

# Beton – materiał budowlany znany od wieków

Dr inż. Wioletta Raczkiewicz, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

## 1. Wprowadzenie – początki betonu

Beton to mieszanina kruszywa (drobno- i gruboziarnistego), piasku i cementu, która w wyniku hydratacji cementu ulega wiązaniu, a następnie twardnieniu, stając się materiałem o właściwościach bliskich właściwościom skał naturalnych.

Najstarsze ślady stosowania betonu datuje się na 7000 r. p.n.e. Z tego okresu pochodzą budowle w miejscowości Yiftah El (południowa Galilea, Izrael), w których podłogi i fragmenty ścian wykonane były z betonu ze spoiwem wapiennym i kruszywem z rozdrobnionego wapienia. Podobny rodzaj betonu występował w podłogach chat rybackich odkrytych w osadzie w Lepenskim Virze (Serbia), a której powstanie datowane jest na 5600 r. p.n.e. Również w Veracruz (Meksyk), w mieście z 1100 r. p.n.e. odkopane zostały budynki, których dachy wykonane z betonu.

Jednak wynalezienie i rozpowszechnienie betonu jako materiału budowlanego przypisuje się starożytnym Rzymianom. W IV w. p.n.e. stosowali oni technikę wznoszenia konstrukcji z betonu polegającą na wlewaniu

rzadkiej zaprawy między dwie murowane z kamienia ściany (pełniące jednocześnie rolę szalunku traconego) i wrzucaniu do środka gruzu kamiennieo-ceramicznego. Natomiast sto lat później wytwarzali już beton odpowiadający z definicji betonom współczesnym. Była to mieszanina kamieni, wody i cementu, która po związaniu twardniała tworząc sztuczną skałę.

Stosowany przez Rzymian cement składał się z zaprawy wapiennej i popiołu wulkanicznego (pulvis puteolanus) powszechnie występującego na obszarach basenu Morza Śródziemnego. Znajomość wytwarzania tego cementu przejęli Rzymianie prawdopodobnie od Greków, którzy jako pierwsi stosowali mieszaninę wapna i popiołów wulkanicznych do wytwarzania spoiw hydraulicznych. Beton z takim spoiwem został m.in. użyty do budowy dużych zbiorników na wodę w świątyni Ateny na wyspie Rodos oraz w porcie Pireus. Grecy wykorzystywali głównie popioły z wyspy Nisiros oraz Puccoli (Putteoli), która była grecką kolonią we Włoszech. Właśnie od nazwy miejscowości Puccoli, leżącej u podnóża Wezuwiusza (gdzie złoża tuf wulkanicznych były największe), pochodzi nazwa tego materiału – pucolany.

Najstarsze zapiski dotyczące betonu zawdzięczamy Witruwiuszowi, rzymskiemu architektowi, konstruktorowi i inżynierowi żyjącemu w I w. p.n.e., którego pełne imię brzmiało Marcus Vitruvius Pollio. W swoim traktacie „O architekturze ksiąg dziesięć” pisał: „Istnieje pewien gatunek pyłu, który dzięki przyrodzonym właściwościom wytwarza rzeczy godne podziwu. [...] Proszek ten zmieszany z wapnem i łamanym kamieniem nie tylko zapewnia trwałość wszystkich budowli, lecz nawet użyty przy budowie grobli w morzu twardnieje pod wodą”.

Zdarzało się już w czasach starożytnych, że beton wzbogacano różnymi naturalnymi domieszkami, które popra-



Rys. 1. Najstarsza droga rzymska Via Appia [17]



Rys. 2.  
Kanał Cloaca  
Maxima [16]



Rys. 3. Pont du Gard (Francja) [autor]

wiały jego właściwości. Najczęściej był to tłuszcz zwierzęcy, krew lub mleko.

Dostępność surowców wchodzących w skład ówczesnego betonu, opanowanie technologii produkcji oraz bardzo dobre właściwości sprawiły, że w I w. p.n.e. beton był już powszechnie stosowany. Wykorzystywano go do budowy fortec, portów, falochronów, świątyni, pomników, akweduktów, dróg. Możliwość dowolnego kształtowania sprawiła, że oprócz prostych ścian, zaczęto formować z betonu łuki i kopuły.

