



ZYGMUNT JAMROŻY

BETON I JEGO TECHNOLOGIE



**Uwzględnia normę
PN-EN 206-1**



BETON I JEGO TECHNOLOGIE

Miło jest autorowi książki poinformować, że udało mu się spełnić prośbę Poetki, Pani Wisławy Szymborskiej, laureatki literackiej Nagrody Nobla, wyrażoną w utworze *Rozmowa z kamieniem*

Pukam do drzwi kamienia.

To ja, wpuść mnie.

Chcę wejść do Twego wnętrza, rozejrzeć się dokoła...

Autor otworzył przed Czytelnikami drzwi kamienia, jakim jest beton, i wprowadził do wnętrza cytatami z utworów Poetki zamieszczonymi w formie motta przed każdym rozdziałem. Pozwoli to uwierzyć, że beton nie jest martwy, a jego charakter zależy od uczciwości człowieka-wykonawcy.

ZYGMUNT JAMROŻY

BETON I JEGO TECHNOLOGIE

**Uwzględnia normę
PN-EN 206-1**

Projekt okładki i stron tytułowych *Bartosz Dobrowolski*

Ilustracja na okładce *FreshPaint/Shutterstock*

Wydawca *Izabela Ewa Mika*

Redaktor prowadzący *Irena Puchalska*

Produkcja *Mariola Grzywacka*

Łamanie *Grafini, Brwinów*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo

Więcej na www.legalnakultura.pl

Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa–Kraków 2000

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2003, 2005, 2015

ISBN 978-83-01-18210-6

Wydanie czwarte

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
infolinia 801 33 33 88
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl

Druk i oprawa: Białostockie Zakłady Graficzne SA

Spis treści

Przedmowa	XV
Przedmowa do wydania trzeciego	XVI
Symbole i skróty	2
1. Wprowadzenie	4
1.1. Rys historyczny rozwoju betonu	5
1.2. Ważniejsze określenia	8
1.3. Postępowanie w robotach betonowych	8
1.4. Zasadniczy podział betonów	9
1.4.1. Podział ze względu na gęstość objętościową (ρ_0)	9
1.4.2. Podział ze względu na przeznaczenie w konstrukcji	9
1.4.3. Podział ze względu na technologiczne warunki pracy	10
1.4.4. Podział ze względu na miejsce urabiania mieszanki	10
1.4.5. Nazwy betonów	10
2. Spoiwo	11
2.1. Pojęcie spoiwa	11
2.2. Rodzaje spoiw	11
2.2.1. Spoiwa powietrzne	11
2.2.2. Spoiwa hydrauliczne	11
2.2.3. Spoiwa żywiczne	12
2.2.4. Spoiwa bitumiczne	12
2.3. Dodatki do cementu	12
2.4. Cement	16
2.4.1. Uwagi wstępne	16
2.4.2. Charakterystyka chemiczna cementu	17
2.4.3. Znaczenie składu chemicznego cementu	18
2.4.4. Postępowanie w praktyce przy wyborze cementu	19
2.4.5. Podział cementów	20
2.4.6. Skład chemiczny cementów powszechnego użytku	20
2.5. Cement portlandzki – CEM I	24
2.6. Cementy z grupy CEM II (portlandzkie mieszane)	28
2.7. Cement hutniczy – CEM III	28
2.8. Cement pucolanowy – CEM IV i wieloskładnikowy – CEM V	29
2.9. Właściwości cementów powszechnego użytku	29
2.10. Cement szybkotwardniejący	32
2.11. Cement portlandzki szybkowiązący	32
2.12. Cement belitowy	33

2.13.	Cement niskokaloryczny	33
2.14.	Cement wysokoalkaliczny	33
2.15.	Cement do budowy mostów	33
2.16.	Cement do budowy dróg	34
2.17.	Cement hydrotechniczny	34
2.18.	Cement dla górnictwa	34
2.19.	Cement wiertniczy	35
2.20.	Cement biały i cementy innych kolorów	35
2.21.	Cement plastyfikowany	35
2.22.	Cement hydrofobowy	36
2.23.	Cement siarczanowo-żuźlowy	36
2.24.	Cement ekspansywny	36
2.25.	Cement glinowy	37
2.26.	Cement bezgipsowy	38
2.27.	Starzenie się cementów	38
2.28.	Transport cementu	40
2.29.	Przechowywanie cementu	40
3.	Zaczyn cementowy	43
3.1.	Opis ogólny	43
3.2.	Właściwości reologiczne zaczynu	43
3.3.	Proces dojrzewania zaczynu cementowego	45
3.4.	Stopień i zakres hydratacji ziaren cementowych	53
3.5.	Struktura stwardniałego zaczynu cementowego	56
3.6.	Ciepło hydratacji	62
3.7.	Wpływ miałkości, temperatury i wilgotności na proces dojrzewania	63
3.8.	Kształtowanie się fizykochemicznych właściwości zaczynu w miarę jego dojrzewania	65
3.9.	Odkształcalność	65
3.9.1.	Skurcz wewnętrzny	66
3.9.2.	Skurcz zewnętrzny	66
3.9.3.	Odkształcalność termiczna	68
3.9.4.	Odkształcenia pod wpływem obciążeń zewnętrznych	68
3.10.	Charakterystyka i celowość badania cementu	69
3.10.1.	Właściwości przewidziane do badań	69
3.10.2.	Czas wiązania	70
3.10.3.	Zmiana objętości	70
3.10.4.	Stopień rozdrobnienia	71
3.10.5.	Skurcz	72
3.10.6.	Wytrzymałość na ściskanie	72
3.10.7.	Cement zwietrzały – ocena i postępowanie	74
3.10.8.	Fałszywe wiązanie	75
3.11.	Podsumowująca analiza właściwości zaczynu	75
4.	Kruszywo	79
4.1.	Kruszywo jako składnik betonu	79
4.2.	Podział kruszyw	79
4.3.	Określenie ważniejszych nazw i pojęć	83
4.4.	Powstawanie ziaren	85
4.5.	Charakterystyka ziaren kruszywa	86
4.6.	Rodzaje skał, z których pochodzi kruszywo do betonów zwykłych	90

4.7.	Ogólna charakterystyka skał	90
4.8.	Właściwości fizyczne skał	91
4.9.	Szczególne cechy skał	95
4.10.	Wymagania techniczne dla kruszyw do betonu	97
4.11.	Wymagania wobec kruszyw łamanych	102
4.12.	Granulometryczna charakterystyka kruszyw	103
4.12.1.	Ważniejsze pojęcia	103
4.12.2.	Wymagania normy	104
4.12.3.	Optymalne uziarnienie	104
4.12.4.	Krzywa uziarnienia	106
4.12.5.	Ograniczenie największej średnicy ziaren kruszywa	108
4.12.6.	Sporządzenie krzywej uziarnienia	108
4.12.7.	Sposoby doboru uziarnienia	109
4.12.8.	Granice krzywych przesiewu	114
4.12.9.	Dobór uziarnienia metodą kolejnych przybliżeń (iteracji)	116
4.12.10.	Szczególne przypadki komponowania kruszyw	121
4.12.11.	Powierzchnia właściwa kruszywa	123
4.13.	Produkcja kruszywa skalnego	125
4.13.1.	Produkcja kruszywa naturalnego	125
4.13.2.	Produkcja kruszywa łamanego	126
4.13.3.	Produkcja kruszywa betonowego (z recyklingu)	126
4.14.	Transport kruszywa	126
4.15.	Składowanie kruszywa	126
4.16.	Istota badań kruszyw skalnych	127
5.	Woda zarobowa	131
5.1.	Warunki dopuszczenia wody do zarabiania betonu	131
5.2.	Ilość wody zarobowej	132
5.3.	Wodoządnosć składników betonu	133
5.4.	Woda w stosie kruszywa	134
5.5.	Doświadczalne wyznaczenie wodoządnosći kruszywa	137
6.	Właściwości mieszanki betonowej	139
6.1.	Ogólna charakterystyka	139
6.2.	Właściwości mieszanki betonowej	141
6.2.1.	Urabialność	142
6.2.2.	Konsystencja	144
6.2.3.	Zdolność do zagęszczania	147
6.2.4.	Uwagi dodatkowe	148
7.	Wytrzymałość na ściskanie – podstawowa cecha betonu zwykłego	153
7.1.	Określenia	153
7.2.	Warunki wykonywania	154
7.3.	Warunki dojrzewania	154
7.4.	Klasa betonu	156
7.5.	Wytrzymałość charakterystyczna f_{ek}	157
7.6.	Wytrzymałość średnia	157
7.7.	Współzależność wytrzymałości charakterystycznej i średniej	159
7.8.	Ustalanie wytrzymałości średniej w celu zaprojektowania założonej klasy betonu	159
7.9.	Związek pomiędzy wytrzymałością średnią a składem betonu	160

7.10.	Optymalna ilość zaczynu	161
7.11.	Dodatkowe informacje	163
8.	Wprowadzenie do projektowania betonu zwykłego	167
8.1.	Podstawowe określenia	167
8.2.	Podział betonu zwykłego na grupy projektowania	167
8.3.	Określenie dobrze zaprojektowanego betonu	168
8.4.	Tok postępowania przy projektowaniu betonu	169
8.5.	Dobór konsystencji	170
8.6.	Dobór rodzaju cementu	170
8.7.	Dobór rodzaju kruszywa	171
8.8.	Badania przydatności i cech charakterystycznych składników	172
8.9.	Graniczne ilości cementu	172
8.10.	Podstawa projektowania ilości składników	172
8.11.	Klasyfikacja metod projektowania	173
9.	Projektowanie składu betonu klas $\leq$ C20/25	175
9.1.	Metody obliczeniowe	175
9.1.1.	Metody trzech równań	175
9.1.2.	Metoda B. Bukowskiego	175
9.1.3.	Metoda T. Kluza–K. Eymana	178
9.1.4.	Metody czterech równań	180
9.1.5.	Metoda punktu piaskowego	180
9.1.6.	Metoda dwustopniowego otulenia W. Paszkowskiego	181
9.1.7.	Metoda dwustopniowego otulenia według B. Kopycińskiego	184
9.1.8.	Metoda dwustopniowego przepełnienia B. Kopycińskiego	187
9.2.	Metody doświadczalne	192
9.2.1.	Idea metod	192
9.2.2.	Metoda znanego zaczynu	192
9.3.	Szczególne sposoby projektowania	194
9.3.1.	Projektowanie według „recepty podanej graficznie”	194
9.3.2.	Projektowanie według „recepty podanej tabelarycznie”	199
9.3.3.	Projektowanie ze wspomaganie komputerowym	199
9.4.	Sprawdzenie zaprojektowanego składu betonu	200
9.5.	Uwzględnienie w projektowaniu betonu dodania domieszki	200
9.6.	Roboczy skład betonu – recepta robocza	201
10.	Projektowanie betonów klas od C25/30 do C45/50	203
10.1.	Uwagi wstępne	203
10.2.	Wymagania dotyczące składników betonu	203
10.3.	Charakterystyka zaczynu	204
10.4.	Dobór uziarnienia kruszywa	204
10.5.	Postępowanie przy projektowaniu	205
11.	Projektowanie betonów wysokich klas $\geq$ C50/60	209
11.1.	Wprowadzenie	209
11.2.	Istota sposobu uzyskiwania betonów wysokich klas	209
11.3.	Przykładowe składniki betonów ustalone przez autora bądź zaczerpnięte z literatury krajowej	210
11.4.	Szczególne właściwości BWW	211
11.5.	Organizacyjne zasady postępowania w projektowaniu składu betonu (kompetencje kadry)	215

12. Projektowanie betonu, który będzie wykonywany w warunkach prymitywnych	217
12.1. Postępowanie zasadnicze	217
12.2. Informacje pomocnicze	218
13. Domieszki	221
13.1. Określenie	221
13.2. Podział	221
13.3. Ocena	221
13.4. Domieszki polepszające urabialność mieszanki betonowej	223
13.4.1. Domieszki upłynniające przez zwilżanie	225
13.4.2. Superplastyfikatory	226
13.4.3. Cel stosowania plastyfikatorów	229
13.5. Domieszki napowietrzające	231
13.6. Domieszki regulujące wiązanie	234
13.6.1. Domieszki opóźniające wiązanie	236
13.6.2. Domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie	236
13.7. Domieszki uszczelniające przeciw przenikaniu wody	239
13.8. Domieszki podwyższające mrozoodporność	240
13.9. Domieszki barwiące	241
13.10. Domieszki spulchniające	241
13.11. Inne domieszki	242
14. Dodatki	245
14.1. Dodatki pylaste	245
14.1.1. Popiół lotny jako dodatek	246
14.1.2. Żużel wielkopiecowy jako dodatek	249
14.1.3. Pył krzemionkowy jako dodatek	249
14.1.4. Mączki skalne jako dodatek	250
14.1.5. Bentonit jako dodatek	250
14.2. Dodatki okruczowe	251
14.3. Żywiec syntetyczny jako dodatki	251
14.4. Dodatki uodporniające na oddziaływania mechaniczne	253
14.5. Dodatki kompleksowe	255
14.6. Projektowanie betonów z domieszkami i dodatkami	255
14.7. Uwagi technologiczne dotyczące domieszek i dodatków	256
15. Właściwości techniczne betonu	259
15.1. Określenia	259
15.2. Rodzaje właściwości	259
15.3. Wytrzymałość na ściskanie i jej kształtowanie	260
15.3.1. Czynniki składowe wytrzymałości betonu na ściskanie	260
15.3.2. Rodzaje przyczepności	260
15.3.3. Strefa stykowa zaczynu z kruszywem	261
15.3.4. Mechanizm i przebieg niszczenia próbki zgniatanej	264
15.3.5. Wzór wytrzymałościowy Fereta	266
15.3.6. Określanie wytrzymałości 28-dniowej na podstawie wytrzymałości wcześniejszej	267
15.3.7. Rozwój wytrzymałości po 28 dniach	268
15.3.8. Rozwój wytrzymałości betonów klas $\geq C50/60$	268
15.3.9. Wpływ kształtu i wielkości elementu na ocenę wytrzymałości	268
15.3.10. Wytrzymałość przy miejscowym docisku	270

15.3.11.	Wytrzymałość przy ściskaniu wieloosiowym	270
15.3.12.	Wytrzymałość w przypadku obciążeń pulsujących (dynamicznych) ..	271
15.3.13.	Czynniki wpływające na chwilowe zmiany wytrzymałości na ściskanie	271
15.3.14.	Wpływ temperatury	272
15.3.15.	Wpływ wilgoci	272
15.3.16.	Wytrzymałość betonu w warunkach kriogenicznych	274
15.4.	Wytrzymałość na rozciąganie	274
15.4.1.	Badanie na osiowe rozciąganie (f_t)	275
15.4.2.	Badanie na zginanie (f_g)	276
15.4.3.	Badanie na łupanie (f_l)	276
15.4.4.	Współzależność wielkości f_t , f_g i f_l	276
15.5.	Specjalne właściwości wytrzymałościowe	277
15.5.1.	Wytrzymałość na skręcanie (f_{skr})	277
15.5.2.	Wytrzymałość na ścinanie (f_τ)	277
15.5.3.	Wytrzymałość uderowa (f_u)	278
15.5.4.	Odporność na ścieranie	278
15.5.5.	Odporność na wysoką temperaturę	279
15.5.6.	Przyczepność do stali	279
15.6.	Odkształcalność	281
15.6.1.	Skurcz	281
15.6.2.	Skurcz karbonizacyjny	287
15.6.3.	Odkształcalność termiczna	287
15.6.4.	Odkształcenia pod rosnącym obciążeniem	289
15.7.	Moduł sprężystości E	291
15.8.	Naprężenia krytyczne	294
15.9.	Pełzanie	295
15.9.1.	Zjawiska zachodzące w strukturze betonu przy pełzaniu	296
15.9.2.	Przebieg pełzania	297
15.9.3.	Czynniki wpływające na wielkość pełzania	298
15.9.4.	Rzeczywista wielkość pełzania	298
15.9.5.	Wskaźnik pełzania (ϕ_p)	298
15.10.	Właściwości fizyczne	300
15.10.1.	Porowatość	300
15.10.2.	Nasiąkliwość	306
15.10.3.	Wodoszczelność	307
15.10.4.	Mrozoodporność	308
15.10.5.	Przewodność cieplna	309
15.11.	Odporność na wpływ środowisk chemicznie agresywnych	309
15.11.1.	Typy korozji i ich objawy	310
15.11.2.	Postać środowiska agresywnego	310
15.11.3.	Opis rodzajów agresywności	310
15.11.4.	Ogólny opis środowiska agresywnego	312
15.11.5.	Klasy środowiska i stąd klasy ekspozycji	313
15.12.	Zestawienie czynników wpływających na właściwości betonu	315
16.	Istota badań technicznych betonu	319
16.1.	Badanie wytrzymałości na ściskanie na próbkach normowych	319
16.2.	Badania wytrzymałości na ściskanie betonu w elemencie lub w konstrukcji ..	320
16.3.	Badanie skurczu	321
16.4.	Badanie modułu sprężystości E	322

