

**ZESZYTY NAUKOWE
AKADEMII ROLNICZEJ
WE WROCŁAWIU**

NR 510

**ROZPRAWY
CCXXVII**

STANISŁAW KLIN

**ANALYSIS OF THE VARIATION OF STRENGTH
AND DEFORMABILITY OF GYPSUM
IN VARIOUS STATES OF STRESS AND HUMIDITY**

INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING



WROCLAW 2005

STANISŁAW KLIN

**ANALIZA ZMIENNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI
I ODKSZTAŁCALNOŚCI GIPSU W RÓŻNYCH
STANACH NAPRĘŻEŃ I WILGOTNOŚCI**

INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA



WROCŁAW 2005

Opiniodawca

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński

Redaktor merytoryczny

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Czamara

Opracowanie redakcyjne i korekta

mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Łamanie

Halina Sebzda

Projekt okładki

Grażyna Kwiatkowska

© Copyright by Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 2005

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISSN 0867-7964

ISSN 0867-1427

WYDAWNICTWO AKADEMII ROLNICZEJ WE WROCŁAWIU

Redaktor naczelny – J e r z y S o b o t a

ul. Sopocka 23, 50-344 Wrocław, tel./fax (071) 328-12-77

e-mail: wyd@ozi.ar.wroc.pl

Nakład: 100 + 16 egz. Ark. druk. 19,75

Druk i oprawa: F.P.H. „Elma”

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.....	13
1.1. Wprowadzenie.....	13
1.2. Rys historyczny zastosowań gipsu w budownictwie	16
2. Analiza zagadnienia wytrzymałości i mikrostruktury gipsu w oparciu o literaturę naukowo-badawczą.....	25
2.1. Wpływ technologii wytwarzania spoiwa gipsowego na jego właściwości.....	25
2.2. Badania związków między porowatością i mikrostrukturą zaczynów gipsowych a wytrzymałością wyrobów	32
2.3. Badania wytrzymałości i odkształcalności tworzyw gipsowych w różnych stanach naprężeń i wilgotności	40
2.4. Wpływ technologii wytwarzania wyrobów i dodatków specjalnych na wytrzymałość i odporność gipsu na działanie wody	49
2.4.1. Wpływ technologii wytwarzania wyrobów	49
2.4.2. Domieszki specjalne poprawiające jakość wyrobów gipsowych.	50
2.5. Obliczenia i wymiarowanie elementów gipsowych.....	51
3. Cel i zakres pracy, metody, techniki oraz narzędzia badawcze	53
4. Propozycja wprowadzenia zunifikowanego nazewnictwa w normalizacji wytrzymałościowej gipsu.	58
5. Wpływ technologii prażenia na statystyczne cechy spoiw gipsowych	61
5.1. Uwarunkowania surowcowe jednorodności spoiw gipsowych naturalnych i syntetycznych.....	61
5.2. Wpływ technologii prażenia surowców na jednorodność produktów gipsowych.....	66
5.3. Przedmiot i zakres statystycznych analiz gipsu półwodnego	68
5.4. Elementy rachunku statystycznego stosowane przy opracowywaniu wyników badań	70
5.5. Wyniki badań i rezultaty analiz.....	71
5.5.1. Analiza jednorodności surowców naturalnych do produkcji gipsu	71
5.5.2. Wpływ technologii produkcji spoiw na jednorodność ich składu mineralnego i chemicznego.....	73
5.5.3. Wpływ technologii prażenia minerałów na wybrane cechy fizyczne i technologiczne spoiw gipsowych.....	78
5.5.4. Analiza jednorodności uziarnienia gipsu budowlanego w powiązaniu z technologią produkcji spoiw	82
5.5.4.1. Wpływ technologii mielenia na uziarnienie spoiwa gipsowego	82
5.5.4.2. Analiza uziarnienia gipsu budowlanego z różnych technologii produkcji.....	83

5.5.4.3. Analiza metod oznaczeń składu granulometrycznego gipsu budowlanego.....	85
5.5.4.4. Analiza składu granulometrycznego gipsu budowlanego z surowców naturalnych i syntetycznych z różnych technologii produkcji.....	87
5.5.5. Jednorodność konsystencji normowej spoiw gipsowych z surowców naturalnych z różnych technologii produkcji.....	92
5.5.6. Wpływ technologii produkcji spoiw z surowców naturalnych na rozkłady statystyczne i jednorodność wytrzymałości gipsu budowlanego	93
5.5.6.1. Oznaczenie normowej wytrzymałości spoiw gipsowych	93
5.5.6.2. Statystyczne rozkłady wytrzymałości gipsu	93
5.6. Zależności między wytrzymałością gipsu wilgotnego f_{2h} a jego wytrzymałością po wysuszeniu	101
5.7. Propozycje klas wytrzymałości gipsu budowlanego	104
6. Badania wybranych właściwości poszczególnych frakcji gipsu budowlanego	110
6.1. Przedmiot i cel badań	110
6.2. Gęstość pozorna i powierzchnia właściwa frakcji składowych gipsu budowlanego.....	111
6.3. Stopień hydratacji i wytrzymałość zaczynów z poszczególnych frakcji rozsegregowanego gipsu budowlanego.....	115
6.4. Gęstość pozorna i wytrzymałość stwardniałych zaczynów gipsowych o różnym uziarnieniu.....	118
7. Wpływ uziarnienia spoiwa gipsowego na cechy świeżych zaczynów oraz na właściwości gipsu dojrzałego.....	122
8. Metody pomiarów i analiza właściwości zaczynów gipsowych w stanie świeżym	124
8.1. Badanie szybkości wiązania gipsu	124
8.2. Pomiar konsystencji zaczynów jako miernika wodozadržności spoiw gipsowych	127
8.2.1. Metody pomiarów konsystencji zaczynów	127
8.2.2. Własne badania porównawcze konsystencji zaczynów gipsowych dla różnych poziomów W/G według różnych metod	128
9. Badania i analizy własne wytrzymałości gipsu na rozciąganie.....	133
9.1. Ocena ogólna różnych metod badawczych oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie.....	133
9.2. Oznaczenia wytrzymałości gipsu na rozciąganie różnymi metodami w stanie suchym i nawilgoconym.....	136
10. Losowy rozkład wytrzymałości i wytrzymałość gwarantowana stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie suchym	149
10.1. Opis wyników badań	149
10.2. Losowe rozkłady wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym	150
10.3. Wytrzymałość średnia i wytrzymałość gwarantowana stwardniałych zaczynów gipsowych	155

11. Opis analityczny wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych w różnych stanach naprężeń.....	161
11.1. Funkcje analityczne opisujące wytrzymałość na ściskanie	161
11.2. Funkcje opisujące wytrzymałości na rozciąganie.....	163
11.3. Związki analityczne między wytrzymałościami na rozciąganie i ściskanie ..	165
11.4. Empiryczne związki pomiędzy porowatością a wytrzymałością na ściskanie stwardniałych zaczynów gipsowych.....	167
11.5. Analiza zmienności wytrzymałości gipsu budowlanego GB-N1 w losowych dostawach rynkowych z okresu wielu lat.....	168
11.6. Statystyczna zależność między gęstością pozorną i wytrzymałością na ściskanie stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego.....	173
12. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie wilgotnym.....	175
12.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w stanie nawilgoconym	175
12.2. Wytrzymałość na ściskanie w stanie nawilgoconym	177
13. Wpływ stabilnych temperatur prażenia w nowoczesnych piecach obrotowych i sterowanego procesu mielenia na właściwości gipsu budowlanego.....	180
13.1. Technologia stabilnego prażenia gipsu w piecach obrotowych przeponowych	180
13.2. Charakterystyka wodożądności gipsu budowlanego GB-N3	181
13.3. Szybkość wiązania gipsu budowlanego GB-N3	182
13.4. Charakterystyka wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsu budowlanego GB-N3 w zależności od wskaźnika W/G.....	183
14. Analiza porównawcza właściwości chemicznych, fizycznych i wytrzymałościowych gipsów syntetycznych i naturalnych. Badania własne.	188
14.1. Znaczenie gipsów syntetycznych w gospodarce materiałowej.....	188
14.2. Analiza porównawcza właściwości chemicznych oraz składu mineralnego gipsów syntetycznych i naturalnych	189
14.3. Analiza porównawcza właściwości technologicznych i wytrzymałościowych gipsów syntetycznych. Badania własne	195
14.3.1. Charakterystyka uziarnienia.....	195
14.3.2. Podstawowe cechy technologiczne i wytrzymałościowe gipsów syntetycznych i naturalnych.	196
14.3.2.1. Wodożądność i konsystencja świeżych zaczynów z gipsów syntetycznych i naturalnych	196
14.3.2.2. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów z gipsów syntetycznych w stanie suchym i nawilgoconym – wyniki badań i analityczne funkcje opisujące	200
15. Ultradźwiękowa ocena wytrzymałości na ściskanie stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego	209
16. Nośność elementów gipsowych na zginanie w stanie suchym.....	212
16.1. Rozkład odkształceń i naprężeń w przekrojach normalnych zginanych belek gipsowych	212
16.2. Analiza nośności na zginanie	217

17. Odkształcalność doraźna i moduły sprężystości stwardniałych gipsów w stanie suchym i nawilgoconym	222
17.1. Odkształcalność i moduły sprężystości suchego gipsu w jednoosiowym stanie naprężeń ściskających	222
17.2. Odkształcenia doraźne i moduły sprężystości gipsu nawilgoconego w jednoosiowym stanie naprężeń ściskających	225
17.2.1. Odkształcenia doraźne gipsu w stanie nawilgoconym.....	225
17.2.2. Badania odkształcalności doraźnej nawilgoconych gipsów o różnym W/G	230
17.3. Odkształcenia „włókien” skrajnych w elementach zginanych w stanie suchym	232
17.4. Moduły sprężystości gipsu w funkcji jego wytrzymałości na ściskanie	236
17.5. Porównawcze oznaczenia ugięć i modułów sprężystości belek i płyt przy zginaniu w stanie suchym	238
18. Zmiany objętościowe gipsu w procesie wysychania i ponownego nawilgacania.....	242
18.1. Badania zmian liniowych świeżych zaczynów gipsowych w procesie odsychania	242
18.2. Badania pęcznienia suchych gipsów w procesie nawilgacania	245
19. Wpływ obecności i migracji wody na właściwości stwardniałego wyrobu gipsowego	248
19.1. Spadek wytrzymałości stwardniałego gipsu w wyniku pierwszego zawilgocenia.....	248
19.2. Zmiany wytrzymałości gipsu w wyniku kolejnych cykli nawilgoceń i wysuszeń.....	252
19.3. Badania przepuszczalności wody przez gips.....	253
19.4. Opis porowatości zaczynów gipsowych na podstawie parametrów filtracji wody	256
19.5. Podsiąkanie kapilarne wody przez gips	264
19.5.1. Rozważania teoretyczne	264
19.5.2. Badania podsiąkania kapilarnego wody przez gips	267
20. Podsumowanie i wnioski	273
20.1. Podsumowanie	273
20.2. Wnioski szczegółowe	275
Literatura	283
Normy związane	301
Tablice	305

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

OZNACZENIA LITERAMI ALFABETU ŁACIŃSKIEGO

a [°]	– kąt nachylenia krzywych zależności kapilarnego podsiąkania $h = f(\sqrt{\tau})$
a [m]	– ugięcie elementów zginanych według oznaczeń EC
d_i [mm]	– ekwiwalentna średnica ziaren danej frakcji
e, e_o [m]	– mimośród siły, mimośród początkowy
f [MPa]	– wytrzymałość
f_c [MPa]	– wytrzymałość normowa cementu
f_{cc} [MPa]	– wytrzymałość normowa cementu na ściskanie
f_{ctb} [MPa]	– wytrzymałość normowa cementu na rozciąganie przy zginaniu
f_g [MPa]	– wytrzymałość gipsu w stanie suchym
f_{gc} [MPa]	– wytrzymałość gipsu na ściskanie
$f_{gc,2h}$ [MPa]	– wytrzymałość normowa na ściskanie spoiwa gipsowego po okresie dojrzewania 2 h
f_{gd} [MPa]	– wytrzymałość obliczeniowa gipsu w wyrobie
f_g^G [MPa]	– wytrzymałość gwarantowana spoiwa gipsowego
f_{gk} [MPa]	– wytrzymałość charakterystyczna gipsu w wyrobie
f_{gm} [MPa]	– wytrzymałość średnia gipsu
f_{gt} [MPa]	– wytrzymałość gipsu na rozciąganie osiowe
f_{gt} [MPa]	– wytrzymałość gipsu na rozciąganie, wyznaczona metodą rozłupywania walców
f_{gtb} [MPa]	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu
$f_{gtb,2h}$ [MPa]	– wytrzymałość normowa na rozciąganie przy zginaniu spoiwa gipsowego, po okresie dojrzewania 2 h
f_{gv} [MPa]	– wytrzymałość gipsu na ścinanie
f_g^w [MPa]	– wytrzymałość gipsu w stanie nawilgoconym
h, h_i [%]	– stopień hydratacji, stopień hydratacji i-tej frakcji spoiwa gipsowego
i	– spadek hydrauliczny
k [m·s ⁻¹]	– współczynnik filtracji wody przez gips według równania Darcy
$k_f = f_g^G/f_{gm}$	– wskaźnik, stosunek wytrzymałości gwarantowanej do wytrzymałości średniej
p [%]	– porowatość
p_o [%]	– porowatość pozorna dojrzałego zaczynu gipsowego
p_f [%]	– porowatość powierzchniowa

p_i [%]	– zawartość procentowa frakcji składowej w całej próbie spoiwa gipsowego
p_k [MPa]	– ciśnienie kapilarne
q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	– wydatek przepływu wody przez pojedynczą ideową kapilarę w strukturze gipsu
r [$\text{\AA}=10^{-10}m$]	– promień umownej kapilary
s [MPa]	– średnie odchylenie standardowe wytrzymałości
t_{kw} [min]	– czas końca wiązania
t_{pw} [min]	– czas początku wiązania
v [$m \cdot s^{-1}$]	– szybkość przepływu wody
w [%]	– wilgotność masowa próbki
w_h [%]	– wodozadność hydratacji spoiwa gipsowego
w_n [%]	– wodozadność normowa spoiwa gipsowego
A_g [m^2/g]	– powierzchnia właściwa spoiwa gipsowego
A_{gB} [m^2/g]	– powierzchnia właściwa spoiwa gipsowego według Blaine'a
AII	– anhydryt II nierozpuszczalny
AIII	– anhydryt III
A(TR)	– anhydryt trudno rozpuszczalny
$CS=CaO \cdot SO_3=CaSO_4$	– siarczan wapnia
CSH	– hydraty siarczanu wapnia ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
E [MPa]	– moduł sprężystości Younga
E_{gb}^+ [MPa]	– moduł odkształceń ściskanych włókien elementu zginanego
E_{gb}^- [MPa]	– moduł odkształceń rozciąganych włókien elementu zginanego
E_{gb} [MPa]	– moduł sprężystości obliczony na podstawie równań opisujących stany ugięcia
E_{gc} [MPa]	– moduł sprężystości gipsu w jednoosiowym stanie naprężeń ściskających
E_{gt} [MPa]	– moduł sprężystości gipsu w zakresie naprężeń rozciągających
E_s [MPa]	– moduł sprężystości cieczy
F [kN]	– siła działająca na element, konstrukcję
F_d [kN]	– siła od obciążeń obliczeniowych
F_k [kN]	– siła od obciążeń charakterystycznych
H [m]	– maksymalna wysokość podsiąkania kapilarnego
$H = H_2O$	– woda krystaliczna
$K_g = f_g^w/f_g$	– współczynnik rozmiękania gipsu, stosunek wytrzymałości gipsu w stanie nawilgoconym do wytrzymałości gipsu w stanie suchym
$K_{gc} = f_{gc}^w/f_{gc}$	– współczynnik rozmiękania w zakresie wytrzymałości na ściskanie

$K_{gt} = f_{gt}^v / f_{gt}$	– współczynnik rozmiękania w zakresie wytrzymałości na rozciąganie
$Q [m^3 \cdot s^{-1}]$	– wydatek przepływu wody przez przekrój próbki
S	– globalny współczynnik bezpieczeństwa nośności elementu, konstrukcji

OZNACZENIA LITERAMI ALFABETU GRECKIEGO

$\alpha_1 - \alpha_{10}$	– współczynniki wartości względnych
$\varepsilon [‰]$	– odkształcenie materiału
$\varepsilon_v^+ [‰]$	– pęcznienie gipsu w wyniku nawilgocenia
$\varepsilon_c [‰]$	– odkształcenie sprężyste
$\varepsilon_g [‰]$	– odkształcenie gipsu
$\varepsilon_p [‰]$	– odkształcenie pełzania
$\varepsilon_{pl} [‰]$	– odkształcenie plastyczne
$\varepsilon_t [‰]$	– odkształcenie reologiczne, zmienne w czasie
$\varepsilon_{tot} [‰]$	– odkształcenie całkowite
$\phi(s) [\%]$	– częstość sumaryczna w rozkładach losowych wytrzymałości
γ_f	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa po stronie obciążeń
γ_m	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa z uwagi na nośność materiału
$\eta_w [Pa \cdot s]$	– dynamiczny współczynnik lepkości wody
$\eta [Pa \cdot s]$	– parametr lepkości tłumika w modelu reologicznym M-V
φ	– współczynnik wyboczeniowy elementu ściskanego
$\varphi_p = \varepsilon_p / \varepsilon_c$	– charakterystyka pełzania, współczynnik pełzania
λ	– smukłość elementu
$\nu [m^2 \cdot s^{-1}]$	– lepkość kinematyczna wody
$\nu_g [\%]$	– współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu
$\nu_{gc} [\%]$	– współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu na ściskanie
$\nu_{gcs} [\%]$	– sumaryczny współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu na ściskanie
$\nu_{gct} [\%]$	– współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu na rozciąganie
$\nu_{gtb} [\%]$	– współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu na rozciąganie przy zginaniu
$\nu_{gtbs} [\%]$	– sumaryczny współczynnik zmienności wytrzymałości gipsu na rozciąganie przy zginaniu
$\rho_p [g \cdot cm^{-3}]$	– gęstość pozorna
$\sigma [MPa]$	– naprężenie
$\sigma_A [N \cdot m^{-1}]$	– napięcie powierzchniowe

τ [Pa]	– naprężenia styczne
τ_0 [Pa]	– próg płynięcia
$\omega' = 1/\omega = G/W$	– wskaźnik gipsowo-wodny
$\omega = W/G$	– wskaźnik wodno-gipsowy
$\delta_f = \sigma_{gc} / f_{gc}$	– wskaźnik poziomu naprężeń σ_{gc} w stosunku do wytrzymałości na ściskanie f_{gc}

OZNACZENIA TECHNOLOGII PRAŻENIA GIPSU I SPOIW GIPSOWYCH

PO	– prażenie gipsu w piecach obrotowych
PK	– prażenie gipsu w prażarkach kotłowych
POP	– prażenie gipsu w piecach obrotowych przeponowych
MPM	– młyny prażąco-mielące
GB-N1	– gips budowlany z surowców naturalnych, prażony w piecach obrotowych PO
GB-N2	– gips budowlany z surowców naturalnych, prażony w prażarkach kotłowych PK
GB-N3	– gips budowlany z surowców naturalnych, prażony w piecach POP
GS-K	– gips syntetyczny z odsiarczania spalin z węgla kamiennego
GS-B	– gips syntetyczny z odsiarczania spalin z węgla brunatnego

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Gips jest powszechnie stosowanym materiałem budowlanym, cechującym się licznymi walorami, a mianowicie: szybkimi przyrostami wytrzymałości; bardzo szybką rotacją form w zakładach prefabrykacji; łatwością łączenia spoiw gipsowych z materiałami odpadowymi takimi jak: żużle piecowe, słoma, trociny, wióry; łatwością wykonywania elementów prefabrykowanych monolitycznych; komfortowym stopniem wykończenia powierzchni licowych elementów po ich rozformowaniu, bez potrzeby wykonywania przecierek, tapetowania; dobrą termo- i dźwiękochłonnością; wysoką odpornością na mróz i ogniochronnością; odpornością na zagrzybenie; bezkonkurencyjnie najmniejszą promieniotwórczością naturalną w grupie mineralnych spoiw budowlanych.

Wyszczególnione powyżej walory gipsu – w zakresie jego zastosowań do robót wykończeniowych i w produkcji prefabrykatów – dają korzystne efekty techniczne, ekonomiczne i użytkowe.

Początki stosowania gipsu w budownictwie polskim sięgają XI wieku (kolegiata w Wiślicy). Intensywny rozwój budownictwa z gipsu w Polsce odnotowano w latach 1922–1939 oraz w latach sześćdziesiątych XX wieku. W latach późniejszych gips stale był obecny w wykonawstwie budowlanym. W tym okresie wykonywano ściany konstrukcyjne z gipsobetonów lanych w szalunkach oraz metodą wznoszenia z bloczków i pustaków. Rozwinięto technologię wznoszenia ścian z prefabrykowanych dyli gipsowych. Stosowano pustaki i dyle gipsowe otworowane do wypełnień stropów gęstożebrowych. Wdrożono nawet technologię gipsowych płyt ściennych średniogabarytowych, do wznoszenia budynków parterowych w systemach prefabrykowanych.

Niestety, dla tego budownictwa nie stworzono – synchronicznie z rozmachem zastosowań gipsu w Polsce i na świecie, szczególnie w byłym ZSRR – normatywnych podstaw do wytrzymałościowej klasyfikacji statystycznej spoiw gipsowych, a także podstaw do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych: murów litych, murów z prefabrykatów, filarów, stref lokalnego docisku, hybrydowych konstrukcji gipsowo-żelbetowych. Poza tymczasowymi i niepełnymi wytycznymi z lat sześćdziesiątych (Meuś, Rzepecki [200]), dostosowanymi do obliczeń metodą naprężeń dopuszczalnych, w analogii do obliczeń konstrukcji murowych, praktycznie w okresie dalszych 40 lat nie dokonano żadnych istotnych nowelizacji. Brak jest zupełnie ustaleń normatywnych w tym zakresie, a istniejące normy dotyczące konstrukcji murowych [432, 433] nie obejmują specyfiki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych ścian wznoszonych z elementów gipsowych.

Problematyka dotycząca metod obliczeń nośności elementów i konstrukcji z gipsu nie została podjęta w licznych i reprezentatywnych monografiach autorów rosyjskich: Wołżenski i Ferronska [352] z 1973 r., Wołżenski, Stambułko i Ferronska [354] z 1977 r., Worobiew, Nestor [355] z 1983 r., Ferronska [63] z 1984 r., Liaszkiewicz [180] z 1989 roku. Podobnie dotyczy to autorów monografii w wydaniu polskim, dotyczących budownictwa z gipsu: Borowskiego z 1954 r. [21], Dutkowskiego z 1960 r. [56], Urbana z 1975 r. [338], Pietronia z 1990 r. [269] i Mikosia z 1994 r. [204] oraz monografii autorów niemieckich: Volkarta z 1976 r. [340], Hanuscha z 1979 r. [87] a także wydawnictwa Przemysłu Gipsowego USA z 1971 roku [334].

Powyższy stan rzeczy wynika ze skomplikowanych właściwości wytrzymałościowych gipsu stwardniałego:

- bardzo dobrych na ogół w „górnym” stanie nośności, czyli w stanach suchych;
- zdegradowanych w „dolnym” stanie nośności, czyli w awaryjnym stanie pełnego nawilgocenia, kiedy odnotowuje się duże spadki wytrzymałości oraz spadki modułów sprężystości, wzrost odkształceń trwałych oraz tendencję do dużych odkształceń pełzania gipsu w strefach nawilgoconych, które narastają sukcesywnie w czasie trwania obciążeń długotrwałych, a stabilizują się po osiągnięciu stanu powietrzno-suchego. Przykładowo, stosowany najczęściej w prefabrykacji elementów zaczyn gipsowy o konsystencji półciekłej, ze wskaźnikiem $W/G = 0,65$, po stwardnieniu cechuje się wytrzymałością słupową na ściskanie w stanie suchym wynoszącą $f_{gc,s} = 9,4$ MPa, co przewyższa wartości wytrzymałości na ściskanie $f_k = 2,9-6,2$ MPa dla muru z cegły pełnej klasy 15 na zaprawie o wytrzymałości $f_m = 1,0-2,0$ MPa [432, 433]. W przypadku pełnego nawilgocenia stwardniałego gipsu o $W/G = 0,65$ jego wytrzymałość słupowa na ściskanie spada do wartości $f_{gc,s}^w = 2,8$ MPa. Jest to poziom wytrzymałości w dalszym ciągu wyższy od najmniejszej wytrzymałości charakterystycznej $f_k = 0,8$ MPa dla murów z lekkiego betonu komórkowego [433].

Z powyższych rozważań wynika, że w przypadku analiz konstrukcyjnych ścian gipsowych w istniejących już jednorodzinnych budynkach z gipsu w niskiej zabudowie, na ogół parterowych lub dwukondygnacyjnych z lekkim dachem drewnianym, wykonanych w latach ubiegłych – nie występują problemy ze spełnieniem „dolnych” stanów nośności, natomiast problemem jest różnica odkształceń doraźnych i odkształceń pełzania między strefą suchą budynku a strefą awaryjnych lokalnych nawilgoceń. Różnice tych odkształceń zależą od poziomu naprężeń w elemencie, stopnia nawilgocenia oraz od czasu potrzebnego na wysuszenie do stanu powietrzno-suchego.

Powyższe właściwości gipsu w stanie nawilgoconym muszą stanowić ograniczenia dla zakresu jego zastosowań w budownictwie jako „samodzielnego” materiału konstrukcyjnego.

Natomiast dla wykonanych w przeszłości i eksploatowanych do dziś budynków ze ścianami konstrukcyjnymi z gipsu niezbędne jest opracowanie mechaniki gipsu do oceny bezpieczeństwa tego typu obiektów, a także rozwiązywania problemów bieżącej eksploatacji w zakresie: inwentaryzacji konstrukcyjno-wytrzymałościowej, orzeczeń o stanie technicznym, ekspertyz oraz postanowień projektowych i wykonawczych, gdyby wystąpiły objawy wymagające modernizacji lub wzmocnień obiektu, a także w przypadkach

konieczności ustalenia trwałości budynków oraz określenia bezpieczeństwa dla skrajnych narażeń w postaci powodzi lub pożaru z akcją gaśniczą.

Rozwiązanie wykazanego zestawu problemów jest możliwe jedynie przez dogłębne rozpoznanie naukowo-badawcze „dolnych” stanów nośności i przygotowanie podstaw do normatywnych orzeczeń w tematach składowych. Wymaga to praktycznie od nowa opracowania podstaw w zakresie: ustalania charakterystycznych i obliczeniowych „górných” i „dolnych” wytrzymałości gipsu stwardniałego w funkcji W/G, określenia „górných” i „dolnych” charakterystyk odkształcalności gipsu dla obciążeń krótkotrwałych i długotrwałych, zdeterminowania stanów granicznych nośności i użytkowania.

Dopiero w nowszych rozwiązaniach systemowych budynków z gipsu, stosowanych w Polsce od 1985 r., dopuszczonych do stosowania świadectwami wydanymi w latach: 1985–1997 [232, 336, 175, 285, 57], problem degradacji wytrzymałościowej gipsu w wyniku nawilgocenia przestał mieć decydujące znaczenie, z powodu wbudowywania w gipsowe ściany nośne betonowego szkieletu, który zapewnia przejście obciążeń w przypadku pęcznienia nawilgoconego gipsu. Dla tego typu budynków występuje jednak potrzeba znajomości elementów mechaniki ścian nośnych hybrydowych oraz znajomości wytrzymałości i odkształcalności ścian wewnętrznych bez szkieletu betonowego, a współpracujących z całym budynkiem na zasadzie przyległych tarcz.

Produkcja ściennych pustaków gipsowych o określonych klasach wytrzymałościowych wymaga opracowania normalizacji w tym zakresie, w oparciu o naukowo-badawcze rozpoznanie zmienności wytrzymałości gipsów stwardniałych w różnych stanach naprężeń i wilgotności. Wymogi jednorodności wytrzymałości wyrobów stawiają potrzebę znajomości zmienności cech wytrzymałościowych i technicznych spoiw gipsowych z surowców naturalnych i syntetycznych, z różnych technologii prażenia i mieleńia, aby ich cechy były statystycznie przewidywalne, analitycznie opisane i normatywnie określone.

Opracowane w niniejszej dysertacji zagadnienia naukowo-badawcze stanowią mogą właśnie podstawy do rozstrzygnięcia wyżej wymienionych problemów, związanych z praktyką zastosowań gipsu w budownictwie.

Rozdział 2 pracy zawiera skróconą wersję opracowanej monografii na temat analizy stanu wiedzy w zakresie wytrzymałości i mikrostruktury gipsu. Rozdziały nr 3–20 zawierają oryginalne badania i analizy, stanowiące własne osiągnięcia twórcze, dotyczące trzech głównych bloków zagadnień naukowo-badawczych:

- analiz zmienności cech spoiw gipsowych w ujęciu statystycznym;
- badań własnych i opisów analitycznych elementów mechaniki gipsu stwardniałego;
- kompleksowych badań i opisów analitycznych złożonych relacji woda – stwardniały gips.

Niezależnie od aplikacyjnego adresowania wykonanych w pracy badań i analiz kierunku wykonanych budynków z gipsu i przyszłych zastosowań gipsu w budownictwie mieszkaniowym, wyselekcjonowany układ treści pracy został ustalony z myślą, aby opracowane kompleksy zagadnień mogły mieć wykorzystanie uniwersalne, niezależnie od kierunku szczegółowych zastosowań gipsu.

Wiele serii wyników, wykonanych w bieżących badaniach kontrolnych spoiw przez przemysł gipsowy oraz własne ich analizy statystyczne i merytoryczne, będą publikowane po raz pierwszy. Dystans czasu w stosunku do części wyników oraz zastosowana anonimowość w stosunku do całości populacji tych danych sprawia, że ich publikacja jest możliwa bez naruszenia rynkowych interesów Stron.

Autor składa podziękowania Jednostkom przemysłu gipsowego w Polsce za udzieloną pomoc i współpracę. Autor składa podziękowania także wszystkim Tym, którzy pomogli w realizacji laboratoryjnych i poligonowych „ścieżek” badawczych.

Główne serie badań w zakresie wytrzymałości i odkształcalności gipsu budowlanego oraz w zakresie wpływu obecności i migracji wody przez gips wykonał autor w warunkach laboratoryjnych. W szerokim rozpoznaniu problematyki naukowo-badawczej i technicznej, dotyczącej spoiw gipsowych i wyrobów z gipsu, były pomocne: studia literatury naukowej, wizje lokalne przemysłowej produkcji spoiw gipsowych, wizje lokalne przemysłowej i poligonowej produkcji elementów z gipsu, opracowania własne dotyczące optymalizacji technologii produkcji i badań kontrolnych systemowych pustaków gipsowych, studia opracowań studialno-projektowych dotyczących budownictwa z gipsu, wizja lokalna i ocena stanu technicznego wykonanego budownictwa z gipsu w Polsce [134].

W sytuacji możliwego do wystąpienia nadmiaru gipsów syntetycznych, uzyskiwanych z powszechnego odsiarczania spalin, może pojawić się problem wykorzystania zasobów tego gipsu, w tym do efektywnych kierunków zastosowań w budownictwie ekologicznym. Już dzisiaj powszechnie stosowane szkielety żelbetowe budynków słupowo-płytowych dają pełnię swobody wykończeniowej zabudowy zewnętrznymi ścianami osłonowymi i wewnętrznymi z pustaków gipsowych (fot. 3.a). Nie można wykluczyć zamówień na budynki z szerokim zastosowaniem gipsu – z uwagi na aspekty promieniotwórczości naturalnej materiałów budowlanych – które mogą być realizowane w systemowych rozwiązaniach konstrukcyjnych, ze ścianami z pustaków gipsowych, z wbudowanym układem betonowych słupów nośnych. Faktem są indywidualne zamówienia na projekty parterowych budynków lotniskowych z gipsu. Stosowanie gipsu w takim zakresie jest niemożliwe bez opracowania niezbędnych elementów mechaniki gipsu i normalizacji w zakresie wymogów wytrzymałości i odkształcalności.

1.2. Rys historyczny zastosowań gipsu w budownictwie

Najstarsze ślady zastosowań gipsu naturalnego w budownictwie jako surowca sięgają 7500 r. p.n.e. i zostały odkryte w Anatolii (Azja Mniejsza), gdzie sproszkowany gips po zmieszaniu z wodą stosowany był jako tynk i podłoże pod freski [272]. Spoiwo gipsowe $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – uzyskane z dehydratacji gipsu dwuwodnego $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – należy w historii budownictwa do najstarszych i najbardziej znanych materiałów wiążących. Mikoś [204] podaje, w rysie historycznym dotyczącym zastosowań spoiw gipsowych w budownictwie na świecie i w Polsce, między innymi następujące przykłady:

- Stosowanie spoiwa typu estrichgips i kruszywa z surowego kamienia gipsowego, jako mieszanki betonu gipsowego, do budowy piramid w starożytnym Egipcie.
- Budowę świątyń z płyt gipsowych odlewanych w formach na obszarze Mezopotamii około 3200 roku p.n.e.
- Udokumentowane archeologicznie zastosowania w Polsce gipsu jako spoiwa do zapraw do budowy murów kościoła przedromańskiego w Wiślicy, do budowy murów kościoła romańskiego w XI w. w Wiślicy, a także w tym czasie do wznoszenia murów kościoła romańskiego w Kijach k. Pińczowa. W okresie średniowiecza stosowano gips jako spoiwo do zapraw przy budowie niektórych murów Zamku Wawelskiego w Krakowie, przy budowie kościoła Św. Stanisława w Gnieźnie. Dalsze przykłady odległych w czasie zastosowań gipsu w budownictwie w Polsce to między innymi: sztukateria w farze w Kamieniu Dolnym, a także w kościołach Zamościa i Lublina. W wieku XVIII wykonano z gipsu elementy dekoracyjne we wnęce kościoła Św. Piotra w Krakowie, na zamkach w Wiśniczu i Łańcucie, wnękę kościoła Św. Piotra i Pawła w Wilnie, sztukaterie w Pałacu Łazienkowskim w Warszawie.
- Po pierwszej wojnie światowej stosowano powszechnie we Francji spoiwo gipsowe do zapraw i budowy ścian, w bardzo szerokim zakresie odbudowy zniszczonych miast w strefie walk frontowych. Wcześniejsze zastosowanie gipsu w mieszkaniowym budownictwie komunalnym w XVII wieku we Francji dokumentuje Pickett [267].
- W 1890 roku A. Sachett w USA wykonuje projekt na okładzinę ścienną, złożoną na przemian z warstw papieru i gipsu. Wynalazek ten był nadal rozwijany w USA, jako prekursor obecnych płyt gipsowo-kartonowych GK, a płyty te zdobyły znaczenie w zastosowaniu do robót wykończeniowych.
- W okresie między pierwszą a drugą wojną światową rozwinięto w Europie produkcję płyt GK w Anglii i na Łotwie. Od 1921 roku Japonia zaczęła stosować gips syntetyczny jako produkt odpadowy przy produkcji kwasu fosforowego. Tuż przed drugą wojną światową technologie budowania z wykorzystaniem spoiw i wyrobów gipsowych są stosowane także w krajach skandynawskich. Nowoczesny przemysł gipsowy rozwija się w Niemczech i Austrii.
- Podczas drugiej wojny światowej następuje znaczny rozwój produkcji płyt GK w USA, a w byłym Związku Radzieckim stosowano gips w dużych ilościach jako materiał konstrukcyjny do wznoszenia wojskowych obiektów dalekiego zaplecza.
- Po drugiej wojnie światowej, wobec dużych zniszczeń substancji budowlanej, ponownie sięgnięto po gips jako spoiwo do wznoszenia budynków monolitycznych i prefabrykowanych. W tym okresie opracowano szereg ciekawych rozwiązań, zebranych w monografiach przez Meusia i Rzepeckiego [200]: płyt ściennych typu plaster pszczeli „Paramount” w Anglii do budowy ścian działowych, bloki ścienne do wznoszenia ścian budynków parterowych systemu Bellock, płyty gipsowe wielokanałowe typu „Gipsolite”, ścienne i specjalne dyle stropowe [24, 25]. W byłym ZSRR rozwinięto na szeroką skalę budownictwo z prefabrykowanych płyt gipsowych wielkowymiarowych oraz prefabrykowane kabiny sanitarne z płyt gipsowych i gipso-cementowych [352, 354].
- Po drugiej wojnie światowej następuje gwałtowny rozwój przemysłu gipsowego w zakresie płyt GK (Firma RIGIPS w 1948 r. w Niemczech, druga Firma KNAUF

w latach 1958–1959 rozpoczęła w Niemczech produkcję płyt GK). W latach sześćdziesiątych rozwinięto produkcję maszyn, sprzętu i kształtowników metalowych stelaży do suchej zabudowy z zastosowaniem płyt GK.

