidity, [10]

w zależności od typu materiału. W rezultacie otrzymano krzywą odkształcenia w funkcji obciążenia, na podstawie której wyznaczono maksymalne odkształcenie  $h_{max}$  oraz sztywność (na podstawie krzywej  $S = dP/dh$ , ryc. 16b).

$$\mu H = \frac{P_{max}}{A},$$

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{eff} \sqrt{A},$$

gdzie:  $\mu H$  oznacza mikrosztywność,  $A$  jest polem kontaktu między końcówką indentera a próbką,  $\beta$  jest bezwymiarowym parametrem, który bierze pod uwagę

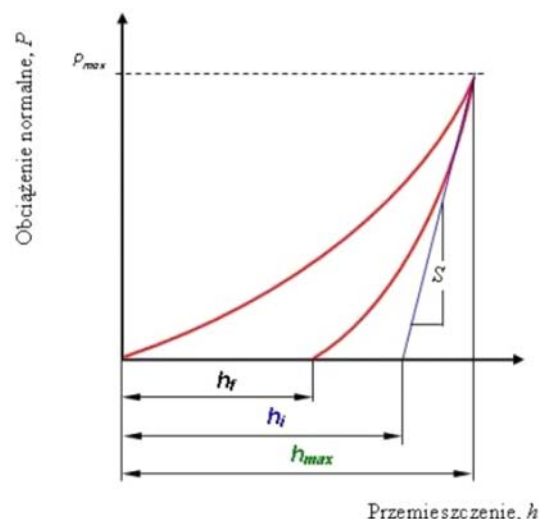
between 10 μm and 300 μm improve the frost resistance properties of concrete. They are visible to the naked eye.

Table 7. Concrete porosity (samples A-D)

	A	B	C	D
Total air content [%]	5,82	10,15	9,36	10,84
Specific surface area of the air pores system [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]	41,73	32,87	45,42	37,65
Micropores < 300 μm content [%]	73,45	61,53	67,12	90,68

### 3.5. Defining hardness and modulus of elasticity of tested concrete using the indentation method

The indentation technique is a common method used to measure the mechanical parameters of a material. It enables determination of the hardness and modulus of elasticity of a tested material, based on generating a ‘stress-strain’ curve. The TTX-NHT nano-indenter device manufactured by CSM company was used for this purpose (fig. 16a).



The Nano-indentation method involves penetrating a sample with a hard diamond indenter tip of a specified geometry – in this case a pyramid. The loading is increased until it reaches a specified limit value  $P_{max}$ , which is a function of the type of material being tested. As a result, the strain in the function of the loading curve is obtained and is used to determine the maximum strain  $h_{max}$  and rigidity (based on the curve  $S = dP/dh$ , fig. 16b).

$$\mu H = \frac{P_{max}}{A},$$

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{eff} \sqrt{A},$$

asymetryczność końcówki indentera,  $E_{\text{eff}}$  to efektywny moduł sprężystości,  $E$  oznacza moduł sprężystości materiału,  $\nu$  to współczynnik Poissona, a  $E_i$  i  $\nu_i$  parametry sprężyste końcówki indentera [9]. Znając współczynnik Poissona materiału można wyznaczyć moduł sprężystości na podstawie równania:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$$

Z tak przeprowadzonej analizy wyznaczono mikro-twardość badanego betonu, która wyniosła 1,8 GPa oraz moduł sprężystości  $E = 33$  GPa. Odnosząc uzyskaną wartość mikro-twardości betonu do klasycznej skali Mohsa lub rozszerzonej skali Ridgweya wynosi ona 4 (tabela 8). Skala Mohsa, w swej górnej części, została zmodyfikowana w 1933 r. przez Ridgweya, który rozszerzył ją do 15 stopni w celu uwypuklenia różnic między najtwardszymi minerałami. Otrzymany moduł sprężystości oznaczony dla badanego pierścienia obwodowego z próbki 4 odpowiada wymaganiom stawianym klasie wytrzymałości C30/37 w rozumieniu normy betonowej [7].

Tabela 8. Twardość materiałów ściernych, [8]

Mikrotwardość	Skala Ridgweya		Skala Mohsa	
	wzorzec	skala	wzorzec	skala
98,7	diament	15	diament	10
54,9 – 56,9	węglik boru B <sub>4</sub> C	14		
26,0 – 29,5	węglik krzemu czarny SiC	13		
20,1 – 21,6	korund	12	korund	9
12,8	tlenek cyrkonu ZrO <sub>2</sub>	11		
11	topaz	10	topaz	8
10,3	granat	9		
9,8	kwarc	8	kwarc	7
8,6 – 9,8	szkło kwarcowe	7		
5,9 – 7,4	ortoklaz	6	ortoklaz	6
4,1	apatyt	5	apatyt	5
1,5	fluoryt	4	fluoryt	4
1,2	kalcyt	3	kalcyt	3
0,35	gips	2	gips	2
0,2	talk	1	talk	1