16.5.	Badanie pełzania	322
16.6.	Badania wodoszczelności	323
16.7.	Badanie nasiąkliwości	323
16.8.	Uwagi dodatkowe	323
17.	Wykonywanie betonu	325
17.1.	Przyjmowanie i magazynowanie składników	326
17.2.	Dozowanie składników	327
17.3.	Mieszanie składników	329
17.4.	Transport mieszanki betonowej	333
17.4.1.	Środki transportu bliskiego	333
17.4.2.	Środki transportu dalekiego	334
17.4.3.	Transport pompowy	335
17.4.4.	Transport metodą rynnową	338
17.5.	Układanie i zagęszczanie	338
17.5.1.	Sposób wprowadzania mieszanki do miejsca przeznaczenia	339
17.5.2.	Sposób układania mieszanki betonowej	340
17.5.3.	Metody rozprowadzania	343
17.5.4.	Zasady zagęszczania	344
17.5.5.	Dziobanie	346
17.5.6.	Ubijanie	346
17.5.7.	Wibrowanie	347
17.5.8.	Prasowanie	354
17.5.9.	Walcowanie	355
17.5.10.	Utrząsanie	355
17.5.11.	Wirowanie	356
17.5.12.	Próżniowanie	356
17.5.13.	Przerwy robocze przy betonowaniu	361
17.5.14.	Samozagęszczanie	362
17.6.	Pielęgnacja	363
17.6.1.	Wprowadzenie	363
17.6.2.	Wpływ oddziaływań mechanicznych	366
17.6.3.	Praktyczne sposoby postępowania	366
17.6.4.	Długość okresu pielęgnacji wilgotnej	367
17.7.	Natryskiwanie	368
17.7.1.	Systemy natryskiwania	369
17.7.2.	Właściwości betonu natryskowego	369
17.8.	Betonowanie pod wodą	371
17.8.1.	Metoda Contractor	371
17.8.2.	Metoda dwuetapowego betonowania	372
17.8.3.	Betonowanie pojemnikami	374
17.8.4.	Betonowanie w wąskich wykopach pod wodą	375
17.8.5.	Betonowanie przez wypełnienie zatopionej powłoki z tworzywa sztucznego (folii)	375
17.8.6.	Betonowanie z zastosowaniem bloków prefabrykowanych	375
17.8.7.	Szczególny tryb postępowania	375
17.9.	Sprawdzanie – ocena wykonywania i jakości betonu	375
17.9.1.	Sprawdzanie składników (cementu, kruszywa i wody)	376
17.9.2.	Sprawdzanie mieszanki betonowej	376
17.9.3.	Sprawdzanie klasy betonu	376
17.9.4.	Ocena poziomu wytwarzania mieszanki betonowej lub betonu stałego	377

17.10.	Problem deskowania a jakość uzyskanego betonu	377
17.11.	Betonowanie mieszanką samozagęszczalną	381
18.	Wykonywanie betonu w zakładzie prefabrykacji	383
18.1.	Charakterystyka postępowania	383
18.2.	Przyspieszone dojrzewanie betonu	384
18.2.1.	Ultrawibracja	385
18.2.2.	Obróbka cieplna	385
18.2.3.	Nagrzewanie w podwyższonej temperaturze	386
18.2.4.	Nagrzewanie w wysokiej temperaturze > 60°C	387
18.2.5.	Naparzanie	390
18.2.6.	Autoklawizacja	390
18.2.7.	Elektronagrzew	390
18.2.8.	Sposoby nagrzewania pośredniego	391
18.2.9.	Nagrzewanie energią promieni podczerwonych	392
18.2.10.	Sposoby zwiększania efektywności nagrzewania	392
18.2.11.	Sprawdzanie przebiegu nagrzewania	393
18.2.12.	Pielęgnacja	394
19.	Betonowanie w warunkach obniżonej temperatury	395
19.1.	Charakterystyka warunków	395
19.2.	Wpływ okresu chłódów na dojrzewanie betonu	396
19.3.	Wpływ okresu mrozów na dojrzewanie betonu	396
19.4.	Prowadzenie robót betonowych w zimie	398
19.4.1.	Podstawowe zasady wpływające na postępowanie	398
19.4.2.	Metody postępowania	398
19.4.3.	Metoda modyfikacji wykonywania mieszanki betonowej	398
19.4.4.	Metoda zachowania ciepła	402
19.4.5.	Metoda nagrzewania betonu	403
19.4.6.	Metoda ciepłaków	404
19.5.	Agregaty grzewcze	405
20.	Beton cementowy specjalny	407
20.1.	Beton hydrotechniczny	407
20.1.1.	Podział konstrukcji hydrotechnicznych mających wpływ na dobór składu betonu	409
20.1.2.	Jakość betonu hydrotechnicznego	409
20.1.3.	Skład mieszanek betonowych	410
20.1.4.	Techniki betonowania	410
20.2.	Beton wodoszczelny	411
20.3.	Beton przewidziany do pracy w środowisku chemicznie agresywnym	413
20.4.	Beton kwasoodporny	414
20.5.	Beton o podwyższonej odporności na ścieranie	414
20.6.	Betony z dodatkiem składnika włóknistego (fibrobetony)	415
20.7.	Beton cementowy do nawierzchni drogowych	417
20.8.	Beton cementowy do nawierzchni lotniskowych	420
20.9.	Beton ciężki jako beton ochronny przed promieniowaniem aktywnym	422
20.10.	Betony żaroodporne i ogniotrwałe	423
20.10.1.	Pojęcia	423
20.10.2.	Betony na cemencie portlandzkim	425
20.10.3.	Betony na cemencie glinowym	426
20.10.4.	Betony na szkle wodnym	426

20.11. Beton architektoniczny	427
20.12. Geobeton	430
20.13. Beton chudy	431
20.14. Beton polimerowo-cementowy	431
20.14.1. Podstawowe właściwości spoiwa polimerowego	431
20.14.2. Beton cementowy impregnowany polimerami	432
20.14.3. Beton polimerowo-cementowy	432
20.15. Beton samozagęszczony	434
20.16. Betony szczególne	435
21. Betony bezcementowe	437
21.1. Beton polimerowy	437
21.2. Beton żużlowo-alkaliczny	439
21.3. Beton bitumiczny	439
21.4. Gipsobeton	441
21.5. Beton sylikatowy	441
21.6. Inne przypadki	442
22. Beton lekki	443
22.1. Klasyfikacja	443
22.2. Kruszywo do betonów lekkich	445
22.2.1. Kruszywa sztuczne	445
22.2.2. Charakterystyka struktury ziaren	446
22.2.3. Zasada produkcji kruszyw ziarnowych	447
22.2.4. Właściwości fizyczne kruszyw sztucznych	448
22.2.5. Wymagania techniczne dla kruszyw sztucznych	449
22.3. Kruszywa skalne do betonów lekkich	451
22.4. Mikrokruszywa zwane inaczej mikrowypełniaczami	451
22.5. Kruszywa organiczne	451
22.6. Beton lekki kruszywowy	452
22.6.1. Składniki betonów	452
22.6.2. Dobór składu betonu zwartego	452
22.6.3. Dobór składu betonu półzwartego	457
22.6.4. Dobór składu betonu jamistego	457
22.6.5. Technologia wykonywania	458
22.6.6. Właściwości betonów kruszywowych	458
22.6.7. Możliwość przewidywania wytrzymałości lekkiego betonu kruszywowego klas do LC16/18	460
22.6.8. Badania	461
22.7. Betony komórkowe (mikrokruszywowe)	462
22.7.1. Istota betonu mikrokruszywowego	462
22.7.2. Rodzaje betonów	462
22.7.3. Właściwości fizykomechaniczne	463
22.7.4. Zastosowanie	464
22.8. Betony na kruszywie organicznym	464
22.8.1. Rodzaje i właściwości	464
22.8.2. Problemy wykonawcze	465
22.9. Szczególne typy betonu lekkiego	466
23. Zasady napraw betonu w konstrukcji	469
23.1. Ogólna charakterystyka	469
23.2. Zasady naprawy chłodni kominowych	472

24. Uzupełnienia	477
24.1. Specyfikacja składu betonu	477
24.1.1. Podstawowe wymagania dotyczące składu betonu	477
24.1.2. Uwagi do projektowania betonu z uwzględnieniem jego trwałości	479
24.1.3. Dobór podstawowych składników	480
24.2. Klasy ekspozycji betonu związane z oddziaływaniem środowiska	481
24.2.1. Wymagania wynikające z klas ekspozycji	485
24.2.2. Spełnienie wymagań	485
24.3. Kontrola produkcji betonu	486
24.4. Stosowanie dodatków	487
24.4.1. Postanowienia ogólne	487
24.4.2. Współczynnik k dodatków typu II	487
24.4.3. Pojęcie równoważnych właściwości użytkowych betonu	488
24.5. Stosowanie domieszek	489
24.6. Dostawa mieszanki betonowej	489
24.7. Kontrola zgodności i kryteria zgodności	490
25. Aktualne kierunki rozwoju technologii betonu	493
26. Załączniki	494
I. Literatura	494
II. Wykaz tablic	496
III. Ważniejsze daty dotyczące historii rozwoju betonu	499
IV. Zestawienie ciekawszych informacji na temat szkół zajmujących się nauką o betonie	500
V. Etapy rozwoju betonu w ujęciu autora książki	501
VI. 10 podstawowych stwierdzeń o betonie według autora książki	502
VII. Określenia	502
Od autora – zamiast posłowania	507

Przedmowa

*Nigdy konstrukcja betonowa nie jest lepsza,
niż zastosowany do niej beton!*

W niniejszym opracowaniu omówiono podstawowe zagadnienia związane z betonem; jest ono przeznaczone przede wszystkim dla studentów budownictwa lądowego, dlatego zawiera wiele uwag o charakterze praktycznym i ma ograniczoną część poświęconą zagadnieniom teoretycznym. Dzięki takiemu charakterowi opracowanie będzie przydatne również dla słuchaczy kursów podyplomowych i dokształcających, a także dla inżynierów oraz techników, którzy mają bliższy praktyczny kontakt z zagadnieniami betonu.

W pracy uwzględniono najważniejsze osiągnięcia w zakresie technologii betonu i obowiązujące przepisy normowe. W rozdziale 25 omówiono aktualne kierunki badań perspektywicznego rozwoju betonu.

Studentom, którzy będą studiować technologię betonu, zwraca się uwagę, że w celu szybszego i właściwego przyswojenia sobie wiadomości należy:

- najpierw przeczytać rozdziały od 1 do 7 i od 13 do 17;
- następnie studiować rozdziałami, analizując wykresy i tablice wraz z rozważaniem skutków przy wnoszeniu do nich zmiennych parametrów;
- samodzielnie sporządzić skrót poszczególnych partii przestudiowanego materiału (rodzaj konspektu, ściągawki!);
- w przypadku fragmentów szczególnie interesujących poszerzyć wiadomości, korzystając ze wskazanej literatury;
- konfrontować przy każdej okazji podane informacje z obserwacjami w praktyce i analizować zgodność oraz dostrzeżone niezgodności;
- posługiwać się normami przy studiowaniu.

Odpowiednio do kierunku studiów wykładowca poda, które rozdziały można poznać pobieżnie lub pominąć przy studiowaniu.

Dla ułatwienia samodzielnego sprawdzania opanowania wiadomości na końcach rozdziałów umieszczono po kilka charakterystycznych pytań.

Forma przedstawienia treści została oparta na kilkudziesięcioletnim własnym doświadczeniu dydaktycznym Autora z uwzględnieniem kanonów sformułowanych w opracowaniu [Biuletyn dydaktyczny AGH – 99], zgodnie z którymi podręcznik akademicki musi:

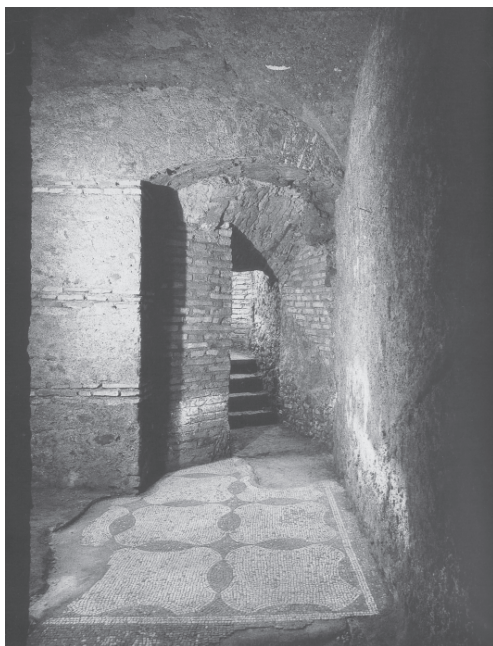
- umożliwiać samodzielne studiowanie;
- zawierać wiadomości kompletne, aktualne i najnowsze;
- być maksymalnie przystępny;
- eksponować problemy, których zrozumienia wymaga się od studenta podczas egzaminu;
- wymuszać kojarzenie zagadnień i twórcze myślenie.

Byłoby wspaniale, gdyby wykładowcy zechcieli przyjąć zawartą w podręczniku treść jako podstawę egzaminu.

Przedmowa do wydania trzeciego

W niniejszym wydaniu podręcznika uwzględniono najnowszą normę PN-EN 206-1, obowiązującą w Unii Europejskiej. W związku z tym uległa zmianie zawartość materiału przedstawionego w książce. Wprowadzono *Symbole i skróty* oparte na ww. Normie i dodano nowy rozdział *Uzupełnienia*, w którym omówiono – pod kątem nowej normy – specyfikacje składu betonu, klasy ekspozycji betonu związane z oddziaływaniem środowiska, kontrolę produkcji betonu, stosowanie dodatków, stosowanie domieszek, dostawę mieszanki betonowej oraz kontrole zgodności i kryteria zgodności. Podano również wykaz tablic, a na końcu podręcznika umieszczono określenia najważniejszych terminów.