Jako ciekawostkę można dodać, że początkowo ludność nie darzyła betonu zaufaniem i w związku z tym budownicy po wykonaniu murów z betonu, pokrywali je licówką z kamienia naturalnego [1, 3, 4, 5, 9].

## 2. Beton w budowlach starożytnego Rzymu

Większość zachowanych do dziś obiektów budowanych, do wykonania których używano betonu na bazie cementu pucolanowego można oglądać na terenach obecnych Włoch. W Pompejach znajdują się najstarsze, pochodzące z II w. p.n.e., termy Karakalli, w których kopułę stanowią bloki „sztucznego kamienia” wykonane z zaprawy z dodatkiem pucolan. Z kolei, w świątyni Konkordii i Kastora w Rzymie (121–117 p.n.e.) z betonowych płyt zostały wykonane fundamenty, tzw. podia. Beton wykorzystywano także do budowy dróg i ulic, w tym do budowy najstarszej drogi w Rzymie – Via Appia (rys. 1).

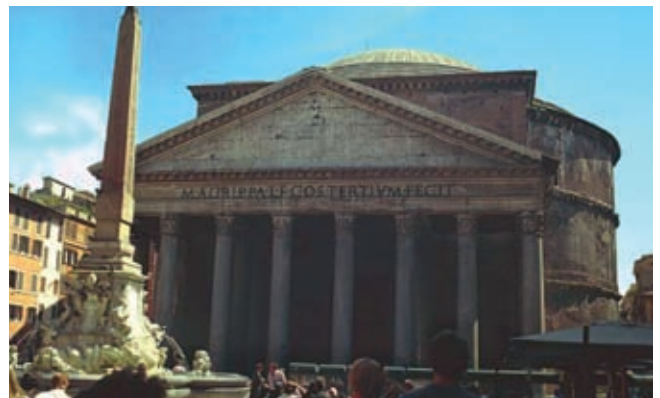
Do dnia dzisiejszego zachował się również kanał ściekowy – Cloaca Maxima w Rzymie (rys. 2), którego budowa rozpoczęła się w VI w. p.n.e. Dzięki niemu osuszono teren pod budowę Forum Romanum. Sam kanał został wybudowany z kamienia, ale w III w. p.n.e. ściany kanału obetonowano, a 184 r. p.n.e., po pracach modernizacyjnych, zamknięto go od góry. Kanał ma 600 metrów długości, 3,20 metry szerokości i 4,20 metry wysokości w świetle. Jest wciąż czynny.

Beton to materiał wykorzystywany również przy budowie powstających w owych czasach akweduktów. Najstarszy z nich – Aqua Appia, wybudowano w 312 r. p.n.e. Nato-

miast jednym z najbardziej okazałych jest Pont du Gard (26–16 p.n.e.) – akwedukt położony w dolinie Gardon na terenach obecnej Francji (rys. 3). To jedyny na świecie zachowany do dziś akwedukt trójpoziomowy. Ma 360 metrów długości, 27 metrów szerokości i 48 metrów wysokości. Zbudowany jest z kamiennych bloków bez użycia zaprawy. W obu tych akweduktach, jak również w innych pochodzących z tamtych czasów, koryta, którymi płynęła woda, były wykonywane z betonu. Z zachowanych do dziś zapisków nadzorca akweduktów Frontinusa (I w. n.e.) wynika, że betonowe koryta przysparzały wiele problemów – często pękały i były nieszczelne. Prawdopodobnie Rzymianie nie rozumieli, że z powodu skurczu i nierównomiernego osiadania budowle o dużych rozmiarach, w tym przypadku wielokilometrowe odcinki betonowych koryt, wymagają stosowania dylatacji.

Z czasów starożytnego Rzymu pochodzi wiele budowli monumentalnych, świątyni i amfiteatrów, które wznoszono głównie z kamienia lub cegły, ale do budowy fundamentów i sklepień używano betonu.