#### 4. WNIOSKI

Dotychczasowe badania betonu pochodzącego z dolnego pierścienia rozciąganego kopuły Hali Stulecia potwierdzają wysoką jakość betonu [4, 5]. W zależności od miejsca badania w konstrukcji, wartości wytrzymałości na ściskanie wyniosły od 28 MPa do 38 MPa, a wartości wytrzymałości na rozciąganie od 2,8 MPa do 4,5 MPa. Uzyskanie tak niskiej nasiąkliwości betonu, poniżej 5%, przy równoczesnym niskim współczynniku zmienności wynoszącym 8% świadczy o dużej jednorodności strukturalnej badanego betonu. Stwardniały zaczyn w badanym betonie wykazuje doskonałą przyczepność do łamanego kruszywa granitowego. Posiada strukturę zwartą, gęstą, o bardzo niskiej nasiąkliwości. Niska

where:  $\mu H$  – micro-rigidity.  $A$  is the surface area of contact between the tip of indenter and the sample,  $\beta$  is a non-dimensional parameter which considers the asymmetry of the indenter tip,  $E_{\text{eff}}$  is the effective modulus of elasticity,  $E$  is the modulus of elasticity of the material,  $\nu$  is the Poisson's ratio, and  $E_i$  and  $\nu_i$  elasticity parameters of the indenter tip [9]. Knowing the Poisson's ratio of the material, it is possible to determine the modulus of elasticity using the equation:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$$

The analysis presented above allowed determination of the micro-hardness of the tested concrete as amounting to 1.8 GPa and modulus of elasticity  $E = 33$  GPa. Referring to the classic Mohs scale or extended Ridgwey's scale, the micro-hardness of concrete was determined to have a value 4 (table 8). The upper part of the Mohs scale was modified in 1933 by Ridgwey, who extended it to cover 15 grades in order to emphasize differences between the hardest materials. The modulus of elasticity obtained for the peripheral ring of the sample 4 meets the requirements for the C30/37 strength class as defined by the concrete standard [7].

Table 8. Hardness of abrasive materials, [8]

Microhardness	Ridgwey's scale		Mohs scale	
	Standard	scale	standard	scale
98.7	diamond	15	diamond	10
54.9 – 56.9	boron carbide B <sub>4</sub> C	14		
26.0 – 29.5	black silicon carbide SiC	13		
20.1 – 21.6	corundum	12	corundum	9
12.8	zirconium oxide ZrO <sub>2</sub>	11		
11	topaz	10	topaz	8
10.3	garnet	9		
9.8	quartz	8	quartz	7
8.6 – 9.8	silica glass	7		
5.9 – 7.4	orthoclase	6	orthoclase	6
4.1	apatite	5	apatite	5
1.5	fluorite	4	fluorite	4
1.2	calcite	3	calcite	3
0.35	gypsum	2	gypsum	2
0.2	talc	1	talc	1

#### 4. CONCLUSIONS

Analysis of the concrete in the lower tensile ring of the Centennial Hall's dome carried out to date confirms high concrete quality [4, 5]. Depending on the location in the structure of the concrete samples, the compressive strength values were found to range between 28 MPa and 38 MPa, and tensile strength values were found to range from 2.8 MPa to 4.5 MPa. Low absorbability of the concrete, amounting to less than 5% together with a low coefficient of variation equal to 8%, attests to the high structural homogeneity of the tested concrete. The hardened cement paste in the tested concrete demonstrates excellent adhesion to crushed granite aggregate. This is characterised by a dense structure, with low absorbability.

przepuszczalność zaczynu utrudnia karbonatyzację oraz dyfuzję chlorków zapewniając barierę ochronną dla zbrojenia. Mikrotwardość badanego betonu wyniosła 1,8 GPa a moduł sprężystości  $E = 33$  GPa. Odnosząc uzyskaną wartość mikrotwardości betonu do klasycznej skali Mohsa lub rozszerzonej skali Ridgweya wynosi ona 4. Otrzymany moduł sprężystości oznaczony dla betonu badanego pierścienia obwodowego (próbka 4) odpowiada wymaganiom stawianym klasie wytrzymałości C30/37 w rozumieniu normy betonowej [7].

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wraz z oddalaniem się od powierzchni zewnętrznej ulegają zmianie właściwości fizyczne betonu, przy czym wraz ze wzrostem gęstości objętościowej maleje porowatość oraz nasiąkliwość betonu. Jest to skutkiem karbonatyzacji betonu. Próbkę betonu różni się składem i ilością kruszywa. Im bliżej powierzchni zewnętrznej, tym bardziej zmniejsza się udział kruszywa w betonie, powodując wzrost udziału cementu. Stosunek kruszywa do cementu dla badanych próbek betonowych wynosi 9:1 oraz 8:1, zatem należy uznać go za stosunkowo mały.