Najstarsze przykłady architektonicznego
zastosowania konstrukcji z betonu
(starożytny Rzym)



Symbole i skróty

X0	– klasa ekspozycji betonu przy braku zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją
XC	– klasy ekspozycji betonu z uwagi na zagrożenie korozją wywołaną karbonatyzacją
XD...	– klasy ekspozycji betonu z uwagi na zagrożenie korozją wywołaną chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej
XS...	– klasy ekspozycji betonu z uwagi na zagrożenie korozją wywołaną chlorkami z wody morskiej
XF...	– klasy ekspozycji betonu z uwagi na oddziaływanie przemiennego zamrażania i rozmrażania
XA...	– klasy ekspozycji betonu z uwagi na agresję chemiczną
S1 do S5	– klasy konsystencji według metody opadu stożka
V0 do V4	– klasy konsystencji według metody Vebe
C0 do C3	– klasy konsystencji według metody stopnia zagęszczalności
F1 do F6	– klasy konsystencji według metody stolika rozplwowego
C.../...	– klasy wytrzymałości na ściskanie w przypadku betonu zwykłego i betonu ciężkiego
LC.../...	– klasy wytrzymałości na ściskanie w przypadku betonu lekkiego
$f_{ck,cyl}$	– wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie oznaczana na próbkach walcowych
$f_{c,cyl}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczana na próbkach walcowych
$f_{ck,cube}$	– wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie oznaczana na próbkach sześciennych
$f_{c,cube}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczana na próbkach sześciennych
f_{cm}	– średnia wytrzymałość betonu na ściskanie
$f_{cm,j}$	– średnia wytrzymałość betonu na ściskanie w wieku (j) dni
f_{ci}	– pojedynczy wynik badania wytrzymałości betonu na ściskanie
f_{tk}	– wytrzymałość charakterystyczna betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu
f_{tm}	– średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu
f_{ti}	– pojedynczy wynik badania wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu
σ	– określenie odchylenia standardowego populacji
s_n	– odchylenie standardowe n kolejnych wyników badania
w/c	– współczynnik woda/cement
k	– współczynnik uwzględniający aktywność dodatku typu II
e	– działka elementarna sprzętu ważącego
m	– obciążenie działające na sprzęt ważący
n	– liczność

- P_p – punkt pyłowy – zawartość kruszywa frakcji 0–0,05 mm w kruszywie 0–2 mm
 PP – punkt piaskowy – zawartość kruszywa frakcji 0–2 mm w całości kruszywa
 $c, k, w, p, \dot{z}$ – objętości absolutne składników mieszanki betonowej
 ρ_w – gęstość (gęstość właściwa)
 ρ_o – gęstość objętościowa (pozorna)
 $\rho_{mb}, \rho_b, \rho_s, \rho_k, \rho_p, \rho_z, \rho_g$ – gęstość objętościowa mieszanki betonowej, betonu stwardnia-
 łego, skały, ziaren kruszywa, ziaren piasku, ziaren żwiru, ziaren kruszywa
 grubego
 ρ_n – gęstość nasypowa, [kg/dm³]
 d – wymiar boku otworu sita, [mm]
 $f_{1, 2, \dots i}$ – oznaczenie frakcji kruszywa
 A, A_1, A_2 – współczynniki wpływu cementu i kruszywa na wytrzymałość betonu.

Uwaga: pozostałe oznaczenia objaśnione są w tekście lub przy rysunkach.

1. Wprowadzenie

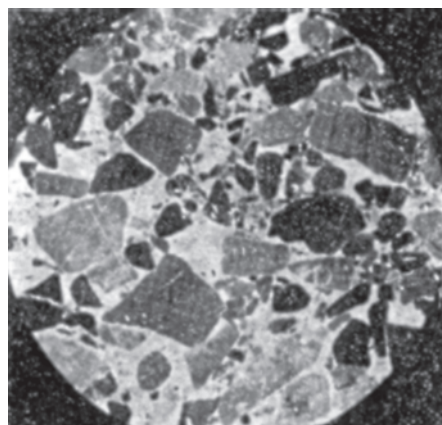
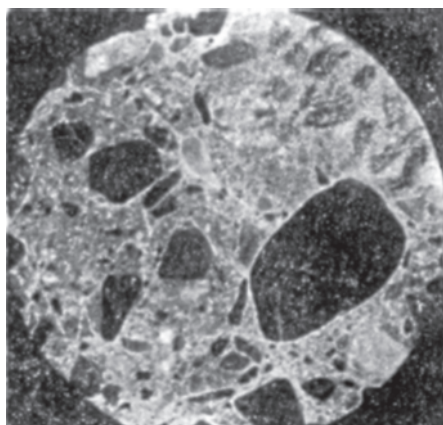
*Tryumfy tryumfami,
ale ileż klęski,
ciosów chybionych
i prób podejmowanych od nowa.*

Już człowiek epoki kamiennej wpadł na pomysł łączenia okruchów skalnych spoiwem, uzyskując materiał, który nazywamy betonem.

E. Freyssi, jeden z najbardziej zasłużonych propagatorów upowszechnienia stosowania betonu, wyraził myśl o dążeniu do uzyskiwania sztucznej skały (betonu) z taką łatwością, z jaką kruszy się naturalne skały. Chodziło mu o uzyskiwanie betonu o wytrzymałości równej kruszonej skale.

Dziś pojęcie betonu jest znacznie szersze, gdyż można go uzyskiwać nie tylko z okruchów skalnych, zaś zamiast cementu używać wielu innych spoiw i wzbogacać różnego typu dodatkami. Bardzo ogólnie można by więc zdefiniować beton jako materiał budowlany uzyskany z połączenia drobnoziarnistego wypełniacza spoiwem. Tak uzyskiwany materiał nosi nazwę materiału kompozytowego, w którym zaczyn spełnia rolę matrycy, a kruszywo inkluzji.

W zależności od cech kruszywa, spoiwa oraz dodatków można uzyskiwać betony o bardzo zróżnicowanych właściwościach. Trzeba silnie podkreślić, że do wykonania obiektów inżynierskich eksploatowanych w naturalnych warunkach atmosferycznych, takich jak np. hale przemysłowe, szkielety wielopiętrowych budynków, mosty, zbiorniki na materiały sypkie itp. stosuje się obecnie z reguły beton nazwany betonem zwykłym.



1.1. Przekrój betonu zwykłego

Beton zwykły jest to beton wykonany z kruszywa mineralnego skalnego spojonego cementem, przy zachowaniu warunków, że jego gęstość pozorną (ρ_o) wynosi co najmniej 2000 kg/m^3 , a ziarna kruszywa sięgają powyżej 8 mm (rys. 1.1). Betonowi temu poświęcona jest norma PN-EN 206-1. Główną wymaganą i sprawdzaną cechą

betonu zwykłego jest tylko wytrzymałość na ściskanie. Temu właśnie betonowi poświęcone są w niniejszym opracowaniu rozdziały do 19 włącznie. Zgodnie z przyjętym zwyczajem stosowano tylko krótką nazwę „beton”, jeśli nie zachodziła potrzeba odróżnienia go od innych jego rodzajów. Wykaz norm związanych z betonem podano w tablicy 24.5.

W przypadku wymaganych od betonu dodatkowych (oprócz wytrzymałości na ściskanie) specjalnych właściwości, jak np. wodoszczelności (zbiorniki na wodę), mrozoodporności (budowle hydrotechniczne), żaroodporności (obudowy pieców) itp., betony takie określa się jako betony specjalne i omówiono je w rozdziale 20.

Betony o gęstości objętościowej poniżej 2000 kg/m^3 ocenia się nie tylko według ich wytrzymałości na ściskanie, ale także według gęstości objętościowej i właściwości termicznych. Noszą one nazwę „betony lekkie” i opisane zostały w rozdziale 22. Należą one do grupy betonów specjalnych.

Beton niemal we wszystkich swoich odmianach jest jedynym stosowanym na ogromną skalę materiałem, z którego budowniczowie nie tylko sami projektują i wznoszą obiekty, ale także sami sobie ten materiał wykonują, zatem w nauce o betonie chodzi o to, żeby:

- 1) zapoznać się z zakresem możliwości uzyskiwania poszczególnych właściwości betonu,
- 2) nauczyć się projektowania składu mieszanki betonowej,
- 3) poznać sztukę wykonywania betonu,
- 4) nauczyć się kontrolowania i badania właściwości betonu.

W miarę zdobywania coraz nowszych doświadczeń, technologia betonu oparta niegdyś na eksperymentowaniu, przekształciła się obecnie w naukę sięgającą do różnych dziedzin wiedzy, takich jak np.:

- chemia – zagadnienie składu cementu (proces wiązania, odporności na czynniki chemicznie agresywne), domieszki modyfikujące własności betonów;
- fizyka – problem systemów zagęszczania, regulowanie przepuszczalności płynów i dyfuzji gazów;
- petrografia – dobór kruszyw w zależności od żądanych właściwości betonów;
- termodynamika – zagadnienie warunków dojrzewania, zjawiska skurczu i pęcznienia;
- mechanika ciała stałego – zależność pomiędzy strukturą wewnętrzną a cechami mechanicznymi betonu;
- reologia – urabialność, ciekłość, lepkość, spójność i tiksotropia mieszanki betonowej; pełzanie betonu.

Wykorzystywanie nauk ścisłych pozwala na dalsze rozwijanie technologii betonu i tłumaczenie wielu zjawisk. Ujmowanie ich w ściślejsze reguły i wzory w postaci matematycznej, umożliwia optymalizowanie właściwości betonu metodami komputerowymi.

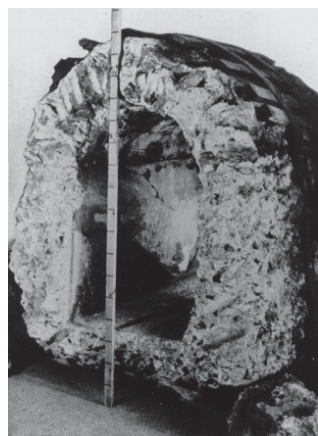
1.1. Rys historyczny rozwoju betonu

Materiał, który można by uznać za beton (okruchy skalne połączone spoiwem mineralnym), stosowano już w VI w. p.n.e. – rys. 1.2. Zapiski historyczne oraz zachowane obiekty lub ich relikty świadczą o tym, że choć rzadko, to jednak beton był stosowany i w późniejszym okresie rozwoju cywilizacji (kopuła Panteonu w Rzymie, Wielki Mur Chiński, wodociągi) – rys. 1.3. Spoiwem było z reguły wapno hydrauliczne z dodatkiem natu-

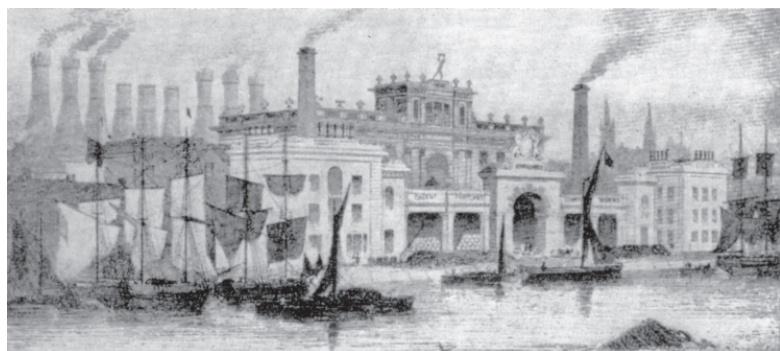
ralnych materiałów współwiążących, (pucolany) lub sztucznych (sproszkowanej ceramiki). Z czasów rzymskich pochodzą nazwy cement (caementum) i beton (bitumen).



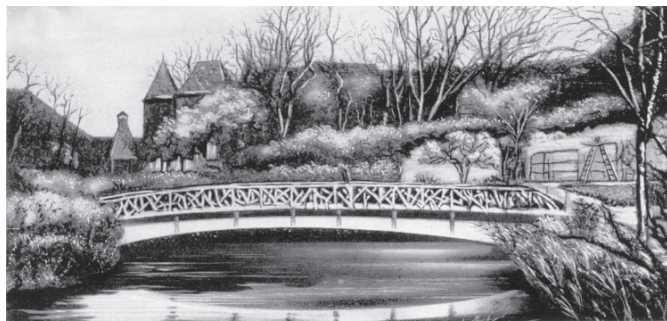
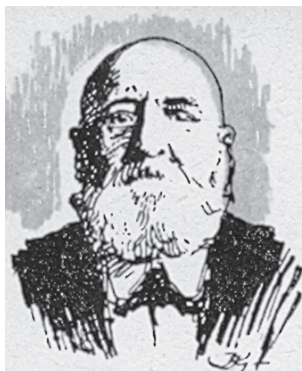
1.2. Beton sprzed około 7600 lat



1.3. Relikt średniowieczny konstrukcji z betonu



1.4. Joseph Aspdin (1779–1855), jego patent (1824) i cementownia (1825)



1.5. Joseph Monier (1823–1906) i jego, pierwszy na świecie most żelbetonowy (16 m); poniżej J. Monier z donicą

Dynamiczne wykorzystanie betonu nastąpiło jednak dopiero w wieku XIX, od momentu opracowania przez Aspdina w roku 1824 technologii sztucznego spoiwa, które nazwał cementem portlandzkim. Wkrótce, bo już rok później, w 1825, zbudowano w Anglii pierwszą cementownię – rys. 1.4. W roku 1867 Francuz Monier – rys. 1.5 wpadł na pomysł zbrojenia betonu. Jednocześnie nastąpił dynamiczny rozwój teorii żelbetnictwa oraz technologii betonu, w czym mają zasługi uczeni wielu krajów. Proces ten trwa w dalszym ciągu. Ważniejsze daty podano na końcu podręcznika.

Warto podkreślić, że pierwsza cementownia w Polsce (jako piąta na świecie) powstała w roku 1857 w Grodźcu k. Będzina. Dziś wznosi się cementownie o istotnie zmienionej konstrukcji, dostosowanej do nowych technologii – rys. 1.6.



1.6. Widok nowoczesnej cementowni

1.2. Ważniejsze określenia

Dla ułatwienia studiowania poniżej podano kilka zasadniczych określeń, którymi należy się posługiwać, choć ich znaczenie w pełni ujawni się dopiero w miarę zgłębiania materii niniejszego przedmiotu (patrz też *Określenia* na s. 503).

Cement – spoiwo hydrauliczne z drobno zmielonego materiału nieorganicznego, który po zmieszaniu z wodą wiąże i po stwardnieniu pozostaje trwały także pod wodą.

Kruszywo – materiał okruszowy nadający się do wykonania betonu.

Mieszanka betonowa – mieszanina wszystkich składników użytych do wykonania betonu przed i po jego zagęszczeniu, lecz przed rozpoczęciem twardnienia.

Beton – mieszanka betonowa od momentu rozpoczęcia twardnienia.

Zaprawa – mieszanina cementu i wody oraz wszystkich składników, które przechodzą w całości przez sito o oczkach 2 mm, występująca w mieszance betonowej i po jej stwardnieniu w betonie.

Zaczyn cementowy – mieszanina cementu i wody występująca w mieszance betonowej i po jej stwardnieniu w betonie (stwardniały zaczyn cementowy nazywa się też często kamieniem cementowym).

Urabialność – zespół cech określających właściwości mieszanki betonowej, od których zależy łatwość wypełniania formy i zdolność zachowania kształtu po zagęszczeniu i rozformowaniu.

Konsystencja – stopień płynności mieszanki betonowej, charakteryzującej w pewnym stopniu urabialność tej mieszanki.

Frakcja kruszywa – zespół ziaren o wymiarach zawartych pomiędzy dwiema normowo ograniczającymi wielkościami ich średnic.

1.3. Postępowanie w robotach betonowych

W celu wykonania konstrukcji z betonu zwykłego najpierw ustala się wymagania techniczne, jakie powinien spełniać beton. W większości przypadków wymagania te ograniczają się tylko do odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie o możliwie najwyższej jednorodności w całym wykonywanym elemencie.