Bogate są doświadczenia w zakresie zastosowań spoiw gipsowych do elementów konstrukcyjnych, do budowy ścian i stropów budynków mieszkalnych. Szersze zainteresowanie gipsem – jako materiałem konstrukcyjnym – rozpoczęło się w Polsce po drugiej wojnie światowej i było spowodowane deficytem materiałów budowlanych, wobec ogromnych zniszczeń powojennych. Wtedy okazało się, że ani biura projektów, ani praktyka wykonawcza nie znają technologii stosowania gipsu i gipsobetonów w charakterze konstrukcyjnym. Podjęte w kraju intensywne prace badawcze przez Instytut Budownictwa Mieszkaniowego (zespół inż. J. Borowskiego) oraz w Instytucie Techniki Budowlanej (Pracownia Gipsów: inż. H. Hartwig, inż. J. Dutkowski, inż. L. Urban i inni) dały pierwsze podstawy doświadczalne ustalania prawidłowych kierunków zastosowań gipsu oraz podstawy pierwszych rozwiązań budowlanych, sprzętu i urządzeń do technologii robót gipsowych. Wyniki prac z tego okresu opublikowano w sprawozdaniach badawczych IBM [19] w 1959 r., ITB [95] w 1955 r., w monografiach: Borowskiego w 1954 r. [21], Meusia i Rzepeckiego w 1965 r. [200], Dutkowskiego w 1960 r. [56], Urbana z 1975 roku [338]. Równolegle podjęto w placówkach naukowych prace badawcze nad wykorzystaniem gipsu: na Politechnice Warszawskiej w zespole prof. W. Skalmowskiego [304, 305] i prof. E. Szymańskiego [302, 303, 324, 325, 326], na Politechnice Krakowskiej przez prof. E. Komarnickiego [139, 140, 141, 142], na Politechnice Wrocławskiej przez prof. S. Mazura [196, 197]. Duży wkład w zakresie organizacji i mechanizacji robót oraz systemowych rozwiązań projektowych wniosły Instytut Organizacji i Mechanizacji Budownictwa oraz Biuro Standardów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego w Warszawie (opracowania [16] z 1958 r. i [34] z 1961 r.).

a)



b)



c)



Fot. 1.1. Przykłady budownictwa z gipsu w Polsce: a) budynek ze ścianami lanymi z zaprawy gipsowo-piaskowej w Pińczowie, rok budowy 1938; b) Łódź, osiedle „Rogi” 110 domków w technologii lanej z żużlogipsu, na fotografii dwukondygnacyjne bliźniaki w ciągu ul. Pirytovej; c) osiedle 30 domków z prefabrykowanych dyli gipsowych w Zgorzelcu, zbudowane w latach 1960–1962. Fot. S. Klin

Phot. 1.1. Examples of gypsum buildings in Poland: a) building with walls made of gypsum-sand mortar in Pińczów, year of construction 1938; b) Łódź, „Rogi” housing estate 110 houses in slag-gypsum technology, in the photo – two-storey semi-detached houses in a row in Pirytovej Street; c) housing estate of 30 houses made of prefabricated gypsum planks in Zgorzelec, constructed in the years 1960–1962. Phot. S. Klin

a)



b)



c)



Fot. 1.2.
Przykłady budynków o ścianach zbudowanych z pustaków gipsowych typu SOVA: a) budynek drukarni Wrocław, ul. Różana; b) budynek mieszkalny, ocieplenie styropian + tynk, Wrocław Bielany; c) budynek biurowo-sklepowy Wrocław Bielany. Fot. S. Klin

Phot. 1.2. Examples of buildings with walls constructed of gypsum hollow bricks of SOVA type: a) a building of printing house Wrocław, Różana Street; b) apartment building, insulatet with foamed polystyrene + plaster thermic isolation, Wrocław Bielany; c) office-shop building Wrocław Bielany. Phot. S. Klin

a)



b)



Fot. 1.3. Przykłady budownictwa z gipsu we Wrocławiu: a) ściany budynku słupowo-płytowego wypełnione pustakami typu KR, b) ściany mieszane ceglano-gipsowe, Wrocław Kuźniki. Fot. S. Klin

Phot. 1.3. Examples of gypsum buildings in Wrocław: a) walls of column-plate building filled with hollow bricks of KR type, b) mixed brick-gypsum walls, Wrocław Kuźniki. Phot. S. Klin

Zestawienie pierwszych realizacji budynków mieszkalnych z gipsu w Polsce przedstawia się następująco:

- a) w okresie 1922–1939 r. w rejonie Pińczowa i Buska (Meuś, Rzepecki [200]):
- budynek w Gorysłowicach w 1922 r., ściany z gipsobetonu piaskowego 1:1;
 - dwa budynki mieszkalne w Wiślicy w latach 1935–1936, ściany ze szczelinowych pustaków gipsowo piaskowych;
 - dwa budynki w Pińczowie w 1938 r., ze ścianami z bloczków gazobetonowych li-tych lub murowanych;

W ocenie Meusia i Rzepeckiego [200] stan budynków w 1958 r., po 38 latach eksploatacji był dobry, nie stwierdzono ani uszkodzeń mrozowych, ani nie stwierdzono objawów rozmywania od oddziaływania wód opadowych. W 1984 roku autor niniejszego opracowania, wraz ze swoimi dyplomantami [323], ocenił stan techniczny budynków w Pińczowie, przy ul. Żwirki i Wigury nr 17 i nr 29, wykonanych z bloczków gipsowo-piaskowych, wybudowanych w 1939 roku. Budynek przy ul. Żwirki i Wigury 17, po 45 latach eksploatacji był w zgodnej ocenie z właścicielem obiektu: suchy, ciepły i w bardzo dobrym stanie. Nieodpowiednie posadowienie ścian w budynku przy ul. Żwirki i Wigury 29, bez cokołów i przy braku okapów, przy niewystarczającej izolacyjności termicznej i niedoskonałym ogrzewaniu – były powodem obserwowanych zawilgoceń w murach ścian budynku w strefie przyziemia;

b) realizacje po 1945 roku:

- 26 budynków wiejskich w powiecie Rawa Mazowiecka w latach 1958–1960 [200], o konstrukcji: ściany z tłuczni wapiennego zalewanego zaczynem gipsowym $W:G = 1,0$, stropy z dyli gipsowych MK-1 zbrojone żebrami żelbetowymi;
- budynek doświadczalny w Warszawie przy ul. Mickiewicza, czterokondygnacyjny, wznoszony w latach 1958–1959, ze stropami z gipsobetonu ceglanego w deskowaniu ślizgowym, strop typu DMS;
- nowatorski budynek w Warszawie przy ul. Dunajeckiej, ośmiokondygnacyjny, ze ścianami nośnymi betonowymi w osłonie z dyli gipsowych, ściany zewnętrzne izolacyjne z bloczków gazobetonowych, strop żelbetowo-gipsowy z dyli MK-2 [35];
- budynek doświadczalny prof. S. Mazura [195] we Wrocławiu (1958 r.) z dzielonych dyli gipsowych, wznoszony w stylu wielkiego bloku, jako prototyp osiedla w Zgorzelcu;
- osiedle mieszkaniowe w Zgorzelcu: 30 domków dwukondygnacyjnych, o ścianach z dyli gipsowych i stropach żelbetowo-gipsowych z dylami gipsowymi;
- osiedle 110 domków parterowych z gipsobetonu żuźlowego, wybudowane w latach 1960–1962 w dzielnicy Łódź–Bałuty (fot. 1.1b);
- osiedle mieszkaniowe w Rokicie Nowe w Łądku, składające się z pięciu domów wielokondygnacyjnych, ze ścianami nośnymi żelbetowymi i stropami z dyli gipsowych typu MK-2;
- kilkadziesiąt domków o ścianach z gipsobetonów, zrealizowanych w latach 1958–1961 w okolicach Pińczowa i Buska, Gacek (Meuś, Rzepecki [200]);

Opracowanie w tym okresie uprzemysłowionej technologii realizacji ścian gipsobetonowych w rusztowaniach ślizgowych (Chomczyk [34]), technologii gipsobetonowych ścian litych (Meuś, Rzepecki [200]), studium architektonicznych założeń systemu otwartego uprzemysłowionego budownictwa w oparciu o tworzywa gipsowe (Kłosak D., Kłosak A. [276]), oraz technologii i organizacji zakładu produkcji domów jednorodzinnych z tworzyw gipsowych (Błochowiak, Jaworek, Kubica [17]) – świadczą o dużym rozwoju budownictwa gipsowego w tym okresie.

Modernizacje budownictwa budynków mieszkalnych z wyrobów gipsowych zapewniły kolejno następujące systemy konstrukcyjno-budowlane:

- system ścian z gipsowych pustaków typu RC z 1985 roku Objawińskiego [232], z otworami walcowymi, do wypełnień termoizolacyjnych lub do wiania betonu w celu stworzenia słupów nośnych niezbrojonych, przeznaczonych do budowy ścian domów jednorodzinnych, letniskowych, altanek itp.;
- system hydrofobowych gipsowych prefabrykatów ściennych typu K (Urban, 1990 [336]), z otworami prostopadłościennymi, do wypełnień termoizolacyjnych lub do wypełnienia betonem konstrukcyjnym, w celu wykształcenia słupów podpierających wieńce żelbetowe w poziomie stropów;
- dwukondygnacyjny domek mieszkalny gipsowo-drewniany, patent W89151 autorstwa J. Buszkiewicza z 1990 roku;
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne typu SOVA-SYSTEM (fot. 1.2), z pustaków gipsowych z otworami prostopadłościennymi do wypełnień izolacyjnych i wypełnień betonem w celu ukształtowania słupka wzmacniającego, autorstwa W. Lewandowskiego [175]. System SOVA-SYSTEM jest podobny do systemu z prefabrykatami typu K autorstwa L. Urbana [336];
- system KR z 1993 roku, do budowy ścian nośnych i osłonowych w budynkach szkieletowych, w skład którego wchodzi specjalne kształtki gipsowe, z wbudowaną wykładziną termoizolacyjną lub z pustakami wypełnionymi betonem i zbrojeniem (jako słupy nośne powiązane z wieńcami stropów), mogące stanowić deskowanie tracone, autorstwa Krajewski, Rolek, patent 290394 z 1993 roku [285, 286];
- system EKOGIPS [57] – określany przez autorów jako nowy system budownictwa, do budowy ścian konstrukcyjnych i osłonowych, z bloczków z zaczynu gipsowego, z pustakami wypełnionymi wkładkami ze styropianu;
- impregnowane płyty gipsowe ściennie PRO-MONTA, autorstwa Zakładów Przemysłu Gipsowego „Dolina Nidy” w Gackach [363];
- stale aktualny system PRAS-GIPS autorstwa prof. J. Mikosia, bazujący na prefabrykacie konstrukcyjnych budynków w technologii PRAS-GIPS, wykorzystując gips i anhydryt zamiast cementu i bazując na tanich kruszywach lokalnych i odpadowych [206];
- zostały perfekcyjnie dopracowane systemy zabudowy wnętrz przy użyciu płyt GK na stelażu metalowym do budowy ścian działowych, płyt warstwowych gipsowo-kartonowych typu plaster pszczeli do budowy ścian działowych, specjalnie zróżnicowanych płyt GK do sufitów podwieszanych, ekranów akustycznych, obudów osłon przeciwpożarowych, zabudowy strychów, specjalnych płyt dachowych,

specjalnych prefabrykowanych płyt podkładów posadzkowych, produkcji czołowych firm: ZPG „Dolina Nidy”, RIGIPS, KNAUF, LAFARGE, ATLAS, USG DONN, AMF THERMATHEX, BAFLEX, FARMACELL, ORTH GIPSE, NORGIPS.

Dalsze doświadczenia w zakresie hydrofobizacji spoiw z gipsów syntetycznych i naturalnych z wykorzystaniem związków krzemooorganicznych (Pichniarczyk [262]) oraz lekkie izolacyjne tworzywa gipsowe i pianki gipsowe, wykonywane z użyciem dodatków pianotwórczych (Pichniarczyk [261]) dopełniają asortyment niezbędnych składników gipsowych.

Na szczególną uwagę zasługują spoiwa złożone z udziałem gipsu. Bardziej stabilne i odporne na destrukcyjne działanie wilgoci spoiwa GCP – gipso-cementowo-pucolanowe – były szczególną domeną badań szkoły rosyjskiej, reprezentowanej przez zespół: Wołżenski, Stambułko, Ferronska [354] oraz Worobiewa [355]. Szerokie doświadczenia z produkcji prefabrykatów średnio- i wielkogabarytowych w budownictwie byłego Związku Radzieckiego dokumentują monografie autorów: Liaszkiewicza [180], Wołżenskigo i Ferronskiej [352], Ferronskiej [63]. Spoiwa GCP charakteryzują się szeregiem pozytywnych cech, w porównaniu do spoiw „czysto” gipsowych. Jednak w celu zabezpieczenia dojrzałego spoiwa przed destrukcją etringitową należy kontrolować skład chemiczny spoiwa, stosować dodatki hydrauliczne w celu obniżenia stężenia CaO w zawieszynie wód porowych w dojrzałym kompozycie, aby nie wytrącił się szkodliwy ettringit. Badania spoiw GCP w Polsce prowadzili między innymi: Jarmontowicz [101], Ostrowski [253], Osiecka [241]. Korzystne cechy spoiw do prefabrykacji mają spoiwa mieszane gips-estrich-wapno badane przez Pietronia [270], stosowane w latach siedemdziesiątych XX wieku między innymi do produkcji wielkogabarytowych płyt gipsowych i kabin sanitarnych.

Na końcu należy wspomnieć o złożonym problemie utylizacji fosfogipsów jako produktów odpadowych przy produkcji nawozów sztucznych (Badowska [11] oraz Badowska, Osiecka [10, 238, 240, 241]).

Ważnym działem zastosowań gipsu jest jego funkcja jako dodatku do spoiw cementowych w celu regulacji procesów wiązania, a szczególnie minerałów C_3A (Kurdowski [161, 162], Peukert [260]).

2. ANALIZA ZAGADNIENIA WYTRZYMAŁOŚCI I MIKROSTRUKTURY GIPSU W OPARCIU O LITERATURĘ NAUKOWO-BADAWCZĄ

2.1. Wpływ technologii wytwarzania spoiwa gipsowego na jego właściwości

Spoiwa gipsowe stanowią szeroką grupę materiałów wiążących otrzymywanych przez częściową lub całkowitą dehydrację bądź naturalnego kamienia gipsowego, bądź przemysłowych produktów odpadowych, głównie fosfogipsów i gipsów z odsiarczania spalin, co dokumentują prace: Kurdowskiego, Pałki [168], Osieckiej [234], Liaszkiewiczza [179], Woźniewskiego i Ferronskiej [342, 344], Wichtera [355], Akermana [2]. W technologii odsiarczania spalin uzyskuje się gips dwuwodny, o dużej zawartości gipsu, powyżej 95%, a uzyskane w wyniku dehydracji tego surowca – spoiwo gipsowe $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – nie ustępuje w zakresie podstawowych właściwości spoiwom naturalnym uzyskiwanym z dehydracji surowców naturalnych. Problematykę tę omówił autor szerzej w rozdziale 14.

Bardziej zróżnicowany jest problem wytwarzania spoiw i elementów budowlanych z odpadów fosfogipsowych. Mimo że zawartość w odpadzie głównego składnika $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ wynosi aż 95%, to obecność niepożądanych domieszek stanowi zagrożenie czystości środowiska i stanowi poważne utrudnienie przy wykorzystaniu tych odpadów z poniższych powodów (Osiecka [232]):

- obecny kwas fosforowy i siarkowy nadaje odpadom odczyn zdecydowanie kwaśny o $\text{pH} = 1,5 - 3,5$;
- zawartości fosforanów rozpuszczalnych na poziomie 3% są wyższe od poziomów dopuszczalnych dla spoiw i elementów budowlanych (0,2% w przeliczeniu na P_2O_5);
- zawartość związków sodu na poziomie 1,3% jest większa od wartości dopuszczalnej 0,04% (w przeliczeniu na Na_2O);
- związki fluoru (w przeliczeniu na fluor F) w ilości 2% są niedopuszczalne ze względów zdrowotnych;
- szkodliwe są również zanieczyszczenia organiczne i podwyższona radioaktywność.

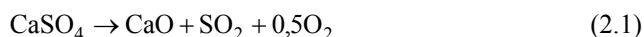
Problematyka fosfogipsów nie jest przedmiotem szerszych analiz w niniejszej pracy. Z bibliografii prac dotyczących fosfogipsów należy przytoczyć jedynie:

- udokumentowane kolejno nowe metody uzyskiwania spoiw fosfogipsowych z odpadów przemysłowych w pracach autorów: Wirschinga z 1971 r. [347], Maertera z 1971 r. [184], Foerster z 1972 r. [67], Gordaszewskiego z zespołem w zakresie spoiw gipsowych o podwyższonej wytrzymałości z 1971 r. [76] i podwyższonej wodoodporności z 1980 r. [77], zespołu Badowska – Osiecka – Woźniak z 1975 r. [10], Matyszewskiego z zespołem z 1975 roku [193].

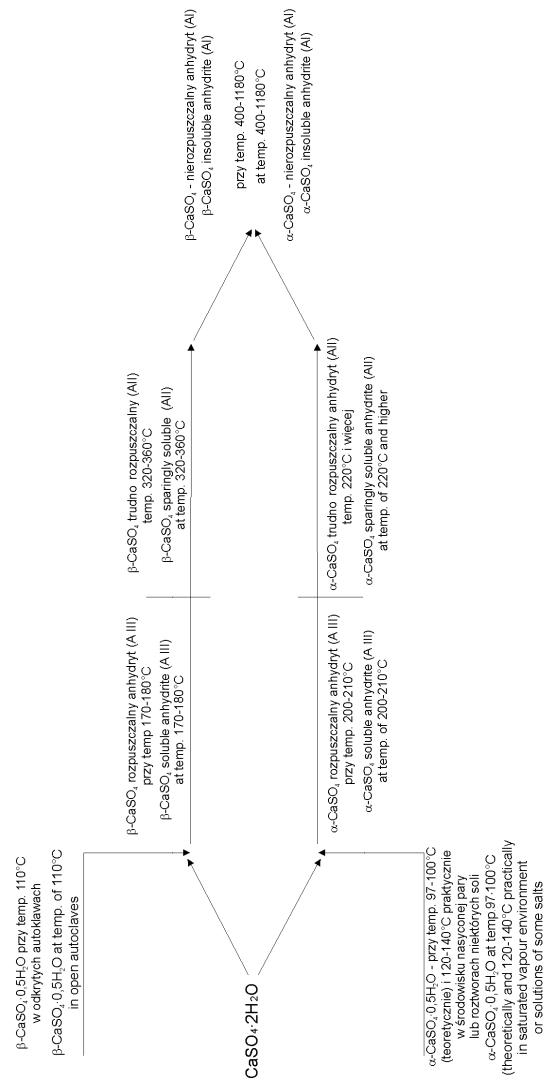
Złożone problemy neutralizacji zanieczyszczeń występujących w fosfogipsie były przedmiotem badań między innymi autorów: Pompowski, Ruczyński [273] i rozprawy doktorskiej Gantner [68]. Monografie tematyczne Osieckiej z 1980 r. [240] i Liaszkiewicza z 1989 r. [180] zawierają bogaty zasób wiedzy w zakresie właściwości tych spoiw i ich zastosowań. Bardzo interesujące są doniesienia badawcze Osieckiej [238], w zakresie wykorzystania odpadowych fosfogipsów do budowy podbudów drogowych, w nawiązaniu do doświadczeń francuskich. Szerokie analizy różnych kierunków utylizacji fosfogipsów, w tym przeróbkę na cement anhydrytowy, na siarkę, na produkty chemiczne: siarczan amonowy i kredę – zawarte są w pracach Ostrowskiego [245, 255]. Problematyce tej poświęcone są także prace Daligranda [49], reprezentującego przemysł francuski.

Proces dehydratacji dwuwodnego siarczanu wapnia przebiega według schematu jak na rysunku 2.1.

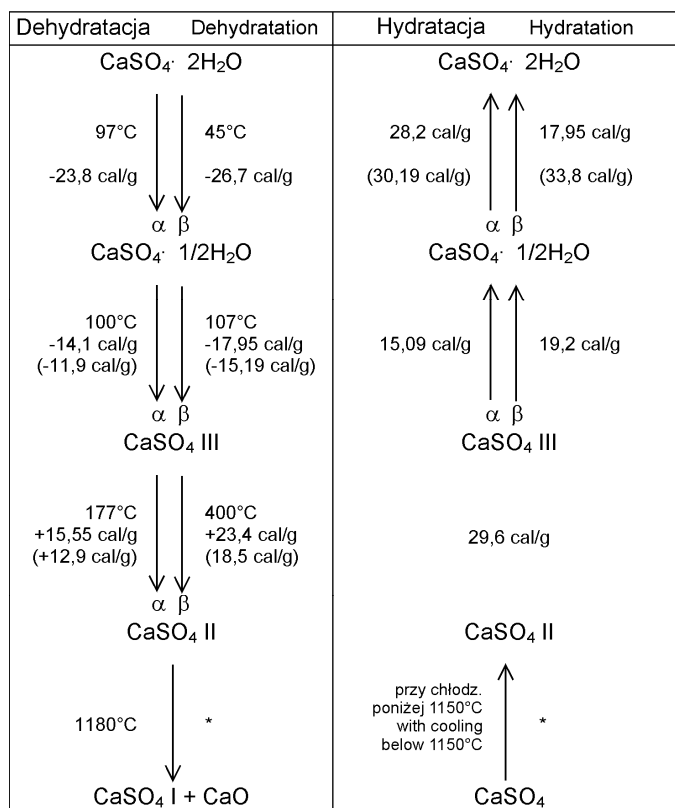
Proces dehydratacji przebiega sukcesywnie w pewnym przedziale czasowym i zależy od wielu czynników, w tym głównie od sposobu prażenia, granulacji czystego surowca oraz obecności minerałów i związków chemicznych towarzyszących. Rodzaj dominującej fazy dehydratu i właściwości spoiwa zależą od historii zmian temperatur w czasie i od końcowego zakresu temperatur (Murat [216]). Charakterystyczne jest jednak, że w produkcie finalnym występują z reguły różne fazy przejściowe, znajdujące się w zakresie temperatur prażenia, co dokumentują badania zespołów: Bachrioni, Negro, Murat z 1976 r. [7] oraz Kuzel, Hauner z 1987 [166]. Na efekt ten mają wpływ szerokie przedziały równowagowych temperatur w procesie przemian gipsu dwuwodnego w półwodny i w anhydryt (rys. 2.2 i rys. 2.3, Kurdowski [162]). W procesie dehydratacji faz odmian β niestabilność układu $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ występuje już w temperaturze $+45\text{ }^\circ\text{C}$ (rys. 2.2), a właściwe „pierwsze wrzenie” – czyli intensywne dehydratacja dwuwodzianu w półwodzian – zachodzi w zakresie temperatur $107\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$ (rys. 2.3, piki A w badaniach metodą DTA). Przejście półwodzianu w nietrwałą fazę anhydrytu III, zwane „drugim wrzeniem” w procesie dehydratacji dwuwodzianu, w ciągu faz odmian β zachodzi w paśmie temperatur $170\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$, z wystąpieniem intensywnych przemian w temperaturze około $200\text{ }^\circ\text{C}$ (rys. 2.3, piki B). Przejście anhydrytu III w trudno rozpuszczalny anhydryt II (odpowiednik anhydrytu naturalnego) następuje w temperaturze około $300\text{ }^\circ\text{C}$ w przypadku półwodzianu β i $220\text{ }^\circ\text{C}$ w przypadku półwodzianu α (rys.2.3, piki C). W temperaturze powyżej $600\text{ }^\circ\text{C}$ rozpoczyna się rozkład siarczanu wapnia według reakcji (Kurdowski [162]):



Uzyskany z tego etapu produkt, zawierający 2–3% nie związanego CaO, stanowi surowiec do produkcji estrichgipsu.



Rys. 2.1. Dehydratacja dwuwodnego siarczynu wapnia (Wichter [346])
 Fig. 2.1. Dehydration of di-hydrate calcium sulphate (Wichter [346])

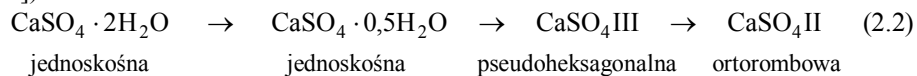


* wg Floerkego
after Floerke

Rys. 2.2. Dehydratacja i hydratacja faz siarczanu wapniowego (Kurdowski [162])
 Fig. 2.2. Dehydration and hydration of calcium sulphate phases (Kurdowski [162])

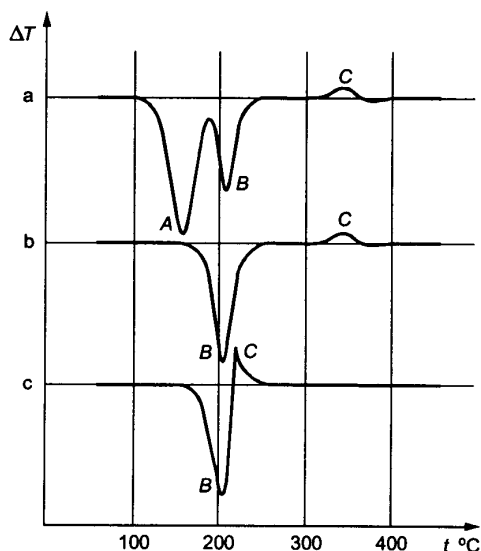
Przy szybkim wzroście temperatury i dużych ziarnach może w surowcu pozostać niezdehydratyzowany materiał, co uwidacznia się w analizach składu mineralnego gipsu budowlanego (β półhydratu). Powyższe czynniki wpływają na niejednorodność produktów wypału i w konsekwencji na zróżnicowanie właściwości spoiw gipsowych, otrzymanych przez zmielenie wyprażonego surowca.

Udokumentowano, że procesowi dehydratacji, od fazy dwuhydratu do fazy anhydrytu II, towarzyszą istotne zmiany struktury krystalicznej według schematu (Kurdowski [161]):



oraz duże zmiany gęstości minerałów, odpowiednio od $2,31 \text{ g/cm}^3$ do $2,979 \text{ g/cm}^3$, co dokumentują prace Woźniewskiego [352], Osieckiej [240], Gay [71].

Hydratacja faz siarczanów gipsu jest procesem odwrotnym w stosunku do dehydratacji, a równowagowe temperatury przemian i wydzielone ciepło w reakcjach egzotermicznych podano na rysunku 2.2. Mechanizm hydratacji odmiany β gipsu półwodnego na drodze pomiarów mikrokalorymetrycznych był przedmiotem badań Magnana [185]. Szerokie studium efektów cieplnych w układzie $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ i model procesu wiązania zawarte są w pracach zespołów autorów Karmazsin, Murat cz. I – IV [112, 113, 114, 115] w latach 1977–1983. Odmiennosc mechanizmu wiązania porównawczo odmiany α i β była przedmiotem badań zespołu autorów Kronert, Hubert [152]. Wpływ metody prażenia na proces hydratacji spoiwa gipsowego był przedmiotem badań zespołu Triollier, Soustelle, Guilbot [333].



Rys. 2.3. Wykresy termicznej analizy różnicowej (DTA): a) dla gipsu dwuwodnego, b) dla gipsu półwodnego β , c) dla gipsu półwodnego α (Kurdowski [162])

Fig. 2.3. Charts of difference thermal analysis (DTA): a) for di-hydrate gypsum, b) for semi-hydrate gypsum β , c) for semi-hydrate gypsum α (Kurdowski [162])

Na proces hydratacji ma wpływ wiele czynników, w tym głównie: naturalny skład surowca, zanieczyszczenia, szybkość zmian temperatur, ciśnienia pary wodnej oraz rozdrobnienie wsadu, co dokumentują badania Triolliera [333] i Murata [216, 218].

Do badań struktury gipsu i jego hydratów stosowane były różne metody pomiarowe: Floerke stosował metody rentgenowskie [66], Ostrowski – metody rezonansu magnetycznego [252], Knauf – mikroskopię elektronową [136].

W literaturze przedmiotu szeroko rozpoznano związki między wybranymi parametrami technologii otrzymywania dehydratów a właściwościami spoiw, dotyczące głównie kinetyki hydratacji i właściwości uwodnionych zaczynów, co dokumentują prace autorów: Badens z zespołem [9], Floerke [66], Karmazsin z zespołem [112, 113, 114, 115], Kronert i Hubert [152], Kuzel i Hauner [167], Lewry [182], Magnan [186], Murat [217, 218, 219], Sattler i Bruckner [294], Uszerow-Marszak [339]. Brak jest w literaturze związków ilościowych, opartych na wieloseryjnych badaniach statystycznych, które mogłyby stanowić podstawę do oszacowań cech gwarantowanych i oceny jednorodności spoiw gipsowych, dla wybranych technologii ich produkcji.

Produkty dehydratacji po zmieleniu stanowią gotowe spoiwo gipsowe, uzupełnione ewentualnie specjalnymi dodatkami (regulatory czasu wiązania, plastyfikatory). Z półwodzianów uzyskuje się spoiwa gipsowe odmiany α i β , z faz anhydrytu II uzyskuje się spoiwa anhydrytowe oraz estrichgipsowe (o korzystnych cechach mechanicznych i technologicznych).

Zastosowanie w praktyce mają spoiwa gipsowe mieszane, złożone z:

- gipsu półwodnego i anhydrytu II odmiany β ,
- gipsu półwodnego i wapna,
- gipsu półwodnego, estrichgipsu i wapna (spoiwo GEW, Pietroń [270]).

Charakterystyka podstawowych właściwości spoiw szybkowiązących na bazie półhydratów α i β , spoiw anhydrytowych i estrichgipsów zawarta jest w monografiach: Osieckiej [240], Liaszkiewicza [180], Wołzńskiego i Ferronskiej [352], Wołzńskiego, Stambułko i Ferronskiej [354], Ferronskiej [63], Wichtera [346], Akermana [2]. Z ciekawych nowości wymienić należy gips odmiany α wysokiej wytrzymałości (HG), nawet powyżej 60MPa, uzyskiwany ze specjalnie selekcjonowanych drobnoziarnistych kamieni gipsowych, z zastosowaniem brykietyzacji surowca, dodatków chemicznych i specjalnej technologii autoklawizacji, co dokumentują prace Iwanickiego [96], Terechowa i Kybajewa [329], zespołu autorów Ratinow – Iwanicki [279, 280, 281]. Gips ten stosowany był w byłym ZSRR jako główny składnik spoiw mieszanych gipsowo-cementowo-pucolanowych [352]. Jednak duże koszty produkcji i równocześnie znaczne spadki wytrzymałości gipsu HG w przypadku nawilgocenia, nawet o 80%, spowodowały zaprzestanie jego produkcji [354], a jego miejsce w spoiwach mieszanych zajął anhydryt.