Z badania składu ziarnowego kruszywa wynika, że krzywa uzyskana na podstawie wyników z analizy sitowej znajduje się w obszarze „dobrego uziarnienia” dla kruszyw frakcji poniżej 31,5 mm. Oprócz kruszywa kwarcowego w stosie okrucowym znajdowało się kruszywo łamane granitowe, którego udział wzrastał wraz ze wzrostem frakcji kruszywa. Bliżej powierzchni zewnętrznej wzrasta udział kruszywa granitowego w badanym betonie. W kruszynie o frakcji poniżej 8 mm stwierdzono obecność drobnych wtrąceń drewnianych [4].

Zmniejszona ilość CaO w składzie tlenkowym cementu oraz obecność drobnych wtrąceń barwy czarnej świadczyć może o tym, że do budowy został wykorzystany cement hutniczy. Wprowadzając świadomie do mieszanki betonowej żużel paleniskowy uzyskano zwartą mikrostrukturę betonu. Dzięki dużej koncentracji fazy C-S-H powstającej jako produktu hydratacji żużla oraz reakcji wodorotlenku wapnia z anionami krzemianowymi powstałymi z hydratacji żużla zmniejsza się ilość wodorotlenku wapniowego, co w efekcie finalnym daje obecność fazy C-S-H w postaci zbitego żelu. Dzięki temu zmniejsza się porowatość kapilarna stwardniałego zaczynu, co utrudnia dyfuzję czynników agresywnych do matrycy cementowej. W zaczynie występuje mniejsza ilość nieodpornych na korozję składników – portlandytu oraz glinianów wapniowych. Podane zmiany mikrostruktury zaczynów z cementów hutniczych powodują, że cementy te mają wiele cech korzystniejszych niż cementy portlandzkie bez dodatków.

Badania mikrostruktury pozwalają na oszacowanie porowatości materiału, struktury oraz rozmiaru porów. Porowatość oznaczona za pomocą mikrotomografu komputerowego w badanych próbkach wyniosła ok. 10%. Występujące pory są drobne, o sferyczności 0,6–0,7. Przeważają mikropory poniżej 300  $\mu\text{m}$ . Dzięki takiej postaci porowatości badany beton posiada niską nasiąkliwość

Low infiltration of the cement paste obstructs carbonization and diffusion of chlorides, providing a protective barrier for the steel reinforcement of the concrete. Microhardness of the tested concrete was determined to equal 1.8 GPa and the modulus of elasticity  $E = 33$  GPa. When the value of micro-hardness obtained was referenced to the classic Mohs scale or the extended Ridgway's scale, it was found to have a value of 4. The modulus of elasticity obtained for the concrete of the tested peripheral ring (sample 4) meets the requirements for the C30/37 strength class as specified by the concrete standard [7].

The analysis conducted confirmed that the physical properties of concrete change with the distance from the external surface of the material. The bulk density grows and the porosity and absorbability of concrete decrease. This phenomenon is caused by the process of carbonization of concrete. Concrete specimens differ with respect to composition and quantity of aggregate. The closer to the external surface of the material, the lower the content of aggregate in concrete which results in higher content of cement. The ratio of aggregate to cement for tested samples was 9:1 and 8:1, which can be regarded as a relatively low.

The analysis of grain composition of the aggregate indicated that the curve derived from the results for sieve testing, places the aggregate in the 'well-grained' category of aggregates with a fraction below 31.5 mm. Quartz aggregate along with crushed granite aggregate was found in the aggregate composition. The content of crushed granite aggregate increases for higher fractions of aggregate. It also increases closer to the external surface of the tested concrete. The presence of fine wood chip inclusions was discovered in aggregate with a fraction below 8 mm [4].

A lower amount of CaO in the oxide composition of the cement and presence of fine black inclusions indicate that blast-furnace cement may have been used for construction purposes. Introduction of slag into the concrete mix resulted in a dense microstructure of the concrete. A high concentration of C-S-H phase is a product of slag hydration and reaction of calcium hydroxide with silicate anions coming from slag hydration. The amount of calcium hydroxide decreases, resulting in the presence of a C-S-H phase as a dense gel. This leads to lower capillary porosity of the hardened cement paste, which in turn obstructs the diffusion of aggressive agents to the cement matrix. The amount of portlandite and calcium aluminates, which are not resistant to corrosion, is lower in the cement paste. These changes to the microstructure of cement paste based on blast-furnace cement mean that such cements are characterized by a number of more favourable properties than Portland cements without additives.