Aby ułożyć mieszankę betonową w deskowaniu danego elementu, musi ona mieć odpowiednią konsystencję, czyli płynność i zdolność dokładnego wypełniania formy. Przy elementach cienkich i gęsto zbrojonych mieszanka musi być bardziej płynna niż np. przy betonowaniu dużego bloku fundamentu pod maszynę. W rzeczywistości mieszanka nigdy nie wypełnia formy pod własnym ciężarem; zawsze trzeba ją rozprowadzić i zagęścić, używa się do tego różnego sprzętu w zależności od konsystencji i typu betonowanego elementu. Ostatnio pojawił się nowy typ mieszanek – samorozlewnych (pkt 13).

Duży wpływ na proces wiązania ma temperatura otoczenia. Należy więc odpowiednio pielęgnować beton, aby zapewnić mu właściwe wilgotnościowo-temperaturowe warunki dojrzewania. Mała wilgotność względna powietrza powoduje, że z ułożonej mieszanki może szybko wyparować tyle wody, że uniemożliwi to prawidłowy przebieg wiązania cementu, co jest niezbędne dla twardnienia betonu.

Odpowiednio do ustalonych własności zarówno betonu (wytrzymałość na ściskanie), jak i mieszanki betonowej (konsystencja), dobiera się składniki betonu, tj. typ kruszywa i rodzaj cementu oraz dostatecznie czystą wodę. Wymienione składniki muszą spełniać

szereg właściwości, aby mogły zapewnić uzyskiwanie założonych cech mieszanki betonowej i betonu. Właściwości te sprawdza się wg zaleceń normowych, a w przypadku kruszywa z reguły nawet komponuje się odpowiedni zestaw ziarnowy (skład granulometryczny). Ze składników uznanych za nadające się do wykonania pożądanego betonu projektuje się skład mieszanki, czyli ustala odpowiednie proporcje tych składników, które podaje się w kg/m^3 mieszanki (specyfikacja składu).

W przypadku produkcji elementów betonowych w fabrykach dochodzi nowy problem, a mianowicie przyspieszenie twardnienia betonu. Znanych jest i tu wiele sposobów, wymagających wyboru rozwiązania optymalnego w danych warunkach. Szczególnego postępowania wymaga betonowanie w okresach obniżonej temperatury. Dla ułatwienia uzyskaniażądanego efektu, dopuszcza się stosowanie specjalnych domieszek lub dodatkowych składników. W miarę intensyfikacji wykorzystywania betonu w budownictwie mieszkaniowym, przemysłowym i hydrotechnicznym, liczba cech technicznych, jakie musi wykazywać mieszanka betonowa i z kolei beton, ogromnie rośnie. Wobec powyższego staje się jasne, dlaczego trzeba mieć do dyspozycji wiele rodzajów spoiw, kruszyw, specjalnych domieszek i dodatków modyfikujących właściwości betonów, a także różnych sposobów zagęszczania oraz pielęgnacji.

Technolog betonu musi je tak dobrać, aby uzyskać nie tylko właściwy beton, ale zapewnić ponadto korzystne rozwiązania pod względem ekonomicznym. Z reguły polega ono na tym, aby zużyć możliwie jak najmniej cementu. Cement jest składnikiem najdroższym, a ponadto zbyt duża jego ilość obniża niektóre ważne właściwości betonu.

1.4. Zasadniczy podział betonów

Stosowane w praktyce betony dadzą się podzielić na pewne grupy. Podziału można dokonać z różnego punktu widzenia. Przyjmuje się następujące zasadnicze podziały:

1.4.1. Podział ze względu na gęstość objętościową (ρ_o)

- Beton ciężki – $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$
- Beton zwykły – $\rho \geq 2000 \text{ kg/m}^3$
- Beton lekki – $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$

1.4.2. Podział ze względu na przeznaczenie w konstrukcji

- Beton konstrukcyjny – to beton, z którego wykonane elementy mogą przejmować obciążenia zewnętrzne od innych elementów. Wytrzymałość na ściskanie takiego betonu powinna odpowiadać klasie $\geq \text{C16/20}$. Do tej grupy należy beton zwykły.

- Beton konstrukcyjno-izolacyjny – charakteryzuje się tym, że może przejmować pewne obciążenia, ale jednocześnie posiada podwyższone walory izolacji termicznej. Wytrzymałość na ściskanie waha się w granicach od 4 do 10 MPa.

- Beton izolacyjny – służy w zasadzie do wykonywania wyłącznie elementów, które przenoszą co najwyżej tylko własny ciężar, ale muszą spełniać odpowiednie wymagania izolacji termicznej. Wytrzymałość na ściskanie takiego betonu nie przekracza 6 MPa.

- Beton architektoniczny – charakterystyczny wyglądem strony zewnętrznej (licowej).

1.4.3. Podział ze względu na technologiczne warunki pracy

- Beton hydrotechniczny
- Beton żaroodporny
- Beton wodoszczelny

Wymienione betony noszą ogólną nazwę betonów specjalnych i stosowane są do konstrukcji eksploatowanych w szczególnych warunkach (o innych zob. rozdz. 20, 21, 22).

1.4.4. Podział ze względu na miejsce urabiania mieszanki

- Beton wykonany na placu budowy – oznacza, że został uzyskany z mieszanki wykonanej na placu budowy (nigdy przez przedsiębiorstwo wnoszące dany obiekt).
- Beton towarowy – to beton wykonany z mieszanki przygotowanej poza placem budowy w specjalnej wytwórni, przez przedsiębiorstwo specjalizujące się w produkcji mieszanek betonowych.

1.4.5. Nazwy betonów

Poszczególne wymienione wyżej betony mogą należeć równocześnie do różnych grup i tak np. ten sam beton może być towarowy, konstrukcyjny, zwykły itp. Dlatego też w rzeczywistości podaje się tylko nazwę o najistotniejszym znaczeniu dla danego betonu.

Oprócz nazwy betonu wynikającej z przynależności do danej grupy przeznaczenia, stosuje się też nazwy charakteryzujące beton, na przykład ze względu na:

- rodzaj użytego kruszywa (beton żwirowy, żuźlowy itd.),
- rodzaj domieszki (beton plastyfikowany, napowietrzony, itd.),
- główną cechę technologiczną (beton odporny na ścieranie, mrozoodporny itd.),
- sposób zagęszczania (beton wibrowany, odpowietrzony, samozagęszczony itd.),
- sposób transportu (beton pompowy, natryskiwany itd.),
- budowę struktury (zwarty, półzwarty, porowaty itd.).

Pytanie kontrolne:

1. Do której grupy można zaliczyć beton pokazany na rys. 1.7?



Rys. 1.7.

2. Spoiwo

*Całość stoi na swoim miejscu.
Szczegóły poruszają się po wyznaczonych torach.*

2.1. Pojęcie spoiwa

Przez spoiwo w betonie rozumie się ten składnik, który w wyniku przemian fizycznych, chemicznych bądź fizykochemicznych twardnieje, łącząc się w monolityczną całość z rozdrobnionym składnikiem stałym.

2.2. Rodzaje spoiw

W zależności od rodzaju betonu dobiera się spoiwo spośród wymienionych poniżej grup:

a. spoiwa mineralne:

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• powietrzne<ul style="list-style-type: none">– wapno palone– wapno gaszone– magnezjowe– gips– anhydryt | i | <ul style="list-style-type: none">• hydrauliczne<ul style="list-style-type: none">– cement– wapno hydrauliczne– żużel wielkopiecowy– spoiwo cementopopiołowe– spoiwo popiołowo-wapienno-gipsowe– spoiwo żużlowo-wapienno-gipsowe– spoiwo żużlowo-siarczanowe– spoiwo żużlowo-alkaliczne |
|---|---|--|

b. spoiwa organiczne:

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• żywiczne<ul style="list-style-type: none">– polikondensacyjne– poliaddycyjne– polimeryzacyjne | i | <ul style="list-style-type: none">• bitumiczne<ul style="list-style-type: none">– asfalt– bitum– smoła |
|---|---|--|

2.2.1. Spoiwa powietrzne

Są to spoiwa, które wiążą tylko w powietrzu. Wykonane z nich betony są wrażliwe na wilgoć bądź całkowicie nieodporne na wodę przy stałym zetknięciu. Wykorzystywane są w zasadzie tylko do produkcji niektórych betonów lekkich, np. komórkowych (pkt 22.7).

2.2.2. Spoiwa hydrauliczne

Są to spoiwa, które mogą wiązać w powietrzu i pod wodą. Wykonane z nich betony są odporne na działanie wody, a nawet woda powoduje stały wzrost ich wytrzymałości. Dotyczy to wody nieagresywnej w stosunku do betonu. Podstawowym spoiwem tej grupy jest cement. Do betonów zwykłych (pkt 1.4) stosuje się jako spoiwo wyłącznie cement.

2.2.3. Spoiwa żywiczne

Podział ich wynika z różnicy sposobu tężenia. Najbardziej przydatne są żywice epoksydowe, poliestrowe, akrylowe oraz furanowe i fenolowe. Przy doborze żywicy trzeba zwrócić uwagę na wymagane warunki dojrzewania, które mogą różnić się temperaturą, wilgotnością kruszywa i otoczenia, tworzenia kompozycji spoiwa (żywica plus domieszki).

2.2.4. Spoiwa bitumiczne

Tężenie ich polega na przemianie fizycznej w wyniku krzepnięcia lub odparowania rozpuszczalnika. Spoiwa te określa się często pojęciem lepiszcza, gdyż ich proces tężenia bardziej przypomina zwykłe sklejanie niż chemiczny proces wiązania.

2.3. Dodatki do cementu

Dodatki to surowce drobnoziarniste dodawane w ilości 5-35% masy cementu podczas urabiania mieszanki betonowej. Zadaniem dodatków jest modyfikacja właściwości cementu portlandzkiego w celu dostosowania go do wymagań przemysłu, utylizacji odpadów z różnych dziedzin produkcji i obniżenia kosztów produkcji betonu.

W zależności od potrzeb odpowiednio do sytuacji można korzystać z następujących dodatków:

- biernych chemicznie (mączki kamienne) – typ I,
- hydraulicznych (granulowane żużle wielkopiecowe) – typ II,
- pucolanowych (popioły lotne, pyły krzemionkowe, naturalne pucolany) – typ III.

Dodatki biernie zwiększają objętość zaczynu, co poprawia urabialność mieszanki betonowej. Najlepsze są mączki skał wapiennych, gdyż wykazują pewien stopień korzystnego wiązania z cementem, dającego wyższą szczelność zaczynu stwardniałego.

Dodatki hydrauliczne cechują się większą zawartością wapna niż pucolanowe i stąd ich charakter wiązania jest analogiczny do cementu, choć nieco wolniejszy. Ma to istotne znaczenie w procesie tworzenia się struktury stwardniałego zaczynu cementowego.

Dodatki pucolanowe zawierają głównie krzemionkę (SiO_2). Krzemionka wiąże z tworzącym się – słabym wytrzymałościowo – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (wodorotlenkiem wapniowym) w hydratyzującym cemencie zwiększając ilość żelu (CSH), decydującym o pozytywnych właściwościach produktu (pkt 3.5). Jeśli wymienione surowce dozowane są dopiero przy urabianiu mieszanki betonowej, to mogą one być traktowane jako zamiennik pewnej ilości cementu, jako dodatek do cementu lub jako uzupełnienie najdrobniejszych ziaren kruszywa. Jeśli dodawane są jako surowce podczas produkcji cementu, to wyprodukowane cementy uzyskują specjalne nazwy i symbole, a mianowicie:

- CEM I – cement portlandzki, zawierający tylko jeden składnik główny – klinkier w ilości co najmniej 95%.

- CEM II – cement portlandzki mieszany, zawierający dwa lub trzy składniki główne w ilości co najmniej 65% klinkieru, a pozostałych co najmniej 6%. W zależności od rodzaju i liczby składników posiadają one różne nazwy i symbole, podane w tablicy 2.1. Posłużono się symbolami literowymi. A i B dotyczą ilości, a litery K, S, D, P, Q, V, W i L rodzaju składników głównych.

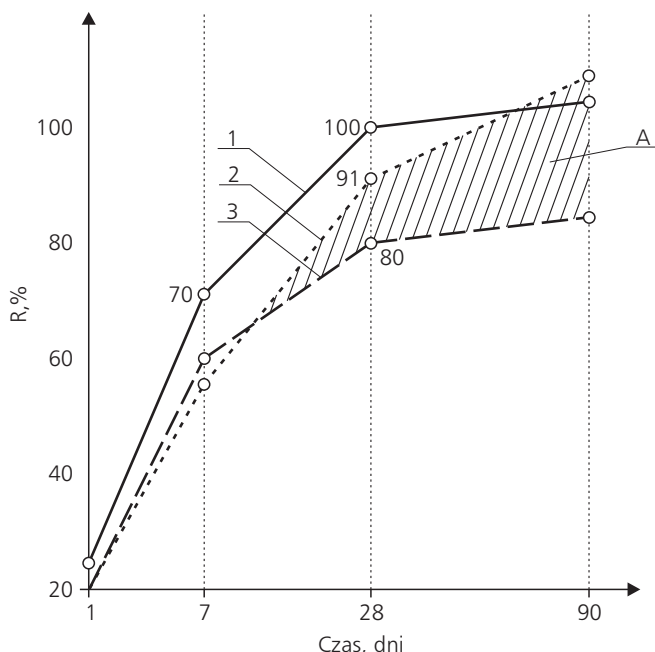
- CEM III – cement hutniczy, zawierający od 36 do 80% żużla.

Tablica 2.1. Cementy powszechnego użytku

Rodzaj	Nazwa	Symbol	Składniki główne [% masy]								Składniki drugorzędne, [%]	
			klinkier	żużel wielkopiecowy	pył krzemionkowy	pucolana		popiół lotny		wapień		
						naturalna	przemysłowa	krzemionkowy	wapienny			
CEM I	cement portlandzki	CEM I	K	S	D	P	Q	V	W	L		
	cement portlandzki żużłowy		95–100	–	–	–	–	–	–	–	0–5	
			80–94	6–20	–	–	–	–	–	–	0–5	
			65–79	21–35	–	–	–	–	–	–	0–5	
CEM II	cement portlandzki krzemionkowy	CEM II/A-D		–	6–10	–	–	–	–	–	0–5	
	cement portlandzki pucolanowy	CEM II/A-P		80–94	–	–	6–20	–	–	–	0–5	
		CEM II/B-P		65–79	–	–	21–35	–	–	–	0–5	
		CEM II/A-Q		80–94	–	–	–	6–20	–	–	0–5	
		CEM II/B-Q		65–79	–	–	–	21–35	–	–	0–5	
	cement portlandzki popiołowy	CEM II/A-V		80–94	–	–	–	–	6–20	–	0–5	
		CEM II/B-V		65–79	–	–	–	–	21–35	–	0–5	
		CEM II/A-W		80–94	–	–	–	–	–	6–20	0–5	
		CEM II/B-W		65–79	–	–	–	–	–	21–35	0–5	
	cement portlandzki wapienny	CEM II/A-L		80–94	–	–	–	–	–	–	0–5	
CEM II/B-L			65–79	–	–	–	–	–	–	0–5		
cement portlandzki żużlowo-popiołowy		CEM II/A-SV		81–94	3–10	–	–	–	–	–	0–5	
		CEM II/B-SV		65–79	10–20	–	–	–	–	–	0–5	
CEM III	cement hutniczy	CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–	–	–	–	0–5	
		CEM III/B	20–34	66–80	–	–	–	–	–	–	0,5	
CEM IV	cement pucolanowy	CEM IV/A		–		← 11–35 →			–	–	0–5	
		CEM IV/B		45–64	–		← 36–55 →			–	–	0–5
CEM V	wieloskładnikowy	CEM V/A		–			← 36–60 →			–	–	0–5
		CEM V/B		20–38	–			← 20–38 →			–	–

- CEM IV – cement pucolanowy, zawierający od 11 do 55% pucolany.
- CEM V – cement wieloskładnikowy (od 20 do 60%).