Bardzo ciekawe poznawczo i obiecujące dla praktyki zastosowań spoiw gipsowych są ustalenia naukowe znanego zespołu autorskiego Wołzński, Stambułko, Ferronska [354] w zakresie korzystnych właściwości spoiw mieszanych anhydrytowo-cementowo-żuźlowych: z wytrzymałością na ściskanie $f_{gc,28} = 17,6$ MPa, dla dobrze urabialnej konsystencji $W/S = 0,5$, z korzystnie wysokim współczynnikiem rozmiękania $K = 0,66$. Tym bardziej, że znane były rezultaty wcześniejszych badań szkoły radzieckiej (Kopielanski [144], Ajapow [1]), dokumentujących złożoność problemu trwałości i stałości objętości spoiw mieszanych GCP z użyciem β -półhydratu i wręcz przypadki rozpadań struktury materiału w wyniku destrukcji rozsadinowej ettringitu. Problem ten wyjaśniają badania Rozienberga i innych [287], dokumentujące prawidłowość, że przy twardnieniu spoiw GC i spoiw GCP z dużą zawartością półhydratu (powyżej 50%) reakcja klinkieru cementowego (faz zawierających glin) ze spoiwami gipsowymi prowadzi do

tworzenia się wysokosiarczanowej odmiany uwodnionego siarczanoglinianu wapniowego, będącego przyczyną destrukcji kompozytu. Nowe badania Colaka [38] z 2000 roku wykazują, że problem spoiw GCP jest nadal aktualny, szczególnie w zakresie poszukiwania optymalnych relacji gips:cement:pucolana i wpływu plastyfikatorów na zmniejszenie wskaźnika W/S oraz ograniczenia porowatości dojrzałych kompozytów. Kovler [148] badał wpływ superplastyfikatorów na termikę i czas wiązania spoiw mieszanych (gips-cement-pyły krzemionkowe) oraz wpływ termiki reakcji na znacznie zwiększoną wytrzymałość i na mikrostrukturę dojrzałego kompozytu. Wykonane w latach 1990–1991 badania laboratoryjne i półtechniczne wskazały także na korzystny wpływ dodatku hybrydowego: 3% cementu portlandzkiego i 1% K_2SO_4 na wzrost wytrzymałości do 23 MPa i na przyspieszenie procesów hydratacji spoiwa anhydrytowego (Gustaw i inni [84], [85]), a Ostrowski [249] wykazał korzystne właściwości spoiwa mieszanego z anhydrytu i gipsu budowlanego o składzie 50%/50%, o wytrzymałości $f_{gc,28} = 30$ MPa w stanie suchym i 9,5 MPa w stanie nawilgoconym (współczynnik rozmiękania $K = 0,31$). Korzystne cechy spoiw mieszanych anhydrytowo-cementowych z dodatkami uzyskał także Rusiecki [290]. Należy więc wnosić, że opracowanie technologii produkcji i wdrożenie spoiw GCP z zastosowaniem anhydrytu może przynieść szereg zastosowań gipsu w budownictwie, w tym do bardziej trwałych ściennych elementów konstrukcyjnych (świadczą o tym urzędowe dopuszczenia do stosowania w Polsce w 1991 r. ściennych pustaków i ściennych bloczków z anhydrytu [327, 328]).

Tworzywami gipsowymi mającymi szerokie zastosowanie w budownictwie są między innymi: gipsy lekkie z wypełniaczami organicznymi, na przykład: wióry, zrębki, kora, korek; gipsy lekkie spienione oraz gipsy zbrojone ciętymi włóknami syntetycznymi polipropylenowymi lub z włókien szklanych. Problematyka ta była przedmiotem szerokiej studium i badań laboratoryjnych autora; wyniki tych prac zostaną podane w oddzielnej publikacji. Aktualność tych zagadnień potwierdzają przykładowo poniższe pozycje bibliograficzne: Colak [37] – badania gęstości wytrzymałości gipsów spienionych z 2000 r. (Turcja), Hernandez – Olivarez z zespołem z Hiszpanii [89] z 1999 r. – charakterystyka technologii – właściwości i zastosowanie w budownictwie tworzyw korkowo-gipsowych.

Badania autora niniejszej pracy dotyczą β -półhydratu jako podstawowego spoiwa o nazwie „gips budowlany”, stosowanego powszechnie w Polsce i na świecie do produkcji szerokiego asortymentu elementów budowlanych: ściennych, stropów podwieszonych, płyt gipsowo-kartonowych, płyt warstwowych, elementów dźwiękochłonnych i dekoracyjnych, do robót wykończeniowych.

Autor widzi celowość przeprowadzenia w przyszłości badań wytrzymałości i odkształcalności mieszanych spoiw anhydrytowych, rokujących nadzieję efektywnych i celowych zastosowań w budownictwie.

2.2. Badania związków między porowatością i mikrostrukturą zaczynów gipsowych a wytrzymałością wyrobów

Na wytrzymałość zaczynów gipsowych największy wpływ mają parametry jego mikrostruktury: gęstość pozorna ρ_p i związana z nią porowatość p . Związki między parametrami ρ_p i p a wskaźnikiem $W/G = \omega$ zostały ustalone przez Warachima [343], przy założeniu szczelności masy zarobowej w stanie świeżym:

$$p = \frac{\omega - 0,145}{\omega + 0,370} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

$$\rho_p = \frac{1,186}{\omega + 0,370} \left[\text{g/cm}^3 \right] \quad (2.4)$$

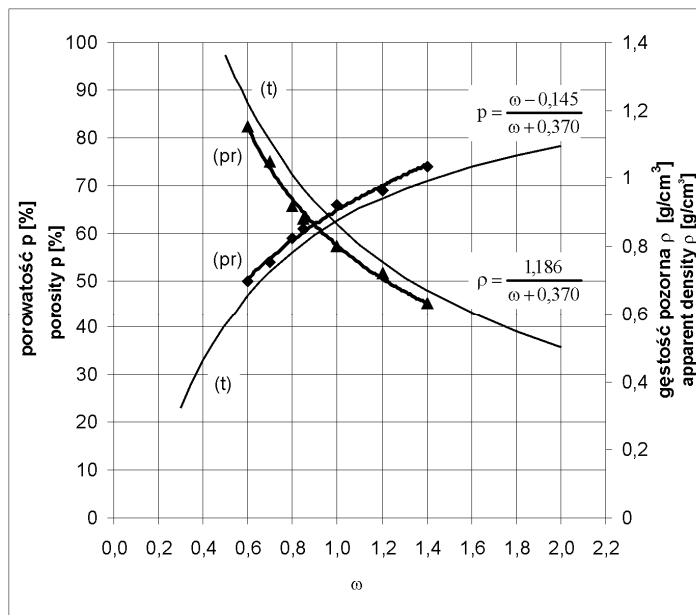
Weryfikacja doświadczalna tych związków wykazuje, że gęstości rzeczywiste ρ_p są niższe od wartości teoretycznych, a porowatość p jest odpowiednio wyższa (rys. 2.4). Różnica ta wynika z nieuwzględniania objętości powietrza w masie świeżego zaczynu oraz z wpływu zanieczyszczeń i materiału nieaktywnego na zakładane relacje objętościowe (pęcznienia i skurczu) substratów i produktów reakcji z wodą, ważne dla czystego chemicznie półhydratu odmiany β . Różnice te nie są jednak duże i relacje (2.3) i (2.4) pozwalają, z dostatecznym przybliżeniem, na obliczenie wpływu wskaźnika ω świeżego zaczynu na parametry mikrostruktury dojrzałego zaczynu p i ρ_p .

Singh, Garg [300] badali zmiany spadku porowatości spoiw gipsowych w funkcji czasu dojrzewania oraz związki: wytrzymałość na ściskanie f_{gc} – porowatość p i ustalili relacje podobne jak na rysunku 2.5, podane przez Neville'a [221] dla różnych materiałów.

Jeulin, Monnaie, Peronnet [104] stwierdzili, że wzrost temperatury świeżego zaczynu gipsowego, w przedziale temperatur $0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$, powoduje tworzenie się dłuższych kryształów, podczas gdy mikrostruktura gipsu stwardniałego w temperaturze 0°C jest drobnokrystaliczna.

W charakterystykach właściwości mechanicznych różnych materiałów mineralnych znana jest regularna zależność między wytrzymałością na ściskanie f_c a porowatością p (rys. 2.5). Graniczna wytrzymałość występuje dla tworzywa nie zawierającego porów. Wartość tę dla stwardniałego zaczynu cementowego określono w granicach $180 \div 190$ MPa (Gertz-Hedström) i 266 MPa (Anderegg, cyt. [31]), a dla stwardniałego zaczynu gipsowego około 83 MPa (Singh, Garg [300]). Tak dużą wytrzymałość uzyskuje się w wyniku wibracyjnego prasowania, z równoczesnym odpowietrzeniem zaczynu. Ograniczenie zagęszczenia tylko do wibracji – prowadzi przykładowo dla gipsu – do związków $f_{gc} = f(\omega)$, pokazanych na rysunku 2.6, to znaczy: możliwa do osiągnięcia – jak dla każdego materiału – funkcja typu hiperbolicznego (podana na rys. 2.5) staje się w praktyce funkcją z ekstremum dla $\omega = \omega_{opt}$. Wartości ω_{opt} odpowiada największa

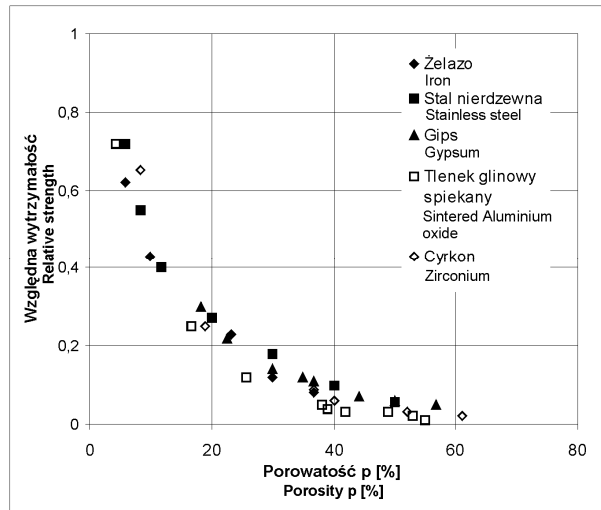
wytrzymałość osiągnięta w określonej technologii. Jak wynika z analiz rezultatów badań Kahla [105], cytowanych przez Skalmowskiego [296] i Russela [291], względne spadki wytrzymałości zaczynów gipsowych i porównawczo cementowych – odpowiadające względnemu wzrostowi wskaźników odpowiednio W/G i W/C – są jakościowo i ilościowo porównywalne (rys. 2.7), co uzasadnia możliwość stosowania związków typu f-p czy f- ω – wcześniej opracowanych dla cementów przez: Bolomey'a [18] i rozwiniętych w pracach autorów: Bukowski [30], Kuczyński [31] oraz Neville [221, 222] – do podobnych jakościowo zależności dla gipsów.



Rys. 2.4. Teoretyczne (t) i rzeczywiste (pr) krzywe zależności porowatości i gęstości pozornej zaczynów gipsowych od wskaźnika $\omega = W/G$, według Warachima [343]

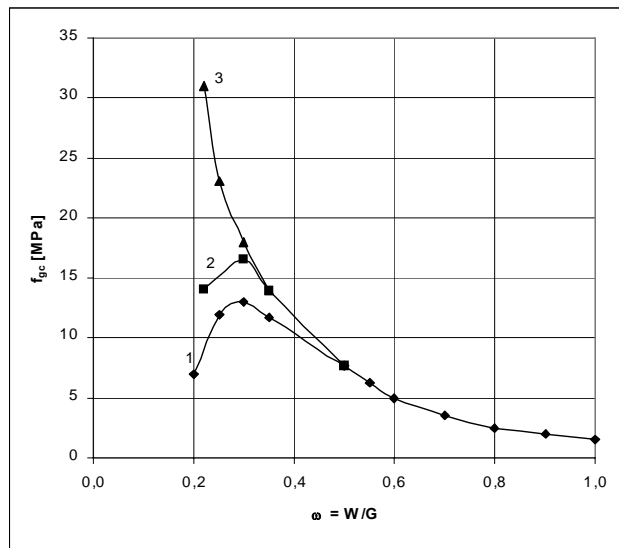
Fig. 2.4. Theoretical (t) and real (pr) curves of the relation of porosity and apparent density of gypsum paste to index $\omega = W/G$, after Warachim [343]

Zestawione przez autora na rysunku 2.8 zależności doświadczalne $f_{gc} = f(\omega)$ – uzyskiwane przez różnych autorów: Wołżenski i Ferronska [352], Wołżenski – Stambułko – Ferronska [354], Klin [120, 128], Skramtajew z zespołem [307], dla poszczególnych rodzajów spoiw gipsowych – potwierdzają, że analizowane jakościowo krzywe są funkcjami hiperbolicznymi, przechodzącymi w ekstremum dla różnych wartości ω . Analizowane krzywe $f_{gc} = f(\omega)$ są podobne, natomiast zróżnicowanie relacji ilościowych stanowi ciekawe porównanie charakterystyk wytrzymałościowych poszczególnych spoiw gipsowych.



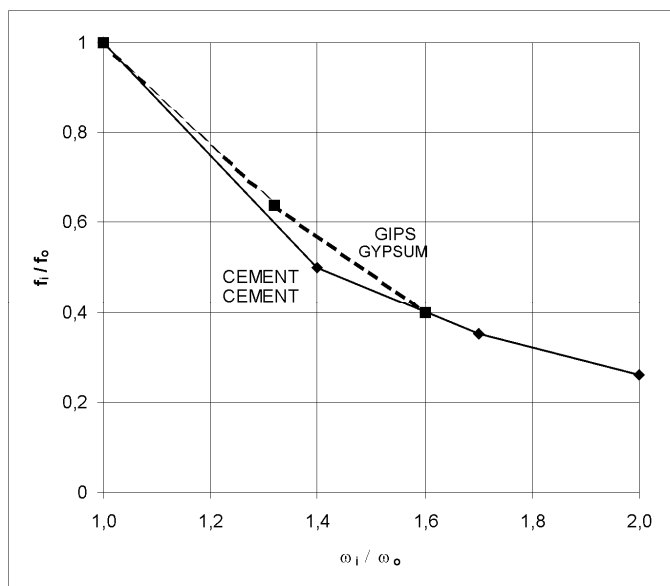
Rys. 2.5. Zależność między porowatością a wytrzymałością względną różnych materiałów, według Neville [221]

Fig. 2.5. Relation between porosity and relative strength of different materials, after Neville [221]



Rys. 2.6. Wytrzymałość gipsu na ściskanie f_{gc} w zależności od $\omega = W/G$ dla różnych technologii wykonywania wyrobów: 1 – wykonanie standardowe, 2 – z wibracją masy, 3 – z prasowaniem, według Liaszkiewicza [180]

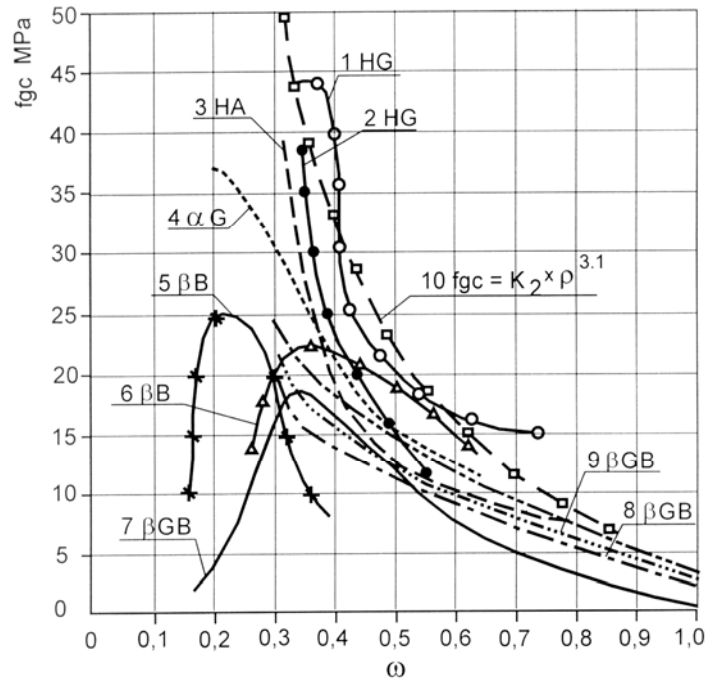
Fig. 2.6. Gypsum compressive strength f_{gc} depending on $\omega = W/G$ for different technologies of product manufacture: 1 – standard manufacture, 2 – with mass vibration, 3 – with pressing, after Liaszkiewicz [180]



Rys. 2.7. Względne spadki wytrzymałości zaczynów cementowych ($\omega_1 = 0,35$) i zaczynów gipsowych ($\omega_1 = 0,55$) w zależności od względnych wzrostów wskaźnika ω (W/C i W/G), według Budnikowa [29]

Fig. 2.7. Relative decreases of strength of cement paste ($\omega_1 = 0,35$) and gypsum paste ($\omega_1 = 0,55$) depending on relative increases of index ω (W/C and W/G), after Budnikow [29]

Różnice w osiąganych wytrzymałościach między β -półhydratem i α -półhydratem są literaturowo znane i wynikają głównie z mniejszej wodożądności w przypadku fazy α . Bardziej rozwinięta powierzchnia właściwa kryształów odmiany β , około dziesięciokrotnie większa od powierzchni właściwej α -półhydratu, powoduje znane zróżnicowanie wodożądności obu odmian ($W/G = 0,3 \div 0,4$ dla odmiany α i $W/G = 0,5 \div 0,75$ dla odmiany β) i w konsekwencji wywołuje duże różnice w wytrzymałości dojrzałych zaczynów, co dokumentują między innymi prace Osieckiej [240], Murata [216], Kurdowskiego [162]. Występujące różnice w rozpuszczalności powodują zróżnicowanie szybkości hydratacji obu rodzajów półhydratu (Murat [218]). Przyspieszenie procesów hydratacji w przypadku odmiany β jest przyczyną powstania licznych i gorzej wykształconych kryształów. Reakcje powolniejsze – jak w przypadku odmiany α – sprzyjają tworzeniu się dużych kryształów, o mniejszej ilości defektów (Woźniski [352], Kronert [152])). Także większe ciepło hydratacji, w przypadku odmiany β , powoduje większe naprężenia termiczne i zmiany objętościowe (Murat [217, 218], Karmazsin, Murat [112, 113]).



Rys. 2.8. Zestawienie zależności $f_{gc} = f(\omega)$ dla różnych rodzajów gipsu: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie w stanie suchym, ω – wskaźnik W/G, 1 – gips wysokiej wytrzymałości HG Moskwa 1974 [346], gips HG London 1958 [296], 3 – spoiwo wysokiej wytrzymałości anhydrytowo-żuźłowe 90/10% Moskwa 1974 [346], 4 – α półhydrat Moskwa 1974 [355], 5 – β półhydrat, wysoki gatunek [355], 6 – β półhydrat [355], 7 – β półhydrat budowlany Moskwa 1952 [307], 8 – β półhydrat gips budowlany Polska, wyniki wg PN 1980 [120], badania własne; 9 – β półhydrat (wyniki według krzywej 8 przeliczone na GOST), 10 – analityczna krzywa $f_{gc} = f(\omega)$ według [346]

Fig. 2.8. Comparison of relations $f_{gc} = f(\omega)$ for different types of gypsum: f_{gc} – compressive strength in dry state, ω – index W/G, 1 – high-strength gypsum HG Moskwa 1974 [346], gypsum HG London 1958 [296], 3 – 90/10% anhydrite-slag binder of high strength Moskwa 1974 [346], 4 – α semi-hydrate Moskwa 1974 [355], 5 – β semi-hydrate, high grade [355], 6 – β semi-hydrate [355], 7 – β building gypsum Moskwa 1952 [307], 8 – β semi-hydrate building plaster Polska, results in accordance with PN 1980 [120], author's own research; 9 – β semi-hydrate (results in accordance with curve 8 recalculated into GOST), 10 – analytical curve $f_{gc} = f(\omega)$ in accordance with [346]

Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo duże zróżnicowanie wytrzymałości $f_{gc} = f(\omega)$ dla β -półhydratów. Lokalne uwarunkowania surowcowe i technologii prażenia – mające duży wpływ na właściwości spoiwa (por. p. 2.1) – skłaniają do wniosku o konieczności sporządzania indywidualnych charakterystyk $f_{gc} = f(\omega)$ dla gipsów z poszczególnych wytwórni.

Związki między wytrzymałością a porowatością określane są dla różnych materiałów mineralnych na drodze empirycznej. Hiperboliczną zależność f - p (por. rys. 2.5) dla spoiw cementowych opisywano różnymi funkcjami: logarytmiczną przez Schillera [296], wykładniczą przez Cottina [43] oraz Feldmana i Beaudoin'a [59], eksponencjalną przez Fagerhunda [58]. Wytrzymałość zaczynów cementowych z porami dużymi korelował Mehta [198], a Mikoś [206] korelował wytrzymałość betonów z najmniejszymi porami. Dla zaczynów gipsowych Nowak [225] zaproponował funkcję (rys. 2.9):

$$f_{gc} = \frac{A}{p-C} + B \quad (2.5)$$

gdzie:

A, B, C – stałe, p – porowatość całkowita w %.

Dla gipsu wysokowytrzymałościowego HG odmiany α , dla wąskiego przedziału $W/G = 0,35 \div 0,45$, relację $f_{gc} = f(\omega)$ opisał funkcją wykładniczą Ranganatham [278], podaną na rysunku 2.10.

Wobec powiązań parametrów p , ρ_p i ω , zgodnie z (2.3) i (2.4), zależność $f_{gc} = f(\rho_p)$ jest pochodną w stosunku do zależności $f_{gc} = f(p)$. Dla gipsów wysokowytrzymałościowych Wichter [346] podał zależność:

$$f_{gc} = K_1 \rho_p^{3,1} \text{ [MPa]} \quad (2.6)$$

gdzie:

K_1 – stała równa $10 \div 11$ MPa, ρ_p – gęstość w g/cm^3 .

Singh i Garg [292] podali propozycję opisu relacji między wytrzymałością stwardniałego gipsu f a jego porowatością w postaci funkcji eksponencjalnej typu:

$$f = f_0 e^{-Bp} \quad (2.7)$$

gdzie:

f_0 – wytrzymałość uzyskana przez ekstrapolację zależności doświadczalnych dla porowatości $p = 0$,

B – parametr liczbowy.

Nowak [224] sformułował tezę o zależności między wytrzymałością gipsu na ściskanie f_{gc} a średnim promieniem porów \bar{r} , w postaci funkcji wykładniczej:

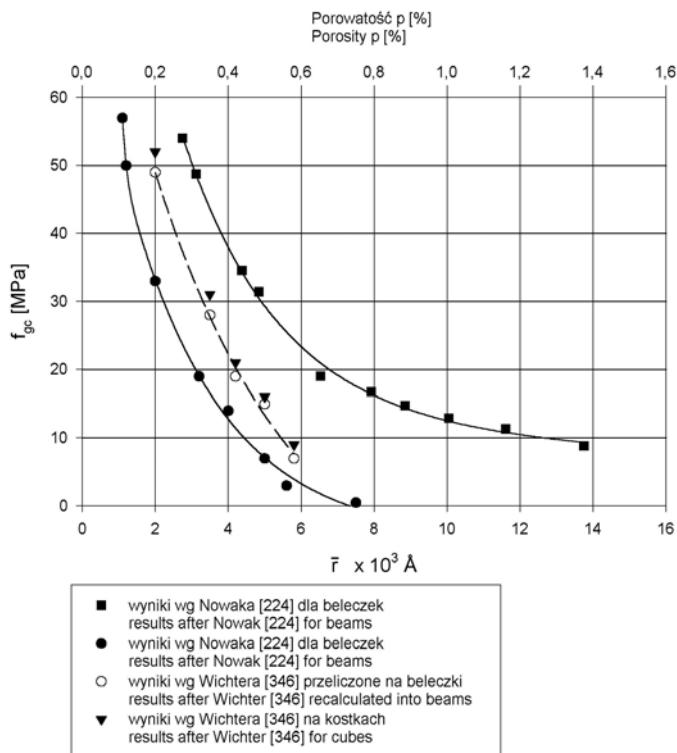
$$f_{gc} = B \cdot e^{A\bar{r}} \quad (2.8)$$

gdzie:

A i B – stałe doświadczalne: $A = 0,0016$, $B = 71,13$

\bar{r} – średni promień porów w nm.

Wyniki badań Odlera i Rösslera [233] potwierdzają – jak to podaje Nowak [226] – regularny rozkład porów w zaczynach gipsowych. Rössler i Odler ustalili także, że wzrost temperatury hydratacji zaczynów wywołuje niekorzystne zmiany, mianowicie: powiększa kruchość wyrobów, dotyczy to półhydratów α i β . Natomiast w niższych temperaturach powstaje więcej drobnych kryształów, lepiej powiązanych ze sobą. Dodatek dwuwodzianu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ powoduje zmniejszenie średnicy porów, gdyż pełniąc rolę zarodków krystalizacji powoduje wytwarzanie bardziej zwartej mikrostruktury drobniejszych kryształów.

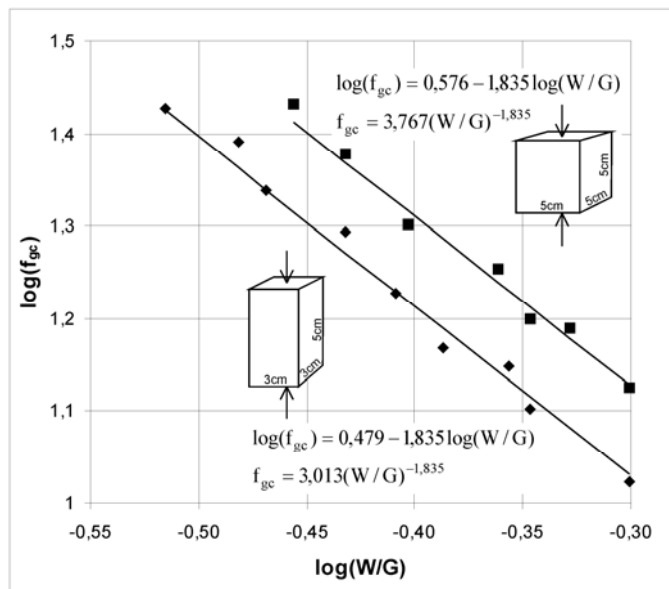


Rys. 2.9. Wykresy zależności wytrzymałości zaczynów gipsowych od porowatości p i średniej średnicy porów \bar{r}

Fig. 2.9. Charts of relation of gypsum paste strength to porosity p and mean pore diameter \bar{r}

Według Odlera i Rösslera [233] dodatek kwasu cytrynowego i winowego, a także plastyfikującego lignosulfonianu sodu powoduje tworzenie się dużych aglomeratów kryształów i obniżenie wytrzymałości wyrobów. Duży wpływ dodatków na mikrostrukturę i wytrzymałość gipsu stwierdziło wielu autorów, między innymi: Gottlieb [78] oraz Yamada i inni [358] wpływ cytrynianu sodu, Combe i Smith [40] wpływ organicznych kwasów i soli, Murat i Jeandot [217] wpływ soli nieorganicznych.

Mikroskopia elektronowa – w stosunku do klasycznych metod rentgenowskich (Floerke [66]), protonowego rezonansu magnetycznego (Ostrowski [252]), analizy efektów termicznych (Gay [71], Murat [218], Magnan, Cottin, Gardet [185]) – znacznie rozszerzyła możliwości poznawcze i interpretacyjne w zakresie powiązań mikrostruktury z właściwościami fizycznymi tworzywa (Schiller [296]). Dotyczy to także właściwej interpretacji bardzo złożonych procesów destrukcyjnych spoiw mineralnych gipsowo-cementowo-pucolanowych (Jarmontowicz [102], Ostrowski [247]).



Rys. 2.10. Zależność między wytrzymałością gipsu wysokiej wytrzymałości HG a wskaźnikiem W/G, dla wąskiego przedziału $W/G = 0,35 - 0,45$, według Ranganatham [278]

Fig. 2.10. Relation between high-strength gypsum strength HG and index WG, for narrow range $W/G = 0,35 - 0,45$, after Ranganatham [278]

W podsumowaniu analizowanej w p. 2.2 tematyki należy stwierdzić, że wiele cząstkowych zagadnień dotyczących związków mikrostruktury i wytrzymałości wyrobów gipsowych jest rozpoznane. Podkreślić należy fakt dużej rozbieżności wyników relacji $f_{gc} = f(\omega)$, uzyskanych przez różnych autorów i podanych w różnych źródłach, choć wszystkie badania dotyczą praktycznie prawie czystego gipsu.

Równocześnie w całym zakresie wskaźnika W/G, odmiany α i β półhydratu cechują się odrębnymi charakterystykami (rys. 2.8).

2.3. Badania wytrzymałości i odkształcalności tworzyw gipsowych w różnych stanach naprężeń i wilgotności

W porównaniu do licznych wyników badań wytrzymałości tworzyw gipsowych na ściskanie, podanych zarysowo w p. 2.2, skromne i wrywkowe są serie badań wytrzymałości w innych stanach naprężeń. Klasyczne wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie osiowe f_{gt} , wykonane kilkadziesiąt lat temu przez zespół Kostyrka, Kosielański, Gajsiński (rys. 2.11), przytaczane są przez kolejne monografie: Akermana z 1964 r. [2], Woźniewski i Ferronska z 1973 r. [352]. Bardzo podobne krzywe $f_{gt} = f(\omega)$ podaje Urban [338] – por. zespół krzywych nr 2 na rysunku 2.11. We wszystkich wymienionych pozycjach bibliograficznych niezmiennie brak jest szczegółowych informacji, jakim konkretnym rodzajom gipsów odpowiadają poszczególne krzywe. Dopiero po wnikliwym przestudiowaniu rosyjskich norm dla gipsów autor niniejszej pracy wnosi, że górna krzywa – z zespołu nr 1 na rysunku 2.11 – dotyczy gipsu wysokowytrzymałościowego α zgodnie z normą TU-33-44 dla marek od 15 MPa do 40 MPa, średnie krzywe dotyczą gipsu modelarskiego według GOST-125-41, dolne zaś dotyczą gipsów budowlanych. Wykonane przez Wianeckiego [345] w 1963 r. badania rozciągania osiowego stosunkowo dużych beleczek 7x7x28 cm obrazuje krzywa nr 3 na rysunku 2.11. Nieregularność „przebiegu” krzywej 3 według badań Wianeckiego może świadczyć o rozrzucie wyników z powodu mimośrodowości obciążenia lub mimośrodowej niejednorodności struktury próbek. Badania wytrzymałości na rozciąganie osiowe są bowiem trudne w realizacji, wymagają dużej precyzji technicznej, staranności i dokładności prowadzenia eksperymentów; z tych względów realizowane są w poszczególnych laboratoriach stosunkowo rzadko.

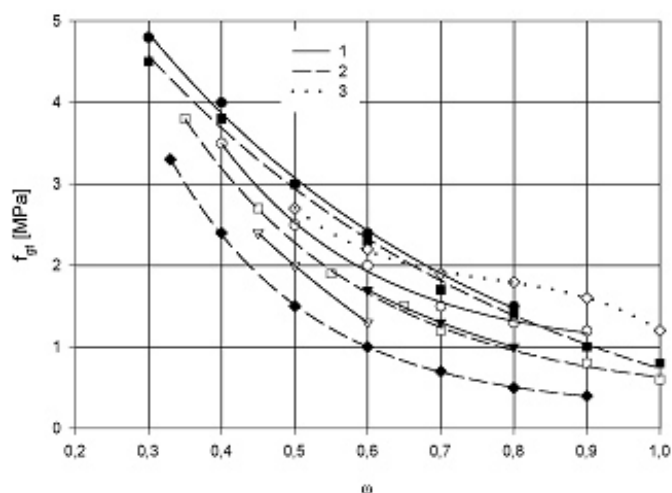
Trudne w realizacji pomiary osiowego rozciągania zastępowane są przez inne badania, na przykład przez:

- określanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} beleczek normowych 4x4x16cm (badania przyjęte powszechnie przez ISO 3051, por. rys. 9.1b) lub większych belek 7x7x28 cm (Wianecki [345] rys. 2.12),
- oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską f'_{gt} przez rozłupywanie walców wzdłuż tworzących (Corneiro, Barcila [42], Klin [123]), por. rys. 9.1a.

Uzyskana tymi metodami wytrzymałość na rozciąganie dotyczy innego stanu naprężeń w całości niszczonej próbki i transformacja tych oznaczeń na przypadek osiowego rozciągania wymaga weryfikacji doświadczalnej. Ponadto brak jest porównawczej oceny dokładności badań według poszczególnych metod. W przypadku badań gipsu różne zależności dotyczą próbek suchych i wilgotnych. Zagadnienie to dokumentuje autor w rozdz. 9 na podstawie badań własnych.

Rusiecki [291] rozszerzył normowe wytrzymałości o badania zaczynów gipsowych na ścinanie f_{gv} . Równoległe wykonane badania wytrzymałości na rozciąganie f_{gt} i na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} , dla zaczynów o $W/G = 0,6 \div 0,8$, dają możliwość – po analizie wyników pracy [291] – ustalenia następujących relacji: $f_{gv} = 2,04f_{gt}$ dla próbek wilgotnych i $f_{gv} = 2,7f_{gtb}$ dla próbek suchych. Uzyskane na podstawie wyników badań

Rusieckiego zależności są zbliżone do analogicznych wartości dla betonów cementowych, w przedziale porównawczych wytrzymałości na ściskanie $\bar{f}_{cc} = 5 \div 20$ MPa, dla których analogiczne relacje wynoszą: $f_{cv} = 1,69 \div 2,0 f_{ctb}$ (Dąbrowski, Stachurski, Zieliński [50]). Analiza szczegółowa wyników badań uzyskanych przez autorów prac: Wianecki [345], Mizera [213], Nowak [224], w porównaniu z wynikami badań własnych zawarta jest w rozdziale 11.