Analysis of the microstructure involved porosity assessment of the material, the structure and dimensions of pores. The porosity was determined with a micro-CT device for tested samples, and found to be approximately 10%. The pores in the material are fine-sized, with a sphericity of 0.6–0.7. The majority are micropores smaller than 300  $\mu\text{m}$ . Such porosity of the tested concrete is responsi-

(poniżej 5%) i przesiąkliwość oraz wysokie właściwości mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie, [3]) oraz dobrą mrozoodporność.

ble for its low absorbability (less than 5%) and percolation and high mechanical properties (compressive strength and tensile strength, [3]), as well as good frost resistance.

---

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Ilkosz J. Hala Stulecia i Tereny Wystawowe we Wrocławiu – dzieło Maxa Berga. Muzeum Architektury we Wrocławiu, Wrocław, 2005.
- [2] Grajewski G., Ilkosz J. Wrocławska Hala Stulecia. Spotkania z Zabytkami 2007;1:3-7.
- [3] Jasieńko J., Moczko M., Moczko A., Dżugaj R., Badanie cech mechanicznych i fizycznych betonu w dolnym pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. Wiadomości Konserwatorskie 2011;27.
- [4] Jasieńko J., Moczko M., Moczko A., Wala D. Beton Hali Stulecia (UNESCO List) we Wrocławiu. Wiadomości Konserwatorskie 2011;30.
- [5] Instrukcja 277/86 ITB. Instrukcja określenia składu stwardniałego betonu.
- [6] Instrukcja 357/98 ITB. Badania składu fazowego betonu.
- [7] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – wersja polska.
- [8] Sobczak R., Prażmo J. Kryteria doboru i własności wybranych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo-ścierniej, <http://www.waterjet.org.pl> (access: 29.05.2015).
- [9] Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Material Research* 1992;7(6):1564-1584.
- [10] Chronowska-Przywara K., Kot M., Zimowski S. Techniki badawcze w analizie właściwości mechanicznych i tribologicznych cienkich warstw i powłok. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport* 2014;83:39-49.

---

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości chemicznych i fizycznych betonu znajdującego się w dolnym pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia w Wrocławiu. Badania przeprowadzone były w drugiej połowie 2009 roku oraz w pierwszej połowie 2015 roku. Ponadto wykonano dodatkowo badania mikrostruktury betonu przy użyciu tomografu komputerowego oraz, na podstawie serii testów nanoindentacji, wykonanych w nanoindenterze.

Dotychczas przeprowadzone badania potwierdzają wysoką jakość betonu. Kruszywo znajdujące się w badanych próbkach to w większości łamany granit strzegomski. W kruszywie o frakcjach poniżej 8 mm zaobserwowano występowanie żużlu paleniskowego o dużej porowatości oraz wtrącenia w postaci ścinków drewnianych.

Ocenę składu mineralogicznego betonu wykonano wykorzystując wyniki analizy składu tlenkowego. Przez zmniejszoną zawartość CaO skład tlenkowy zbliżony jest do składu cementu hutniczego. Wprowadzając świadomie do mieszanki betonowej żużel paleniskowy uzyskano zwartą mikrostrukturę betonu. Stwardniały zaczyn w badanym betonie wykazuje doskonałą przyczepność do łamanego kruszywa granitowego. Posiada strukturę zwartą, gęstą, o bardzo niskiej nasiąkliwości. Mikrotwardość badanego betonu wyniosła 1,8 GPa, a moduł sprężystości  $E = 33$  GPa. W badaniach wykonanych za pomocą mikrotomografu komputerowego oznaczona porowatość w badanych próbkach wyniosła ok. 10%. W strukturze przeważają mikropory poniżej 300  $\mu\text{m}$ .

---

## Abstract

The paper reports on results of chemical and physical testing of concrete sampled from the lower circumferential ring of the dome of the Centennial Hall In Wrocław. Testing was conducted in the second half of 2009 and in the first half of 2015. Additionally, an analysis of the concrete microstructure was undertaken using a computer tomography and a number of nano-indentation tests were carried out with a nano-indentation device.

Analysis of the concrete carried out to date confirms high concrete quality. The aggregate in tested specimens comprises mainly crushed Strzegom granite. In aggregate fractions lower than 8 mm, the presence of high porosity slag and wood chip inclusions was observed.

Analysis of concrete mineral composition was conducted using results of an oxide composition analysis. The oxide composition of this cement is close to the composition of blast-furnace cement. Introduction of slag into the concrete mix resulted in a dense microstructure of the concrete. The hardened cement paste in the tested concrete demonstrates excellent adhesion to crushed granite aggregate. This is characterised by a dense structure, with low absorbability.

Micro-hardness of tested concrete was determined to equal 1,8 GPa and the modulus of elasticity  $E = 33$  GPa. In studies conducted using micro-CT the porosity for tested samples found to be approximately 10%. In the structure the majority are micropores smaller than 300  $\mu\text{m}$ .