Cementy II, III, IV i V są tańsze od I, ponieważ do ich produkcji zużywa się mniej energii, nawet o 50%. Odpowiednio wykorzystane dają wybitnie lepsze efekty techniczne wyprodukowanego z nich betonu. Dlatego zwiększa się ich produkcję w świecie. Największe uznanie zyskują sobie cementy CEM III – hutnicze.



2.1. Ocena aktywności dodatku do cementu

1 – beton tylko z cementem, 2–20% m.c. zamieniono na dodatek obojętny, 3–20% m.c. zamieniono na dodatek hydrauliczny, A – wpływ oddziaływania dodatku hydraulicznego

Dodatki dozowane bezpośrednio do betoniarki są tym korzystniejsze, im cechują się wyższym stopniem aktywności chemicznej, a mniejszym stopniem wodożądności. Na rys. 2.1 pokazano przykładowo sposób oceny aktywności dodatku. Wyższa aktywność związana jest również z wyższą miałkością i jednorodnością surowca. Wodożądność muszą zawsze wykazywać niższą niż cement. Pozwala to na stosowanie mniejszej ilości wody zarobowej w betonie, co jest dla betonu bardzo korzystne (pkt 7).

W Polsce mamy do dyspozycji wszystkie wyżej wymienione surowce, powstają one jako odpady w przemyśle. Występują przy tym w tak wielkich ilościach, że potrzeba ich zagospodarowania jest poważnym problemem gospodarki (utylicacja odpadów). Stąd też wykorzystywanie tych materiałów jako składników betonu bądź bezpośrednio spoiw jest coraz powszechniejsze.

Żużle wielkopiecowe

Spotyka się wiele rodzajów żużli wielkopiecowych. Poniżej zestawiono sposób wykorzystywania ich w betoniarstwie w zależności od właściwości:

Żużel wielkopiecowy hutniczy			
kwaśny CaO < 40; SiO ₂ > 40%		słabo zasadowy CaO = 41 do 44%; SiO ₂ = 35 do 40%	
granulowany	temperowany	granulowany	temperowany
jako kruszywo do betonów lekkich	jako kruszywo do betonów zwykłych	jako surowiec lub dodatek do cementu	nie nadaje się do wykorzystania

Żużel temperowany – uzyskuje się przez powolne, często samoczynne chłodzenie. Traci wówczas właściwości wiążące.

Żużel granulowany – otrzymuje się przez szybkie studzenie żużla wodą. Przy szybkim chłodzeniu żużel przechodzi w formę szkła. Szkło z racji swojej nieuporządkowanej budowy posiada „określony zapas energii”, która jest jedynym z głównych parametrów określających zdolność do hydratacji żużla.

Żużle hutnicze powstają przy produkcji żelaza i metali kolorowych. Badania wykazały, że w betoniarstwie mogą być stosowane także żużle stalownicze.

Najlepsze właściwości hydrauliczne mają żużle z jak największą ilością części zeszkliwionych – nawet do 90% swojej masy, które powstają podczas gwałtownego ochłodzenia. Najlepsze właściwości hydrauliczne żużel uzyskuje wówczas, gdy jego powierzchnia właściwa jest wyższa od 3500 cm²/g. Żużel może być mielony osobno lub wraz z klinkierem portlandzkim. Powierzchnia właściwa uzyskiwanych cementów zawarta jest pomiędzy 2500 a 4500 cm²/g.

Popiół lotny

Popiół lotny uzyskuje się przez wychwytywanie za pomocą elektrofiltrów stałych cząstek unoszonych z dymem podczas spalania węgla w elektrowniach i innych wielkich zakładach przemysłowych. Może to być zarówno popiół z węgla kamiennego, jak i brunatnego. Rozróżnia się dwa rodzaje popiołu lotnego w zależności od składu mineralogicznego, a mianowicie krzemionkowy i wapienny. Obydwa muszą spełniać warunki określone w normie EN–450, przede wszystkim oba popioły muszą zawierać co najmniej:

- 25% reaktywnego dwutlenku krzemu,
- < 5% reaktywnego tlenku wapnia – popiół krzemionkowy,
- od 5 do 15% – popiół wapienny.

Pył krzemionkowy

Pył krzemionkowy jest odpadem w produkcji stopów krzemowych i zawiera od 75 do 98% SiO₂. Jako dodatek hydrauliczny jest tym korzystniejszy im więcej zawiera krzemionki (SiO₂). W Polsce taki pył powstaje tylko w Hucie Łaziska i zawiera krzemionki od 85 do 95%. Musi on odpowiadać normie EN–13263.

Ziarenka pyłu są kuleczkami o wielkości od 0,01 do 0,5 μm, ze zdecydowaną przewagą do 0,1 μm za granicą, a w Łaziskach do 80%. Odpowiednio, powierzchnia właściwa wynosi do 200 000 cm²/g (pył zagraniczny) i do 150 000 cm²/g (pył krajowy). Gęstość pyłów równa się od 2,2 do 2,5 g/cm³, gdy cementu od 3,05 do 3,15 g/cm³. Gęstość nasypowa od 250 do 300 kg/m³.

Pyły krzemionkowe nazywane też mikrokrzemionką zbudowane są z krzemionki bezpostaciowej (amorficznej) i cechują się wysoką aktywnością (dwa razy większą niż po-

piół lotny) w stosunku do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, co, jak już powiedziano, prowadzi do tworzenia w kamieniu cementowym żelu CSH.

Do istotniejszych korzyści wynikających z dodania mikrokrzemionki do zaczynu cementowego należy także:

- zwiększenie jego kleistości i szczelności, a w konsekwencji wzrostu wytrzymałości i również szczelności kamienia cementowego i z kolei w istotnym zakresie poprawy betonu,

- przy zamianie określonej masy cementu na pył krzemionkowy wzrasta objętość zaczynu, co wynika z niższej gęstości pyłu o ok. 25%,

- pył krzemionkowy może być z korzyścią stosowany do każdego betonu w ilości 2–15% masy cementu, pod warunkiem jednoczesnego dodania upłynniacza (pkt 11).

W zależności od ilości pyłu zmienia się zakres jego oddziaływania, a to:

- 2–4% – poprawia urabialność mieszanki betonowej, gdyż tworzy z wodą zol, co ogranicza tendencję do oddzielania się i ucieczki wody z mieszanki;
- 4–10% – poprawia także właściwości fizyczne betonu oraz przynosi istotny wzrost wytrzymałości i polepsza odporność na agresję chemiczną;
- 10–15% – dodatkowo podwyższa trwałość betonu z kruszywem małoodpornym na alkalia.

Zeolit syntetyczny

Ciągle prowadzi się badania nad odpowiednim, przydatnym w gospodarce, zużywaniem odpadów również w przypadku betonu. Jako przykład takich poszukiwań przytoczyć można zeolit syntetyczny, nowo zbadany odpad, jeszcze przez przepisy niedopuszczony do stosowania. Preparat ten jest odpadem powstającym w jednej z gałęzi przemysłu petrochemicznego. Zeolity są ziarnistymi glinokrzemianami o mianości większej niż najdrobniejsze pyły krzemionkowe. Efekty stosowania zeolitu do betonu są zbliżone do efektów uzyskiwanych z mikrokrzemionką.

2.4. Cement

2.4.1. Uwagi wstępne

Ponieważ na temat tego spoiwa ukazało się bardzo wiele publikacji, w tym monograficznych, tutaj przedstawione są tylko najistotniejsze wiadomości konieczne budowniczym. Myślą przewodnią będzie zwrócenie uwagi na konieczność zrozumienia potrzeby właściwego doboru cementu do betonu i odpowiedniego postępowania w celu uzyskania przez beton założonych właściwości z uwzględnieniem problemu ekonomicznego.

Mimo że w niektórych krajach (Włochy, Francja) występują cementy naturalne, uzyskiwane ze zmielenia specjalnych skał, to jednak powszechnie stosuje się tylko cementy sztuczne uzyskiwane w drodze przemysłowej przeróbki. Dzięki przemysłowej produkcji otrzymuje się cementy o wysokim stopniu jakości i o zróżnicowanych, ale jednorodnych właściwościach w dostosowaniu do wymagań. Różnice właściwości cementów są pochodną głównie zróżnicowanych proporcji składników chemicznych i minerałów, zróżnicowanej wielkości faz krystalicznych, mianości ziaren cementu oraz zastosowania specjalnych dodatków zwanych modyfikatorami klinkieru portlandzkiego, będącego podstawą każdego cementu. Wymagania w stosunku do jakości cementów określa norma EN–197.

Natomiast rzeczywiste ich właściwości, które nigdy nie mogą być gorsze od założonych w normie podają producenci w swoich informatorach.

2.4.2. Charakterystyka chemiczna cementu

Składniki chemiczne

Główne składniki chemiczne wszystkich cementów podane są w tablicy 2.2. Są to tlenki pierwiastków Ca, Si, Al, Fe, S, Na, K, Mg i ślady innych. Dla uproszczenia tlenki te nazywa się ogólnie składnikami chemicznymi.

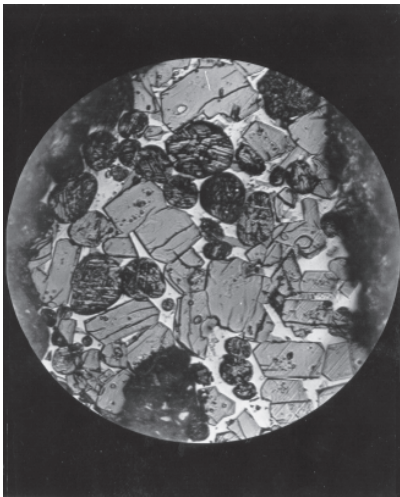
Tablica 2.2. Główne składniki chemiczne cementu

Lp.	Oznaczenie	Nazwa	Zawartość w cemencie portlandzkim	
			[%]	(średnio)
1.	CaO	tlenek wapnia	60–70	(63)
2.	SiO ₂	krzemionka	18–25	(22)
3.	Al ₂ O ₃	tlenek glinu	4–9	(7)
4.	Fe ₂ O ₃	tlenek żelaza	1–5	(3)
5.	MgO	tlenek magnezu	1–5	(2)
6.	SO ₃	trójtlenek siarki	1–3	(2)
7.	Na ₂ O + K ₂ O	tlenek sodu i potasu (alkalia)	0,5–1,8	(0,8)

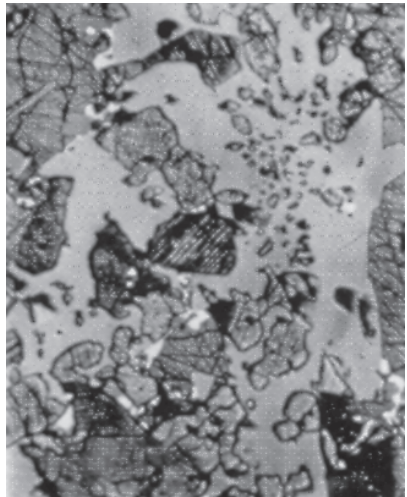
Minerały

Wymienione w tablicy 2.2 składniki cementu występują w postaci związków chemicznych tworzących różne minerały. Podstawowymi są cztery minerały opisane w tablicy 2.3.

A



B



2.2. Przekrój ziarna cementu portlandzkiego: A – z roku 1999, B – z roku 1825

Krzemiany (C_3S i C_2S) mają budowę krystaliczną o różniącym się kształcie. Gliniany i glinożelaziany są bezpostaciowe i tworzą matrycę ziarna spajającą kryształy krzemianów. Zaznaczono je na rys. 2.2 będącym zdjęciem przekroju ziarna cementu portlandzkiego.

Tablica 2.3. Główne minerały cementów

Wzór chemiczny	Skrót wzoru	Nazwa	Budowa	Właściwości	Zawartość [% masy]
$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	krzemian trójsilnikowy (alit)	krystaliczna w postaci sześciokątnych tabliczek	- wysokoaktywny - wysokokaloryczny (szybkie twardnienie)	55–65
$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	krzemian dwusilnikowy (belit)	krystaliczna w postaci krępej	- średnioaktywny - niskokaloryczny (powolny, lecz duży przyrost wytrzymałości)	15–25
$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	glinian trójsilnikowy (celit)	od bezpostaciowej do krystalicznej krępej i sześciobocznej, ale o bardzo małych wymiarach	- bardzo wysoko aktywny - wysokokaloryczny (przyspiesza wiązanie)	8–12
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	żelazoglinian czterowapniowy (braunmillerit)	od bezpostaciowej po krystaliczną, o nieprawidłowej budowie	- ślaboaktywny - średniokaloryczny (powolny przyrost wytrzymałości)	8–12

Omówienie tablicy 2.3:

1. W kolumnie „Właściwości” należy rozumieć zachowywanie się poszczególnych minerałów, po wymieszaniu skruszonego klinkieru (czyli cementu) z wodą.

2. Aktywnością określa się udział w uzyskiwanych wytrzymałościach w początkowym okresie twardnienia.

3. Kalorycznością określa się intensywność wydzielania ciepła podczas hydratacji.

4. W klinkierze znajdują się ponadto jako wolne składniki tlenek wapniowy (CaO), tlenek magnezowy (MgO), alkalia (Na_2SO_4 i K_2SO_4), a dodatkowo tylko w cemencie gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Ilość ich wpływa w znacznym stopniu na właściwości cementu – z reguły szkodliwie – co będzie omówione w pkt 2.4.7.

5. Podkreślimy, że zawsze $C_3S + C_2S = 75\text{--}85\%$, a suma wszystkich czterech minerałów $\geq 95\%$.

2.4.3. Znaczenie składu chemicznego cementu

Różnica składu mineralogicznego pomiędzy klinkierem portlandzkim a cementem portlandzkim polega w zasadzie tylko na tym, że cement zawiera kilka procent gipsu dla regulacji czasu wiązania.

Od składu chemicznego i ilości poszczególnych minerałów w cemencie zależy przede wszystkim:

- szybkość procesu wiązania i twardnienia cementu,
- szybkość i ilość wydzielanego ciepła podczas hydratacji,

• skład mineralogiczny powstającego kamienia cementowego, a w konsekwencji, właściwości fizyczne, chemiczne i mechaniczne ważne dla wykonywanych z nich betonów, a to:

- wytrzymałość na ściskanie,
- odporność na agresywne środowiska,
- odkształcalność,
- trwałość.

Najważniejsze przykłady:

• Wolny tlenek CaO i MgO może spowodować brak stałości objętości cementu (nadmierne pęcznienie po stwardnieniu betonu) i prowadzić do powstania mikrospekkań. Zawartość wolnego CaO w klinkierze nie powinna przekraczać 1,5%, natomiast zawartość MgO w składzie chemicznym klinkieru 5%.

• K_2O i Na_2O – (składniki alkaliczne) mogą reagować z krzemionką opalową w kruszywach, co prowadzi do pęcznienia i pęknięcia betonów.

• FeO – nadaje ciemną barwę cementowi i obniża wrażliwość cementów na wody z siarczanami.

• C_3S – wiąże szybciej niż C_2S , ale daje niższą wytrzymałość końcową; wyrażenie „leniwe wiązanie” dobrze określa proces wiązania cementów zawierających dużo C_2S .

• C_3A – wiąże bardzo szybko, wydzielając przy tym dużo ciepła. Wpływa korzystnie na początkową, ale negatywnie na końcową wytrzymałość cementu. Obniża odporność na większość czynników chemicznie agresywnych.