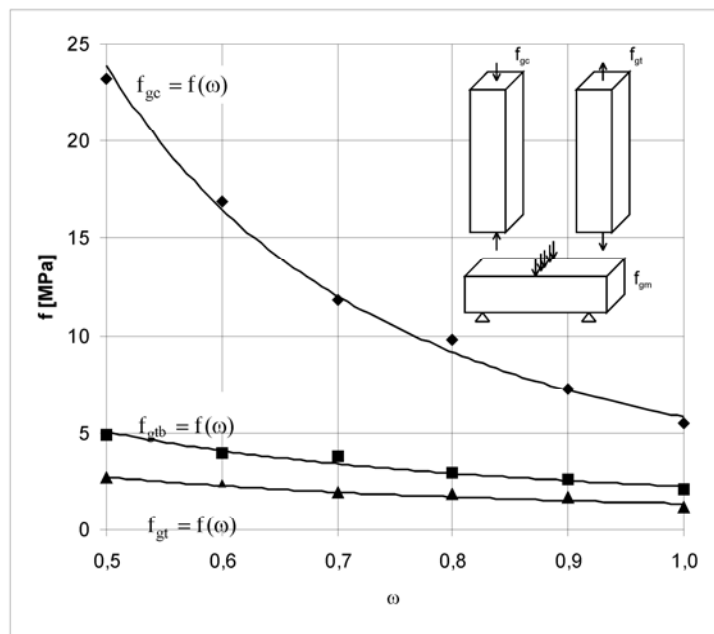


Rys. 2.11. Wyniki badań wytrzymałości gipsu na rozciąganie osiowe f_{gt} , uzyskane przez różnych autorów: 1 – Kostyrka, Kocielanski, [2, 142], 2 – Urban [338], 3 – Wianecki [345]

Fig. 2.11. Test results of gypsum axial tensile strength f_{gt} , obtained by different authors: 1 – Kostyrka, Kocielanski, Gajsiński [2, 142], 2 – Urban [338], 3 – Wianecki [345]

W odniesieniu do wytrzymałości zapraw i betonów gipsowych można sformułować tezę, że dodatek kruszywa (wypełniacza) powoduje spadek wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości matrycy gipsowej, podczas gdy w przypadku spoiw cementowych cementy dają wytrzymałości wyższe w betonie niż w zaczynie. Tezę tę można udokumentować przez porównanie relacji wytrzymałości zaczynów do wytrzymałości zapraw dla $W/S = \text{const.}$, wykorzystując wyniki badań dla tworzyw cementowych wykonanych przez Humla (podane w [31]) i dla tworzyw gipsowych wykonanych przez Meusia [200] i Dutkowskiego [56]. Z badań tych wynika, że wypełniacz piaskowy wywołuje nie większe obniżenie wytrzymałości w przypadku gipsu. Wynika to z małej przyczepności kryształów gipsu do okrągłych ziaren piasku, natomiast w przypadku spoiw toowych istnieje wyraźna przyczepność spoiwa do kruszywa i jest ona natury fizykochemicznej (Czernienko, cytowany w pracy [31]). Badania Kuczyńskiego [32] dowodzą jednak, że dla betonów cementowych o małych wytrzymałościach na ściskanie $f_{cc} \leq 15$ MPa rola przyczepności schodzi całkowicie na dalszy plan, ma jednak większy wpływ

wpływ na wytrzymałość na rozciąganie. Analizowany problem jest złożony i Bukowski [31] przytacza sprzeczne wyniki badań betonów cementowych przez różnych autorów w zakresie wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 2.12. Wyniki badań wytrzymałości f próbek gipsu francuskiego „Molda Normal”: f_{gc} – na ściskanie, f_{gtb} – na zginanie, f_{gt} – na rozciąganie osiowe, $\omega = W/G$; zestawienie autora na podstawie wyników badań Wianeckiego [345]

Fig. 2.12. Test results of strength f of „Molda Normal” French plaster samples: f_{gc} – compressive strength; f_{gtb} – bending strength f_{gt} – axial tensile strength; $\omega = W/G$; author’s comparison on the basis of Wianecki’s test results [345]

W przypadku gipsu zalecane jest stosowanie kruszyw lekkich porowatych, takich jak żużel lub pumeks, gdyż z uwagi na lepsze połączenie mechaniczne spoiwa i wypełniacza uzyskuje się wyraźnie wyższą wytrzymałość na ściskanie niż w przypadku stosowania okrągłych ziaren piasku i żwiru (Dutkowski [56]).

Krzywe $f_{gc} = f(\omega)$ – charakteryzujące zmiany wytrzymałości na ściskanie f_{gc} dla betonów gipsowych, wykonanych z zaczynów gipsowych o stosunku $W/G = \omega$ – są jakościowo podobne do analogicznych zależności $f_{gc} = f(\omega)$ dla stwardniałych zaczynów gipsowych podanych na rysunkach 2.6 i 2.8. Dla zakresu opadających wartości tych krzywych, dla $\omega > \omega_{opt}$, dla betonów wykonanych z gipsów wysokowytrzymałościowych Bułyczew [33] sformułował opis funkcji $f_{gc} = f(\omega)$ w postaci związku:

$$f_{gc} = K_1 A \left(\frac{\frac{G}{W} - 0,5}{\frac{G'}{W'} - 0,5} \right) \quad (2.9)$$

gdzie:

K_1 – współczynnik kształtu próbek testujących projektowaną wytrzymałość,

A – aktywność spoiwa odpowiadająca wytrzymałości na ściskanie stwardniałego zaczynu o normalnej konsystencji (rozplływ wg Southarda $d = 18$ cm),

G'/W' – wskaźnik gipsowo-wodny odpowiadający zaczynowi o konsystencji normalnej.

Zależność (2.9) jest analogiczna do wcześniejszego wzoru dla betonów cementowych, zaproponowanego przez Bolomey'a [18]. Doświadczalna weryfikacja zależności (2.9) przeprowadzona przez Czernskiego [46, 48] wykazała, że przy projektowaniu i sprawdzaniu wytrzymałości betonów wykonanych z gipsu budowlanego β -półhydratu o niższej wytrzymałości – uzyskuje się dobrą zgodność z eksperymentem tylko w zakresie małych wartości $W/G = 0,33 \div 0,43$, a więc w zakresie większych wytrzymałości tworzywa i gęstoplastycznych zarobów i to tylko dla kruszyw typu żwirów i żużli kotłowych. Brak zgodności w przypadkach:

- dla $W/G = 0,33 \div 0,35$ przy zastosowaniu grysów granitowych,
- zupełny brak zgodności w przypadku $W/G = 0,58$ i $0,68$, przy stosowaniu grysów ceglanych, w przypadku których wyniki doświadczalne były odpowiednio 1,75 i 2,33 razy większe od wartości obliczonych z zależności (2.9).

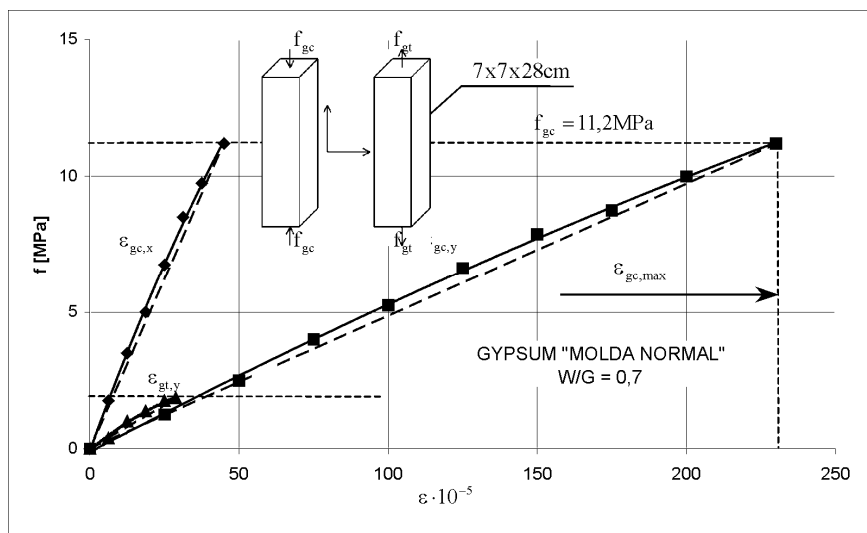
Próba dostosowania wzoru Bolomey'a do betonów z gipsu budowlanego i wypełniaczy ciężkich, przez wprowadzenie dodatkowego mnożnika $a = 1,3$ (Czernski [47] oraz Woźniski i Ferronska [352]) i zmianę zależności (2.9) do postaci:

$$f_{gc} = K_1 A \left(\frac{\frac{G}{W} \times a - 0,5}{\frac{G'}{W'} - 0,5} \right) \quad (2.10)$$

nie poprawia dużej rozbieżności wyników dla zakresu $W/G = 0,59 \div 0,68$, natomiast powoduje brak zgodności wyników w zakresie $W/G = 0,33 \div 0,43$. Wniosek ten wysuwa autor niniejszej pracy na podstawie wnikliwej analizy wyników badań Czernskiego [47, 48] oraz własnych analiz i obliczeń porównawczych. Omawiane niezgodności z eksperymentalnym wzorem Bułyczewa (2.9), w przypadku betonów z gipsów o małej wytrzymałości, wskazują na konieczność wprowadzenia innej postaci funkcji $f_{gc} = f(\omega')$, przyjmując $\omega' = 1/\omega = G/W$ (wniki badań własnych, przykładowo jak na rys. 11.1).

Odkształcalność zaczynów gipsowych badano pierwotnie w celu ustalenia właściwości mechanicznych modeli z gipsu, stosowanych dla odwzorowania konstrukcji inżynierskich na etapie badań laboratoryjnych. Wianecki [345] badał relacje σ – ε w przypadku ściskania i rozciągania próbek z francuskiego gipsu modelowego „Molda normal” (rys. 2.13). Mierząc tensometrami odkształcenia ε_x i ε_y , określił moduły sprężystości przy ścisnaniu i rozciąganiu oraz wartości maksymalnych odkształceń ε_{max} dla gipsów

w stanie suchym. Odształcalność przy zginaniu cienkich płyt o grubości 1 cm, wykonanych z gipsu dentystycznego „Nowy Łąd” oznaczył Denkiewicz [53], dokonując pomiaru ugięć i obliczając moduł z teoretycznego wzoru na ugięcie belki. Wyniki badań Wianeckiego [345] i Denkiewicza [53] – w porównaniu z wynikami badań własnych odształcalności gipsu budowlanego w różnych stanach naprężeń i wilgotności – zostały przeanalizowane w rozdziale 17.

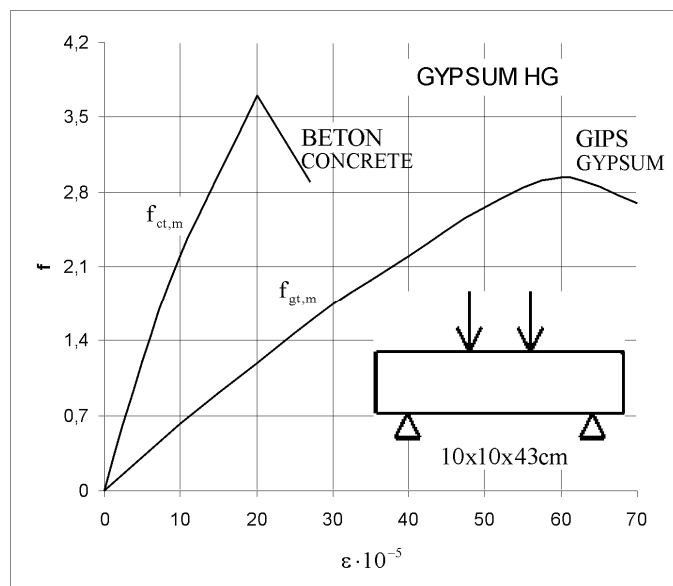


Rys. 2.13. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla testów ściskania i rozciągania próbek gipsu „Molda normal”, według Wianeckiego [345]

Fig. 2.13. Charts $\sigma - \varepsilon$ for compression and tension tests of „Molda normal” gypsum samples, after Wianeckie [345]

Dla celów modelowych badań konstrukcji inżynierskich odwzorowanych z gipsu, charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ dla gipsów HG wysokiej wytrzymałości, w zakresie W/G = 0,35÷0,45 badali: Ranganatham i inni [278], Smith i Orangun [312], Smith [313] i Leslie [174]. Stwierdzono, że beton i gips HG mają podobną charakterystykę $\sigma - \varepsilon$ na ściskanie i nawet zakresy ε_{max} były do siebie zbliżone [312, 313], natomiast w teście zginania wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla betonu i gipsu mają różne przedziały odkształceń granicznych (rys. 2.14).

Komarnicki [139, 140] badał odształcalność przy ściskaniu betonów gipsowych z różnymi wypełniaczami i stwierdził, że wypełniacze żużłowe zwiększają wytrzymałości i zwiększają moduły odkształcalności kompozytu, w stosunku do analogicznych wartości dla czystego zaczynu stwardniałego. Graniczne odkształcenia gipsów z kruszywem żużłowym są jednak mniejsze od odkształceń granicznych matrycy stwardniałego zaczynu gipsowego. Podobne relacje dla stwardniałych zaczynów i betonów na spoiwach mieszanek GCP otrzymali Woźniski, Stambułko, Ferronska [354].



Rys. 2.14. Porównanie wykresów $\sigma - \epsilon$ dla skrajnych „włókien” rozciąganych w belkach zginanych, wykonanych z betonu cementowego i gipsu, według Leslie [174]

Fig. 2.14. Comparison of charts $\sigma - \epsilon$ for extreme „fibres” tensed in bent beams, made of cement concrete and gypsum, after Leslie [174]

Yilimaz i Sendir [359] wykorzystali młotek Schmidta do oznaczeń wytrzymałości i modułu Younga oraz charakterystyk cech mechanicznych podkładów z gipsu z rejonu Sivas w Turcji, opracowując statystyczne krzywe korelacji dla badanych wielkości. Norton, Peters, Jacobson [223] zastosowali bardzo efektywnie promienie X do badań rozkładu gęstości gipsu w płytach gipsowo-kartonowych, w celu kontroli jednorodności rdzeni gipsowych.

Współczynnik Poissona dla zaczynów gipsowych $W/G = 1,0 \div 0,5$ waha się w zakresie $\nu = 0,206 \div 0,196$ (według Wianeckiego [345]). Wartości tego współczynnika dla tworzyw na spoiwach mineralnych gipsowo-cementowo-pucolanowych zamykają się w podobnym zakresie $\nu = 0,17 \div 0,25$ (Wołżenski z zespołem [354]).

W zakresie naprężeń własnych elementów z gipsu dużą rolę odgrywają zmiany objętościowe i liniowe dojrzewających tworzyw, które występują z reguły w postaci pęcznienia (Kuhlmann, Ludwig [159], Kossatz [146]). Zmiany liniowe zaczynów bez wypełniaczy mogą wynosić do 5% (Dutkowski, Chełkowska [54], Ostrowski [244]). Wichter [346] podaje, że pęcznienie półhydratów gipsu w czasie twardnienia wynosi od 0,05 do 0,15%. Wprowadzenie wypełniaczy mineralnych powoduje obniżenie pęcznienia: przy stosunku gips:keramzyt = 1:1,5 (przy $W/G = 1,0$) wielkość pęcznienia nie przekracza 0,05%, przy stosunku gips:kruszywo = 1:2 pęcznienia nie ma (Dutkowski [56]).

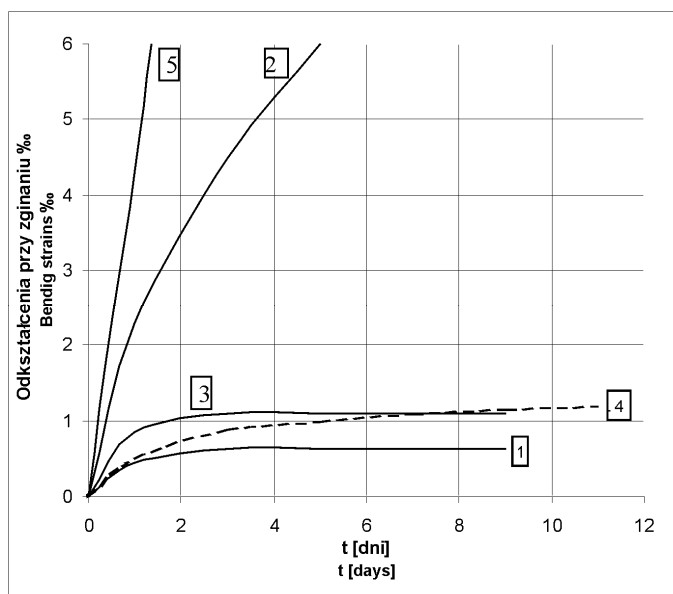
Gmouch z zespołem marokańsko-francuskich badaczy [72, 73] określił ciśnienie pęcznienia w funkcji czasu wiązania. Ciśnienia te są wysokie dla gipsów drobnoziarnistych, rosną ze stosunkiem G/W, czyli maleją wraz ze wzrostem konsystencji gipsu. Ciśnienia te wywołują technologiczne sprężenie gipsu i sprzyjają tworzeniu się zwartych aglomeratów z kryształów gipsu. Zmiany objętościowe zaczynów gipsowych w trakcie dojrzewania i zmiany gęstości twardego gipsu w zależności od konsystencji gipsu badali także Sattler i Bruckner [294].

Brak odporności na wodę gipsu, objawiający się: dużym spadkiem wytrzymałości, wzrostem odkształcalności i pęcznienia – stanowi główną wadę tego materiału. Największe spadki wytrzymałości, wynoszące 50%, zachodzą już w zakresie małych zmian wilgotności do 2% (badania Russela [291]). Wobec kapilarnego podsiąkania wody w porowatej mikrostrukturze zaczynu Szymański [325] wykazał występowanie otoczek wodnych na kryształach gipsu, stanowiących w istocie nasycony roztwór gipsu, oddzielający ściany dużych kryształów. Stąd tak duży spadek wytrzymałości zaczynu, wzrost odkształcalności i pęcznienie wyrobów z gipsu po ich nawilgoceniu.

Skalmowski i Szymański [302, 303] wykazali, że także naturalny gips, o wytrzymałości na ściskanie 40 MPa, po namoczeniu wykazywał nasiąkliwość zaledwie 0,2%, ale nastąpił spadek wytrzymałości około 50%. Prace badawcze innych autorów: Russel [291], Szymański [324], Bagelke [12], Karger [111], Komarnicki [141] – stanowią potwierdzenie wpływu wody na gips oraz dokumentują ilościowo zjawisko dla różnych tworzyw gipsowych. Mechanizm tworzenia się zrostów między ścianami kryształów i eliminacja fazy ciekłej, opisanej przez Szymańskiego [325], tłumaczy także skokowy przyrost wytrzymałości gipsu w końcowej fazie suszenia do stałej masy (Hartwig i inni [88]). Przyczyn podatności gipsu na działanie wody upatrywali różni autorzy także w jego budowie krystalicznej, w procesach uwadniania porów i pustek międzykrystalicznych (Grzymek [83], Kramer i Koschany [150], Brückner [27]). Kubik, Mizera, Najzarek [153] podjęli także próbę opisu procesu rozmiękania gipsu.

Oslabienie wiązań międzykrystalicznych w wilgotnym zaczynie gipsowym objawia się – oprócz spadku wytrzymałości – także wzrostem odkształceń plastycznych i pęcznienia (Pieredierij [259] rys. 2.15). Badania Perederija [259] dokumentują duże pęcznienie nawilgoconych zaczynów gipsowych przy naprężeniach zginających i to zarówno dla gipsu budowlanego odmiany β -półhydratu, jak i dla gipsu HG wysokiej wytrzymałości (rys. 2.15, krzywe 2 i 5). Zdecydowanie mniejsze pęcznienie odnotowuje się w przypadku nawilgoconych gipsobetonów (rys. 2.15, krzywa 3) oraz gipsobetonów wzmocnionych zbrojeniem rozproszonym (rys. 2.15, krzywa 4). Natomiast zaczyn z gipsu HG w stanie suchym cechuje się stabilnością pęcznienia już po czterech dniach obciążania (rys. 2.15, krzywa 1). Stabilizację odkształceń pęcznienia w stanie suchym potwierdzają także wyniki badań autorów: Ferronska, Baranow [64], którzy w przypadku zginania belek z betonów gipsowych ze spoiwa GCP, zbrojonych stalą, uzyskali po 10 dniach ustabilizowany stan pęcznienia. Podobne zjawisko odnotowała Kozina [148] w przypadku betonów gipsowych GCP zbrojonych włóknami polipropylenowymi. Zdecydowanie mniejsze są odkształcenia plastyczne i pęcznienie betonów gipsowych z GCP w stanie ściskania; dla stanów suchych są one mało różniące się od obserwowanych w betonach cementowych (Woźnenski

i inni [354]), w przypadku względnego poziomu naprężeń $\sigma/f = 0,35$. Dla stanów wilgotnych pełzanie gipsobetonów z GCP jest początkowo większe, ale szybko stabilizuje się (Ferronska, Korowiakow [61]).



Rys. 2.15. Odkształcenia plastyczne zginanych tworzyw gipsowych, według Perederija [259]: 1 – zaczyn z gipsu HG suchego, 2 – zaczyn z gipsu HG nasyconego wodą, 3 – gipsobeton z HG nasycony wodą, 4 – gipsobeton z HG zbrojony, nasycony wodą, 5 – zaczyn z gipsu budowlanego nasyconego wodą

Fig. 2.15. Plastic strains of bent gypsum materials, after Perederija [259]: 1 – dry gypsum paste HG, 2 – humid gypsum paste HG, 3 – humid gypsum concrete from HG, 4 – humid gypsum concrete from HG reinforced, 5 – humid building plaster paste

Nowsze badania zespołu autorów: Badens, Vessler, Boistelle i Chatair [8] określają wpływ wzrostu zawartości wilgoci ΔW na spadek ΔE modułów sprężystości dojrzałych zaczynów gipsowych, wskazując na decydujący wpływ wzrostu grubości warstwy wody na styku kryształów. Kallath i Juhasz [106] określili wpływ kapilarnego podsiąkania w zaczynach z gipsu i tlenku glinu Al_2O_3 . Rendell i Jaubertie [282] stwierdzili wzrost twardości zapraw cementowych spowodowany tworzeniem się gipsu, w przypadku oddziaływania środowiska wodnego zawierającego siarczan.

Na podstawie studiów literatury problemu odkształcalności tworzyw gipsowych, w powiązaniu z brakiem odporności na wodę, nasuwają się poniższe wnioski dotyczące stosowania gipsu w budownictwie:

- a) W elementach gipsowych nawilgoconych nie tyle niewalczony jest problem spadku wytrzymałości, który można bez problemu uwzględnić w obliczeniach

statycznych, w przypadku zastosowania tych tworzyw w budownictwie w relatywnie grubych ścianach, ale poziom naprężeń σ/f , który determinuje narastanie odkształceń plastycznych w czasie. Przy poziomie $\sigma/f = 0,35$ niektórzy autorzy sugerują względną stabilność reologiczną kompozytu. Poziom ten dla różnych kompozytów będzie można ustalić dopiero po szerszych badaniach pełzania, gdyż poznanie tej zależności należy uznać za niewystarczające.

- c) Należy dążyć do stosowania betonów z gipsu z wypełniaczami żużłowymi różnych typów, jako materiałów o zdecydowanie mniejszej tendencji do odkształceń plastycznych, w porównaniu do wyrobów z samego gipsu. Należy przede wszystkim w tym zakresie przebadać spoiwa mieszane anhydrytowe oraz gipsy wzmocnione zbrojeniem rozproszonym.

Z omawianą problematyką braku odporności gipsu na działanie wody wiąże się temat jego strukturalnego i powierzchniowego uodpornienia na działanie wilgoci. Problem ten szeroko omówił autor niniejszej pracy w publikacji [126], z analizą bibliografii tematu, w nawiązaniu do badań Chvatala [36] i przeglądowej pracy Ostrowskiego [247]. Odnośnie do uodpornienia strukturalnego gipsu autor niniejszej pracy konstatuje, że nadzieja która kierowała bardzo liczną grupę badaczy w kierunku poszukiwaniu rozwiązania tego problemu, nie spełniła się i nie uzyskano ekonomicznie efektywnych rozwiązań. Przyczyną niepowodzeń jest duża rozpuszczalność gipsu, a także charakter mikrostruktury, z systemem otwartych porów, które trudno jest uszczelnić w całej masie. Nawet jeśli uszczelnią się duże pory konstrukcyjnymi żywicami poliestrowymi (badania Lisowskiego i Matyjaszewskiej [181], epoksydowymi (Chvatal [36]), styrenowymi (Jakubowska [99]), aminowo-formaldehydowymi (Horyl [90]), montanową (Mazur [196] i innymi), to kompozyt będzie podciągał kapilarnie wodę mikroszczelinami między ścianami kryształów w aglomeratach. Efekty wytrzymałościowe uzyskuje się dopiero przy dużym dodatku żywic około 20÷30% (Chvatal [36]), gdy w przestrzeni otwartych porów w matrycy gipsowej wytworzy się niezależny szkielet własny związanej żywicy. Ta operacja technologiczna jest jednak nieopłacalna, biorąc pod uwagę fakt, że jedna z najtańszych – żywica mocznikowa jest 10 razy droższa od cementu, czyli 25 razy droższa od gipsu, a żywica epoksydowa jest 300 razy droższa od gipsu (Czarnecki [44]). W kontekście tej analizy pozostają metody zabezpieczeń powierzchniowych, z użyciem preparatów zmniejszających sorpcję wilgoci, ale zapewniających możliwość „oddychania” gipsu, co dokumentują badania Planety [271], Borowskiego [22], Mazura [196]. Powłoki szczelne powierzchniowe można stosować w strefie, w której występuje zagrożenie styku wodą. Hydrofobizacja gipsów preparatami silikonowymi i krzemooorganicznymi daje efektywne ograniczenie pochłaniania wilgoci i podsiąkania kapilarnego wody (Pichniarczyk [261, 262]).

2.4. Wpływ technologii wytwarzania wyrobów i dodatków specjalnych na wytrzymałość i odporność gipsu na działanie wody

2.4.1. Wpływ technologii wytwarzania wyrobów

Zwiększenie wytrzymałości wyrobów i zmniejszenie spadków wytrzymałości po nawilgoceniu uzyskuje się przez formowanie gęstszych zarobów, o $W/G = 0,5 \div 0,35$, techniką wibracji (Czerski [46]). Do zagęszczania zaczynów o wartości W/G mniejszej od 0,35 konieczne jest stosowanie specjalnych wibratorów impulsowych (Czerski [46]). W zakresie $W/G = 0,35 \div 0,27$ dobre efekty zagęszczania tworzyw gipsowych uzyskuje się dopiero techniką prasowania z odpowietrzaniem (Mikoś [206], Nowak [226]). Dla próbek zagęszczanych pulsacyjnie o $W/G = 0,23 \div 0,2$ Czerski [46] odnotował jednak duży spadek wytrzymałości po nawilgoceniu, nawet o 70%, podczas gdy dla próbek o $W/G = 0,4 \div 0,5$ spadek jest mniejszy i wynosi 40-50%. Duże spadki wytrzymałości po nawilgoceniu zaczynów o $W/G \leq 0,25$ powodowane są wewnętrznymi naprężeniami, związanymi z objętościowymi deformacjami gipsu, które mogą być nawet przyczyną zniszczenia jego mikrostruktury (Ratinow i inni [280]).

Duże możliwości otrzymywania wyrobów wysokiej wytrzymałości z gipsu daje technika formowania przez prasowanie półhydratu β , nawilżonego w formie (Suzuki, Koto [321]). Nową technologią jest termoprasowanie dwuwodnego gipsu, przy ciśnieniach do 100 MPa, z równoczesną hydrotermiczną rekrytalizacją naturalnego surowca do powstania silnie zagęszczonych i dobrze powiązanych wtórnych kryształów dwuhydratu, o wytrzymałości na ściskanie 50-75 MPa, nasiąkliwości 6-10% i współczynniku rozmiękania 0,45-0,5 (Samcow, Liaszkiewicz, Ratinow [293]). Badania Kucharskiej, Moczko [154] wyjaśniają mechanizmy procesów chemicznych dehydratacji dwuwodzianu w technologii termoprasowania, a osiągnięte rezultaty mogą stanowić podstawę optymalizacji parametrów technicznych tej technologii.

Kucharska i Moczko wykazały, że materiał po procesie termooobrobki w zakresie temperatur 130°C-150°C zawiera odpowiednio 23,7%-78% półhydratu i półprodukt wymaga nasycenia wodą w warunkach normalnych w celu jego uwodnienia, ponownego suszenia i dopiero uzyskuje się tworzywo o wytrzymałości 73 MPa. Odnotowano także duże spadki wytrzymałości gotowego, suchego tworzywa, po jego nawilgoceniu, o 67%, a nawet o 90% przy niekorzystnej temperaturze termooobrobki 150 °C. Należy wnioskować, że wymuszone w tej technologii procesy wielokrotnej rekrytalizacji wywołują naprężenia wewnętrzne, które – oprócz zmian objętości – dodatkowo obniżają wytrzymałość gotowego wyrobu po nawilgoceniu.

Prasowanie w powyższej technologii proszku półhydratu β w temperaturze 18 °C daje materiał o wytrzymałości 38-40 MPa, charakteryzujący się współczynnikiem rozmiękania 0,25 (Gracjanski, Franko [79], Wołżenski, Ferronska [352]). Ograniczenie naprężeń wewnętrznych w finalnym tworzywie w tej technologii można uzyskać przez

stosowanie surowca złożonego z dwuhydratu i półhydratu (Ratinow [279]). Kucharska, Moczko [155] ustaliły, że dodatek siarki i polietylenu powoduje stabilizację wytrzymałości i zwiększenie odporności na działanie wody materiałów gipsowych prasowanych na gorąco.

2.4.2. Domieszki specjalne poprawiające jakość wyrobów gipsowych

Z licznych prac badawczych wiadomo, że dodatek wapna w ilości 5% poprawia wytrzymałość i wodoodporność tworzywa (Pietrón [269]). W pracy [157] (Kucharska, Moczko) wykazano, że dodatek miki o dużym rozdrobnieniu zwiększa wytrzymałość wyrobów z gipsu budowlanego, oraz że zastosowanie polifosforanu sodu jako inhibitora wiązania zmniejsza wodożądność gipsu. Gorbaczewa i inni [75] uzyskali ciekawe, odporne na działanie wody spoiwo gipsowo-żelazowo-magnezowe, charakteryzujące się współczynnikiem rozmiękania o wysokiej wartości $K = 0,90 \div 0,97$ i wytrzymałością $R_{28} = 6,2$ MPa. Rezultaty te są interesujące także z tego powodu, że otrzymano spoiwo modyfikowane bardzo tanim dodatkiem, stosując do 3% materiałów odpadowych z przemysłu.

Dobrą wytrzymałość wyrobów gipsowych, poprzez oddziaływanie siarczanem aluminium $Al_2(SO_4)_3$, uzyskał Kriuczok [151]. Ferronskaja i inni [62] stosowali do spoiw GCP dodatek złożony z: plastyfikatora, etyłodwuaminy i wodnej emulsji polimeru. Uzyskano dobrą urabialność zaczynu o $W/G = 0,25 \div 0,38$ i wytrzymałość gotowego wyrobu w przedziale $23,2 \div 30,6$ MPa. Quant i inni [277] stosowali mieszaninę fosfogipsu, popiołu lotnego, wapna pokarbidowego, piasku i szkła wodnego w celu uzyskania kompozytu do powierzchniowego uszczelnienia i wzmocnienia gruntów. Korzystny wpływ na właściwości tworzyw gipsowych różnych dodatków organicznych i nieorganicznych odnotowali autorzy prac: Jakubowska [99], Siewert, Heming [299]. Worobiew [356] stwierdził korzystny wpływ chlorków, a Tomasik [331] – eterów celulozy.

Boisvert z zespołem [13] stwierdzili korzystny wpływ poliakrylanu sodu na zarodkowanie kryształów gipsu w procesie wiązania. Badens, Vessler, Boistelle [9] określili wpływ różnych kwasów organicznych: adypinowego, winowego, jabłkowego, cytrynowego na opóźnienie czasu wiązania, rozszerzając eksperymenty o analizy wpływu tych domieszek na mikrostrukturę dojrzałego gipsu.

Mahmoud z zespołem [186] określił wpływ kwasu fosforowego H_3PO_4 , kwasu siarkowego H_2SO_4 , kwaśnego fosforanu wapnia $CaHPO_4$ na szybkość wiązania i strukturę gipsu stwardniałego, ustalając optymalizację ilości tych domieszek jako modyfikatorów gipsu.

Karni J., Karni E. [448] zbadali wpływ rodzaju spoiwa gipsowego na ekspansję objętościową zaczynów w pierwszym okresie twardnienia do 60 minut, stwierdzając korzystny wpływ domieszek opóźniających wiązanie na zmniejszenie tej ekspansji.

Bardzo interesujące są wyniki badań z 2003 roku zespołu autorów Małolepszy, Hynowski [190, 191] nad wpływem wybranych dodatków mineralnych na hydratację spoiw gipsowych oraz na mikrostrukturę stwardniałych zaczynów gipsowych. Stwier-

dzono, że dodatki typu: wapno hydrauliczne, mączka wapienna, anhydryt naturalny, pył krzemionkowy, zmielony żużel wielkopiecowy powodują wzrost wytrzymałości stwardniałych zaczynów oraz zmniejszenie destrukcyjnego wpływu zawilgoceń (wzrost współczynników rozmiękania). Szczególnie korzystne efekty uzyskano przy zastosowaniu żużla wielkopiecowego oraz pyłu krzemionkowego i wapna. Stwierdzono, że dodane dodatki mineralne zmieniają kształt i wielkość kryształów gipsu dojrzałego, wywołując tworzenie się kryształów w postaci grubych słupków i płytek. Dodatki te wpływają na korzystne wypełnianie wolnych przestrzeni pomiędzy kryształami dwuhydratu, dzięki czemu tworzy się bardziej zwarta struktura. Podobne rezultaty uzyskano stosując dodatki mineralne do spoiwa anhydrytowego; dodatek 1% pyłu krzemionkowego i 5% wapna hydratyzowanego spowodował duży wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie odpowiednio o 150% i 114%. Stwierdzono, że dodatek mikrokrzemionki i zmielonego żużla wielkopiecowego obniża mikroporowatość stwardniałych zaczynów gipsowych i anhydrytowych w zakresie porów kapilarnych. Rezultaty tych badań mogą mieć duże znaczenie praktyczne w efektywnej modyfikacji spoiw gipsowych, szczególnie do produkcji elementów budowlanych.

2.5. Obliczenia i wymiarowanie elementów gipsowych

Założenia do obliczeń statycznych elementów gipsowych ściskanych podali Meus i Rzepecki [200], opierając się na zasadzie naprężeń dopuszczalnych. Autorzy przyjęli wytrzymałość reprezentatywną materiału w stanie pełnego nasycenia wodą, a współczynnik pewności oszacowano w przybliżeniu równy $S = 2,5$ dla ścian wznoszonych z prefabrykatów i $S = 3,0$ dla ścian litych.

Kryteria wytrzymałościowe dotyczące gipsowych elementów ścianek działowych opracował Reyman [283], z oszacowaniem wielkości obciążeń statycznych i dynamicznych użytkowych oraz obciążeń przekazywanych przez uginające się płyty stropowe. Urban [335] zajmował się obliczeniami momentów zginających w ścianach działowych od zawieszonych urządzeń, które oszacował w wielkości $M = 470 \text{ Nm/mb}$ ścianki. Rejestr możliwych obciążeń dla ścianek działowych z gipsu zestawiał Szlemminger [322]. Badania wytrzymałości i propozycję obliczeń statycznych dla przekątniowych pustaków typu TB-1 opracowali Dutkowski, Makulski [55]. Weryfikację ogólnej teorii sprężystości – w zastosowaniu do obliczeń warstwowych ścian działowych z płyt GK – i wyników badań wytrzymałości podał Hanusch [87]. Hanusch przyjął następujące ustalenia dotyczące bezpieczeństwa w projektowaniu: dla pasa ściskanego stosunek siły krytycznej do obliczeniowej $F_{kr}/F_d \leq 3$, współczynnik pewności przy rozciąganiu płyt gipsowo-kartonowych nie powinien być mniejszy od 3,2 i wytrzymałość dopuszczalną przyjął na poziomie $\sigma_{dop} = 0,95 \text{ MPa}$, maksymalne ugięcie ścian nie powinno przekraczać wartości $f \leq \frac{l_0}{350}$ lub 10 mm, gdzie l_0 – rozpiętość między żebrami poprzecznymi. Wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości i ugięć stropu gipsowo-żelbetowego podali Borowski,

Brunarski [20]. W pracy [200] wyszczególniony jest szeroki zestaw sprawozdań z badań wytrzymałościowych elementów i konstrukcji z gipsu, ścian, filarów, stropów, nych przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie w latach 1959÷1962.