Za przykład może posłużyć rzymski Panteon (118–128 n.e.) – świątynia posadowiona na betonowym fundamencie o głębokości 4,5 i grubości 7,3 m (rys. 4). Ściany Panteonu wykonane są z cegły, ale przekrycie stanowi kopuła zbudowana z poziomych warstw betonu przełożonych cegłą. Na jej szczycie znajduje się okrągły otwór zwany oculusem. Kopuła ma średnicę 43,3 m. Ze względu na zmniejszenie ciężaru, jaki wynikałby z tak dużej ilości materiału koniecznego do wykonania skle-



Rys. 4. Rzymski Panteon [14]



**Rys. 5.**  
Koloseum [autor]

pienia, kopułę uformowano schodkowo, a wewnętrzna jej powierzchnia została wykonana z kasetonów. Kasetony, w liczbie 140, ułożone są w pięciu poziomych rzędach po 28 sztuk w rzędzie. W każdym kolejnym, wyższym rzędzie kasetony są coraz mniejsze. Od strony zewnętrznej kopuła zmniejsza się schodkowo, grubość u podstawy wynosi 6 metrów, podczas gdy przy górnym otworze tylko 1,5 m. Dodatkowo, w celu zmniejszenia ciężaru kopuły, w najwyższej jej części zamiast cegły i kamienia zastosowano pumeks wulkaniczny.

Drugą znaną budowlą Rzymu będącą przykładem wykorzystania betonu jest Koloseum (Colosseum) – Amfiteatr Flawiuszów (rys. 5). Obiekt został wybudowany w latach 70–82 n.e. Jest to budowla na owe czasy ogromna, wysoka na 49 metrów, w planie eliptyczna o długościach osi: 188 metrów i 156 metrów. Koloseum jest kilkukondygnacyjne, z czterema galeriami komunikacyjnymi, areną oraz rozbudowanym układem podziemnych korytarzy. Ściany zewnętrzne zbudowane są z twardego trawertynu i cegły. Jednak do konstrukcji sklepień i murów wewnętrznych użyte zostały obok cegły duże ilości betonu.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że w latach 37–41 n.e. w Neapolu powstał pierwszy na świecie budynek w technologii prefabrykacji. Do jego wykonania użyto prefabrykowanych bloków stwardniałego betonu wykonywanych poza miejscem budowy.

Rzymianie mieli również doskonale opanowaną technikę wykonywania betonowych konstrukcji podwodnych, falochronów.

Pod koniec II w. n.e. na ziemiach Imperium Rzymskiego, które obejmowało wówczas sporą część Europy (państwa basenu Morza Śródziemnego, półwysep Bałkański, Europę północno-zachodnią, Krym), Azji (Małą Azję, część Armenii, Syrię, Judeę, półwysep Synaj), a w Afryce Egipt i ziemie aż po Gibraltar, sztuka budowlana osiągnęła bardzo wysoki poziom, a spoiwa pucolane pozwalały na wykorzystanie betonu do kształtowania wytrzymałych i ciekawych form architektonicznych. Dużą skarbnicą wiedzy o rzymskiej sztuce budowania jest wspomniany już wcześniej traktat Witruwiusza pełen informacji o konstrukcjach, szalunkach i używanych przez Rzymian materiałach.

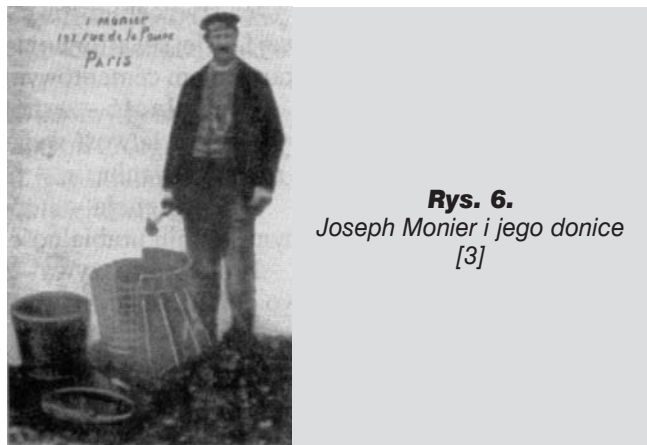
Wraz z nastaniem Średniowiecza i zahamowanym w tym czasie rozwojem nauki i techniki, na skutek niedostatecznej wiedzy budowlanej, nie wykonywano betonu i nie stosowano go w budownictwie. Wszelkie budowle wznoszono głównie z cegły. Jako materiał wykorzystywano wypalone wapno i gips [1, 5, 9, 14, 16, 17, 18].