• SO_3 – po przekroczeniu 3% masy cementu może wywołać korozję siarczanową.

• Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) – opóźnia wiązanie. W nadmiarze może prowadzić do rozsądzania wyrobu reagując z C_3A (pkt 15.11).

Już z tych kilku przykładów można wyciągnąć pierwsze praktyczne wnioski, a mianowicie, że: można ocenić właściwości cementu znając jego skład chemiczny bądź mineralogiczny oraz że, do betonowania dużych bloków, np. zapór wodnych, należy przyjąć cement o małej ilości C_3A i C_3S , a o podwyższonej ilości C_2S – do takich należy np. cement pucolanowy. Beton będzie wtedy wiązał wolniej i będzie wydelał mało ciepła dzięki czemu nie nastąpi zbytne rozgrzanie i z tym związane ewentualne pęknięcie konstrukcji.

O skuteczności oddziaływania poszczególnych składników i minerałów decydują ponadto wzajemne proporcje poszczególnych grup składników, co uwzględniają producenci cementów specjalnych. Wyróżnia się dwie podstawowe grupy składników:

- zasadową (CaO i MgO),
- kwaśną (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3),

przy czym istotną rolę odgrywa także ogólna ilość ($Al_2O_3 + Fe_2O_3$) oraz samego Fe_2O_3 .

2.4.4. Postępowanie w praktyce przy wyborze cementu

Aby inżynier budowlany nie musiał sam decydować o doborze cementu wg analizy jego właściwości chemicznych, zróżnicowane w rzeczywistości cementy mają swoje oddzielne nazwy (pkt 2.4.5) oraz wytyczne ich stosowania. Jednak znajomość zarówno problemów mechanizmu produkcji, jak i zasad procesu wiązania cementu jest konieczna, ponieważ w praktyce nie ma idealnych i stałych warunków stosowania. Pomoże to zatem inżynierowi w doborze cementu oraz metody postępowania przy wykonywaniu i pielęgnacji betonów, aby uniknąć niepowodzeń.

2.4.5. Podział cementów

Oprócz cementów powszechnego użytku (tablica 2.1) wyróżnione zostały cementy specjalne, stosowane w szczególnych przypadkach wynikających z warunków wykonawczych bądź eksploatacyjnych betonów. Liczba cementów specjalnych stale rośnie, stosownie do zapotrzebowania. Cementy specjalne dzielą się na trzy grupy:

- a) oparte na klinkierze portlandzkim: biały, kolorowy, hydrofobizowany, bitumini-zowany, plastyfikowany, bezskurczowy, ekspansywny, drogowy, mostowy, hydrotechniczny, wiertniczy, bezgipsowy,
- b) oparte na klinkierze glinowym: cement glinowy, glinowy żaroodporny,
- c) bezklinkierowe: pucolanowo-wapienny, żuźlowo-wapienno-gipsowy, żuźlowo-siarczanowy, żuźlowo-alkaliczny.

2.4.6. Skład chemiczny cementów powszechnego użytku

Oдноśne dane zawiera tablica 2.4. Podane liczby charakteryzują współzależność właściwości cementów od ich składu. Znajomość tych wielkości nie ma istotniejszego praktycznego znaczenia dla inżyniera budowlanego.

Tablica 2.4. Przykłady składu chemicznego cementów

Lp.	Cementy powszechnego użytku	Ilość składników [%]			
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
1.	CEM I	62–68	18–25	4–8	3–4
2.	CEM II	pośrednio między CEM I i III			
3.	CEM III	50–58	24–30	7–9	3–5
4.	CEM IV i CEM V	< CEM III	> CEM III	± jak CEM III	
	Cementy specjalne	Ilość minerałów [%]			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1.	Normalnie wiążący	60	20	10	9
2.	Szybkotwardniejący	65	12	13	7
3.	O obniżonym cieple hydratacji	30	45	5	12
4.	O podwyższonej odporności siarczanowej	45	30	7	12
5.	Odporny na siarczany	40	35	3	15

W tablicy 2.5 podano informacje o optymalnym przeznaczeniu cementów powszechnego użytku. Podobne informacje o cementach specjalnych zawierają informatory producentów. W obu zasadniczych grupach cementów występuje podział na klasy uzależnione od wymaganych wytrzymałości na ściskanie do uzyskania (wykazania) w próbie normowej. Wyróżnia się klasy: 32,5; 42,5; 52,5 oraz 32,5R; 42,5R i 52,5R. Symbol R jest wyróżnikiem klasy o wysokiej wytrzymałości wczesnej, (do roku 1998 dzielono cementy według marek: 25; 35; 45; 50; 55). Polska norma PN-B-19701 dotycząca cementów powszechnego użytku spełnia warunki normy europejskiej i stosownie przyporządkowuje do niej cementy produkowane w Polsce.

W tablicach 2.6 i 2.7 (s. 30) podano najważniejsze właściwości mechaniczne, fizyczne i chemiczne wymagane odpowiednio do rodzajów oraz klas cementów.

Tablica 2.5. Kierunki stosowania cementów powszechnego użytku

Rodzaj cementu	Cechy charakterystyczne	Zalecane kierunki zastosowania betonu
1	2	3
portlandzki: CEM I 32,5 CEM I 32,5R CEM I 42,5	• umiarkowane ciepło hydratacji • umiarkowana dynamika narastania wytrzymałości wczesnej • umiarkowana dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania	Beton zwykły klasy C12/15–C35/45 • konstrukcje i elementy monolityczne oraz prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • konstrukcje i elementy sprężone dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • wyroby drobnowymiarowe dojrzewające w warunkach naturalnych • betonowanie w warunkach obniżonej temperatury Beton komórkowy
portlandzki: CEM I 42,5R CEM I 52,5 CEM I 52,5R	• bardzo wysokie ciepło hydratacji • szybkie narastanie wytrzymałości wczesnej • niewielka dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania	Beton zwykły klasy C20/25–C40/50 • konstrukcje i elementy prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych, podwyższonej temperatury i obniżonej temperatury • konstrukcje i elementy sprężone dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • drobnowymiarowe wyroby dojrzewające w warunkach naturalnych • beton o wymaganej wysokiej wytrzymałości wczesnej • betonowanie w warunkach zimowych Beton szczególnego przeznaczenia BSP, C40/50–C90/100
portlandzki: CEM I 42,5 NA CEM I 42,5R NA CEM I 52,5 NA	• wysokie ciepło hydratacji • szybkie narastanie wytrzymałości wczesnej • niewielka dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania	Beton zwykły klasy C20/25–C40/50 o zastosowaniach jak wyżej • dopuszcza się stosowanie kruszyw reaktywnych

Tablica 2.5. Kierunki stosowania cementów powszechnego użytku (ciąg dalszy)

1	2	3
portlandzki krzemionkowy CEM II/A – D 42,5 portlandzki krzemionkowy CEM II/A – D 52,5	• umiarkowane ciepło hydratacji • dobra dynamika narastania wytrzymałości wczesnej • bardzo dobra dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania • podwyższona odporność na agresję chemiczną	Beton zwykły klasy średniej • konstrukcje i elementy prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • konstrukcje i elementy sprężone dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • betony i konstrukcje pracujące w środowiskach o podwyższonej agresywności chemicznej • betonowanie w warunkach obniżonej temperatury Beton wysokiej wartości (BWW), C50/60–C90/105
portlandzki popiołowy CEM II/A – V 32,5R portlandzki popiołowy CEM II/A – V 42,5	• umiarkowane ciepło hydratacji • umiarkowana dynamika narastania wytrzymałości wczesnej • bardzo dobra dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania	Beton zwykły klasy do C35/45 • konstrukcje i elementy monolityczne lub prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • drobnowymiarowe wyroby dojrzewające w warunkach naturalnych Beton komórkowy Zaprawy murarskie Zaprawy tynkarskie
portlandzki żuźłowy CEM II/A – S 32,5R portlandzki żuźłowy CEM II/A – S 42,5R		
portlandzki żuźłowo-popiołowy CEM II/A – SV 32,5R portlandzki żuźłowo-popiołowy CEM II/A – SV 42,5R		

Tablica 2.5. Kierunki stosowania cementów powszechnego użytku (ciąg dalszy)

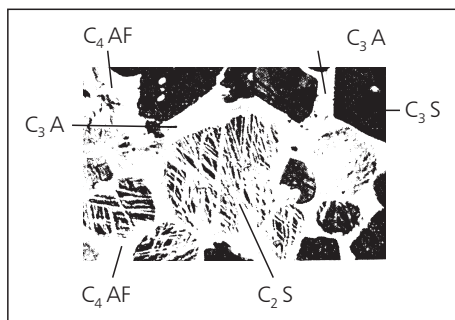
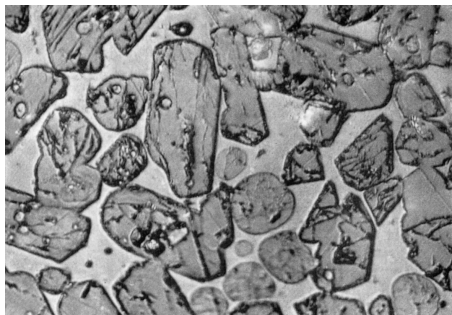
1	2	3
portlandzki popielowaty CEM II/B – V 32,5	• niskie ciepło hydratacji • powolne narastanie wytrzymałości wczesnej • bardzo dobra dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania • podwyższona odporność na agresję chemiczną	Beton zwykły klasy do C25/30 • konstrukcje i elementy monolityczne oraz prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • konstrukcje masywne • beton o podwyższonej odporności na agresję chemiczną • beton „chudy” • betony stabilizujące Zaprawy murarskie Zaprawy tynkarskie
portlandzki żuźlowy CEM II/B – S 32,5		
portlandzki żuźlowo-popielowaty CEM II/B – SV 32,5		
portlandzki wapienny CEM II/A – L 32,5R	• umiarkowane ciepło hydratacji • umiarkowane narastanie wytrzymałości wczesnej • niewielka dynamika narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania • jasna barwa	Beton zwykły klasy do C35/45 • konstrukcje i elementy monolityczne oraz prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • drobnomiarowe wyroby prefabrykowane dojrzewające w warunkach naturalnych • betony i zaprawy barwione Zaprawy murarskie Zaprawy tynkarskie Betony i zaprawy posadzkowe
portlandzki wapienny CEM II/A – L 42,5		
CEM III, IV i V analogicznie jak CEM II		

2.5. Cement portlandzki – CEM I

W budownictwie na całym świecie, a także w Polsce, najpowszechniej stosowany jest obecnie cement portlandzki. Cement ten produkowany jest w największej ilości zróżnicowanych wytrzymałości („klas”) i zróżnicowanej szybkości procesu dojrzewania (N, W, S $\equiv$ normalnie, wolno, szybko). Norma odróżnia od normalnej klasy odmianę R (o wysokiej wytrzymałości wczesnej – po 2 do 7 dniach – co wynika z przyspieszonego twardnienia).

A. Surowce do produkcji cementu portlandzkiego

Cementy portlandzkie otrzymuje się z naturalnych skał, takich jak: wapień, margiel, glina, kreda, ziemia krzemkowa oraz tufy wulkaniczne, a czasem także piasek kwarcowy.



2.3. Klinkier portlandzki

Wymienione surowce po przetworzeniu, mają postać obłych spieczonych bryłek o wielkości do 20 mm – rys. 2.3, nazywanych klinkierem portlandzkim cementu. Rysunek pokazuje także widok mikroskopowy struktury klinkieru i jego szkic. W czasie rozdrabniania klinkieru dodaje się gips, który reguluje przebieg wiązania. Rozdrobniony klinkier z gipsem nazywa się cementem portlandzkim. Klinkier cementu portlandzkiego jest także podstawą do produkcji większości innych rodzajów cementu, co przykładowo obrazuje tablica 2.1.

B. Technologia produkcji cementu portlandzkiego

Proces produkcji cementu portlandzkiego obejmuje trzy zasadnicze etapy:

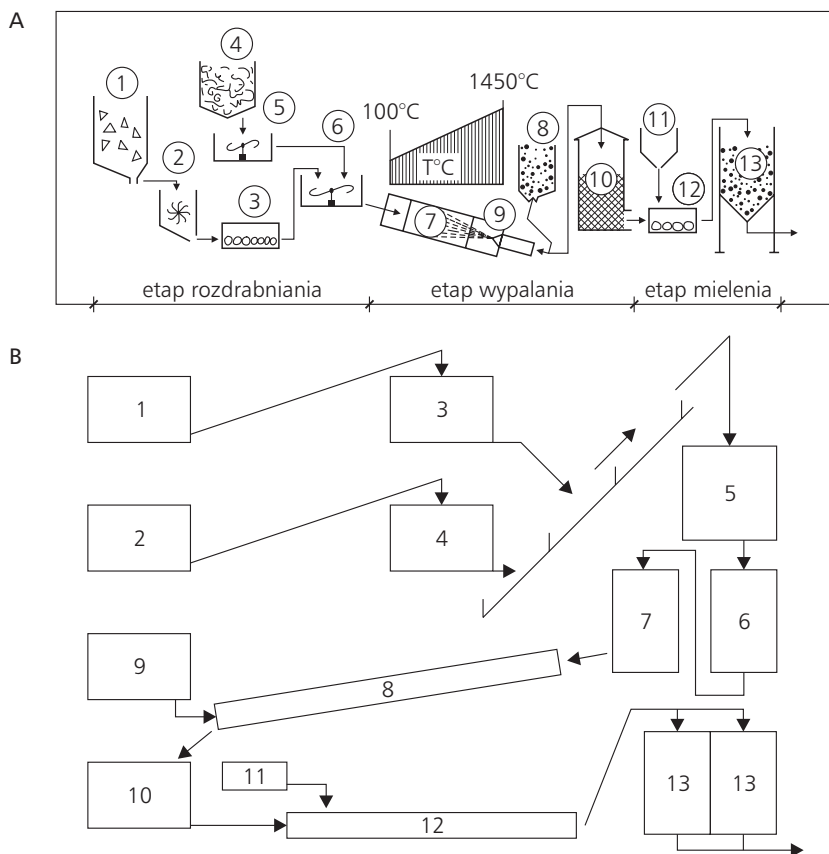
- przygotowanie surowca,
- wypalanie – (uzyskuje się klinkier portlandzki)
- mielenie, z dodatkiem gipsu – (uzyskuje się cement portlandzki).

Rozróżnia się produkcję klinkieru na mokro i na sucho. Schematy produkcji zobrazowano na rys. 2.4A i B.

- Metoda mokra – przygotowanie surowców wymaga ich sortowania i rozdrobnienia. Sortowanie polega na odrzuceniu złych partii składników, co ustala się z reguły makroskopowo. Oczywiście zakłada się, że generalnie surowce pochodzą ze złóż zbadanych pod względem przydatności, a ich zanieczyszczenie może pochodzić tylko z przerostów skalnych lub przypadkowych zanieczyszczeń.

Rozdrobnienie prowadzi się w trzech etapach. Najpierw kruszy się bloki w łamaczach 2 (rys. 2.4), następnie miele się w młynie kulowym 3 i tak rozdrobniony surowiec przesyła

się do szlamownika 6. Kruszeniu w łamaczach i młynach podlegają twarde surowce, np. wapień, natomiast miękkie, np. glina, rozdrabnia się w szlamowniku 5 i z kolei przelewa do basenu szlamowania 6, gdzie po zmieszaniu z dodatkową wodą powstaje zhomogenizowany szlam. Tutaj też dokonuje się korekcji składu pod względem chemicznym, stosując odpowiednie dodatki.