W podsumowaniu problemów ujętych w p. 2.5 nasuwają się poniższe wnioski:

- a) Wstępne zaledwie zarysowanie problematyki obliczeń i wymiarowania elementów budowlanych z gipsu, opracowane na bieżące potrzeby realizacji budownictwa z gipsu w latach 1958–1962, pozostało do dzisiaj nie rozwinięte dalej. Wstępne ustalenia obliczeń elementów warstwowych z płyt GK w stanie suchym, jak w pracy Hanuscha [87], wymagają uzupełnień dla stanów nawilgoconych.
- b) Występuje olbrzymia dysproporcja między szerokimi dociekaniem badawczymi – rozwijanymi w różnych kierunkach, głównie w zakresie optymalizacji i modyfikacji technologii spoiw i wyrobów – a prawie nie rozwijaniem problematyki wytrzymałości i wymiarowania elementów z gipsu.
- c) Szczególnie pilne potrzeby badawcze i analityczne dotyczą następujących zagadnień:
 - nośności elementów z gipsu w różnych stanach naprężeń,
 - probabilistyczne określenie „dolnej” wytrzymałości wyrobów z gipsu dla stanów nawilgoconych,
 - określenie przynajmniej reologii i pełzania elementów ściskanych w różnych stanach naprężeń σ/f i różnych stanach wilgotności.

3. CEL I ZAKRES PRACY, METODY, TECHNIKI ORAZ NARZĘDZIA BADAWCZE

Celem niniejszej pracy jest określenie zmienności wytrzymałości gipsu budowlanego w ujęciu statystycznym, z analizą losowych rozkładów wytrzymałości i wytrzymałości gwarantowanych, a także odkształcalności gipsu pod działaniem obciążeń krótkotrwałych, badanych w różnych stanach naprężeń i wilgotności, jako zespół problemów dotyczących mechaniki gipsu stwardniałego. Pochodnym celem tych analiz jest opracowanie naukowo-badawczych podstaw do klasyfikacji wytrzymałościowej gipsu jako spoiwa budowlanego, a także do określeń statystycznych charakterystyk wytrzymałościowych i klasyfikacji wytrzymałościowej wyrobów z gipsu z uwagi na problemy bezpieczeństwa nośności elementów.

Postawiony jak wyżej zespół problemów badawczych jest w pracy rozwiązywany na podstawie wyników laboratoryjnych badań właściwości gipsu w ujęciu statystycznym oraz analiz teoretyczno-studialnych dotyczących problemów mechaniki gipsu. Składowe problemy rozwiązywane są w czterech etapach, dotyczących kolejno: spoiw gipsowych, zaczynów w stanie świeżym, gipsów stwardniałych oraz złożonych relacji woda – stwardniały gips.

W problematyce dotyczącej gipsu – jako spoiwa budowlanego – podstawowym celem badawczym jest określenie: zmienności cech składu chemicznego i mineralnego gipsów budowlanych z surowców naturalnych i syntetycznych, zależnie od technologii prażenia; zmienności cech fizycznych i technologicznych, takich jak: wodożądność, uziarnienie warunkowane technologią przemiału; wpływu tych czynników na losowe rozkłady wytrzymałości normowej na ściskanie i zginanie.

Pochodnymi celami są: określenie jednorodności różnych gipsów budowlanych oraz ustalenie statystycznych związków między wytrzymałością normową na ściskanie $f_{gc,2h}$ w stanie pierwotnej wilgotności a wytrzymałością f_{gc} w stanie suchym i opracowanie algorytmów ustalania wytrzymałości gwarantowanych $f_{gc,2h}^G$ i f_{gc}^G , wraz z propozycją klas wytrzymałościowych gipsu budowlanego, z analitycznym przypisaniem do tych klas odpowiadających statystycznie wytrzymałości średnich i gwarantowanych w stanie suchym i nawilgoconym. Dalszym składowym celem – bloku zagadnień dotyczących spoiw gipsowych – jest rozpoznanie i opisanie właściwości frakcji składowych f_1 – f_8 rozsianego gipsu budowlanego oraz poznawczo – niezbędne określenie parcjalnych stopni hydratacji i powierzchni właściwych dla frakcji składowych.

W problematyce dotyczącej świeżych zaczynów gipsowych postawiono w pracy następujące cele badawcze:

- określenie związków między konsystencją zaczynów a wodożądnością spoiw gipsowych z różnych technologii ich produkcji;
- ustalenie wpływu konsystencji na jednorodność wytrzymałości gipsów stwardniałych;
- analiza zmian konsystencji zaczynów gipsowych jako efektu postępującej w czasie hydratacji gipsu;
- opracowanie propozycji efektywnych metod szacowań konsystencji dla zaczynów gipsowych, o kolejno różnych wskaźnikach W/G;
- porównawcze analizy czasu początku (t_{pw}) i końca (t_{kw}) wiązania różnych gipsów budowlanych, z surowców naturalnych i syntetycznych, wraz z analitycznym opisem tych wielkości w funkcji wskaźnika W/G.

W problematyce dotyczącej gipsów stwardniałych postawiono w pracy następujące cele naukowo-badawcze, niezbędne do ustaleń elementów mechaniki gipsu:

- określenie statystycznych rozkładów wytrzymałości stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego o różnych wskaźnikach W/G, w różnych stanach naprężeń i wilgotności, wraz z analizą klasyfikacji wytrzymałościowej;
- analityczny opis wytrzymałości gipsu w funkcji wskaźnika W/G, dla różnych stanów naprężeń i wilgotności;
- ustalenie analitycznych związków między poszczególnymi wytrzymałościami gipsów stwardniałych, w funkcji wskaźnika W/G;
- analityczny opis charakterystyki odkształceń i modułów sprężystości E_g gipsów stwardniałych w różnych stanach naprężeń i wilgotności, w funkcji wskaźnika W/G, pod działaniem obciążeń krótkotrwałych;
- rozpoznanie i opisanie dla elementów zginanych w stanie suchym: funkcji rozkładu odkształceń ε w przekrojach normalnych dla różnych poziomów naprężeń σ/f_g , sprężysto-plastycznego wskaźnika wytrzymałości oraz funkcji momentu łamiącego;
- rozpoznanie i analityczny opis zależności między wytrzymałością gipsów stwardniałych w stanie suchym f_{gc} a szybkością przepływu ultradźwięków v , a także między wytrzymałością f_{gc} a gęstością gipsu ρ , praktycznie przydatnych do badań wytrzymałości metodami nieniszczącymi.

W kluczowej dla gipsu problematyce złożonych relacji woda – stwardniały gips postawiono w pracy następujące cele naukowo-badawcze:

- rozpoznanie i opis zmian objętościowych twardniejącego gipsu w procesie pierwotnego odsychania i w czasie wtórnego nawilgocenia,
- opis funkcyjny spadków wytrzymałości gipsu na ściskanie i na rozciąganie przy zginaniu w funkcji wzrastającego poziomu nawilgocenia,
- rozpoznanie problematyki migracji wody przez gips, charakterystyk przepuszczalności wody przez gips oraz zjawisk towarzyszących,
- opis mikrostruktury kapilarnej gipsów stwardniałych w funkcji wskaźnika W/G oraz opis procesu kapilarnego podsiąkania wody przez gips, w oparciu o badania doświadczalne i analizy teoretyczne składowych problemów.

Wykonane przez autora wstępne rozpoznanie pełzania gipsu w jednoosiowym stanie ściskania, pod działaniem obciążeń długotrwałych, dla gipsów w stanie suchym i nawilgoconym, w pełzarkach sprężynowych wykazało, że badania takie należy wykonywać w pełzarkach balastowych, zapewniających dokładność oznaczeń odkształceń pełzania, przy zachowaniu obciążeń $\sigma = \text{const.}$, co trudno jest uzyskać w pełzarkach sprężynowych. Reologia gipsu pozostaje problemem do przyszłych rozstrzygnięć badawczych.

Materiałem badanym są gipsy budowlane z surowców naturalnych, uzyskane w trzech różnych technologiach prażenia i mielenia: gipsy naturalne GB-N1 z pieców obrotowych PO i młynów kulowych, gipsy naturalne GB-N2 z prażarek kotłowych PK i młynów kulowych oraz gipsy naturalne GB-N3 z nowoczesnych pieców obrotowych przeponowych POP, z młynami walcowymi z separatorem. Wykonano także równoległe badania gipsów syntetycznych z odsiarczania spalin z węgla brunatnego GS-B i z węgla kamiennego GS-K.

W pracy wykorzystano wyniki wieloseryjnych badań bieżących spoiw w procesie ich przemysłowej produkcji w zakładach przemysłu gipsowego (Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130]). Równoległe autor wykonał własne badania składu chemicznego i mineralnego oraz cech fizycznych dla zbioru prób z losowych dostaw rynkowych spoiw gipsowych (Klin [129]). Dla wszystkich ścieżek badawczych wykonano wieloseryjne badania laboratoryjne, z opracowaniem statystycznym analizowanych zagadnień.

Zastosowane narzędzia i techniki badawcze zostały wcześniej dokładnie opisane w pracach [123, 124, 125, 128]. Badania wytrzymałości zostały przeprowadzone w trzech typach maszyn wytrzymałościowych I klasy dokładności, o różnym zakresie: maszynie ZD 10/90 o zakresie do 100 kN z automatyczną rejestracją typu x-y; prasie EDT 1600 o zakresie 1600 kN z automatyką wydzielonych czynności i regulacją stałego przyrostu siły; zestawie trzech maszyn wytrzymałościowych TONI TECHNIK, sterowanych komputerowo o zakresach: do 10 kN do zginania beleczek, do 100 kN do zginania elementów belkowych, do 3000 kN do ściskania próbek kontrolnych, z rejestracją przesuwu tłoka i z systemem czujników elektroindukcyjnych do pomiaru przemieszczeń. Przemieszczenia mierzono czujnikami elektroindukcyjnymi, w zestawie osprzętu pomiarowego i kontrolnie czujnikami zegarowymi. Odkształcenia gipsów stwardniałych w testach σ - ϵ , w różnych stanach naprężeń (ściskanie, rozciąganie osiowe, zginanie), oznaczono za pomocą naklejonych sond tensooporowych dla elementów suchych oraz czujników elektroindukcyjnych dla elementów nawilgoconych. Opis prototypowej aparatury do badań przepuszczalności wody przez gips i stosowanej metody badawczej przedstawiono szczegółowo w pracy [126]. Badania ultradźwiękowe przeprowadzono przy użyciu aparatury typu UNIPAN ze wskaźnikiem cyfrowym. Zdjęcia struktury gipsu wykonano metodą SEM.

Uzyskane wyniki pomiarów i oznaczeń opracowano statystycznie. Aproksymację wyników badań do postaci funkcji empirycznych wykonano metodą obliczeń numerycznych. Przynależność zbiorów wyników do populacji o rozkładzie normalnym sprawdzono metodą graficzną na siatce laplaso-normalnej [28]. Opis niezbędnych statystycznych zależności podano w rozdziale 5.3 części pracy, na przykładzie prezentacji i analizy wyników pomiarów.



Fot. 3.1. Zestaw maszyn do badań wytrzymałości: a) prasa ZD-10/90 o zakresie 100 kN, z rejestracją przemieszczeń typu x-y; b) prasa EDT-1600 o zakresie 1600 kN z automatyką i regulacją przyrostu siły; c) zestaw trzech maszyn wytrzymałościowych TONI TECHNIK, sterowanych komputerowo o zakresach: 10 kN, 100 kN i 3000 kN

Phot. 3.1. Set of equipment for strength tests: a) ZD-10/90 press of 100 kN range, with registration of x-y type relocations b) EDT-1600 press of 1600 kN range with automatics and force increase control; c) set of three TONI TECHNIK strength machines, computer-controlled with the following ranges: 10 kN, 100 kN and 3000 kN

Zostały wykonane także przez autora liczne, wieloseryjne badania dotyczące zagadnień dodatkowych, które nie weszły w zakres niniejszej pracy, a które mieszczą się w kompleksie problematyki mechaniki gipsu, a mianowicie: gipsy zbrojone włóknem rozproszonym, gipsy zbrojone wkładkami zbrojeniowymi stalowymi (ze specjalnym zabezpieczeniem antykorozyjnym) i wkładkami z poliestrów zbrojonych włóknem szklanym, elementy warstwowe w różnych wariantach: z gipsem w rdzeniu i jako warstwy okładzinowe. Niniejszą pracą nie zostały objęte także wykonane przez autora naukowo-

-badawcze rozpoznania zagadnień specjalnych dotyczących tworzyw gipsowych, takich jak: gipsy spienione, gipsy z wypełniaczem mineralnym, spoiwa gipsowo-estrich-wapienne GEW oraz spoiwa gipsowo-cementowo-pucolanowe GCP, problemy optymalizacji i plastyfikacji świeżych zaczynów gipsowych. Wiedza w zakresie wyżej wymienionych grup tematów dała – na etapie opracowania niniejszej dysertacji – możliwość szerszych uogólnień rozpatrywanych zagadnień składowych, a wymienione prace badawcze zostaną ujęte wydzielonymi publikacjami. Cały ten kompleks zagadnień dotyczy specjalnych technologii i specjalnych zastosowań tworzyw gipsowych.

4. PROPOZYCJA WPROWADZENIA ZUNIFIKOWANEGO NAZEWNICTWA W NORMALIZACJI WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ GIPSU

Polskie akty normatywne dotyczące spoiw, zaczynów, zapraw i betonów gipsowych powinny być dostosowane – w zakresie klasyfikacji opartej na wytrzymałości tych materiałów – do postanowień normatywnych dla innych materiałów budowlanych, zawartych w normach krajowych i międzynarodowych, zarówno w zakresie przyjęcia pojęć, jak i nazewnictwa oraz symboli. Jest niepożądaną nieprawidłowością występującą w normie branżowej „Gipsobeton” [381] z 1987 roku: wyszczególnienie różnych klas betonów odpowiadających liczbowo spodziewanej wytrzymałości średniej \bar{R} , podczas gdy w wielu aktach normatywnych krajowych, opartych na postanowieniach norm międzynarodowych ISO, dotyczących: betonu od 1975 r. [424], konstrukcji żelbetonowych od 1976 r. [426], konstrukcji stalowych od 1976 r. [425] – pojęcie klasy jest związane z wytrzymałością gwarantowaną z określonym prawdopodobieństwem. Różnica ta nie dotyczy tylko formalnego nazewnictwa, lecz dostosowania nazw do ujednoczonego systemu atestacji wytrzymałości materiałów, związanego ze sposobem projektowania i określania nośności elementów konstrukcji budowlanych.

Na podstawie analiz całości kodu nazewnictwa wytrzymałości, w aktualnych normach krajowych i międzynarodowych, autor zaproponował w pracy [131] symbolikę oznaczeń cech wytrzymałościowych tworzyw gipsowych, spójną z nazewnictwem w tym zakresie innych materiałów według stanu na 1991 rok. Propozycja ta jest podana w tabeli 4.1, kolumna 5–6. Propozycja ta uległa dalszej korekcie, w związku z wprowadzeniem nowego systemu ujednoczonych norm europejskich EUROCODE i ustaleniami nad przystosowaniem do nich norm polskich (Lewicki [177]). Nowy system oznaczeń literowych w budownictwie, dostosowany do analizowanych norm międzynarodowych, określa polska norma [423] oraz publikacja Lewickiego [177]. Z uwzględnieniem tych ustaleń w tabeli 4.1 (kolumny 7-9) podał autor propozycję II nazewnictwa cech wytrzymałościowych tworzyw gipsowych. Wstępne ustalenia odnośnie trybu ustalania klas wytrzymałościowych spoiwa i tworzyw gipsowych oraz określenia współczynników bezpieczeństwa – determinujących wytrzymałości charakterystyczne i obliczeniowe – podał autor w pracy [131].

Propozycje oznaczeń cech wytrzymałościowych
 Suggestions for denotations of the strength properties

Lp. No	Stan naprężeń Cecha wytrzymałości Strength state Strength property	W normach PN* In PN* standards	W nor- mach ISO** In ISO standards	Propozycja I (1991) Suggestion I (1991)		Propozycja II (EUROCODE) Suggestion II (EUROCODE)		
				$R_k^{1)}$	$R_d^{2)}$	$f_k^{1)}$	$f_d^{2)}$	$f_L^{3)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Ściskanie Compressive strength	R_s	R_c	R_{gck}	R_{gc}	f_{gck}	f_{gcd}	f_{gc}
2.	Rozciąganie Tensile strength			R_{gzk}	R_{gz}	f_{gtk}	f_{gtd}	f_{gt}
3.	Rozciąganie przy zginaniu Flexural tensile strength	R_{zg}	R_f	R_{gbk}	$R_{gb}; R_{gf}$	f_{gtbk}	f_{gtbd}	f_{gtb}
4.	Ścinanie Shear			R_{gtk}	R_{gt}	f_{gvk}	f_{gvd}	f_{gv}
5.	Docisk Pressure				R_{gd}		f_{gpd}	f_{gp}
6.	Gwarantowana na ściskanie Guaranteed for compressive strength				R_g^G			f_g^D
7.	Gwarantowana na rozciąganie Guaranteed for tensile strength				R_{gz}^G			f_{gt}^G
8.	Współczynnik rozmiękania przy ściskaniu Softening coefficient during com- pressive strength				K_c			K_c
9.	Współczynnik rozmiękania przy rozciąganiu (zginaniu) Softening coefficient during tensile strength (bending)				K_z			K_t
10.	Symbol marki spoiwa R_{min} Binder brand symbol R_{min}	R^G R^G			G			G
11.	Symbol klasy zaczynu (Gypsum Paste) Paste class symbol				GP			GP
12.	Symbol klasy zapraw i betonów (Gypsum Concrete) Mortar and concrete class symbol				GC			GC
13.	Stan wilgotny Humid state			R_{gk}^w	R^w	f_{gk}^w	f_{gd}^w	f_g^w

* W normach PN, stan w 1991 r.

In PN standards, condition in 1991

** W normach ISO, stan w 1991 r.

In ISO standards, condition in 1991

1) wytrzymałości charakterystyczne – characteristic strengths

2) wytrzymałości obliczeniowe – calculation strengths

3) ogólny symbol wytrzymałości – general strength symbol

Autor stwierdza, że najnowsze europejskie normy gipsowe z 2004 r. [445, 446, 447] nie nawiązują do przyjętego w Unii Europejskiej systemu oznaczeń w normach EUROCODE, dotyczących: betonu i konstrukcji betonowych (EC-2), stali i konstrukcji stalowych (EC-3), zapraw i konstrukcji murowych (EC-6), drewna i konstrukcji drewnianych (EC-4). Przyjęte w aktualnych europejskich normach gipsowych oznaczenia są kolizyjne z ogólnym kodem oznaczeń w normach EC, jak zestawiono poniżej:

- Norma EN 13454-1:2004 [447] wprowadza klasy wytrzymałości na ściskanie dla podkładów anhydrytowych C5 – C-80, podczas gdy symbolem C (concrete) oznaczane są klasy betonu w normie EC-2. Wydaje się właściwe oznaczenie symbolami G i GC, jak podaje autor w tabeli 4.1.
- W normie EN 13279-2:2004[446] wytrzymałości oznacza się „starym” symbolem R (R_c – na ściskanie, compressive strength; R_n – na odrywanie, adhesive strength) i równocześnie P_f – wytrzymałości na zginanie (flexural strength), podczas gdy w normach EC przyjęto jednolicie oznaczenie wytrzymałości symbolem „f”. Równocześnie w tej samej normie symbolem R = G/W oznacza się wskaźnik gipsowo-wodny.
- W normie EN 13279-1:2004[445] rodzaje spoiw gipsowych „czystych” i mieszanych oznacza się symbolami B1 do B7 (tab. Z-6), a gipsów do specjalnych zastosowań (do robót tynkowych, murowych, o właściwościach akustycznych, izolacji termicznej, do ochrony przeciwpożarowej, na odlewy) – symbolami C1 – C6. Wydaje się przecież właściwszy system oznaczeń odpowiednio: GP1 – GP7 (gypsum plaster) oraz GS1 – GS6 (gypsum special)

Przyjęty kod oznaczeń w europejskich normach gipsowych nie stanowi przeszkody w wydzielonym funkcjonowaniu branż przemysłu gipsowego. Natomiast w przypadku zastosowań gipsu do elementów budowlanych (płyty GK, bloczki gipsowe, konstrukcje murowe z elementów z gipsu), dla inżynierów budownictwa i architektów, potrzebny jest system oznaczeń spójnych z normami EC, nie kolidujący z normami EC.

Propozycja zunifikowanego nazewnictwa w normalizacji wytrzymałościowej gipsu, podana w rozdziale 4, może być wykorzystana w normalizacji europejskiej spoiw i tworzyw gipsowych.

5. WPŁYW TECHNOLOGII PRAŻENIA NA STATYSTYCZNE CECHY SPOIW GIPSOWYCH

5.1. Uwarunkowania surowcowe jednorodności spoiw gipsowych naturalnych i syntetycznych

Publikacje ujmujące statystycznie jednorodność cech określonych rynkowych spoiw mineralnych w procesie ich bieżącej produkcji należą do rzadkości. W odniesieniu do jakości cementów występujące w literaturze dane ograniczają się do podania wartości współczynników zmienności $v_f = s_R / \bar{f}$ (wyniki udokumentowane w pracach Zachary z zespołem [360], Tomkowiaka [332]), bez przytaczania jednak szerszej dokumentacji statystycznej, a publikowane dane dotyczą lat 1968–1979, kiedy występowała względna swoboda przepływu informacji i publikowania danych dotyczących przedsiębiorstw państwowych. W warunkach rynku kapitałowego publikowanie lub wyrażenie zgody na publikowanie danych dotyczących spoiw leży w gestii poszczególnych producentów. Konkurencja rynkowa powoduje daleko idącą powściągliwość w tym zakresie, a równocześnie brak jest motywacji lub wymuszeń podawania szerszych charakterystyk statystycznych.

Normy dotyczące spoiw, przykładowo: normy dotyczące cementów [428], polskie normy dotyczące spoiw i tworzyw gipsowych [370–378, 429, 430, 443, 444], a także aktualne europejskie normy [445, 446, 447] dotyczące spoiw gipsowych stawiają wymagania co do wartości granicznych górnych $X_{i\max}$ lub dolnych $X_{i\min}$, przykładowo w zakresie: uziarnienia, składu chemicznego lub mineralnego, czasów wiązania i wytrzymałości. Ustalenia normowe nie wymuszają więc wymogu podawania statystycznych charakterystyk wymienionych spoiw, mimo że istniejące systemy kontroli jakości nakładają wymogi bieżących badań i laboratoria zakładowe dysponują dużymi zasobami wyników kontrolnych.

Spoiva gipsowe będące w obiegu rynkowym, jak: gips budowlany, gips modelowy, gips ceramiczny, gips górniczy – produkowane są z surowców naturalnych. Gips tynkarski i gips szpachlowy, zaliczane także do spoiw gipsowych, produkowane są z gipsu naturalnego lub syntetycznego $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, z dodatkiem środków modyfi-

kujących (Osiecka [239, 242], Małolepszy z zespołem [70], Kurdowski [162]). Wiodącym producentem spoiw gipsowych w Polsce pozostaje nadal ZPG „Dolina Nidy”, choć są one także wytwarzane przez ponad 20 firm krajowych i międzynarodowych (na przykład: „Knauf”, „Henkel”, „Lafarge”, BPB, „Kreisel”, „Arel Gips” (Galos [68])).

Tabela 5.1

Table 5.1

Produkcja i wykorzystanie gipsu $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ w Polsce [68, 258]

Production and use of gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ in Poland [68, 258]

Lp. No	Producenci gipsu półwodnego Semi-hydrate gypsum manufacturers	Produkcja gipsu tys. ton Gypsum production in thou- sands of tons	Asortyment i zużycie gipsu Assortment and gypsum use				
			Płyty G-K G-K plates	Gipsy tynkarskie i szpa- chlowe Plaster and spatu- la gypsum	Bloczki pustaki i inne pre- fabry-katy Hollow brick blocks and other prefabri- cates	Gips budowla- ny* spoiwa specjalne* Building plaster* special binders*	Przemysł cemento- wy Cement industry
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Gips naturalny Natural plaster						
1.1.	„Atlas” ZPG Dolina Nidy „Lafarge” – Nida Gips	370	90	100	110	+	+
1.2.	BPB „Rigips” Szczerbów	300	220			+	+
1.3.	„Atlas” Nowy Łąd	158		40		+	+
2.	Gips syntetyczny Synthetic gypsum plaster						
2.1.	Knauf” Bełchatów		90				
2.2.	„Knauf” Jaworzno			200	110		
2.3.	„Arel-Gips” Bełchatów „Baumit Bełchatów			60	40		
2.4.	„Norgips” Opole		200				
2.5.	„Atlas Gipstech” Kamień „Reablock” Bełchatów			50	40		

* Surowce anhydrytowe z kopalni Nowy Łąd przeznaczone są do produkcji spoiw specjalnych: gipsów ceramicznych i medycznych
Anhydrite raw materials from Nowy Łąd mine are designated for special binder production: ceramic and medical gypsum

Spoiva gipsowe uzyskiwane z surowców naturalnych wytwarzane są w Zakładach ZPG „Dolina Nidy” w Gackach (Atlas), eksploatujących złoża surowcowe kopalni Leszcze oraz w BPB „Rigips” w Szarbkowie, eksploatujących złoża surowcowe Borków-Chwałowice w kopalni Stawiany (Olejarz, Pabis [234]). Dla obu zakładów bazą surowcową są złoża krystalicznego gruboziarnistego gipsu dwuwodnego o wysokiej zawartości minerału $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, powyżej 86% (tab. 5.2). Wydobycie kamienia gipsowego w Polsce sięga około 1 mln ton rocznie i produkuje się z niego około 560 tys. ton gipsu półwodnego (Sobala [314]). Pozostali wytwórcy rynkowych spoiw gipsowych wykorzystują gips syntetyczny $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, otrzymywany w procesie odsiarczenia spalin w elektrowniach, między innymi: Bełchatów, Opole, Konin, Dolna Odra, Jaworzno i Połaniec, kierując swoją produkcję głównie na wytwarzanie gipsu tynkarskiego, gipsu szpachlowego i kleju gipsowego (Pichniarczyk [264], Sobala [314]). Produkcja gipsu syntetycznego w Polsce wynosi około 1,5 mln ton rocznie i otrzymuje się z niego około 800 tys. ton gipsu półwodnego rocznie (Sobala [314]).

Złoża anhydrytu w rejonie Nowego Łądu i Lubichowa (kopalnia anhydrytu „Nowy Łąd”), będące w posiadaniu Firmy „Atlas”, wykorzystywane są do produkcji spoiw gipsowych specjalnych (gips ceramiczny i modelowy) i wylewek podłogowych samopoziomujących (Galos, Szlugaj, Wyszomiński [68]). Spoiva anhydrytowe uzyskiwane są z anhydrytu naturalnego oraz procesach prażenia w temperaturze 500 °C surowców syntetycznych. Syntetycznie otrzymywany anhydryt II wykorzystywany jest do produkcji mieszanek tynkarskich tak zwanych dwufazowych (Pichniarczyk [264]).

W bilansie spoiw pochodzenia przemysłowego należy wymienić:

- Fosfogipsy, jako produkt odpadowy procesu produkcyjnego kwasu fosforowego w przemyśle nawozów sztucznych. Wielkość produkcji fosfogipsu w Polsce wynosi około 2,5 mln ton rocznie. Wykorzystanie fosfogipsu jako zamiennika gipsu naturalnego do produkcji spoiw gipsowych jest zerowe, z uwagi na obecność trudno usuwalnych związków fosforu i fluoru, oraz innych zanieczyszczeń (Sobala [314]).
- Gipsy chemiczne, które powstają jako produkty odpadowe w procesie odsalania wód kopalnianych. Gipsy chemiczne uzyskuje się także w procesie oczyszczania wód i ścieków. Przewiduje się, że w najbliższych latach powinno powstać około 100 tys. ton tego rodzaju gipsów, które mogą być substytutem gipsu naturalnego zarówno do produkcji wyrobów gipsowych oraz jako regulator wiązania w przemyśle cementowym (Sobala [314]).

Gips budowlany $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – jako spoiwo przeznaczone do prac remontowo-budowlanych – produkowany jest jako konfekcjonowany produkt rynkowy (z surowców naturalnych ze złoża w Leszczach), a także produkowany jest z gipsów syntetycznych w Jaworznie, Bełchatowie oraz Koninie i używany między innymi do produkcji własnej: bloczków, pustaków i innych prefabrykatów (tab. 5.1). W tych przypadkach zastosowań gips jest materiałem budowlanym, którego jakość i jednorodność cech mają wpływ na organizację robót budowlanych oraz na jakość wyrobów, w tym na jakość wytrzymałościową produktów finalnych i prefabrykatów. W tym zakresie zastosowań gipsu wymagana jest zarówno klasyfikacja wytrzymałościowa spoiw, jak również klasyfikacje wytrzymałościowe wyrobów.

Skład mineralny wybranych typów kamienia gipsowego w złożu Gacki-Krzyżanowice
(Ostrowski [254])
Mineral composition of selected types of gypsum stone in Gacki-Krzyżanowice deposit
(Ostrowski [254])

Nr próby Sample No	Opis próby Sample description	Minerały w % Minerals in %						Razem Total
		CaSO ₄ · 2H ₂ O	CaCO ₃	MgCO ₃	CaSO ₄	Fe ₂ S	Inne zanieczy- szczenia Other contamina- tion	
I	Gips grubokrystaliczny zanieczyszczony kredą Coarse-crystalline gyp- sum contaminated with calcium carbonate	91,11	1,80	1,67	2,29	–	1,82	98,69
II	Gips łupkowany koloru siwego Schistose gypsum of grey colour	52,35	9,41	2,28	–	2,92	32,01	98,97
VI	Gips drobnokrystaliczny koloru siwego Fine-crystalline gypsum of grey colour	76,11	13,53	1,21	–	–	9,65	100,52
VII	Gips drobnokrystaliczny koloru jasnobeżowego Fine-crystalline gypsum of light-beige colour	95,08	0,91	0,54	2,26	–	0,98	99,77
VIII	Gips zbity drobnokrysta- liczny z przerostami kalcytu Compact fine-crystalline gypsum with calcite interlayers	71,43	20,60	1,09	4,99	–	1,14	99,25
X	Gips drobnokrystaliczny koloru siwego Fine-crystalline gypsum of grey colour	67,99	25,08	0,89	2,68	–	3,04	99,68

Na jednorodność i klasyfikację gipsu budowlanego mają bezpośredni wpływ trzy główne grupy czynników: jednorodność surowców, technologia prażenia oraz stopień zmielenia. W niniejszej pracy szerzej omówiono powyższe grupy czynników, dla gipsu budowlanego produkowanego z surowców naturalnych, z uwagi na dostępność danych statystycznych. W technologii produkcji spoiw gipsowych jakość złoża ma bezpośrednio

ważny wpływ na jednorodność tych spoiw. Bardzo ważna okazała się problematyka wpływu technologii prażenia na jakość i jednorodność spoiw gipsowych. Gips półwodny produkowany na kompletnie zmodernizowanych liniach technologicznych, cych większą stabilność temperatur prażenia w przeponowych piecach obrotowych z wymiennikami ciepła, z automatycznie regulowaną temperaturą w poszczególnych strefach oraz z kontrolowaną wtórną kalcynacją, jest spoiwem lepszej jakości. Dzięki nowej technologii istnieje możliwość uzyskania bardziej jednorodnych gipsów półwodnych $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ oraz dodatkowo jednorodnych anhydrytów syntetycznych – stosowanych do produkcji gipsów tynkarskich (Nowak [227, 228]). Wyniki badań własnych dla losowych prób rynkowych gipsu budowlanego, wyprażonego według nowej technologii w piecach przeponowych, podano analitycznie i porównawczo w pracy w rozdziale 14.

Tabela 5.3

Table 5.3

Średnie tygodniowe parametry chemiczne gipsu syntetycznego z odsiarczania spalin z węgla kamiennego (przykładowe dane z krajowego zakładu energetycznego)
 Mean weekly chemical parameters of synthetic gypsum plaster from desulphurisation of flue gas from hard coal (exemplary data from national power engineering plant)

Lp. No	Badana właściwość Tested property	Wartość Value
1	2	3
1.	Gips dwuwodny $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Di-hydrate gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	96,98%
2.	Zawartość wilgoci Moisture content	8,30%
3.	Chlorki Chlorides	0,007%
4.	pH	7,26
5.	Uziarnienie $d_{0,5}$ Graining $d_{0,5}$	44,22 μm
6.	Stopień białości Degree of whiteness	81,2%

Spoiwa gipsowe otrzymywane z odsiarczania spalin produkowane są z bardziej jednorodnych surowców w postaci syntetycznego gipsu dwuwodnego (tab. 5.3). W przypadku gipsu budowlanego, uzyskiwanego z surowców syntetycznych, o ich jakości i jednorodności decydują głównie już tylko dwie grupy czynników: reżimy technologii prażenia oraz skład granulometryczny i stopień zmielenia. Wyniki badań własnych dla losowych prób krajowych gipsów syntetycznych $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, uzyskanych z odsiarczania spalin z węgla brunatnego oraz z odsiarczania spalin z węgla kamiennego,

podane są analitycznie i porównawczo w p. 14.3, w nawiązaniu do przykładowych gipsów syntetycznych niemieckich i holederskich.

Szersze opracowanie statystyczne jednorodności syntetycznych spoiw gipsowych będzie możliwe po zaistnieniu większej swobody dostępności do bieżących badań kontrolnych, stosownie do ustaleń systemów certyfikacji jakości według ISO 9001.

5.2. Wpływ technologii prażenia surowców na jednorodność produktów gipsowych

Dehydraty odmiany α uzyskuje się w procesie prażenia w atmosferze nasyconej pary wodnej w autoklawach. Ograniczony zakres zastosowania spoiw gipsowych odmiany α sprawia, że przedmiotem zainteresowania w niniejszej pracy są spoiwa gipsowe odmiany β . Dehydraty β uzyskuje się w procesie prażenia w atmosferze powietrza, przy niewielkiej prężności pary wodnej (rys. 2.1).

Na jakość i jednorodność analizowanych w niniejszej pracy spoiw gipsowych odmiany β wpływ ma technologia prażenia, a w istocie rodzaj pieca do prażenia surowców. Przeglądową charakterystykę pieców do prażenia gipsu podaje Kurdowski, Pałka [162]. W oparciu o pracę [162] oraz własne doświadczenia z przemysłem gipsowym – w zakresie analiz jednorodności produktów prażenia – można sformułować następujące ustalenia w analizowanym temacie.