### 3. Cement i beton w czasach nowożytnych

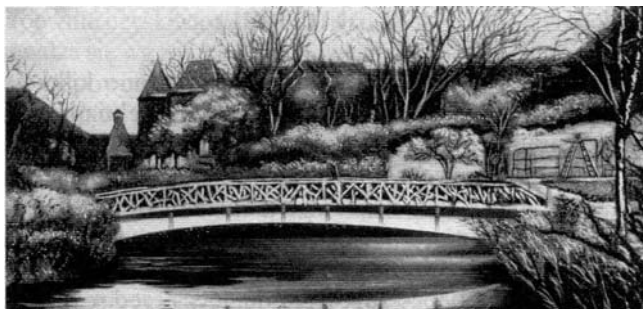
Powrót do wykorzystania betonu w budownictwie nastąpił po ponownym zainteresowaniu się cementem, co nastąpiło pod koniec XVIII w.

Prawdopodobnie pierwszym cementem stosowanym w końcu XVIII w. był cement Parkera (wypalany z wapienia marglistego wydobywanego na klifach Brytanii) opatentowany w 1796 r. przez Josepha Parkera. Cement ten nosił też nazwę cementu romańskiego z racji koloru przypominającego stare cementy rzymskie z wapna i pucolany. W tym samym roku francuski inżynier wojskowy Lesage wyprodukował tzw. cement naturalny na bazie otoczków (występujących w rejonach Boulogne-sur-Mer we Francji). Pierwsze ośrodki produkcji cementu romańskiego zlokalizowane były w Anglii i Francji, ale szybko powstały kolejne w Niemczech, Szwajcarii, Czechach i Polsce. Cement romański stał się bardzo popularny głównie za sprawą wykorzystania go w latach 1796–1801 przez Thomasa Telforda do budowy wiaduktu w Chirk, w Anglii. Jednocześnie trwały badania nad nowymi cementami. John Smeaton, angielski mechanik i budowniczy, w 1756 r. otrzymał wapno hydrauliczne wiążące pod wodą. W roku 1811 James Frost opatentował cement Frosta – spoiwo hydrauliczne uzyskane z wypalenia kredy i gliny. Jedenaście lat później, po udoskonaleniu metody wypalania, Frost uzyskał cement brytyjski. W roku 1820, w USA opatentowany został cement naturalny wyprodukowany przez inżyniera Canvassa Whita z kamienia wapiennego z domieszkami krzemianów i glinianów, który zastosowany został do budowy kanału Erie.

Stosowanym powszechnie aż do dziś (choć według zmienionej receptury) jest cement portlandzki. Powsta-



**Rys. 6.**  
Joseph Monier i jego donice  
[3]



**Rys. 7.** Pierwszy most żelbetowy, J. Monier [3]

nie tego cementu należy zawdzięczać angielskiemu murarzowi Josephowi Aspdinowi, który opatentował go w 1824 r. Aspdin nazwał go „portlandzkim” ze względu na zewnętrzne podobieństwo do kamienia budowlanego wydobywanego w okolicach Portlandu. Do początków XIX w. cement ten nie miał dużego znaczenia. Do jego rozpowszechnienia przyczyniła się rozpoczęta w roku 1825 budowa tunelu pod Tamizą. Początkowo do budowy używano cementu Parkera, który jednak nie sprostął wymaganiom, a konstrukcja w 1828 r. uległa zawaleniu. To skłoniło syna Josepha Aspdina – Williama do badań nad opatentowanym cementem portlandzkim. William Aspdin udoskonalił recepturę ojca i zaproponował swój cement na budowę tunelu. Materiał okazał się tak dobry, że wyparł stosowany dotychczas cement Parkera.

Jednak za twórcę współcześnie stosowanego cementu portlandzkiego uważany jest Isaac Charles Johnson, który w 1845 r. opracował optymalny skład cementu i właściwą temperaturę prażenia.

W roku 1848 zakończono budowę tunelu, a w kilka lat później na świecie funkcjonowało już pięć dużych fabryk cementu portlandzkiego. Jedną z nich była uruchomiona w 1857 r. w Groźcu k. Będzina (Polska – zabór rosyjski) fabryka Jana Ciechanowskiego.

Warto dodać, opierając się na informacjach z wydawanego wówczas Czasopisma Towarzystwa Technicznego Krakowskiego, że Ciechanowski był osobą wyjątkowo zasłużoną dla rozwoju cementownictwa na ziemiach polskich – kilka lat wcześniej uruchomił fabrykę cementu naturalnego nazywanego roman-cementem Ciechanowskiego.