2.4. Schemat produkcji cementu

A – metodą mokrą: 1 – składniki twarde, 2 – łamacz, 3 – młyn kulowy, 4 – składniki miękkie, 5 – szlamownik, 6 – basen szlamowania, 7 – piec wypalowy obrotowy, 8 – pył węglowy, 9 – dmuchawa pyłu, 10 – pojemnik klinkieru, 11 – pojemnik z gipsem, 12 – młyn kulowy, 13 – silosy z cementem; B – metodą suchą: 1 – kruszarka gliny, 2 – kruszarka wapienia, 3 – uśrednianie gliny, 4 – uśrednianie wapienia, 5 – młyn susząco-mielący, 6 – homogenizacja, 7 – zbiornik mąki surowca, 8 – piec obrotowy, 9 – zbiornik paliwa, 10 – zbiornik klinkieru, 11 – zbiornik gipsu, 12 – młyn klinkieru, 13 – silosy cementu

Omówienie rysunku 2.4

Zhomogenizowany szlam przechodzi do ukośnie ustawionych pieców obrotowych, gdzie następuje wypalanie w temperaturze do 1450°C. Temperaturę tę uzyskuje się przez wdmuchiwanie płomienia z pyłu węglowego, oleju lub gazu od strony niższej położonego końca pieca. Szlam przesuwając się wzdłuż pieca przechodzi przez strefy o coraz wyższej

temperaturze, aż blisko końca pieca osiąga ona żądane 1450°C. W końcowym odcinku (ok. 10% długości pieca) następuje chłodzenie do 1200°C. Przy odpowiednich temperaturach zachodzą procesy chemiczne i strukturotwórcze, prowadzące do powstania połączonych składników mineralnych klinkieru portlandzkiego (rys. 2.3). Szybkość studzenia, zwłaszcza w ostatniej części pieca, decyduje o ostatecznym stosunku ilościowym poszczególnych minerałów w cemencie. Klinkier musi leżakować tak długo, aż nastąpi w nim zakończenie wszelkiego rodzaju reakcji chemicznych, a temperatura obniży się do co najmniej 40°C.

Ostatnia czynność polega na rozdrobnieniu klinkieru z dodatkiem gipsu na cement. Dokonuje się tego w młynach kulowych (nr 12 na rys. 2.4).

Gips – jak to już powiedziano – reguluje czas wiązania cementu. Ilość dodawanego gipsu jest mniej więcej proporcjonalna do ilości C_3A i miakkości cementu. W miarę wzrostu ilości gipsu opóźnia się początek i wydłuża czas wiązania. Z reguły ilość gipsu wynosi około 3% masy cementu (wyjątkowo do 4%). Od lat poszukuje się metod zastąpienia gipsu innym beziarkowym produktem, w celu uniknięcia wymienionych niebezpieczeństw, np. korozji betonu, korozji stali zbrojeniowej i wywoływania fałszywego wiązania.

- Metoda sucha – różni się ona od metody mokrej jedynie sposobem przygotowania surowców. Po wstępnym rozdrobnieniu w łamaczach 1 i 2 surowiec przechodzi do suszarni, która w nowoczesnych rozwiązaniach jest jednocześnie młynem obrotowym (młyn susząco-mielący). Tu materiał osusza się do wilgotności około 1–2% i rozdrabnia. Surowce drobne, jak np. żużle, dozowane są bezpośrednio do młyna susząco-mielącego w odpowiedniej proporcji w stosunku do pozostałych rozdrobnionych innych surowców. W tym stanie przesyła się materiał do zbiorników korekcyjnych, w których następuje skorygowanie składu i dokładne wymieszanie metodą pneumatyczną. Następnie – jak w metodzie mokrej – następuje wypał i leżakowanie. Oczywiście, w tej metodzie rozdrobniony surowiec wprowadzany jest do pieców wypalowych w stanie suchym jako proszek lub granulki.

- Porównanie metody mokrej i suchej – metoda sucha jest nowocześniejsza i bardziej ekonomiczna. Zużywa mniej ciepła, gdyż odpada odparowywanie wody ze szlamu. Zużywa się około 3600–4000 kJ na 1 kg klinkieru wobec 5300–7200 kJ w metodzie mokrej. Wydajność pieców w metodzie suchej jest prawie 2-krotnie wyższa. Metoda sucha pozwala w sposób znacznie prostszy wykorzystać żużel wielkopiecowy i popioły lotne jako wyjściowe składniki w produkcji cementów hutniczych i pucolanowych. W metodzie mokrej wymienione surowce dodaje się dopiero przy przemiale klinkieru.

Niektóre cementownie w Polsce nadal pracują metodą mokrą, co wynika poniekąd stąd, że mamy dość pyłu węglowego jako paliwa. Wszystkie nowo wznoszone cementownie dostosowane są jednak do nowoczesnej technologii, tj. metody suchej.

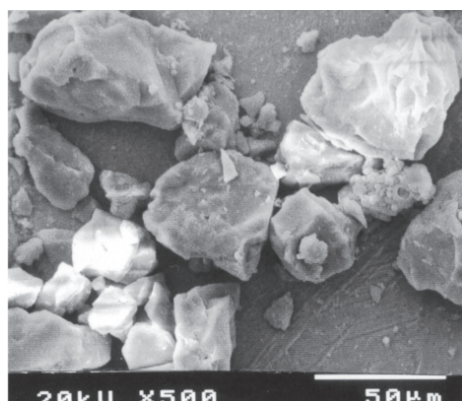
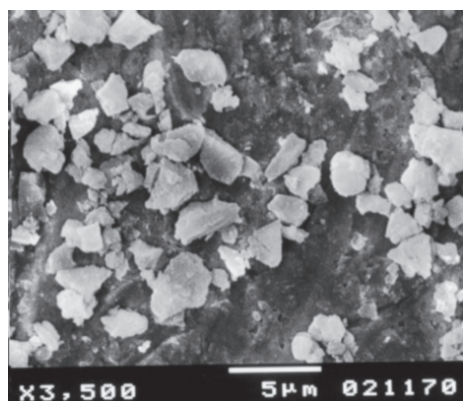
Klinkier otrzymywany metodą suchą zawiera w swoim składzie chemicznym więcej alkaliów (Na_2O i K_2O) od klinkieru otrzymywanego metodą mokrą.

C. Właściwości fizyczne ziaren cementu

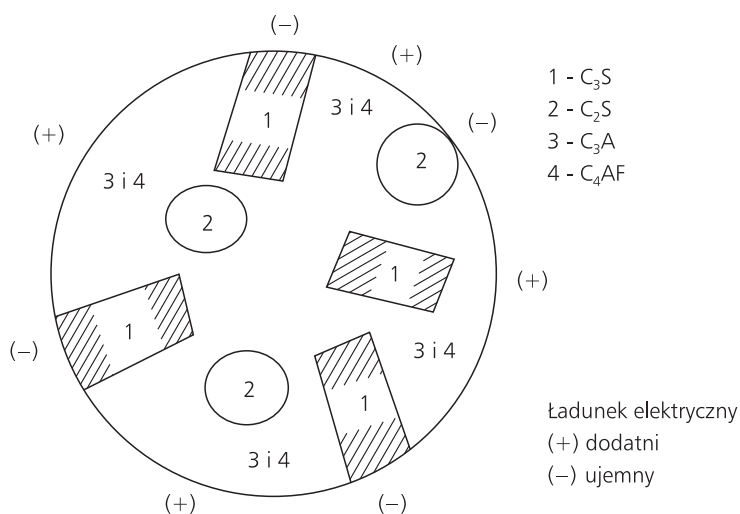
Wyprodukowany cement dowolną metodą jest całkowicie suchy. Kształt ziaren cementu jest w zasadzie krępy, przy czym może znacznie odbiegać od formy kulistej – rys. 2.5. Powierzchnia ziaren jest chropowata i z załamaniami. Ziarna wykazują często powierzchniowe pęknięcia. Przyjmuje się, że cement zawiera ziarna od 5 μm do 80 μm . Dominującą frakcją są ziarna 20–40 μm . Dopuszcza się od 5 do 15% nadziarna do 200 μm .

Ziarna cementu adsorbują na powierzchni powietrze w postaci pęcherzyków mikroskopowej wielkości, przez co gęstość nasypowa cementu jest bardzo mała i wynosi około

1,1–1,3 kg/dm³ wobec gęstości właściwej ok. 3,1 kg/dm³. Zawartość próżni w stosie cementu wynosi zatem około 65%. Pod względem strukturalnym jest to ciało krystaliczno-szkliste, niejednorodne, wielofazowe, złożone z bezwodnych minerałów (tabl. 2.3 i rys. 2.2).



2.5. Widok ziaren cementu CEM I (fot. B. Trybalska)



2.6. Schemat rozkładu potencjalnej aktywności fizykochemicznej na powierzchni ziaren cementu (zależy od minerału na jego powierzchni)

Jeden kilogram cementu średniej miąłkości (ok. 2700 cm²/g) zawiera około 1 miliarda (10⁹) ziaren. Uziarnienie rozkłada się symetrycznie względem mediany (średnia arytmetyczna wielkości ziarna). Ziarna cementu mają obojętny ładunek elektryczny, choć nie są elektrycznie bierne, co wynika z właściwości głównych minerałów. Można przyjąć schematycznie rozkład ładunków według rys. 2.6. Właściwości te można wykorzystać w technologii betonu (pkt 13.5). Powierzchnia ziaren jest stosunkowo słabo zwilżalna wodą, a ziarna w zetknięciu z wodą mają tendencję do koagulacji (zbijania się w grudki),

co zmienia się po wprowadzeniu plastyfikatorów (pkt 13.4). Cement jest higroskopijny i może wsysać wilgoć z powietrza, co prowadzi do tzw. wietrzenia cementu (pkt 2.27). Materiał ziarna (czyli klinkieru) jest zbitą bezporowatą masą o wytrzymałości na ściskanie do 2000 MPa.

D. Stosowanie cementu portlandzkiego

Cement portlandzki można stosować do wszelkich konstrukcji betonowych i żelbetonowych bez względu na porę roku i warunki dojrzewania. W szczególnych przypadkach korzystniejsze są inne cementy, co podano w tablicy 2.4. Dobór klasy cementu portlandzkiego zależy głównie od wymaganej wytrzymałości na ściskanie betonu (pkt 8.6).

2.6. Cementy z grupy CEM II (portlandzkie mieszane)

Cementy z grupy CEM II charakteryzują się różną zawartością klinkieru portlandzkiego oraz innych surowców określonych jako składniki główne lub składniki drugorzędne, w zależności od ich zawartości. Składniki główne występują w ilości większej niż 5% sumy masy wszystkich składników, a drugorzędne – mniejszej niż 5%. Składnikami tymi mogą być: granulowany żużel wielkopiecowy, pucolana naturalna lub przemysłowa, popiół lotny krzemionkowy lub wapienny, wapień (w postaci mączki), pył krzemionkowy.

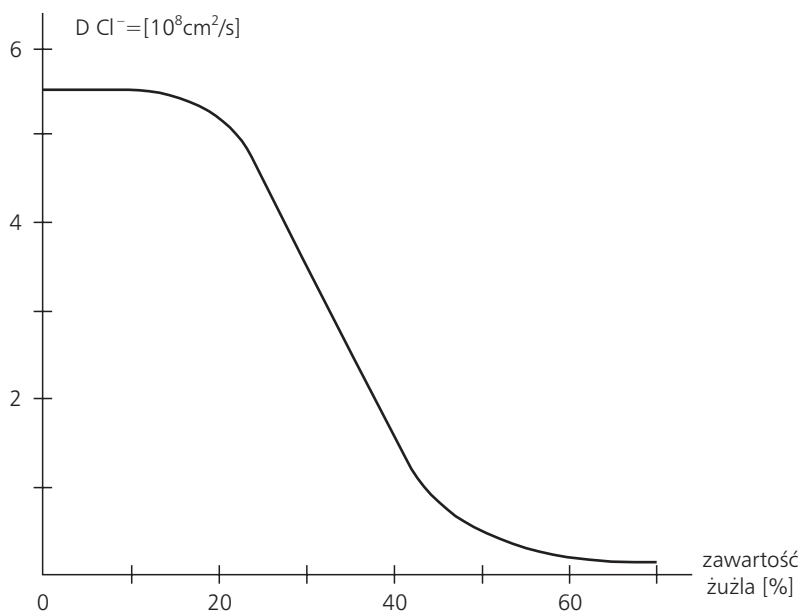
Szczególnym składnikiem jest siarczan wapnia (gips lub anhydryt), którego zawartość zależy od wymagań regulacji szybkości wiązania (z reguły od 3 do 4% całej masy cementu).

Jak to już wspomniano, w zależności od rodzaju składnika głównego, cement CEM II uzyskuje specjalną nazwę wg tablicy 2.1. Należy zwrócić uwagę, że w tablicy wprowadzono specjalne symbole literowe dla składników, a to: S, P, Q, V, W, L i D.

2.7. Cement hutniczy – CEM III

Cement hutniczy ma właściwości zbliżone do cementu portlandzkiego. Głównym jego składnikiem jest granulowany żużel wielkopiecowy. Różnice w ilościach składników chemicznych (głównie mniej CaO, a więcej SiO₂) nadają mu szczególnych własności, do których – w porównaniu do CEM I – można przede wszystkim zaliczyć:

- wolniejszy proces wiązania i twardnienia,
- opóźniony o około 30% w stosunku do cementu portlandzkiego początek i koniec wiązania,
- wybitnie osłabiony proces wiązania w niskiej temperaturze, niższej od +5°C. Wyjątek mogą stanowić betony o dużych masywach (samoocieplenie od ciepła hydratacyjnego),
- wyższa odporność na działanie środowiska o średniej agresji, zwłaszcza siarczanej,
- wydzielanie mniejszych ilości ciepła przy wiązaniu,
- wyższy przyrost wytrzymałości po upływie 28 dni, a o wiele wyższy po 90 dniach,
- niższy skurcz o około 40%,
- w kamieniu cementowym pory mają mniejsze wymiary,
- niższa nasiąkliwość, wyższa mrozoodporność.



2.7. Wpływ składu cementu na porowatość kamienia cementowego zobrazonego dyfuzją D jonów Cl^-

Wymienione wszystkie pozytywne cechy wynikają z istotnie obniżonych wielkości porów w kamieniu cementowym, co obrazuje rys. 2.7, wskazujący wysokie obniżanie możliwości przenikania jonów chlorkowych (Cl^-) wraz ze wzrostem ilości żużla.

Cement ten zyskuje coraz większą popularność w świecie nie tylko z powodu wymienionych wyżej wielu korzystnych właściwości, ale także istotnie niższej ceny. Wynika ona z wykorzystywania odpadu, którym jest żużel.

2.8. Cement pucolanowy – CEM IV i wieloskładnikowy – CEM V

Główną ich cechą jest zawartość pucolany, która może być naturalna, przemysłowa uzyskiwana z obróbki gliny i łupków aktywowanych termicznie lub pochodząca z odpadów, którymi obecnie są popiół lotny i pył krzemionkowy. Prowadzi się badania nad wykorzystaniem innych odpadów typu pucolanowego. CEM V charakteryzuje się wybitnie wolniejszym wiązaniem.

2.9. Właściwości cementów powszechnego użytku

Właściwości wytrzymałościowe mechaniczne i fizyczne podaje tablica 2.6, a właściwości chemiczne tablica 2.7.

W tablicy 2.8 podano dla ułatwienia oceny cementu nazwy i oznaczenia wg nowej i ostatnio obowiązującej normy, a w tablicy 2.9 stosowane na workach z cementem kolory rozpoznawcze.