- a) Piece obrotowe bezprzeponowe (PO) w ocenie autorów pracy [162] są w miarę nowoczesne i wciąż jeszcze stosowane. Są to piece współprądowe, w których gruboziarnisty (kawałkowy), wstępnie pokruszony wsad surowcowy styka się bezpośrednio z gazami ze spalania paliwa. Przy wlocie pieca gorące gazy z komory spalania o temperaturze 500–700 °C stykają się z zimnym kamieniem gipsowym. Przy wylocie pieca opuszczający piece gips półwodny styka się z gazami o temperaturze 140–170 °C, zawierającymi dużo pary wodnej, pochodzącej głównie z rozkładu gipsu. Występujące w piecu temperatury wywołują kalcynację głównie do fazy półwodzianu β , ale występują także fazy β wyższe: anhydryt III i anhydryt II. Wadą tych pieców jest zmienna jakość produktu, szczególnie w zakresie składu mineralnego. Z analiz statystycznych autora okaże się jednak, że jakość stabilizowanych spoiw typu gips budowlany niewiele odbiega charakterystyką od jakości podobnych spoiw uzyskiwanych z surowców prażonych w innych technologiach. Wynika to z faktu, że anhydrytu II jest niewiele, anhydryt III ulega z czasem stabilizacji do fazy półwodzianu i skład mineralny gipsów PO jest praktycznie zbliżony do składu mineralnego spoiw uzyskiwanych z innych technologii prażenia. Na niejednorodność produktu prażenia wpływ ma uziarnienie surowca w postaci grubych kawałków, co sprawia że w masie dużego odłamu mogą występować równocześnie fazy: anhydrytu II na powierzchni, anhydrytu III w bliższej głębi, półwodzianu w głębi i nawet dwuwodzianu w obrębie rdzenia odłamu. Obecność dwuwodzianu wpływa na przyspieszenie procesów wiązania spoiwa gipsowego. Istotną wadą technologii pieców PO jest brak precyzji kontrolowanej sterowalności.

aspekcie ekonomicznym piece PO odznaczają się dużym zużyciem ciepła, z uwagi na duże straty do otoczenia w wyniku promieniowania i konwekcji.

- d) Prażarki kotłowe (PK) w formie zamkniętych cylindrycznych komór, służących do zasypania rozdrobnionego wsadu surowcowego i opróżniania wyprażonego produktu, wyposażonych w oddzielone przeponą płaszcz zewnątrz do rozprowadzania gorących gazów w systemie rur przepływowych – zapewniają w całej masie wsadu stabilne temperatury prażenia, w przedziale optymalnym 140–170 °C. Rozdrobniony surowiec ulega prawie całkowitej kalcynacji, z bardzo małą pozostałością dwuwodzianu. Równocześnie duża prężność pary wodnej sprawia, że w produkcji występuje bardzo mała zawartość anhydrytu III. Uzyskany produkt prażenia jest bardzo jednorodny, a proces kalcynacji jest sterowany. Wadą tej technologii jest mała wydajność 4–5 t/h z pojedynczego kotła. Przystosowanie stacjonarnych kotłów zasypanych do pracy ciągłej zwiększa wydajność do 7–8 t/h. Prażarki kotłowe zostały aktualnie zastąpione przez piece obrotowe przeponowe, lecz jeszcze są stosowane przez małych wytwórców.
- e) Piece obrotowe przeponowe (POP) są znacznie nowocześniejsze od prażarek kotłowych. Wyposażone są w aparaturę kontrolno-pomiarową, a proces prażenia jest monitorowany w poszczególnych fragmentach pieca. Występują więc warunki do zapewnienia stabilnych warunków termicznych na długości pieca. Surowiec może być finalnie zmielony lub jest wstępnie rozdrabniany do 2 mm. Surowiec nie kontaktuje się ze spalinami, a przesypuje się pomiędzy przewodami rurowymi, którymi przepływają gorące gazy. Piece typu (POP) są uniwersalne, gdyż są stosowane zarówno do otrzymywania gipsu dwuwodnego o założonym składzie fazowym, jak i do otrzymywania anhydrytu II po przestawieniu temperatury prażenia na przedział około 400 °C. Szczególną zaletą prażarek obrotowych jest sterowalna możliwość wytwarzania spoiw o założonym składzie fazowym, a więc spoiw jednorodnych o z góry zaprojektowanych właściwościach. Temu celowi służy także technologia rozdrabniania produktu prażenia w młynach walcowych, wyposażonych w separatory, które odrzucają ziarna większe i kierują do ponownego przemielenia. Młyny te zapewniają bardziej jednorodną strukturę uziarnienia rozdrobnionego spoiwa gipsowego, niż to miało miejsce w młynach kulowych, które były stosowane w zakładach gipsowych wyposażonych w piece obrotowe bez-separacyjne.
- f) Młyny porządkujące (MPM) pracują we współprądzie i w przypadku młynów pionowych materiał opuszcza młyn w strumieniu gazów. Młyny (MPM) mają wbudowany separator. Temperatura gazów na wlocie do młynów wynosi około 600 °C, na wylocie około 150 °C, natomiast temperatura produktu wynosi 120 °C. Młyny z separatorem zapewniają efektywną regulację stopnia rozdrobnienia produktu. Warunki termiczne prażenia sprawiają, że spoiwo gipsowe β zawiera pewne ilości anhydrytu II, co wpływa na skrócenie czasu wiązania. Powyższe właściwości są szczególnie pożądane do produkcji płyt gipsowych i zakłady produkcji płyt GK są reguły wyposażone w ten rodzaj prażarek.

Znajomość opisanych powyżej technologii prażenia surowców gipsowych jest niezbędna do właściwej oceny zróżnicowanych właściwości fizykochemicznych i jednorodności spoiw gipsowych, uzyskiwanych z różnych surowców i w zróżnicowanych technologiach ich wytwarzania.

5.3. Przedmiot i zakres statystycznych analiz gipsu półwodnego

Przedmiotem statystycznej analizy jest jednorodność cech spoiw gipsowych odmiany β – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, wyprażanych w trzech różnych technologiach:

- piece obrotowe (PO),
- prażarki kotłowe (PK),
- piece obrotowe przeponowe (POP).

Bazą surowcową dla analizowanych trzech technologii jest to samo złożo naturalnego gruboziarnistego gipsu dwuwodnego, o zawartości 86,0–92,6% minerału $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (tab. 5.2).

Celem wykonanych badań było ustalenie wpływu technologii prażenia surowca na zmienność cech chemicznych i składu fazowego produktu prażenia, a także wpływ tych technologii – w powiązaniu z metodami mielenia – na właściwości rozdrobnionego spoiwa, w tym na rozkłady losowe i jednorodność wytrzymałości.

Analizy statystyczne zmienności cech gipsu półwodnego przeprowadził autor wykorzystując duże zbiory oznaczeń, wykonywanych w procesie bieżącej produkcji w zakładach przemysłu gipsowego. Oznaczenia składu chemicznego i mineralnego były sukcesywnie wykonywane (okresowo) przez Instytut Przemysłu Materiałów Wiążących w Krakowie, na zlecenie producentów. Pozostałe oznaczenia, jak: uziarnienie, początek i koniec wiązania, wodozgodność i wytrzymałość normowa $f_{gc,2h}$ były i są wykonywane kontrolnie, codziennie przez laboratoria zakładowe. Część wyników tych badań, po ich statystycznym opracowaniu, została współautorsko opublikowana (Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130]). Ze względów redakcyjnych kooperujące w analizowanym temacie firmy gipsowe pozostają anonimowe.

Niezależnie od banku danych producenta gipsu, autor wykonał własne badania oraz identycznie zlecił wykonanie oznaczeń składu chemicznego i mineralnego dla losowych dostaw rynkowych gipsu (tab. 5.4). Analizę szerszą zmienności tych cech podał autor w pracy własnej [129].

Wyniki badań składu chemicznego i mineralnego gipsu budowlanego z surowców naturalnych (z pieców obrotowych PO), dla prób pobranych z dostaw rynkowych w latach 1980–1987
 Test results of chemical and mineral composition of natural building plaster (from PO rotary furnaces), for samples taken from market supplies in the years 1980–1987

Lp. No	Opis próby Sample description	Skład mineralny % Mineral composition %								
		H ₂ O Krystalizacyjny Crystalline H ₂ O	Wilgoć moisture	Anhydryt III* Anhydrite III*	CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	Stabilizowany anhydryt II Stabilised anhydrite II	Anhydryt II Anhydrite II	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Materiał nieaktywny Non-active material	Σ CS 5+6+7+8+9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Gips budowlany Building plaster 011 (2.01)	5,01	1,17	0,00	80,60	3,06	0,39	4,80	10,37	88,85
2.	Gips budowlany Building plaster 012 (2.02)	6,00	1,20	0,00	80,87	2,80	0,31	4,67	10,46	88,65
3.	Gips budowlany Building plaster 013 (2.03)	5,01	0,71	0,00	82,43	1,78	0,26	4,26	10,74	88,73
4.	Gips budowlany Building plaster 014 (2.04)	5,71	1,48	0,00	81,95	2,04	1,91	2,97	11,56	88,87
5.	Gips 005GP 005GP gypsum [1-05]	6,08	1,22	0,00	80,66	2,76	1,48	5,02	10,34	89,92
6.	Srednia z poz. 1, 2, 3, 4, 5 Mean from Items 1, 2, 3, 4, 5	5,56	1,15	0,00	81,30	2,49	0,87	4,34	10,69	89,00
	MINIMUM	5,01	0,71	0,00	80,60	1,78	0,26	2,97	10,34	88,65
	MAKSIMUM	6,08	1,48	0,00	82,43	3,06	1,91	5,02	11,56	89,92
7.	Gips rumuński Romanian gypsum 004R	4,12	0,62	0,00	63,26	0,76	7,53	0,97	34,44	72,52

* Gips w dostawach rynkowych w czasie transportu i magazynowania uległ całkowitej stabilizacji, z przejściem fazy anhydrytu III w gips półwodny
 Gypsum in market supplies was subject to total stabilisation during shipment and storage, with transition of anhydrite III phase into semi-hydrate gypsum

5.4. Elementy rachunku statystycznego stosowane przy opracowywaniu wyników badań

Rozkłady statystyczne podawane są w postaci histogramów oraz rozkładów częstości wyników (por. rys. 5.9 i rys. 5.10 – zawierające wyniki badań wytrzymałości f). Sprawdzenie przynależności podzbiorów do populacji wyników o rozkładzie normalnym wykonano metodą graficzną na siatce laplaso-normalnej (Brunarski [28]). Liniowy układ punktów na tej siatce potwierdza przynależność zbioru do populacji o rozkładzie normalnym. Na osi poziomej siatek laplaso-normalnych jest nanoszona wytrzymałość gipsu f_g w skali normalnej. Na osi pionowej występuje częstość sumaryczna określona zależnością:

$$\Phi(s) = \sum_{i=1}^k m_i \cdot \frac{1}{n} \quad (5.1)$$

gdzie: m_i – ilość wyników mieszczących się w i -tym przedziale wytrzymałości na histogramie,
 n – całkowita ilość wyników w serii badań.

Przy sporządzaniu krzywych rozkładu częstości typu Gaussa (jak na rys. 5.11), wykorzystuje się normowany rozkład normalny, określony ogólną zależnością:

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (5.2)$$

gdzie t – wielkość bezwymiarowa, dana wyrażeniem:

$$t = \frac{f_g - \bar{f}_g}{s} = \frac{f_{gi} - f_{gm}}{s} \quad (5.3)$$

Wielkość s oznacza średnie odchylenie standardowe, które określa wyrażenie:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} (f_{gi} - \bar{f}_g)^2} \quad (5.4)$$

W oparciu o zależności (5.2) i (5.3) wyznacza się dla każdego słupka histogramu wartości $\varphi(t)$. Dla zrównoważenia rozkładu wartości w histogramie – uzyskanych z obliczeń częstości $\varphi(t)$ – z teoretyczną krzywą rozkładu normalnego stosuje się warunek: aby pole pod krzywą teoretyczną było równe powierzchni histogramu, według zależności:

$$\Phi(t) = \varphi(t) \cdot \frac{h(f_g)}{s} \quad (5.5)$$

gdzie: $\Phi(t)$ – rzędna wykresu oznaczającego częstość wyników, odpowiadającej wartości wytrzymałości średniej \bar{f}_{gi} dla dowolnego słupka,

$h(f)$ – szerokość przedziału wytrzymałości w histogramie (na rys. 5.8 przyjęto $h(f) = 0,2$ MPa).

Rozrzut względny wyników w analizowanym rozkładzie charakteryzuje się współczynnikiem zmienności v określonym wzorem:

$$v = \frac{s}{\bar{f}_g} = \frac{s}{f_{gm}} \quad (5.6)$$

Wartość $f_{g,\min}$, odpowiadająca częstości $\Phi(s) = 5\%$, nazywana w wytrzymałości materiałów wytrzymałością gwarantowaną f_g^G , dla rozkładu normalnego określa się zależnością:

$$f_{g,\min} = \bar{f}_g - t_{\min} \cdot s \quad (5.7)$$

gdzie t_{\min} – dla rozkładu normalnego i prawdopodobieństwa, że $f_{gi} > f_{g,\min}$ wynosi 95% – jest równa $t_{\min} = 1,65$ [28].

Wyrażenia statystyczne oceny wyników według testu t-Studenta i testu „chi-kwadrat” zostały podane w toku analiz problemów składowych podanych w p. 9.2.

5.5. Wyniki badań i rezultaty analiz

5.5.1. Analiza jednorodności surowców naturalnych do produkcji gipsu

Do produkcji spoiw gipsowych z surowców naturalnych w Polsce, zlokalizowanych w rejonie doliny rzeki Nidy, używane są surowce z rozpoznanych złóż i pokładów, o zawartości minerałów gipsu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ powyżej 85% (Ostrowski [254]). Są to gipsy gruboziarniste, o zawartości gipsu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ w przedziale wartości 86–93% (tab. 5.2). O jednorodności surowców kierowanych do produkcji spoiw gipsowych najlepiej świadczy jednorodność składu fazowego gotowego spoiwa gipsowego, w postaci gipsu budowlanego (tab. 5.5).

Z danych zawartych w tabeli 5.5 wynika, że średnia zawartość wszystkich faz dehydratów gipsu CSH-dH:

$$\Sigma \text{CSH-dH} = \text{AIII} + \text{CS} \times 0,5\text{H} + \text{CS} \times 2\text{H} + \text{A(TR)} + \text{AII} \quad (5.8)$$

gdzie oznaczono:

AIII – anhydryt łatwo rozpuszczalny,
 CS = $\text{CaSO}_3 = \text{CaSO}_4$ – siarczan wapnia,
 H – woda krystaliczna – H_2O ,
 A(TR) – anhydryt trudno rozpuszczalny
 AII – anhydryt II

w gotowym produkcie – wynosiła odpowiednio:

- w przypadku spoiw produkowanych w piecach obrotowych (PO) wartość średnia $\bar{X} = 88,27\%$;
- w przypadku spoiw produkowanych w prażarkach kotłowych (PK) $\bar{X} = 89,64\%$;
- w przypadku spoiw produkowanych w technologii pieców obrotowych przeponowych (POP) $\bar{X} = 91,07\%$.

Analiza porównawcza danych z tabeli 5.5 – a dotyczących oddzielnie nych lat produkcji – wskazuje na wysoką jednorodność surowców, podawanych w tym samym okresie dla dwóch ciągów technologicznych: pieców obrotowych (PO) i prażarek kotłowych (PK).

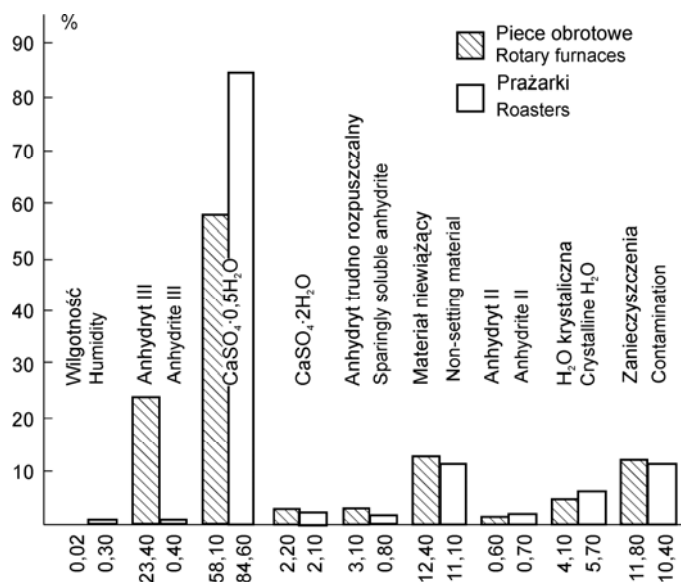
Także jakość i jednorodność minerałów wsadowych w aktualnej technologii pieców obrotowych przeponowych (POP) niewiele odbiegają od danych z lat ubiegłych. Świadczy to o wysokiej jednorodności zasobnych złoża, będących w ciągłej eksploatacji.

5.5.2. Wpływ technologii produkcji spoiw na jednorodność ich składu mineralnego i chemicznego

Porównawcza analiza statystyczna wyników oznaczeń cech spoiw gipsowych, produkowanych w starszych technologiach pieców obrotowych (PO) i prażarek (PK), wykazała duże, statystycznie istotne różnice w składzie mineralnym (rys. 5.1) i innych cechach (rys. 5.3), mających istotny wpływ na szereg podstawowych właściwości spoiwa oraz na wytrzymałość średnią i jednorodność wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych (rys. 5.9, rys. 5.10). Dla obu porównywanych technologii bazą surowcową było to samo złożo krystalicznego gipsu, o czystości 86÷93% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Zróżnicowana była tylko granulacja wsadu w postaci: skruszonej skały o ziarnach 0÷50 mm w przypadku pieców obrotowych, selekcyonowany tłuczeń frakcji 50÷150 mm zmielony następnie do postaci finalnego proszku w przypadku prażarek kotłowych.

Ujednorodniony przez mielenie surowiec i stała temperatura utrzymywana w prażarkach kotłowych (PK) o wartości 140 °C zapewniają jednorodność procesu dehydratacji w całej masie, a dominującą w procesie prażenia fazą jest półhydrat odmiany β . W drugim ciągu technologicznym – w piecach obrotowych (PO) – występuje duża niejednorodność temperatur: od 440–720 °C przy wlocie do 140–170 °C przy wylocie. W takich warunkach prażenia występują w produkcji po wypale różne fazy dehydratacji gipsu budowlanego, a szczególnie kolejna wyższa energetycznie – po β -półhydracie – faza anhydrytu β – CaSO_4III , zwana anhydrytem łatwo rozpuszczalnym, powstającym po przekroczeniu pasma temperatur 170°÷180 °C.

Rozpoznano, że gipsy z pieców obrotowych (PO) mają dużą zawartość anhydrytu III $\bar{X} + s = 23 \pm 17,1\%$, a gipsy z prażarek kotłowych (PK) tylko $\bar{X} = 0,39 \pm 1,3\%$. Przesunięcia zawartości faz w gipsie z pieców obrotowych (PO) – w porównaniu do gipsów z prażarek kotłowych (PK) – są istotne i wynoszą: o 26,5% mniej $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ i równocześnie o 23% więcej anhydrytu III oraz o 2,5% więcej anhydrytu trudno rozpuszczalnego β . Poziom nierozpuszczalnego anhydrytu II w gipsach obu technologii jest na zbliżonym poziomie: wartość średnia \bar{X} wynosi odpowiednio 0,62% w serii PO i 0,73% serii PK.



Rys. 5.1. Zestawienie średnich \bar{X} zawartości składowych minerałów w spoiwach gipsowych $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, uzyskanych z surowców z tego samego złoża, wyprodukowanych w technologii pieców obrotowych PO i prażarek kotłowych PK (wyniki średnie z okresu trzech lat, tab. 5.5)

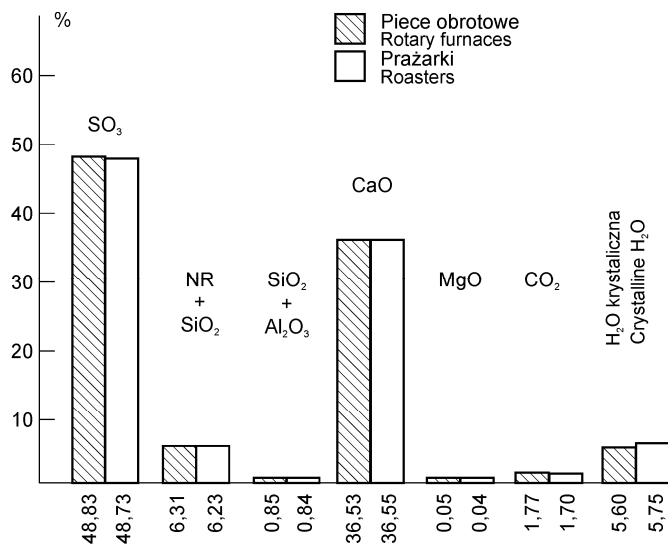
Fig. 5.1. Comparison of mean \bar{X} values of mineral constitution contents in gypsum plaster $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, obtained from raw materials of the same deposit, produced in the technology of PO rotary furnaces and PK boiler roasters (mean results of the period of three years, tab. 5.5)

Pomimo stwierdzenia dużej zmienności składu mineralnego spoiw gipsowych, uzyskanych w technologii pieców obrotowych PO, ze współczynnikami zmienności według relacji:

$$v = \frac{s}{\bar{X}} \quad (5.9)$$

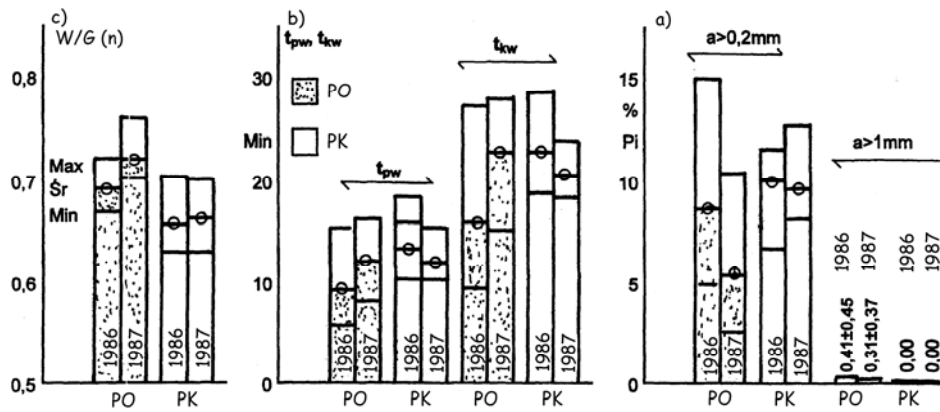
wynoszącymi aż $v = 0,755$ w przypadku anhydrytu III i wysokiej wartości $v = 0,301$ w przypadku minerału głównego $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, to należy podkreślić, że suma obu tych minerałów, czyli suma bardzo aktywnych faz AIII + $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ stanowi już zbiór statystycznie bardzo jednorodny, z wysoką wartością średnią $\bar{X} = 82,32\%$ i ze współczynnikiem zmienności $v = 0,032$ (wskazującym na ocenę jednorodności z notą bardzo dobry, według na przykład klasyfikacji zmienności wytrzymałości betonów w normie PN-B-06250:1975).

Jednorodność składu fazowego spoiw gipsowych uzyskanych w technologii prażarek kotłowych (PK), w porównaniu do spoiw uzyskanych z pieców obrotowych, jest porównawczo rewelacyjna. Dane tej jednorodności to: wysoka i stabilna zawartość półhydratu $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ na poziomie $\bar{X} \pm s = 84,57 \pm 2,42\%$ ($v = 0,0286$), porównywalna z serią PO mała zawartość gipsu dwuwodnego $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ na poziomie $\bar{X} \pm s = 2,15 \pm 1,76\%$, mniejszą niż w serii PO zawartość anhydrytu trudno rozpuszczalnego na poziomie $\bar{X} \pm s = 0,88 \pm 0,72\%$, porównywalna z serią PO bardzo mała zawartość anhydrytu II na poziomie $\bar{X} \pm s = 0,73 \pm 0,82\%$, korzystnie bardzo wysoka zawartość dehydratów bardzo aktywnych AIII + $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ na poziomie $\bar{X} \pm s = 89,96 \pm 1,87\%$ ($v = 0,020$).



Rys. 5.2. Zestawienie średnich \bar{X} zawartości składu chemicznego w spoiwach gipsowych $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, uzyskanych z surowców z tego samego złoża, wyprodukowanych w technologii pieców obrotowych PO i prażarek kotłowych PK (wyniki średnie z okresu dwóch lat, tab. 5.6)

Fig. 5.2. Comparison of mean \bar{X} values of mineral constitution contents in gypsum plaster $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, obtained from raw materials of the same deposit, produced in the technology of PO rotary furnaces and PK boiler roasters (mean results of the period of two years, tab. 5.6)



Rys. 5.3. Wartości \bar{X} , X_{\max} i X_{\min} w serii wyników badań spoiw gipsowych $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, prażonych przemysłowo w technologii pieców obrotowych (PO) i prażarek kotłowych (PK) w latach produkcji 1986–1987 (tab. 5.7): W/G (n) – wodożądność dla konsystencji normowej, t_{pw} i t_{kw} – początek i koniec wiązania, p_i – zawartość frakcji w %, pozostająca na sicie o wymiarze oczek kwadratowych: $a > 0,2 \text{ mm}$, $a > 1 \text{ mm}$

Fig. 5.3. Values \bar{X} , X_{\max} and X_{\min} in a series of tests of gypsum plaster $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, roasted in an industrial way in the technology of rotary furnaces (PO) and boiler roasters (PK) in the production years 1986–1987 (tab. 5.7): W/G (n) – water demand for standard consistency, t_{pw} i t_{kw} – beginning and ending of bonding, p_i – fraction contents in %, remaining on sieve with square mesh dimension: $a > 0,2 \text{ mm}$, $a > 1 \text{ mm}$

Oddzielnej analizie wymaga aktualnie najnowocześniejsza technologia prażenia w piecach obrotowych przeponowych POP, które łączą walory stabilności temperatur prażenia jak w technologii PK, z dużą wydajnością uzyskiwaną uprzednio w technologii PO. Gipsy budowlane uzyskiwane w technologii prażenia POP są to spoiwa gipsowe, które będą dominowały na rynku podaży spoiw tego rodzaju. Analiza składu fazowego tych spoiw – w konfrontacji z cechami spoiw uzyskiwanych z technologii PO i PK – prowadzi do następujących stwierdzeń:

- Zawartość gipsu dwuwodnego w spoiwie uzyskiwanym w technologii POP wynosi $\bar{X} = 3,96\%$ i jest to wartość wyższa od uzyskanej w technologii PK o wartość $\bar{X} = 2,24\%$. Najwyższą zawartość gipsu dwuwodnego występuje w spoiwie gipsowym prażonym w technologii pieców obrotowych PO. Niższą zawartość $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ w spoiwie prażonym w technologii prażarek kotłowych PK – w porównaniu do pieców obrotowych przeponowych POP – należy tłumaczyć różnicą czasu przebywania wsadu surowcowego.
- Zawartości gipsu półwodnego w technologii POP i PK są prawie identyczne i wynoszą kolejno: $\bar{X} = 84,77\%$ i $\bar{X} = 84,57\%$.

- c) Zawartość anhydrytu III w spoiwie z nowoczesnej technologii POP wynosi $\bar{X} = 1,60\%$ i jest to wartość wyższa od uzyskiwanej w technologii PK ($\bar{X} = 0,39\%$). Wynika to z podwyższonej temperatury prażenia, w przedziale temperatur 170 °C–180 °C, doprowadzając surowiec do tak zwanego drugiego wrzenia. W tych warunkach nawet 80% pierwotnego gipsu dwuwodnego przechodzi w fazę anhydrytu III. W specjalnym chłodniku, w warunkach odpowiedniej wilgotności, anhydryt III przechodzi w fazę półhydratu i w gotowym produkcie jest go już tylko 1,60%. Anhydryt III w czasie magazynowania i transportu od zakładu do klienta przechodzi w fazę półhydratu. Proces ten jest dobitnie widoczny w przypadku spoiwa gipsowego z technologii pieców obrotowych PO: duża zawartość anhydrytu III na poziomie $\bar{X} = 23,33\%$ (tab. 5.5) ulega redukcji do zawartości równej zero w gipsie budowlanym, w analizowanych detalicznych dostawach rynkowych.
- d) Zawartość anhydrytu trudno rozpuszczalnego A II, w gipsie budowlanym prażonym w technologii POP i PK, są do siebie zbliżone i wynoszą: $\bar{X} = 0,64\%$ dla technologii POP i $\bar{X} = 0,88\%$ dla technologii PK. W przypadku technologii prażenia pieców obrotowych PO zawartość anhydrytu trudno rozpuszczalnego jest wyższa i wynosi $\bar{X} = 3,09\%$, co należy wiązać z występowaniem w piecu temperatur w przedziale 400 °C–720 °C, w których następuje tworzenie się fazy anhydrytu II.
- Skład chemiczny spoiw gipsowych, otrzymanych w obu technologiach: pieców obrotowych PO i prażarek PK, kontrolowanych w toku sukcesywnych pomiarów w okresie produkcji trzech lat, są praktycznie identyczne (tab. 5.6) i charakteryzują one skład chemiczny tego samego jednorodnego złoża surowców. Główne składniki chemiczne można opisać następującymi parametrami statystycznymi:

- zawartość SO_3
 $\bar{X} \pm s = 48,83 \pm 0,71\%$ ($v = 1,45\%$) dla serii PO,
 $\bar{X} \pm s = 48,73 \pm 0,59\%$ ($v = 1,21\%$) dla serii PK;
- zawartość CaO
 $\bar{X} \pm s = 36,53 \pm 0,77\%$ ($v = 2,10\%$) dla serii PO,
 $\bar{X} \pm s = 36,56 \pm 0,55\%$ ($v = 1,50\%$) dla serii PK;
- zawartość wody krystalicznej H_2O
 $\bar{X} \pm s = 5,59 \pm 0,77\%$ ($v = 13,77\%$) dla serii PO,
 $\bar{X} \pm s = 5,74 \pm 0,68\%$ ($v = 11,84\%$) dla serii PK;
- zawartość części nierozpuszczalnych w HCl
 $\bar{X} \pm s = 6,32 \pm 1,05\%$ ($v = 16,61\%$) dla serii PO,
 $\bar{X} \pm s = 6,23 \pm 0,79\%$ ($v = 12,68\%$) dla serii PK.

Opisane w tabeli 5.6 dane statystyczne charakteryzują dużą jednorodność składu chemicznego surowców w złożu, a także porównywalnie dużą jednorodność surowców wsadowych w analizowanych technologiach produkcji spoiw: PO i PK. Główne składniki chemiczne w wartościach uśrednionych wynoszą: SO_3 – 48,78%, CaO – 36,55%, materiał nierozpuszczalny w HCl – 6,27%, woda krystaliczna – 5,66%, CO_2 – 1,73%, Fe_2O_3 + Al_2O_3 – 0,85%, MgO – 0,05% (razem 99,89%).

Tabela 5.6

Table 5.6

Cechy statystyczne składu chemicznego gipsu budowlanego β -CaSO \cdot 0,5H $_2$ O prażonego przemysłowo w technologii pieców obrotowych (PO) i z prażarek kotłowych (PK): \bar{X} – wartości średnie w %, s – odchylenie standardowe w % (na podstawie badań kontrolnych przemysłu gipsowego w Polsce, wyniki opracowane przez autora)

Statistic properties of chemical composition of building plaster β -CaSO \cdot 0,5H $_2$ O roasted in an industrial way in the technology of rotary furnaces (PO) and boiler roasters (PK): \bar{X} – mean values in %, s – standard deviation in % (on basis of control tests of gypsum industry in Poland, test results are elaborated by author)

Lp. No	Okres produkcji Production period	Liczba oznaczeń Amount of samples	SO $_3$		Części nierozpuszczalne w HCl Particles insoluble in HCl		Fe $_2$ O $_3$ + Al $_2$ O $_3$		CaO		MgO		CO $_2$		H $_2$ O krystaliczne H $_2$ O crystalline	
			\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Piece obrotowe PO – PO rotary furnaces																
1.	1986	6	48,47		6,55		0,98		36,64		0,07		1,78		5,98	
2.	1987	11	49,63		6,19		0,78		36,80		0,04		1,75		5,37	
3.	1986 + 1987	17	48,83	0,71	6,32	1,05	0,84	0,32	36,53	0,77	0,05	0,06	1,76	0,15	5,59	0,77
Prażarki kotłowe PK – PK boiler roasters																
4.	1986	7	48,80		6,11		0,94		36,38		0,06		1,64		5,85	
5.	1987	10	48,68		6,31		0,77		36,68		0,04		1,73		5,67	
6.	1986 + 1987	17	48,73	0,59	6,23	0,79	0,83	0,33	36,56	0,55	0,04	0,05	1,70	0,22	5,74	0,68

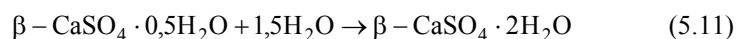
5.5.3. Wpływ technologii prażenia minerałów na wybrane cechy fizyczne i technologiczne spoiw gipsowych

Zwiększona zawartość łatwo rozpuszczalnego i łatwo hydratyzującego anhydrytu III powoduje zwiększenie wodożądności spoiw z pieców obrotowych (PO), zgodnie z poniższymi relacjami:

- hydratacja częściowa AIII do fazy półhydratu



- hydratacja półhydratu do fazy gipsu dwuwodnego



Z wieloseryjnych badań kontrolnych, wykonywanych w procesie bieżącej produkcji wynika, że gipsy z prażarek cechują się średnią wodożądnością normową $w_n = 0,658$ G, podczas gdy dla gipsów z pieców obrotowych wartość ta wynosi $w_n = 0,70$ G i jest ona porównawczo o 6,3% większa. Wodożądność normowa w_n oznacza ilość wody niezbędnej do uzyskania takiej konsystencji zaczynu gipsowego, aby jego rozplływ w aparacie Southarda wynosił $D = 18,0$ cm.

Wodożądność normową w_n można przedstawić jako sumę wodożądności hydratacji w_h i wodożądności konsystencji w_k , zgodnie z równaniem:

$$w_n = w_h + w_k \quad (5.12)$$

Wodożądność hydratacji spoiwa gipsowego wynosi:

$$w_h = \frac{\sum_{i=0}^2 X_i \cdot w_{hi}}{100} \quad (5.13)$$

gdzie: X_i – zawartości procentowe poszczególnych faz dehydratów gipsu,
 w_{hi} – wodożądność hydratacji poszczególnych faz.