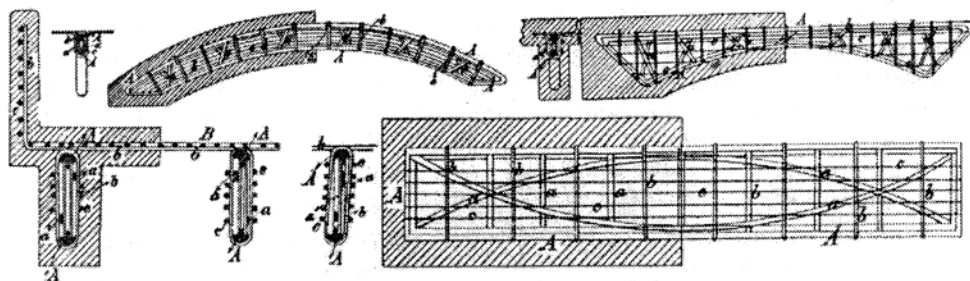
Natomiast pionierem przemysłowej produkcji cementu portlandzkiego na świecie został Isaac Johnson. Za ojca betonu uważany jest, wspomniany już wcześniej, samozwańczy inżynier John Smeaton (1724–1792), który w latach 1756–1759 prowadził doświadczenia nad mieszankami na bazie różnych spoiw z różnymi dodatkami. Efektem jego pracy była m.in. mieszanka betonowa, która została wykorzystana do wzniesienia w 1776 r. 24-metrowej latarni morskiej w Eddystone k. Plymouth (Anglia).

Należy wspomnieć, że w czasach nowożytnych wyodrębnione były początkowo dwa pojęcia: beton i concrete. Beton – według angielskiego rozumienia była to mieszanka piasku, cementu i wody, bez udziału kruszywa, którą przygotowywano wcześniej i dopiero taką mieszanką zalewano grube kruszywo umieszczone w deskowaniu. Concrete natomiast był mieszanką zarobioną ze wszystkich składników jednocześnie. Dopiero w 1748 r., po publikacji francuskiej „Architecture hydraulique” Bernarda Foresta de Belidor, słowo beton nabrało jednego, dzisiejszego znaczenia.

Mimo powstawania coraz to lepszego cementu, beton nie przyjął się szybko jako materiał pozwalający na nową technikę budowania. Jak podaje Affelt [1] „Szacowne instytucje akademickie i profesjonalne towarzystwa raczej przyglądały się wyczynom inżynierów, niżli je wspierały teorią lub badaniami materiałowymi” [1, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15].

#### 4. Rozwój betonu zbrojonego

Wadą betonu, która znacznie ograniczała jego zastosowanie w budownictwie, była mała wytrzymałość na rozciąganie (~10-krotnie mniejsza niż na ściskanie). Dla-



**Rys. 8.**  
Wybrane zbrojone elementy betonowe opatentowane przez J. Moniera [1]



**Rys. 9.**  
Żelazobetonowa łódź zbudowana przez J. Lambota [15]

tego też XIX-wieczni wynalazcy i inżynierowie, głównie pochodzący z Anglii i Francji, pracowali nad udoskonaleniem betonu. W efekcie odkryty został beton zbrojony – żelazobeton. Nowo powstały materiał połączył w sobie istotne właściwości betonu i początkowo żelaza, a w późniejszym czasie stali. Dzięki dobrej wzajemnej współpracy obu tych materiałów można było jednocześnie wykorzystać dużą wytrzymałość betonu na ściskanie oraz jego rolę ochronną w stosunku do żelaznych wkładek, które z kolei wykazywały się dużą wytrzymałością na siły rozciągające.

Powstanie żelazobetonu powszechnie kojarzone jest z postacią francuskiego ogrodnika Josepha Monier (1823–1906), który w 1849 r. zastosował żelazne siatki do zbrojenia betonowych donic wykorzystywanych w ogrodach wersalskich (rys. 6). Anegdota głosi, że stało się to przypadkowo, gdyż żelazny kosz niechcący wpadł ogrodnikowi do płynnej masy betonowej, a po wyschnięciu, oblepiony betonową skorupą, okazał się bardzo mocny. Czy było tak naprawdę, nie wiadomo.