Tablica 2.6. Właściwości wytrzymałościowe mechaniczne i fizyczne

Klasa	Wytrzymałość na ściskanie MPa				Czas wiązania		Stałość objętości mm
	wczesna		normowa				
	2 dni	7 dni	28 dni		początek min	koniec h	
			minimalna	maksymalna			
1	2	3	4	5	6	7	8
32,5	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10	–					
42,5	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5			
42,5R	≥ 20	–					
52,5	≥ 20	–	≥ 52,5	–	≥ 45	≤ 10	
52,5R	≥ 30	–					
Symbol R jest wyróżnikiem klasy o wysokiej wytrzymałości wczesnej							

Tablica 2.7. Właściwości chemiczne

Właściwości	Metoda badania	Rodzaj cementu	Klasy	Wymagania ¹
1	2	3	4	5
Strata prażenia	PN-EN 196-2	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0%
Pozostałość nierozpuszczalna	PN-EN 196-2	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0%
Siarczany (jako SO ₃)	PN-EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV	32,5	≤ 3,5%
			32,5R	
			42,5	≤ 4,0%
			42,5R	
			52,5 52,5R	
Chlorki	PN-EN 196-21	CEM III	wszystkie	≤ 0,10%
		wszystkie	wszystkie	
Alkalia ² (jako Na ₂ O)	PN-EN 196-21	wszystkie	wszystkie	≤ 0,60% ³
Pucolanowość	PN-EN 196-5	CEM IV i V	wszystkie	wynik pozytywny
¹ Wartości są podane w procentach masy gotowego cementu.				
² Wymaganie dotyczy tylko cementów uznanych za niskoalkaliczne ze względu na małą zawartość alkaliów.				
³ Cement hutniczy CEM III/A, zawierający co najmniej 50% żużla wielkopieczowego, może zawierać do 1,10% alkaliów. Cement hutniczy CEM III/B może zawierać do 2% alkaliów.				

Tablica 2.8. Zestawienie nowych (PN-19701) i poprzednich nazw oraz oznaczeń

Nowe nazwy i oznaczenia	
Cement portlandzki	CEM I
Cement portlandzki żuźłowy	CEM II/A – S CEM II/B – S
Cement portlandzki krzemionkowy	CEM II/A – D
Cement portlandzki pucolanowy	CEM II/A – P CEM II/B – P CEM II/A – Q CEM II/B – Q
Cement portlandzki popiołowy	CEM II/A – V CEM II/B – V CEM II/A – W CEM II/B – W
Cement portlandzki wapienny	CEM II/A – L CEM II/B – L
Cement portlandzki żuźłowo-popiołowy	CEM II/A – SV CEM II/B – SV
Cement hutniczy	CEM III/A CEM III/B
Cement pucolanowy	CEM IV/A CEM IV/B
Cement wieloskładnikowy	CEM V/A CEM V/B

Tablica 2.9. Kolory rozpoznawcze w zależności od klas cementu

Klasa wytrzymałości	Kolor rozpoznawczy	Kolor nadruku
32,5	jasnobrązowy	czarny
32,5R		czzerwony
42,5	zielony	czarny
42,5R		czzerwony
52,5	czzerwony	czarny
52,5R		biały

Cement wysyłany luzem powinien mieć identyfikator (np. w formie przywieszki do zbiornika transportowego), zawierający co najmniej następujące dane:

- nazwę, rodzaj, symbol i klasę cementu,
- nazwę wytwórni i miejscowości,
- masę cementu, którego dotyczy identyfikator,
- datę i godzinę wysyłki,
- numer rejestracyjny pojazdu,
- zleceniodawcę, numer zlecenia, odbiorcę,
- termin ważności cementu.

2.10. Cement szybkotwardniejący

Cement szybkotwardniejący jest w zasadzie odmianą cementu portlandzkiego. Charakteryzuje się szybkim procesem twardnienia przy zachowaniu wymaganego przez normy czasu do rozpoczęcia wiązania tj. minimum 60 minut. Produkowany jest w odmianach różnych klas i różnej wytrzymałości wymaganej już po 24 godzinach.

Cement szybkotwardniejący wykorzystywany jest w przypadkach wymagających szybkiego uzyskania przez beton żądanej wytrzymałości na ściskanie. Cementy te charakteryzują się dużą miątkością, intensywnym wydzielaniem ciepła przy wiązaniu, a przede wszystkim szybkim wzrostem wytrzymałości na ściskanie.

Powierzchnia właściwa cementu szybkotwardniejącego wynosi co najmniej $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ wg Blaine'a, gdy cementów portlandzkich klasy 32,5 ok. $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Cement szybkotwardniejący klasy $\geq 42,5$ już po 12 godzinach dojrzewania osiąga minimum 20 MPa. Charakterystyczne jest, że żadaną wytrzymałość końcową wyrobów z tych cementów uzyskuje się po 7 do 14 dniach, czyli w okresie co najmniej o 50% krótszym. W prefabrykacji elementów betonowych, szybsze wiązanie pozwala wyeliminować kosztowną metodę nagrzewania. Cement ten nie powoduje większych skurczów ani innego typu odkształceń zaczynów, zapraw czy betonów niż inne cementy portlandzkie. Ma także właściwości chroniące stal przed korozją.

Bardzo szybki przebieg tężenia można osiągnąć poprzez dodanie K_2SO_4 , który powoduje gwałtowne wydzielanie się znacznych ilości bardzo drobnych zarodków krystalicznych syngenitu, inicjujących i przyspieszających wiązanie cementu.

2.11. Cement portlandzki szybkowiązący

Cementy te różnią się od cementów szybkotwardniejących tym, że wiążą już po upływie od 3 do 30 minut. W zależności od potrzeby wybiera się odpowiednią odmianę cementu. Uzyskuje się ją przez zaniechanie stosowania domieszek opóźniających wiązanie, które dodaje się do cementów normalnie wiążących a szybkotwardniejących. Cementy szybkowiązące stosuje się głównie do robót naprawczych w budownictwie wodnym i górnictwym.

Ponadto produkowane są także cementy szybkowiązące oraz twardniejące, które w myśl pkt 2.5 i 3.3 można nazwać szybkodojrzewającymi. Cementy takie uzyskują pełną wytrzymałość często już po 2 tygodniach, a po 4 tygodniach może się ona nieco (o kilka procent) obniżyć.

2.12. Cement belitowy

Cement belitowy jest przykładem cementu uzyskiwanego przy znacznie zmniejszonym zużyciu energii niż cementu portlandzkiego (CEM I). Różni się od cementu portlandzkiego wybitnie wolniejszym przebiegiem twardnienia, co wynika przede wszystkim ze zmiany ilości C_3S na korzyść C_2S .

Znane są już sposoby całkowitego wyeliminowania C_3S . Są to cementy o niskim zużyciu energii i niemające budowy typu klinkieru portlandzkiego. W zależności od stosunku względem siebie wszystkich minerałów można też wyróżnić cementy belitowo-pucolanowe ($C_2S > 60\%$, a C_3S i $C_3A = 0$). Oszczędność energii przy produkcji cementów belitowych sięga nawet do 35%.

2.13. Cement niskokaloryczny

Cechuje się powolnym i małym ilościowo wydzielaniem ciepła hydratacji. Towarzyszy temu powolny przebieg procesu wiązania i twardnienia. Beton z tego cementu wykazuje bardzo niską tendencję do pęcznienia w okresie dojrzewania i skurczu w okresie eksploatacji. Uzyskuje się go przede wszystkim przez obniżenie C_3A i C_3S w składzie mineralogicznym. Wydziela nie więcej niż 250 kJ/kg w ciągu 7 dni i nie więcej niż 300 kJ po 28 dniach. W takim cemencie ilość CO w stosunku do tlenków pozostałych pierwiastków jest znacznie niższa niż w zwykłych cementach. Cement niskokaloryczny dzieli się na odmiany portlandzkie i hutnicze. Znane są przypadki szczególnej modyfikacji w celu przyspieszania dojrzewania bez wzrostu ilości ciepła. Tak otrzymany cement stosowany jest przede wszystkim do betonowania wielkich masywów.

Odpowiednikiem tego cementu, lecz inaczej produkowanym jest cement belitowy i hydrotechniczny.

2.14. Cement wysokoalkaliczny

Zagadnienie niebezpieczeństwa reakcji zawartych w cemencie rozpuszczalnych alkaliów (Na_2O i K_2O) z tzw. kruszywami reaktywnymi jest omówione w pkt 15.11. Reakcje te mogą prowadzić do rozkruszenia betonu. Niebezpieczeństwo takie zagraża, gdy suma $Na_2O + 0,658 K_2O > 0,6\%$ masy cementu. Polskie cementy w większości nie przekraczają tej wielkości, ale produkowane metodą suchą, mogą osiągać aż 1,5%.

2.15. Cement do budowy mostów

Trudne warunki eksploatacji mostów i wiaduktów (cykliczne zamrażanie, drgania, sole rozmrażające, ścieranie), wymagają stosowania do ich budowy odpowiednio silnego i odpornego betonu, a więc i cementu o specjalnych właściwościach, np.: CEM III A i B.

Cement produkowany specjalnie do wymienionych konstrukcji jest klasy 42,5 o powierzchni właściwej od 2800 do 3000 cm²/g. Zawiera co najwyżej 3% C_3A , od 50 do 60% C_3S i alkaliów $< 0,6\%$. Cement ten cechuje się nieznacznym skurczem i zwiększoną odpornością na działanie środowiska siarczanowego.

Po 3 dniach uzyskuje 45% wytrzymałości końcowej, a po 7 dniach 65%. Może on być wykorzystany także do budowy nawierzchni drogowych, mimo że istnieje specjalny cement do budowy dróg.

2.16. Cement do budowy dróg

Cement do betonu przeznaczonego do wykonywania nawierzchni drogowych i lotniskowych musi cechować się specjalnymi właściwościami z powodu szczególnych warunków wykonywania nawierzchni i ich eksploatacji. Powinien wykazywać jak najniższy skurcz, powolne wiązanie i twardnienie, ograniczoną mialkość do $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$, dużą wytrzymałość na ściskanie i zginanie, lepkość po zmieszaniu z wodą, zdolność do tworzenia szczelnej struktury zaczynu i wysokiej przyczepności do kruszywa, a wykonany z niego beton wysoką mrozoodporność (min. 300 cykli zamrażania).

Produkowane w Polsce cementy CEM I HSR i CEM I MSR klasy 42,5 spełniają opisane wyżej wymagania z tym, że ilość alkaliów dochodzi do 1,0%, co należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu składu betonu (pkt 15.11).

2.17. Cement hydrotechniczny

Cement ten cechuje się niską zawartością C_3S i C_3A i występuje w dwóch odmianach: odmiana I (max 5% C_3A), a II (max 8% C_3A), na korzyść C_2S i C_4AF . Cechuje się obniżonym o około 70% skurczem w stosunku do cementu portlandzkiego. Klasę tego cementu ustala się dopiero po upływie 90 dni, ponieważ przeznaczony jest na konstrukcje długo wznoszone i późno obciążane – są to przeważnie budowle hydrotechniczne, np. zapory wodne.

2.18. Cement dla górnictwa

Należy do grupy cementów CEM III (pucolanowych). W górnictwie cement może być przeznaczony do betonów pracujących w najtrudniejszych warunkach. Toteż cement stosowany do niego musi mieć właściwości wysokiej jakości, a przede wszystkim musi zapewnić betonowi odporność na środowiska chemicznie agresywne, wysoką wodoszczelność i wytrzymałość, mały skurcz i małe pękanie.

Specjalne cementy SG 42,5 i SG 32,5 dla górnictwa spełniają te warunki. Istota ich uzyskania polega na tym, że mieląc klinkier portlandzki dodaje się mikrokrzemionkę aktywną (pkt 2.3), w ilości ok. 10% masy. Mikrokrzemionka wiążąc z wodorotlenkiem wapniowym $\text{Ca}(\text{OH})_2$, prowadzi do jej redukcji o około 40–60%.

Ten kierunek rozwoju cementów obserwuje się w krajach o wysokiej technice budowlanej. Cement górniczy może być z pożytkiem wykorzystywany do napraw konstrukcji metodą natrysku i do betonów wysokich wytrzymałości ($B > 60 \text{ MPa}$). Mialkość tego cementu jest dość duża i wynosi ok. $4800 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Produkuje się także specjalny górniczy cement hutniczy w dwóch odmianach: HSG – 22,5 i HSG – 32,5. Obie wiążą nie wcześniej niż po 1 godzinie, mają powierzchnię właściwą po $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$. Zawartość granulowanego żużla wielkopiecowego może być odpowiednio do potrzeb zmieniana w granicach 30–70% całej masy cementu.

Cementy HSG obu odmian zawierają także mikrokrzemionkę i mogą być szeroko stosowane w budownictwie morskim dzięki podwyższonej odporności na korozję chlorową. Istotny z punktu widzenia inwestorów jest fakt, że cementy górnicze nie są droższe więcej niż o 10% od swoich odpowiedników bez mikrokrzemionki.

2.19. Cement wiertniczy

Cement wiertniczy cechuje się przede wszystkim długookresową (często od 2 do 3 godzin) niezmiennością konsystencji zaczynów oraz zapraw i betonów wykonanych z tego cementu. Cecha ta jest nieodzowna przy iniekowaniu (cementacji) w celu uszczelnienia górotworu i spękaną konstrukcji betonowej przez otwory wcześniej wywiercone oraz przy transporcie mieszanki na duże (do kilku km) głębokości, co często zdarza się w pracach górniczych i odkrywkowych. Rolę tę spełnia cement o bardzo małej zawartości C_3A (0–3%) i C_3S (do 60%) oraz o mialkości około $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ wg Blaine'a. Konieczny stopień ciekłości i okres jego trwania oraz wymagane końcowe właściwości po stwardnieniu (min 20 MPa) można regulować dobierając odpowiednio dodatki i domieszki. Dobierając domieszki, trzeba uwzględnić, że co 33 m w głąb temperatura w gruncie wzrasta o 1°C . Przy robotach do głębokości powyżej 0,5 km, cement musi być zatem uzupełniony domieszką opóźniającą wiązanie stosownie do występującej wysokiej temperatury otoczenia. Jednocześnie, stwardniały produkt powinien uzyskiwać po 8 godzinach od rozpoczęcia wiązania wytrzymałości 1,5–3,0 MPa.

2.20. Cement biały i cementy innych kolorów

Cementy te posiadają te same cechy wytrzymałościowe, fizyczne i chemiczne, co cement portlandzki. Mogą więc być stosowane do takich samych konstrukcji. Ze względu na ich cenę oraz ideę wyprodukowania stosuje się je tylko w miejscach o celowo zaprojektowanym odpowiednim zabarwieniu (elementy wykładzinowe, zewnętrzne partie betonów, wyprawy tynkarskie).

Cement biały uzyskuje się z surowców pozbawionych tlenków żelaza.

Cementy kolorowe uzyskuje się przez odpowiednie zabarwienie i wypalanie klinkieru lub przez barwienie cementu białego odpowiednimi pigmentami (barwnikami), zwykle tlenkami różnych metali, np. Cr_2O_3 , Mn_2O_3 .

Do wypału klinkieru kolorowego cementu stosuje się olej, a nie węgiel, aby uniknąć zabrudzenia popiołem. Cement ten jest znacznie droższy od innych.

2.21. Cement plastyfikowany

Należy do grupy cementów portlandzkich. Otrzymuje się go przez przemieszenie normalnego klinkieru portlandzkiego i gipsu z dodatkiem substancji powierzchniowo czynnych, ułatwiających zwilżanie cementu wodą.

Przy stosowaniu tego cementu zużywa się do 12% mniej wody zarobowej w celu uzyskania żądanej konsystencji betonu. Obniżenie W/C pociąga za sobą szybszy przyrost wytrzymałości początkowych (do 7 dni) o około 20–50%.

Po stosownej próbie, można wprowadzić do betonu dodatkową porcję upłynniacza.