Wartości w_{hi} dla poszczególnych faz dehydratacji wynoszą:

Nr fazy	Faza dehydratacji		Dwuhydrat	Wodożądność hydratacji
0	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	→	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$w_{h0} = 0$
1	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	→	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$w_{h1} = 0,1862$
2	CaSO_4	→	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$w_{h2} = 0,2674$

Jeżeli do zależności (5.13) w miejsce X_i podstawimy szereg średnich zawartości składowych faz \bar{X}_i , określonych statystycznie w tabeli 5.5, to otrzyma się średnie, statystycznie reprezentatywne wartości wodożądności hydratacji spoiw gipsowych \bar{w}_h równe: $\bar{w}_h = 0,178$ dla gipsów z pieców obrotowych PO i $\bar{w}_h = 0,161$ dla gipsów z prażarek. Składowe wodożądności konsystencji w_k wyznaczono na podstawie zależności (5.12): $w_k = 0,522$ dla serii PO i $w_k = 0,497$ dla serii PK. Całość analizowanych wartości wodożądności zestawiono w tabeli 5.8.

Z danych zawartych w tabeli 5.8 wynika, że wodożądność hydratacji w_h gipsów z pieców obrotowych PO jest większa o 9,6% od wodożądności hydratacji gipsów z rek kotłowych PK, co uzasadniają reakcje (5.3) i (5.4). Gipsy z pieców obrotowych PO cechują się także większą wodożądnością konsystencji w_k o 4,9%, co jest związane z ich drobniejszym przemiałem (rys. 5.3). Uzyskiwany drobniejszy przemiał gipsu z technologii pieców obrotowych – przy porównywalnych dla obu technologii warunkach mielenia w młynach kulowych – może wynikać z faktu, że tłuczeń gipsowy po wypale w piecach ulega łatwiej rozdrobieniu niż surowy kamień gipsowy mielony przed wypałem w technologii prażarek. Autor sądzi, że łatwość rozdrabniania wyprażonego w piecach tłucznia

gipsowego może być powodowana występowaniem naprężeń termicznych, wynikłych z rekrytalizacji minerałów w zwartej masie ziaren surowca, oraz występowaniem różnych faz dehydratacji w poszczególnych warstwach grubszych ziaren.

Tabela 5.7

Table 5.7

Cechy statystyczne wybranych właściwości gipsu budowlanego prażonego przemysłowo w technologii pieców obrotowych (PO) i prażarek kotłowych (PK), dane z lat produkcji 1986–1987, oraz w technologii pieców obrotowych przeponowych POP (dane z 2004 r.): \bar{X} – wartości średnie w %, s – odchylenie standardowe w % (na podstawie badań kontrolnych przemysłu gipsowego w Polsce, wyniki opracowane przez autora)

Statistic properties of selected features of building plaster roasted in an industrial way in the technology of rotary furnaces (PO) and boiler roasters (PK), data coming from production years of 1986–1987, and in the technology of indirect rotary furnaces POP (data of 2004): \bar{X} – mean values in %, s – standard deviation in % (on basis of control tests of gypsum industry in Poland, test results are elaborated by author)

Lp. No	Okres produkcji Production period	Liczba oznaczeń Amount of samples	Wskaźnik W/G dla konsystencji normowej W/G index for standard consistency		Czas początku wiązania t_{pw} [min] Time of setting start t_{pw} [min]		Czas końca wiązania t_{kw} [min] Time of setting end [min]		Pozostałość na sicie 0,2 mm [%] Sieve residue 0,2 mm [%]		Pozostałość na sicie 1,0 mm [%] Sieve residue 1,0 mm [%]	
			\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Piece obrotowe PO – PO rotary furnaces												
1.	1986	20	0,69	0,014	9,23	3,01	16,57	5,15	8,56	2,55	0,41	0,45
2.	1987	15	0,71	0,018	13,46	2,96	22,88	3,56	5,17	2,21	0,16	0,09
3.	średnio mean 1986– 1987	35	0,70	0,018	10,90	3,63	19,06	5,53	7,72	2,93	0,31	0,37
Prażarki kotłowe PK – PK boiler roasters												
1.	1986	18	0,65	0,019	13,03	1,93	22,94	2,51	10,11	1,47	0,00	0,00
2.	1987	14	0,66	0,020	11,75	1,59	20,82	1,74	9,83	1,57	0,00	0,00
3.	średnio mean 1986– 1987	32	0,66	0,020	12,74	1,90	22,02	2,44	9,99	1,52	0,00	0,00
Piece obrotowe przeponowe POP – POP indirect rotary furnaces												
1.	2004	8 33 22 33	0,66		21,8	6,88	26,7	7,33				
									7,35	2,15	0,01	0,01

Wodożądności analityczne gipsu budowlanego
Analytical water demand of building plaster

Lp. No	Rodzaj wodożądności (w) Type of water demand (w)	Wodożądność spoiw gipsowych Water demand of gypsum plaster		
		Piece obrotowe Rotary furnaces w_1	Prażarki Roasters w_2	w_1/w_2
1	2	3	4	5
1.	Wodożądność hydratacji w_h Hydration water demand w_h	0,178	0,161	1,096
2.	Wodożądność konsystencji w_k Consistency water demand w_k	0,522	0,497	1,049
3.	Wodożądność całkowita normatywna w_n Total normative water demand w_n	0,700	0,658	1,063

Średnia zawartość frakcji p_i powyżej wymiaru $a > 0,2$ mm wynosi: dla spoiw z pieców obrotowych (PO) $p_i = 7,22\%$, a dla spoiw z prażarek (PK) $p_i = 9,99\%$. Równocześnie, w gipsach z prażarek nie odnotowuje się w ogóle ziaren powyżej wymiaru $a > 1$ mm, podczas gdy pozostałość na sicie $a = 1$ mm w przypadku gipsów z pieców obrotowych wynosi $p_1 = 0,31\%$. Należy wyraźnie podkreślić, że skład ziarnowy i stopień domielenia zależy od parametrów technicznych młynów kulowych oraz od czasu mielenia. Z tych względów nie ma uzasadnień prowadzenia ścisłych analiz w celu powiązania uziarnienia spoiwa z technologią prażenia.

Gipsy z obu analizowanych technologii PO(1) i PK(2) mają niewiele różniące się czasy początku wiązania: $\bar{t}_{pw,1} = 10,09$ min, $\bar{t}_{pw,2} = 12,47$ min i czasy końca wiązania: $\bar{t}_{kw,1} = 19,06$ min, $\bar{t}_{kw,2} = 22,02$ min. Zauważa się jednak, że gipsy z pieców obrotowych mają średni czas początku wiązania krótszy o 1,57 min, a czas końca wiązania krótszy o 2,96 min. Ma to zapewne związek ze znaczną zawartością łatwo rozpuszczalnego i szybciej hydratyzującego anhydrytu III. Równocześnie gipsy z prażarek cechują się mniejszym rozrzutem czasu wiązania, zarówno czasu początku wiązania w przypadku którego współczynnik zmienności $v_2 = 15,2\%$ (podczas gdy dla gipsów z pieców obrotowych $v_1 = 33,3\%$), jak i końca wiązania t_{kw} , w przypadku którego współczynnik wynosi $v_2 = 11,1\%$ ($v_1 = 29,01\%$).

Oddzielnej analizie porównawczej wymagają analizowane właściwości spoiw gipsowych uzyskiwanych z aktualnie nowoczesnej technologii prażenia w piecach obrotowych przeponowych POP.

Z analizy wyników badań zawartych w tab. 5.7 wynikają następujące stwierdzenia:

- Najkrótszymi wartościami czasu wiązania cechują się gipsy budowlane uzyskane w procesie prażenia w piecach obrotowych PO, co ma związek z bardzo dużą zawartością fazy anhydrytu III, jako fazy łatwo rozpuszczalnej i szybko wiążącej, co powoduje wczesne tworzenie zarodników krystalizacji dwuwodzianu z przesyconych roztworów.

Najdłuższymi czasami wiązania cechują się gipsy budowlane z technologii POP, z wartościami początku wiązania $t_{pw} = 21,8$ min i końca wiązania $t_{kw} = 26,7$ min. Wydłużenie czasu wiązania gipsu z technologii prażenia POP należy wiązać z grubszym uziarnieniem oraz ze specjalną obróbką termiczną produktów prażenia: doprowadzenia do drugiego wrzenia, do powstawania fazy anhydrytu III i w atmosferze chłodnika następuje częściowa hydratacja do finalnej fazy półwodzianu. Czasy wiązania gipsów budowlanych wykonywanych w technologii prażarek kotłowych PK mają wartości pośrednie w stosunku do gipsu budowlanego z technologii PO

- b) Wodozgodności gipsów budowlanych uzyskiwanych w technologii prażenia POP i PK są identyczne i odpowiadają normowej konsystencji W/G = 0,66. Wodozgodność gipsów z pieców obrotowych PO jest wyższa i wskaźnik konsystencji normowej wynosi dla nich W/G = 0,70.

5.5.4. Analiza jednorodności uziarnienia gipsu budowlanego w powiązaniu z technologią produkcji spoiw

5.5.4.1. Wpływ technologii mielenia na uziarnienie spoiwa gipsowego

Uziarnienie gipsu budowlanego uzyskanego z surowców naturalnych zależy głównie: od rodzaju maszyn rozdrabniających (młyny kulowe lub młyny mieląco-prażące) i czasu mielenia. W przypadku młynów kulowych istotną rolę odgrywają ich parametry techniczne jak: masa kul, wysokość spadania, system cyrkulacji surowca masa wsadu, a ściślej grubość warstwy, na którą spadają kule. Dla stałych parametrów technicznych młyna stopień domielenia, mierzony powierzchnią właściwą, zależy głównie od czasu mielenia. W tej technologii rozdrobnienia zarówno wzrost stopnia domielenia, jak i rozkład frakcji składowych zależy od cech fizycznych wsadu oraz wilgotności. W przypadku mielenia kawałkowego gipsu, prażonego w technologii pieców obrotowych PO, wyprażony gips jest w stanie suchym. W technologii prażenia gipsu w prażarkach kotłowych PK wsad jest rozdrobniony, uzyskany przez zmielenie surowca naturalnego w młynach kulowych, czyli surowca w stanie zgrubnego pokruszenia i w stanie wilgotności naturalnej. Można sformułować tezę – jako, wydaje się, oczywistą – że surowiec wilgotny wstępnie mielony w ciągu technologii prażarek kotłowych PK łatwiej ulega rozdrobnieniu, choć należy spodziewać się aglomeracji drobnych cząstek, co utrudnia efektywność przemiału.

Z kolei w surowcu kawałkowym w technologii pieców obrotowych PO, w poszczególnych większych ziarnach występują naprężenia wewnętrzne wywołane zmianami struktury krystalizacji w procesie prażenia, z występowaniem wręcz różnych faz dehydratacji dwuwodzianu – co wpływa korzystnie na efektywność rozdrabniania surowca. Zdecydowanie inne uwarunkowania procesu mielenia występują w przypadku stosowania młynów mieląco-prażących. Szczeliny pomiędzy obracającymi się walcami

i separacja ziaren wykraczających poza założony wymiar – dają możliwość bardziej kontrolowanego rozdrobnienia.

Należy jednak podkreślić, że ostateczny rozkład uziarnienia, czyli udział poszczególnych frakcji, jest zdarzeniem losowym. Jedynie przy jednorodnym surowcu, jednolitej technologii prażenia i przemiału można metodą kolejnych prób nasterować parametry produkcji spoiw na zakładane efekty finalne w zakresie uziarnienia. W związku z tym, że stopień rozdrobnienia i skład ziarnowy spoiwa gipsowego mają duży wpływ na: właściwości technologiczne w stanie świeżym (wodożądność, konsystencję, czas wiązania) na właściwości w czasie twardnienia (zmiany objętościowe, czas wiązania) oraz na cechy gipsu stwardniałego (wytrzymałość, moduł sprężystości) – rozdrobnienie spoiwa gipsowego jest bardzo ważnym elementem oceny jego jakości.

5.5.4.2. Analiza uziarnienia gipsu budowlanego z różnych technologii produkcji

Normy krajowe [429, 430] oraz normy zagraniczne (między innymi: DIN 1168 [393, 384], międzynarodowa ISO [399], rosyjska ST CEW 826 i ukraińska DSTY B W.2.7-82-99 [449] stawiają warunki graniczne dotyczące normatywnej zawartości frakcji najgrubszych, o średnicy ziaren $d < 0,2$ mm i $d < 1,0$ mm, tak jak podano w tablicy Z-4 dla gipsu budowlanego i w tablicy Z-5 dla gipsów specjalnych (szpachlowy, tynkarski, klej gipsowy). Normatywy krajowe, zagraniczne i międzynarodowe dotyczące spoiw gipsowych nie stawiały i nie stawiają wymogów w zakresie stopnia domielenia, charakteryzowanego na przykład powierzchnią właściwą. Prenorma europejska prEN 13279-1 [445] stawia tylko ograniczenia zawartości frakcji najgrubszych w odniesieniu do gipsów specjalnego przeznaczenia z grupy C, natomiast nie wyszczególnia takich wymogów w stosunku do spoiw gipsowych grupy B, w tym do spoiwa B-1 gips budowlany. Nie jest to ani właściwe, ani praktyczne podejście i krajowi wytwórcy wdrożyli swoje normy zakładowe, kontrolując dalej zawartości $d < 0,2$ mm i $d < 1,0$ mm w przypadku gipsów budowlanych, gdyż taka kontrola jest potrzebna jako istotny wskaźnik jednorodności cech spoiwa gipsowego. Wskaźnik taki jest bardzo potrzebny w ocenie jakości spoiw gipsowych w obrocie międzynarodowym. Należy wnosić, że takie uzupełnienie zostanie wprowadzone.

Analiza statystycznych wyników badań kontrolnych zawartości frakcji górnych w gipsie budowlanym, w procesie bieżącej produkcji przemysłowej, przy wykorzystaniu tej samej, jednolitej bazy surowcowej, w technologii: pieców obrotowych PO i młynów kulowych (1), prażarek kotłowych PK i młynów kulowych (2) oraz technologii pieców obrotowych przeponowych POP i młynów walcowych z separatorem (3) prowadzi do następujących stwierdzeń:

- a) W przypadku wszystkich – wyżej analizowanych technologii produkcji – spełniony jest warunek normowy zawartości frakcji większych od 0,02 mm w ilości poniżej 15%. Różnice w zawartościach pozostałości na sicie 0,2 mm, czyli frakcji $d_i > 0,2$ mm, nie są duże, a wartości średnie wynoszą kolejno: $\bar{X}_{(1)} = 7,72\%$, $\bar{X}_{(2)} = 9,99\%$, $\bar{X}_{(3)} = 7,35\%$. Współczynniki zmienności wynoszą kolejno

$v_{(1)} = 37,95\%$, $v_{(2)} = 15,21\%$, $v_{(3)} = 29,25\%$ i różnice w tym zakresie są duże. Zmienność ta dotyczy ogólnie mniej niż 10% spoiwa, dlatego wpływ ści uziarnienia w zakresie frakcji $d > 0,2$ mm nie jest wielki nie tylko w relacjach masowych, ale jest jeszcze mniejszy w relacjach powierzchni właściwej ziaren o uziarnieniu $d > 0,2$ mm, w stosunku do powierzchni właściwej całości spoiwa. W tym aspekcie praktycznie rozstrzygającą jest wysoka jednorodność wskaźnika $(W/G)_n$ dla konsystencji normalnej, jak podano w p. 5.5.5. Nie mniej należy dźić, że gipsy z technologii prażarek kotłowych PK (2) cechowały się najwyższą jednorodnością, a gipsy z pieców obrotowych PO – najniższą jednorodnością.

- b) Jeżeli warunek normowy nieprzekraczania zawartości frakcji $d > 0,2$ mm potraktuje się jako wymóg statystyczny, to będzie on równoznaczny z odpowiedzią na pytanie: czy na podstawie posiadanego zbioru wyników przesiewu o liczebności n , o cechach zbioru \bar{X} , s , jesteśmy w stanie orzec, że z prawdopodobieństwem 95% nie zajdzie zależność jak poniżej:

$$X_{k,02} = \bar{X}_{02}(1 \pm tv_{02}) \leq X_n \quad (5.15)$$

gdzie:

$X_{k,02}$ – wartość charakterystyczna zawartości frakcji $D > 0,2$ mm,

v_{02} – współczynnik zmienności wyników w zbiorze,

t – parametr do obliczeń kwantyli w rozkładzie normalnym,

X_n – wartość graniczna zawartości frakcji $d > 0,2$ mm w spoiwie, określona normą.

Rozwiązanie zadania dla zbioru o liczebności n , z cechami zbioru \bar{X} , s , poprzez analizowanie granic przedziału średniej generalnej \bar{X} na podstawie rozkładu t-Studenta, a następnie w oparciu o zależność rozkładu normalnego Gaussa prowadzi ogólnie do związku:

$$X_{k,02} = \bar{X}_{02} \pm k_a s \leq X_n \quad (5.16)$$

Dla zbioru wyników o liczebności $n = 30$ parametr k_A można przyjąć o wartości 1,84 [434], tym samym ocena statystyczna uziarnienia analizowanych spoiw gipsowych, w oparciu o wyniki \bar{X} i v podane w tabeli 5.7, przedstawia się jak poniżej:

- dla gipsów z pieców obrotowych PO (1)
 $X_{k,02} = 7,72 + 1,84 \cdot 2,93 = 13,11\% < X_n = 15\%$
- dla gipsów z prażarek kotłowych PK (2)
 $X_{k,02} = 9,99 + 1,84 \cdot 1,52 = 12,79\% < X_n = 15\%$
- dla gipsów z pieców obrotowych przeponowych POP (3)
 $X_{k,02} = 7,35 + 1,84 \cdot 2,15 = 11,31\% < X_n = 15\%$

Na podstawie powyższego toku rozumowania autor wnosi, że właśnie powyższy sposób analizy wyników i zastosowanie proponowanych zależności (5.15) i (5.16) powinny być podstawą do statystycznej oceny uziarnienia spoiw gipsowych, w procesie ich produkcji.

- c) W ocenie analizowanych spoiw w zakresie zawartości frakcji $d > 1,0$ mm stwierdza się, że istotnie zauważalne zawartości tej frakcji występowały w gipsie z technologii pieców obrotowych PO (1) i mielenia w młynach kulowych wyprażonego surowca. Stwierdzone wartości średnie $\bar{X}_{1,0} = 0,31\%$ są niższe od wartości progowej $\bar{X}_{n,1,0} = 0,5\%$, ale w ocenie statystycznej, według zależności (5.16) występuje losowa możliwość niespełnienia warunku granicznego, z prawdopodobieństwem 95%, gdyż wartość charakterystyczna $X_{k,1,0}$ przekracza wartość progową jak poniżej:

$$X_{k,1,0} = 0,31 + 1,84 \cdot 0,37 = 0,99\% > X_{n,1,0} = 0,5\%$$

W statystycznych zbiorach wyników badań gipsu budowlanego w technologii produkcji prażarek kotłowych PK (2) zawartość frakcji $d > 1,0$ mm była równa 0, a w gipsach produkowanych aktualnie w nowoczesnej technologii POP zawartość frakcji $d > 1,0$ mm jest śladowa, na poziomie 0,01%.

5.5.4.3. Analiza metod oznaczeń składu granulometrycznego gipsu budowlanego

Typową metodą stosowaną w praktyce laboratoryjnej jest analiza sitowa.

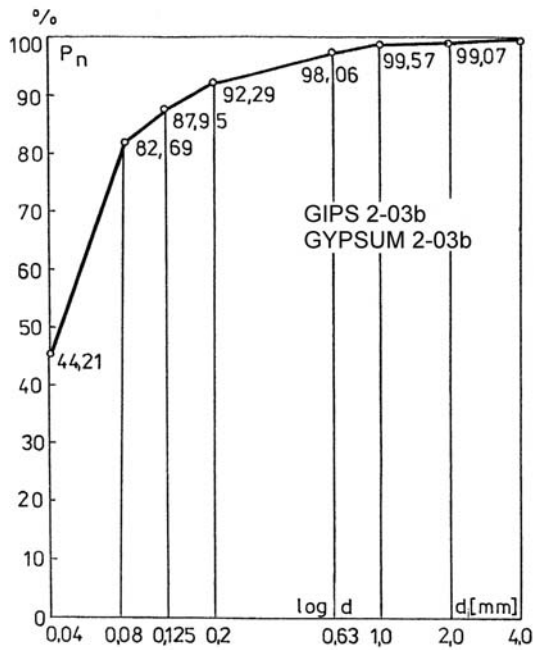
Przykładową krzywą przesiewu losowej próby gipsu budowlanego nr 2-03b (z technologii pieców obrotowych PO) podano na rysunku 5.4. Na uwagę zasługują następujące stwierdzenia:

- ponad 80% masy spoiwa to ziarna poniżej $d = 0,08$ mm, a udział ziaren powyżej 0,04 mm w badanej próbie wynosił 44,2%;
- w badanej próbie gipsu budowlanego występują ziarna relatywnie grube jak na spoiwa budowlane, nawet frakcji 2–4 mm w ilości około 1%, czego nie spotyka się w przypadku spoiw cementowych (w przypadku których pozostałość na sicie 1,0 mm dla świeżych cementów powinna wynosić normatywnie 0%).

Pogląd na jednorodność uziarnienia gipsu budowlanego przybliżają wyniki badań pięciu losowych dostaw rynkowych z okresu produkcji lat 1982–1986, podanych na rysunku 5.5. Rozrzut zawartości frakcji składowych wynosi w zakresie wartości: od 0,5% dla frakcji 1–2 mm do około 5% dla frakcji 0–0,08 mm.

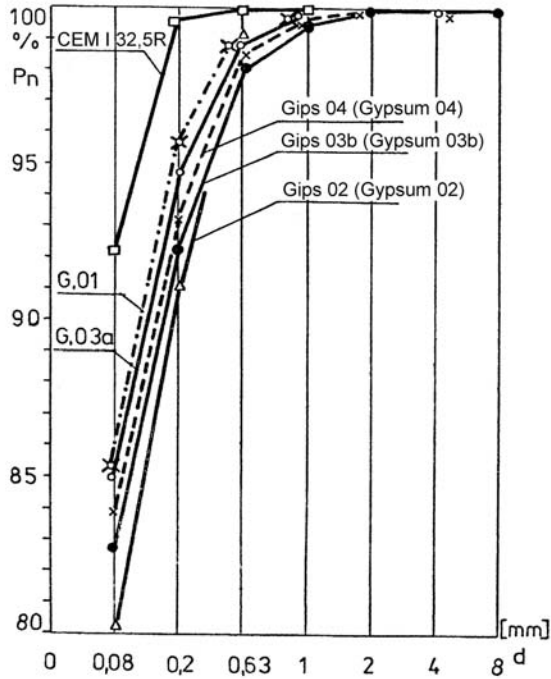
Porównanie uziarnienia spoiw gipsowych i cementu portlandzkiego CEM I 32,5 prowadzi do poniższych stwierdzeń:

- w zakresie frakcji grubszych cementy są drobniej przemielone niż gips budowlany „zwykły” z pieców obrotowych,
- w przypadku cementów niższa jest też pozostałość na sicie 0,2 mm.



Rys. 5.4.
 Krzywa uziarnienia próby gipsu budowlanego nr 2-03b, typ GB-N1 (surowce naturalne, piece obrotowe PO, młyny kulowe): P_n – przechodzi przez sito, d_i – wymiar oczka kwadratowego sit

Fig. 5.4.
 Curve of grain size distribution of building plaster sample No 2-03b, type GB-N1 (natural raw materials, PO rotary furnaces, ball mills): P_n – goes through sieve, d_i – sieve square mesh dimension



Rys. 5.5.
 Zestawienie krzywych uziarnienia kilku prób gipsu budowlanego GB-N1 z okresu produkcji 1982–1986 oraz porównawczo krzywe uziarnienia cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R

Fig. 5.5.
 Comparison of grain size distribution curves of several samples of building plaster GB-N1 of the production period of 1982–1986 and – comparatively – grain size distribution curves of Portland cement CEM I 32,5 R

5.5.4.4. Analiza składu granulometrycznego gipsu budowlanego z surowców naturalnych i syntetycznych z różnych technologii produkcji

Właściwą i precyzyjną ocenę porównawczą uziarnienia spoiw można przeprowadzić dopiero na podstawie badań składu granulometrycznego, uzyskanego metodą laserową, dającą możliwość analizy zawartości frakcji składowych w zakresie ziaren drobnych i bardzo drobnych (Wirsching [348]). W przypadku cementu istnieje pogląd, że aż 60% powierzchni właściwej zapewniają frakcje drobne poniżej 3 μm (dokumentacja aparaturowa firmy Malvern Instruments), co można oszacować na podstawie wzoru (5.17).

Podane na rysunku 5.6 krzywe rozkładu uziarnienia losowych prób dostaw rynkowych gipsu budowlanego, wykonanych z surowców z tego samego jednorodnego złoża, ale z różnej technologii produkcji przemysłowej z okresu 1990–2004, wskazują na duże zróżnicowanie charakterystyki uziarnienia i stopnia domielenia (tab. 5.9).

Powierzchnia geometryczna ziaren (tab. 5.9, kol.7) obliczana jest według wzoru:

$$SSC = \sum_{i=1}^n \frac{6}{\rho d_i} p_i \quad (5.17)$$

gdzie:

ρ – gęstość materiału w g/cm^3 ,

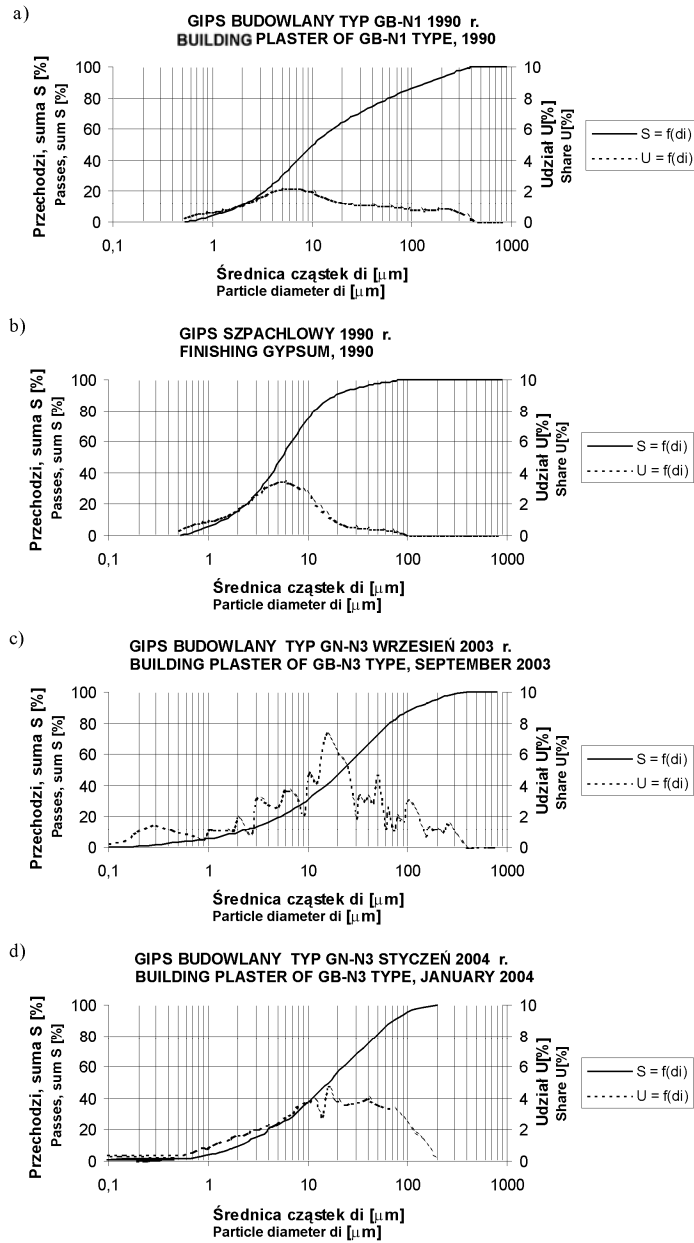
d_i – ekwiwalentna średnica ziaren danej frakcji w cm ,

p_i – zawartość procentowa frakcji składowej w całej próbie.

Stopień domielenia i skład uziarnienia zależy od maszyn i technologii rozdrabniania, a także ogólnie od: twardości skał, właściwości wsadu, czasu domielania (Lehman, Mathiak, Kurpiers [170, 171]). Gipsy budowlany i szpachlowy, których krzywe uziarnienia podano na rysunkach 5.6a, 5.6b, były domielane w klasycznych młynach kulowych. Gipsy budowlane z charakterystyką składu ziarnowego podaną na rys. 5.6c i 5.6d, zostały domielone w aktualnie zmienionej technologii młynów walcowych, pozwalającej na osiągnięcie regulowanego stopnia domielenia (Nowak [227, 228], Zisselmar [362]).

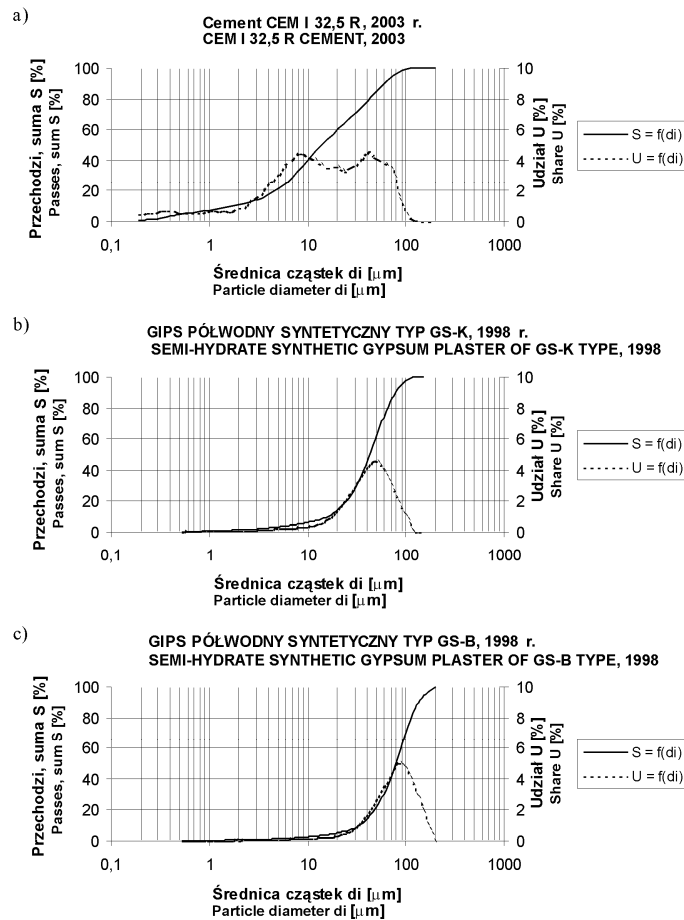
Analiza porównawcza charakterystyki uziarnienia prób gipsów, podanych na rysunku 5.6, prowadzi do stwierdzeń podanych poniżej:

- W technologii młynów kulowych uzyskiwano wysokie powierzchnie geometryczne ($SSC = 1245 \text{ m}^2/\text{kg}$ dla gipsu budowlanego (GB-N1) i $SSC = 1770 \text{ m}^2/\text{kg}$ dla gipsu szpachlowego) i towarzyszące niskie wartości średnic ziaren d_{50} , równych: 10,17 μm dla gipsu budowlanego i tylko 5,52 μm dla gipsu szpachlowego. Równocześnie w przypadku gipsu budowlanego wystąpiła wyraźnie obecność ziaren grubych: powyżej 200 μm o zawartości 6,52%, w próbie losowej jak na rysunku 5.6a, i o zawartości 4,5–8% w próbach losowych jak podano na rysunku 5.5. Są to zawartości poniżej wartości dopuszczalnych 15% według BN-89/6733-12 [371]. Gipsy budowlane domielone w tej technologii cechują się obecnością ziaren frakcji 1–2 mm, a nawet frakcji 2–4 mm (rys. 5.4, 5.5), z zawartością ziaren powyżej 1 mm przekraczającą w niektórych losowych próbach próg dopuszczalny 0,5% (rys. 5.5).



Rys. 5.6. Uziarnienie gipsu budowlanego z surowców naturalnych, losowe próby dostaw rynkowych w okresie 1990–2004

Fig. 5.6. Natural building plaster graining, random attempts of market supplies in the period of 1990–2004



Rys. 5.7. Zestawienie porównawczych krzywych uziarnienia cementu i dwóch losowych prób gipsu półwodnego syntetycznego z odsiarczania spalin
 Fig. 5.7. Set of comparative grain size distribution curves of cement and two random samples of semi-hydrate synthetic gypsum plaster from flue gas desulphurisation

Bardziej domielone gipsy szpachlowe cechowały się uziarnieniem zawężonym do wymiaru maksymalnego 100 μm (rys. 5.6b) i spełniały wymogi normowe [366, 420] w zakresie uziarnienia (załączniki tab. Z-1 i Z-3).

Gipsy budowlane GB-N3, jak na rysunkach 5.6c i 5.6d, uzyskane w nowej nologii młynów walcowych, cechują się mniejszą powierzchnią geometryczną wędnio 248 m²/kg i 494 m²/kg, większymi wartościami średnicy ziaren d₅₀ (odpowiednio 22,21 μm i 15,88 μm). Mniejsza powierzchnia właściwa wpływa korzystnie na

żenie wodozadności spoiwa. Różnice w uziarnieniu dwóch losowych prób z dostaw rynkowych gipsu GN-N3, jak na rysunkach 5.6c i 5.6d, związane są z poszukiwaniem malnego składu granulometrycznego gipsu półwodnego. Różnice te dotyczą zarówno stopnia domielenia SCC, jak i pasma uziarnienia z ograniczeniem do $d_{\max} < 400 \mu\text{m}$ (dla próby jak na rys. 5.6c) i do $d_{\max} < 100 \mu\text{m}$ (dla próby jak na rys. 5.6d).