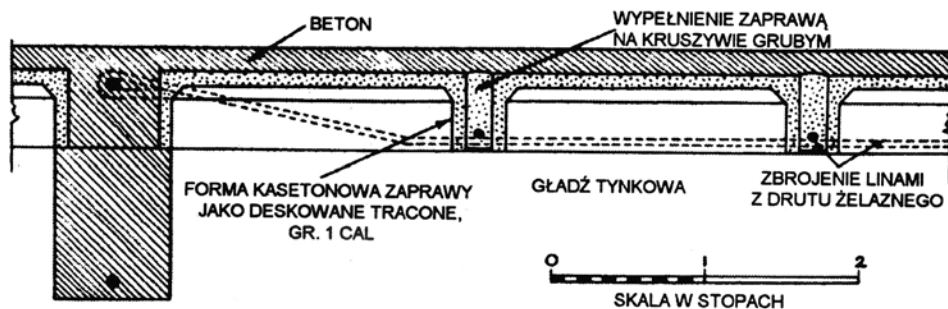
W każdym razie Monier przeprowadzał szereg badań i doświadczeń związanych z nowym materiałem. W 1867 r. opatentował technologię wyrobu żelbetonowych koszy, a w latach następnych również rur (1868), płyt (1869), arkad mostu łukowego (1873), belek – podkładów kolejowych (1877), stropów (1880–1883) itp. (rys. 7, 8). Jednak nieco wcześniej, bo w 1848 r. francuski wynalazca Joseph-Louis Lambot zbudował łódź z żelazobetonu (pokazaną na Światowej Wystawie w Paryżu w 1855 r.) i to on w 1851 r. opatentował tworzywo składające się z zaprawy cementowej zbrojonej drucianą siatką (rys. 9).

W kolejnych latach udoskonalano sposoby zbrojenia betonu. W 1854 r. William Boutland Wilkinson, tynkarz z Newcastle, opatentował sposób wykonania stropu z betonowych płyt z zatopionymi w nich paskami żelaznej bednarki oraz stropu opartego na betonowych żebrach zbrojonych stalowymi linami (rys. 10). Amerykański inżynier, Thadeus Hyatt, choć z wykształcenia był prawnikiem, zwrócił uwagę na wiele istotnych cech dotyczących betonowych elementów zbrojonych. Jako pierwszy dostrzegł konieczność otulenia żelaza betonem w celu ochrony przed ogniem oraz podkreślał ważność właściwego umiejscowienia zbrojenia w belkach i słupach. W tych ostatnich zalecał także stosowanie poprzecznych obręczy obejmujących zbrojenie podłużne. Zauważył też, że pręty żłobkowane mają lepszą przyczepność do betonu niż pręty gładkie. W 1877 r. opublikował wyniki swoich badań doświadczalnych.

Do upowszechnienia stosowania konstrukcji żelbetonowych w budownictwie przyczynił się francuski kamieniarz i przedsiębiorca budowlany, budowniczy – samouk Francois Hennebique, który w Anglii w 1892 r. opatentował swój system wykonania żelbetonowych płyt, belek i słupów wzajemnie powiązanych stalowym zbrojeniem, co dawało jednolity, szkieletowy układ konstrukcyjny (rys. 11). On też zaproponował stosowanie żelbetonowych belek teowych, pali o przekroju kwadratowym oraz ścianek oporowych z płyt prefabrykowanych. Założył ogólnościatową firmę, która oferowała kompleksowe (projektowe i wykonawcze) usługi budowlane. Firma zrealizowała ok. 500 dużych przedsięwzięć budowlanych, w tym m.in. Muzeum Egipskie w Kairze, pierwszy w świecie most żelbetonowy w Szwajcarii (1894) oraz pierwszy w świecie most z betonu sprężonego we Francji o rozpiętości przęsła 13 m (1898).

Na uwagę zasługuje również niemiecki architekt i inżynier Max Berg, który zaprojektował stojącą do dziś we Wrocławiu Halę Stulecia (rys. 12) – największy w owych czasach obiekt żelbetonowy. Hala ma 42 m wysokości, a zwieńczona jest żelbetonową kopułą o średnicy 67 m. Budowa hali trwała zaledwie kilkanaście miesięcy, od sierpnia 1911 do grudnia 1912 roku.

Zastosowanie betonu sprężonego było kolejnym przełomem w upowszechnieniu betonu w budownictwie. Największe zasługi w tym obszarze miał francuski inżynier,



**Rys. 10.**  
Sposób wykonania stropu wg W. B. Wilkinsona [1]