Tabela 5.9

Table 5.9

Charakterystyka uziarnienia spoiw gipsowych z surowców naturalnych i gipsów syntetycznych, w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R
 Characteristics of graining of natural gypsum plaster and synthetic gypsum plaster, in comparison to CEM I 32,5 R. Portland cement

Lp. No	Rodzaj spoiwa Type of binder	Uziarnienie spoiwa Binder graining				
		$d_{0,1}$ μm	$d_{0,5}$ μm	$d_{0,9}$ μm	d_{\max} μm	SSC m^2/kg
1	2	3	4	5	6	7
1.	Gips budowlany GB-N1 Building plaster GB-N1	1,85	10,17	143,5	400	1245
2.	Gips szpachlowy Spatula gypsum	1,43	5,52	18,13	100	1770
3.	Gips budowlany GB-N3 IX 2003 Building plaster GB-N3 IX 2003	2,02	22,21	125,0	400	249
4.	Gips budowlany GB-N3 III 2004 Building plaster GB-N3 III 2004	1,99	15,92	75,54	200	494
5.	Gips syntetyczny GS-K Synthetic gypsum plaster GS-K	15,79	43,13	78,13	140	290
6.	Gips syntetyczny GS-B Synthetic gypsum plaster GS-B	33,25	79,27	134,85	200	150
7.	Cement CEM I 32,5 R Cement CEM I 32,5 R	1,90	14,00	63,1	150	605

Znacznie uległa poszerzeniu problematyka uziarnienia spoiw gipsowych po wejściu na rynek gipsowych spoiw syntetycznych, uzyskiwanych z odsiarczania spalin w technologii mokrej wapniowej (Osiecka [242]).

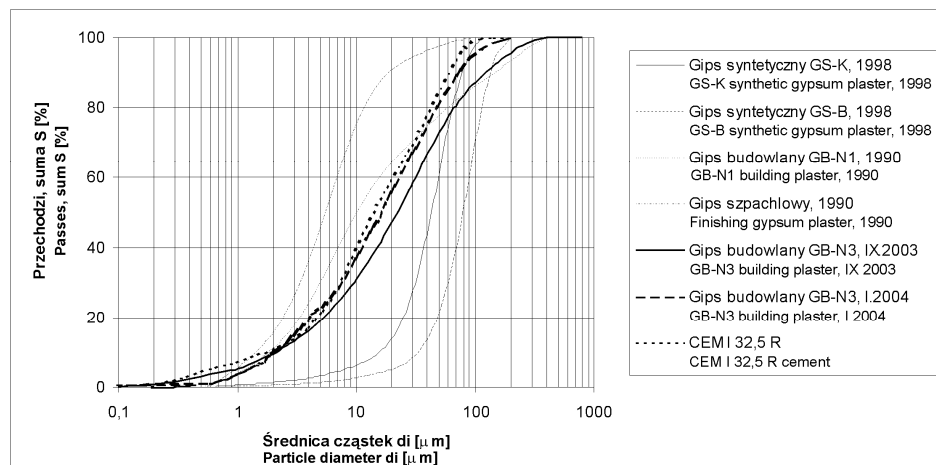
Na rysunku 5.7b i c podano – dla celów porównawczych – charakterystyki uziarnienia dwóch losowych dostaw spoiw gipsowych syntetycznych, przeznaczonych do produkcji płyt gipsowo-kartonowych. Technologia produkcji płyt G-K, z rdzeniem z zaczynów gipsowych, wymaga stosowania gipsów o relatywnie szybkim czasie hydratacji, niedużej wodozadności, w celu uzyskania wyższych przyrostów wytrzymałościowych rdzenia gipsowego i ograniczenia zmian liniowych w procesie wiązania i odsychania.

Średnice sprowadzone d_{50} dla podanych gipsów syntetycznych wynoszą kolejno 43,13 μm i 79,27 μm i mieszczą się one w zakresie optymalnym dla technologii płyt G-K w przedziale 30–75 μm , i z ograniczeniem obecności zawartości ziaren powyżej 100 μm . Ziarna większe mogą bowiem nie ulec całkowitej hydratacji, w relatywnie krótkim czasie przebiegu płyt do pieców wysuszających i byłyby wtrąceniem osłabiającym strukturę kompozytu dojrzałego rdzenia gipsowego. Charakterystyki gipsów syntetycznych, podane na rysunku 5.7b i c, spełniają właśnie specyficzne wymogi spoiw gipsowych do produkcji płyt G-K.

Gipsy syntetyczne o drobniejszym uziarnieniu mają zastosowanie do produkcji konfekcjonowanych zapraw tynkarskich gipsowych i gipsowo-wapiennych.

Na rysunku 5.7a podano porównawczą krzywą uziarnienia cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R, z parametrami: $d_{50} = 14,00 \mu\text{m}$ i $\text{SSC} = 605,4 \text{ m}^2/\text{kg}$. Charakterystyka uziarnienia prezentowanej losowej próby cementu, rozdrabnianego w technologii młynów kulowych, jest zbliżona do charakterystyk uziarnienia gipsów budowlanych, podanych na rysunku 5.6.

Zbiorcze zestawienie krzywych uziarnienia analizowanych spoiw gipsowych z surowców naturalnych i syntetycznych oraz porównawczo cementu CEM I 32,5 R, podano na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Zestawienie krzywych uziarnienia dla spoiw gipsowych i porównawczo dla cementu CEM I 32,5 R, badanych metodą analizatorów laserowych

Fig. 5.8. Comparison of grain size distribution curves for gypsum plaster, and comparatively for CEM I 32,5 R cement, tested by means of laser analyser method

Z podsumowania analiz wyników badań uziarnienia spoiw gipsowych metodą laserową wynika jednoznaczny wniosek, że wymagania stawiane spoiwom gipsowym w aktach normatywnych (tablice Z1–Z5 w załączeniu do pracy, zawierające ograniczenia pozostałości na sitach 0,2 i 1,0 mm) są wysoce nieprecyzyjne, ujmują jedynie problem w zakresie ograniczenia frakcji górnych. Brak jest wymogów w zakresie przedziałów wartości ziaren sprowadzonych d_{50} i d_{10} , a przede wszystkim w zakresie powierzchni właściwej, która ma ważne znaczenie technologiczne w aspekcie informacji o potencjalnej wodoodporności zaczynów, skurczu w trakcie wysychania oraz czasie wiązania.

Dostępność techniki laserowej, w zakresie oznaczeń składu ziarnowego i powierzchni geometrycznej SSC, powinna być bodźcem do sformułowania bardziej precyzyjnych i reprezentatywnych wymagań normatywnych dotyczących uziarnienia spoiw gipsowych, ze zróżnicowaniem tych wymogów stosownie do ich przeznaczenia i zastosowań w budownictwie. Powyższe uwagi krytyczne dotyczą także aktualnych norm europejskich PN-EN [443, 444, 446, 447] oraz norm wprowadzanych prEN 13279-1 [445].

5.5.5. Jednorodność konsystencji normowej spoiw gipsowych z surowców naturalnych z różnych technologii produkcji

Konsystencję normową normy wielu państw określają w sposób zróżnicowany (ISO 3051 [400], ASTM 427-84 [406]). Norma Polska PN [369] konsystencję normalną określa średnicą rozplywu 18 cm w aparacie Southarda.

Jednorodność konsystencji normowej $\omega_n = (W/G)_n$ w procesie bieżącej produkcji spoiw ma bezpośredni wpływ na jednorodność cech wytrzymałościowych stwardniałych zaczynów gipsowych.

Zbiory wyników badań kontrolnych parametru konsystencji normowej ω_n określone dla gipsów budowlanych produkowanych według trzech analizowanych porównawczo technologii produkcji, mają następujące cechy statystyczne \bar{X} i v :

- gipsy z pieców obrotowych PO (1): $\bar{\omega}_{n(1)} = \bar{X}_1 = 0,70$;
 $v = 2,6\%$
- gipsy z prażarek kotłowych PK (2): $\bar{\omega}_{n(2)} = \bar{X}_2 = 0,66$;
 $v = 3,0\%$
- gipsy z pieców obrotowych przeponowych POP (3): $\bar{\omega}_{n(3)} = \bar{X}_3 = 0,66$;
 $v = 0,85\%$

Na podkreślenie zasługuje fakt niskich współczynników zmienności v , czyli dużej jednorodności kontrolowanych parametrów ω_n dla gipsów budowlanych w produkcji przemysłowej według trzech analizowanych technologii. Zestawienie danych jak wyżej dokumentuje dobitnie walory nowej technologii pieców obrotowych przeponowych (POP), jak i skorelowanej technologii mielenia w młynach walcowych.

Można orzec, że parametr ω_n – w kontroli bieżącej produkcji spoiwa – ujmuje kompleksowo dwa ważne czynniki: skład fazowy spoiwa (warunkowany technologią prażenia) i skład granulometryczny (warunkowany technologią przemiału). Można także orzec, że przy stałej technologii produkcji spoiwa, w oparciu o stałą bazę jednorodnego złoża, właśnie jednorodność parametru ω_n stanowi łatwą i tanią metodę kontroli wewnętrznej (zakładowej) i charakterystyki na zewnątrz (dla klienta) w zakresie jednorodności spoiwa w bieżącej produkcji.

Należy wnosić, że parametr ω_n , w zakresie wartości średniej \bar{X} i współczynnika zmienności v , powinien być wprowadzony obligatoryjnie do bieżącej kontroli jakości spoiw gipsowych (w ocenie zakładowej), ale także jako parametr uzasadniony w wymaganiach normowych, o różnej tolerancji, w powiązaniu z deklarowanymi klasami spoiw gipsowych.

Przy zapewnieniu bieżącej codziennej kontroli parametru ω_n można ograniczyć do niezbędnego minimum badania kontroli składu fazowego i laserowe badania składu granulometrycznego.

5.5.6. Wpływ technologii produkcji spoiw z surowców naturalnych na rozkłady statystyczne i jednorodność wytrzymałości gipsu budowlanego

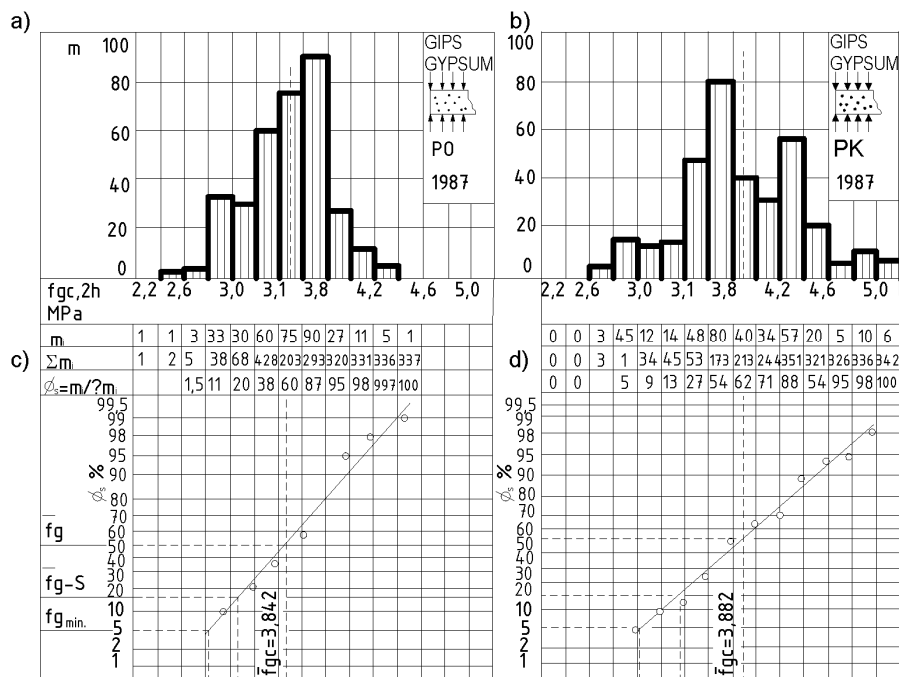
5.5.6.1. Oznaczenie normowej wytrzymałości spoiw gipsowych

Kontrolę normowej wytrzymałości spoiw gipsowych – zgodnie z normatywami ISO 3051 [400] – przeprowadza się na próbkach w kształcie beleczek 4x4x16 cm, wykonanych z zaczynu o wskaźniku W/G odpowiadającym konsystencji normalnej. W toku dalszych badań wilgotne próbki dojrzewającego zaczynu gipsowego są rozformowywane po 15 minutach, a następnie przechowywane w atmosferze laboratoryjnej ($20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$, wilgotność względna powietrza $w_p = 65 \pm 10\%$, zgodnie z ISO 3048 [402]). Po upływie $2h \pm 10\text{ min}$ od chwili zarobienia gipsu – próbki wilgotne poddaje się próbie zginania, a następnie ściskania. Wyniki tych oznaczeń stanowią podstawę normowej oceny wytrzymałości gipsu u producenta.

5.5.6.2. Statystyczne rozkłady wytrzymałości gipsu

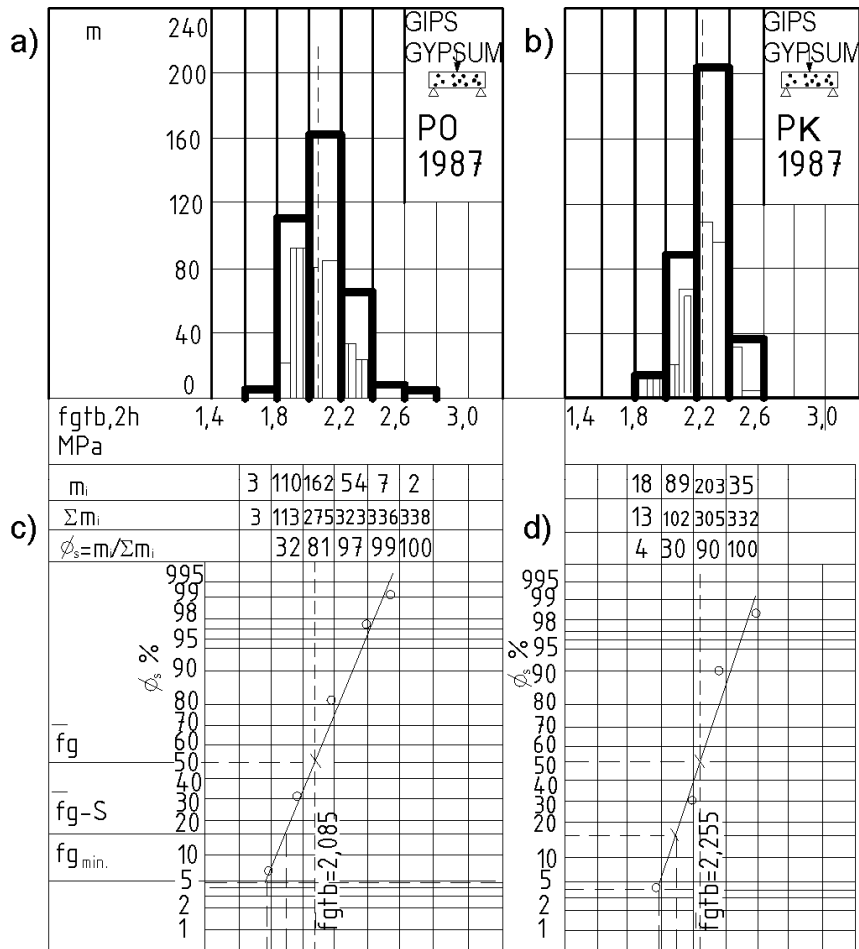
Histogramy rozkładów wytrzymałości f_{2h} wilgotnych zaczynów normowych gipsu budowlanego, wykonanych z prób kontrolnych pobieranych codziennie w przeciągu całego roku z bieżącej produkcji zakładu przemysłu gipsowego (Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130]), podano na rysunkach 5.9 i 5.10. Na rysunku 5.9 podano histogramy rozkładu wytrzymałości gipsu na ściskanie $f_{gc,2h}$, przykładowo z roku 1987, oddzielnie dla gipsów prażonych w piecach obrotowych (seria PO, rys. 5.9a) i w prażarkach (seria PK, rys. 5.9b). Analogiczne wartości wytrzymałości gipsu na rozciąganie przy zginaniu

$f_{gb,2h}$ podano na rysunku 5.9. Liczebność populacji wyników $f_{gc,2h}$, jak podano na rysunku 5.10, wynosiła $\Sigma m_i = 337$ dla serii PO i 342 dla serii PK. Podobna była liczebność wyników przy analizie statystycznej zbiorów $f_{gb,2h}$ na rysunku 5.10. Każdy pojedynczy wynik analizowanej populacji stanowił średnią z 6 beleczek kontrolnych. Analizowane więc serie wyników badań z lat 1986 i 1987 są bez zastrzeżeń reorezentatywne do ogólnych analiz składowych zagadnień badawczych: wpływu technologii prażenia gipsu budowlanego, przy zachowaniu relatywnie porównywalnego wsadu surowcowego z tego samego jednorodnego złoża oraz przy stosowaniu tej samej technologii mielenia w młynach kulowych.



Rys. 5.9. Histogramy rozkładu wytrzymałości na ściskanie $f_{gc,2h}$ gipsu budowlanego produkcji z surowców naturalnych: a) dla gipsów GB-N1 prażonych w piecach obrotowych PO, b) dla gipsów GB-N2 prażonych w prażarkach PK, c) i d) graficzne opracowanie statystyczne wyników na siatce laplaso-normalnej (dane z 1987 r., serie badań z bieżącej produkcji zakładu przemysłu gipsowego [130])

Fig. 5.9. Histograms of compressive strength distribution $f_{gc,2h}$ of natural building plaster production: a) for GB-N1 gypsum roasted in PO rotary furnaces, b) for GB-N2 gypsum roasted in PK roasters, c) and d) graphic statistic representation of results on laplace-normal grid (data of 1987, a series of tests from current production of gypsum industry plant [130])



Rys. 5.10. Histogramy rozkładu wytrzymałości na zginanie $f_{gtb,2h}$ gipsu budowlanego z surowców naturalnych: a) dla gipsów GB-N1 prażonych w piecach obrotowych PO, b) dla gipsów GB-N2 prażonych w prażarkach PK, c) i d) graficzne opracowanie statystyczne wyników na siatce laplaso-normalnej (dane z 1987 r., serie badań kontrolnych z bieżącej produkcji zakładu przemysłu gipsowego [130])

Fig. 5.10. Histograms of bending strength $f_{gtb,2h}$ of natural building plaster: a) for GB-N1 gypsum roasted in PO rotary furnaces, b) for GB-N2 gypsum roasted in PK roasters, c) and d) graphic statistic representation of results on laplace-normal grid (data of 1987), a series of tests from current production of gypsum industry plant [130])

Na rysunkach 5.9c i 5.9d oraz 5.10c i 5.10d pokazano wartości statystyczne rozkładu, wyznaczone metodą graficzną:

\bar{f} – wytrzymałość średnia, odpowiadająca częstości sumarycznej $\Phi_s = 50\%$, wartość $\bar{f} - s$, odpowiadająca częstości sumarycznej $\Phi_s = 15\%$, f_{\min} wytrzymałość odpowiadająca częstości sumarycznej $\Phi_s = 5\%$, czyli wytrzymałość gwarantowana z prawdopodobieństwem 95%.

Powyższe wartości statystyczne rozkładu obliczono także analitycznie według zależności (5.4), (5.6) i (5.7). Całość parametrów statystycznych analizowanych rozkładów wytrzymałości podano w tabeli 5.10.

Na rysunku 5.11 podano histogramy rozkładu wyników badań w układzie współrzędnych $f_{gc,2h} - \Phi(t) = m_i / n$, czyli w relacji: wytrzymałość gipsu wilgotnego na ściskanie po 2h – częstość wyników w danym i-tym przedziale wytrzymałości.

Tabela 5.10

Table 5.10

Parametry statystyczne rozkładu wytrzymałości gipsu budowlanego z surowców naturalnych (serie badań kontrolnych z bieżącej produkcji zakładu przemysłu gipsowego [130]: PO – piece obrotowe, PK – prażarki kotłowe, dane z lat 1986–1987)

Statistic parameters of strength of natural building plaster (series of tests from current production of gypsum industry plant [130]: PO – rotary furnaces, PK – boiler roasters, data of the years 1986–1987)

Lp. No	Rok produkcji Year of production	Parametry statystyczne Statistic parameters	Wytrzymałość na zginanie $f_{gbt,2h}$, Mpa Bending strength $f_{gbt,2h}$, Mpa		Wytrzymałość na ściskanie $f_{gc,2h}$, Mpa Compressive strength $f_{gc,2h}$, Mpa	
			PO	PK	PO	PK
			1.	1986	Ilość pomiarów Σn_i Number of measurements Σn_i	360
2.	Wytrzymałość R_{2h} Strength R_{2h}	2,157	2,358		3,566	4,031
3.	Odchylenie standardowe s Standard deviation s	0,197	0,116		0,414	0,541
4.	Współczynnik $v = s / \bar{f}$ Coefficient $v = s / \bar{f}$	9,12	1,93		11,61	13,42
5.	$f_{\min,2h}$	1,833	2,166		2,883	3,138
6.	$f_{gbt,2h} / f_{gc,2h}$	0,636	0,690			
7.	1987	Ilość pomiarów Σn_i Number of measurements Σn_i	338	340	337	342
8.		Wytrzymałość R_{2h} Strength R_{2h}	2,085	2,255	3,482	3,882
9.		Odchylenie standardowe s Standard deviation s	0,148	0,123	0,339	0,529
10.		Współczynnik $v = s / \bar{f}$ Coefficient $v = s / \bar{f}$	7,13	5,47	9,73	13,62
11.		$f_{\min,2h}$	1,810	2,052	2,923	3,010
12.		$f_{gbt,2h} / f_{gc,2h}$	0,619	0,682		

Wnioski z analizy wyników badań kontrolnych gipsu są następujące:

- Średnie wytrzymałości gipsu na ściskanie f_{2h} produkowanego w prażarkach są większe – w porównaniu do analogicznych wartości gipsów z pieców obrotowych – o 9% w przypadku prób zginania i o 12,2% w przypadku prób ściskania.
- Mniejsze relatywnie wytrzymałości gipsów z pieców obrotowych należy wiązać ze znaczną zawartością anhydrytu III, którego obecność powoduje zwiększenie wodoodporności spoiwa i w konsekwencji zwiększenie porowatości zaczynów dojrzałych, co jest równoznaczne ze spadkiem wytrzymałości.
- Zdecydowanie większa jednorodność składu mineralnego i uziarnienia gipsów z prażarek powinna stanowić o większej jednorodności wytrzymałości tych gipsów. Istotnie współczynniki zmienności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla gipsu z prażarek wynosiły w latach 1986 i 1987 odpowiednio 1,93% i 5,47%, podczas gdy te same wartości dla gipsów z pieców obrotowych wynosiły 9,12% i 7,13%.
- Serie badań kontrolnych wytrzymałości na ściskanie wykazały zdecydowanie większy rozrzut wyników, stąd dla tych zbiorów odnotowuje się zdecydowanie większe wartości współczynników zmienności v , które w latach 1986 i 1987 kolejno wynoszą: 11,6% i 9,7% dla gipsów z pieców obrotowych oraz 13,4% i 13,6% dla gipsów z prażarek.

Z badań własnych autora [123, 124] wynika, że rozrzut wyników, oznaczeń wytrzymałości w próbie zginania belek i w próbie ściskania półbeleczek z zaczynów gipsowych jest zbliżony. Oba badania w warunkach badań laboratoryjnych cechuje podobny współczynnik zmienności v równy 9,31% w próbie zginania i 9,76% w próbie ściskania. Próba normowa ściskania jest natomiast bardzo wrażliwa na nierównoległość płaszczyzn podłużnych beleczek, które mogą wynikać z dekalibracji forem lub z powodu braku precyzyjnej kontroli równoległości przegród, przy składaniu części robieralnych form. Tego rodzaju wymóg precyzyjnej kontroli forem beleczkowych powinien być dobitnie podkreślony w korekcie przyszłych aktów normatywnych, w zakresie metodyki badań wytrzymałości spoiw (dotyczy to także spoiw cementowych i żywic sztucznych) – jako ważny element wiarygodności i prawidłowości uzyskiwanych wyników oznaczeń wytrzymałości na ściskanie.

Określone jak wyżej współczynniki zmienności wytrzymałości dla gipsu budowlanego są porównywalne z analogicznymi wartościami dla cementów hutniczych i portlandzkich niższych marek dawnych cementów CH25 i CP25 ($v = 12,7\%$ dla CH25 według Kurdowskiego i Błacha [160]) i są nieco wyższe od tych współczynników dla cementów CEM I 32,5 (różne wartości występują w pracach [117, 160, 360] i zamykają się w granicach 1,7–7,2%). Należy jednak podkreślić, że przemysł gipsowy ma w tym zakresie rezerwę do technologicznego uruchomienia, przy czym budownictwo krajowe nie wymuszało dotąd wymogu zwiększenia jednorodności spoiw gipsowych.

Rozrzuty wytrzymałości spoiw gipsowych występują także w czołowych firmach europejskich. Znani autorzy wielu prac badawczych z tego zakresu: Lehmann, Mathiak, Kurpiers [170, 171] ustalili następującą rozpiętość różnic niektórych właściwości spoiw gipsowych, produkowanych w pewnych anonimowych, różnych pięciu zakładach A, B, C, D, E z koncernu KNAUF'a:

- rozpiętość czasu początku wiązania $X_{i, \min} - X_{i, \max} = 9 - 23$ min, z dużą zmiennością tej cechy dla każdego zakładu z osobna, z wartością odchylenia standardowego $s_{\max} = \pm 4$ min;
- zawartość wody krystalicznej od 2% do 5%, z odchyleniem standardowym $s_{\max} = \pm 1,5\%$;
- stopień hydratacji od 82% do 96%, z odchyleniem standardowym $s_{\max} = \pm 4\%$.

Jak wynika z powyższych badań Lehmana z zespołem [170, 171], zmienne uwarunkowania surowcowe poszczególnych zakładów zwiększają jeszcze dodatkowo rozpiętość rozrzutu cech spoiw gipsowych, mogących znaleźć się równocześnie na określonym rejonie podaży. W Polsce, praktycznie skoncentrowana do niedawna produkcja gipsu budowlanego z surowców naturalnych w zakładach przemysłu gipsowego w rejonie rzeki Nidy sprawia, że na detalicznym i hurtowym rynku krajowym znajduje się gips budowlany z relatywnie porównywalnych i jednorodnych złóż gipsu grubokrystalicznego, przez to bardziej jednorodny, z rozrzutem właściwości w stopniu wynikłym z uwarunkowań technologicznych technologii prażenia i przemiału. Jednak duże koszty transportu wpływają na podrożenie ceny spoiwa do bardziej odległych rejonów Polski.

Na tle powyższych analiz wpływu technologii prażenia na jednorodność wytrzymałości gipsu budowlanego, uzyskiwanego w procesie przemysłowej produkcji w technologii pieców obrotowych PO i prażarek kotłowych PK z mieleniem w młynach kulowych – jako technologii, które mogą być jeszcze stosowane w mniejszych wytwórniach (Kurdowski, Pałka [166]), ale aktualnie zostały zastąpione przez nowocześniejsze technologie prażenia w piecach obrotowych przeponowych POP, z rozdrobnianiem w sterowanych młynach walcowych (Nowak [227, 228], Zisselmar [362]) – podaje się poniżej w tabeli 5.11 porównawcze wyniki badań właśnie dla technologii POP.

Tabela 5.11

Table 5.11

Wyniki badań kontrolnych wytrzymałości gipsu budowlanego, z surowców naturalnych mielonych w młynach walcowych i prażonych w technologii pieców obrotowych przeponowych POP (dane z zakładu produkcji przemysłowej z 2004 r., z okresu 1 miesiąca)

Test results of strength of natural building plaster grounded in roller mills and roasted in the technology of POP indirect rotary furnaces (data from industrial production plant of 2004, from the period of 1 month)

Lp. No	Właściwość gipsu, cecha zbioru Gypsum characteristic, feature of set	Oznaczenie Denotation	Jednostka Unit	Wartość liczbową Numerical value
1	2	3	4	5
1.	Wytrzymałość na zginanie 2h Bending strength after 2h	$f_{gtb,2h}$		
1.1.	Wymagania normowe Standard requirements		MPa	$\geq 1,8$
1.2.	Wymagania zakładowe Industrial requirements		MPa	$\geq 1,8$
1.3.	Liczebność podzbioru Subset size	n	sztuk piece	15

Tabela 5.11 cd.
Table 5.11 cont.

1	2	3	4	5
1.4.	Wartość średnia miesięczna Mean monthly value	$\bar{X}, \bar{f}_{gtb,2h}$	MPa	2,05
1.5.	Dolna granica przedziału ufności Lower trust range limit	$\bar{X} - 9\bar{X}$	MPa	1,53
1.6.	Górna granica przedziału ufności Upper trust range limit	$\bar{X} + 9\bar{X}$	MPa	2,53
1.7.	Wartość minimalna w zbiorze Minimal value in set	$\min f_{gtb,2h}$	MPa	1,85
1.8.	Wartość maksymalna w zbiorze Maximal value in set	$\max f_{gtb,2h}$	MPa	2,64
1.9.	Mediana Median	$M f_{gtb,2h}$	MPa	2,00
1.10.	Odchylenie standardowe Standard deviation	s	MPa	0,17
1.11.	Współczynnik zmienności Coefficient of variation	v_{tb}	%	8,42
1.12.	Wytrzymałość gwarantowana Guaranteed strength	$f_{gtb,2h}^G$	MPa	1,71
2.	Wytrzymałość na ściskanie 2h Compressive strength after 2h	$f_{gc,2h}$		
2.1.	Wymagania normowe Standard requirements		MPa	$\geq 3,0$
2.2.	Wymagania zakładowe Industrial requirements		MPa	$\geq 3,0$
2.3.	Liczebność podzbioru Subset size	n	pc	15
2.4.	Wartość średnia miesięczna Mean monthly value	$\bar{X}, f_{gc,2h}$	MPa	4,54
2.5.	Dolna granica przedziału ufności Lower trust range limit	$\bar{X} - 9\bar{X}$	MPa	3,10
2.6.	Górna granica przedziału ufności Upper trust range limit	$\bar{X} + 9\bar{X}$	MPa	5,94
2.7.	Wartość minimalna w zbiorze Minimal value in set	$\min f_{gc,2h}$	MPa	4,00
2.8.	Wartość maksymalna w zbiorze Maximal value in set	$\max f_{gc,2h}$	MPa	5,24
2.9.	Mediana Median	$M f_{gc,2h}$	MPa	4,34
2.10.	Odchylenie standardowe Standard deviation	s	MPa	0,47
2.11.	Współczynnik zmienności Coefficient of variation	v_c	%	10,31
2.12.	Wytrzymałość gwarantowana Guaranteed strength	$f_{gc,2h}^G$	MPa	3,76
3.	Relacja Relation	$\bar{f}_{gtb,2h} / \bar{f}_{gc,2h}$		0,45

Wnioski szczegółowe wynikające z analizy porównawczej cech wytrzymałościowych i jednorodności gipsów budowlanych, wykonanych w aktualnie stosowanej technologii POP (3) w porównaniu do technologii PO (1) i PK (2):

- a) Średnia wytrzymałość na zginanie $\bar{f}_{gtb,2h}$ gipsów w nowej technologii POP, wynosząca $\bar{X}_{tb,3} = 2,05$ MPa, jest najmniejsza: mniejsza od uzyskanej w technologii PO ($\bar{X}_{tb,1} = 2,157$ MPa w 1986 r. i $\bar{X}_{tb,1} = 2,085$ MPa w 1987 r.) oraz mniejsza od uzyskanej w technologii PK ($\bar{X}_{tb,2} = 2,358$ MPa w 1986 r. i $\bar{X}_{tb,2} = 2,225$ MPa w 1987 r.). Współczynnik zmienności wytrzymałości $f_{gtb,2h}$ w technologii POP, wynoszący $v_{tb,3} = 8,42\%$ jest zbliżony do współczynników zmienności gipsu z technologii PO ($v_{tb,1} = 9,12\%$ w 1986 r. i $v_{tb,1} = 7,13\%$ w 1987 r.). Niekwestionowanie najlepszą jednorodnością wytrzymałości cechowały się gipsy z technologii prażarek PK ($v_{tb,2} = 1,93\%$ w 1986 r. i $v_{tb,2} = 5,47\%$ w 1987 r.).
- b) Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{gc,2h}$ gipsów w nowej technologii POP, wynosząca $\bar{X}_{c3} = 4,54$ MPa, jest największa: większa od wytrzymałości na ściskanie gipsów uzyskiwanych z produkcji według technologii PO ($\bar{X}_{c1} = 3,56$ MPa w 1986 r. i $\bar{X}_{c1} = 3,482$ MPa w 1987 r.), a także większa od wytrzymałości uzyskiwanych w technologii PK ($\bar{X}_{c2} = 4,031$ MPa w 1986 r. i $\bar{X}_{c2} = 3,882$ MPa w 1987 r.). Współczynnik zmienności wytrzymałości gipsów uzyskiwanych w technologii POP, wynoszący $v_{c3} = 10,31\%$, jest tego samego rzędu jak w przypadku gipsów z technologii PO ($\bar{v}_{c1} = 10,67\%$ średnio dla lat 1986–1987) i mniejszy od wartości tego współczynnika dla gipsów z technologii PK ($\bar{v}_{c2} = 13,52\%$ średnio dla lat 1986–1987).
- c) Wytrzymałość gwarantowana na zginanie, obliczona według zależności (5.7), dla gipsów uzyskiwanych z technologii POP ($f_{gtb,2h}^G = 1,71$ MPa) jest natomiast mniejsza od analogicznych wytrzymałości gwarantowanych na zginanie uzyskiwanych dla gipsów w technologii PO ($f_{gtb,2h}^G = 1,839$ MPa w 1986 r. i $f_{gtb,2h}^G = 2,085$ MPa w 1987 r.), a także mniejsze od wytrzymałości gwarantowanych uzyskiwanych dla technologii PK ($f_{gtb,2h}^G = 2,166$ MPa w 1986 r. i $2,255$ MPa w 1987 r.).

Z kolei wytrzymałość gwarantowana na ściskanie f_{gc}^G dla gipsów w technologii POP wynosi $3,76$ MPa i jest ona większa od analogicznej wartości $f_{gc,2h}^G = 2,903$ MPa dla gipsów z technologii PO, jak również większa od tej wartości dla gipsów z technologii PK ($f_{gc,2h}^G = 3,074$ MPa).

Wnioski generalne wynikające z powyższej analizy:

- a) Drobniejszy przemiał gipsów w technologii PO i PK sprawia, że uzyskuje się sze średnie i gwarantowane wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu,

w porównaniu do „niżej” domielonych gipsów z technologii POP. Drobniejszy przemiał i większa liczba szczepów między kryształami gipsu stwardniałego czynią wyższą jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, mimo że „wyżej” ny gips z technologii PO i PK cechuje się wyższą wodożądnością dla uzyskania konsystencji normowej.

- b) Większa wodożądność gipsów uzyskanych w technologii PO i PK akcentuje się uzyskiwaniem mniejszych wytrzymałości średnich i gwarantowanych na ściskanie, w porównaniu do gipsów uzyskanych w technologii POP.

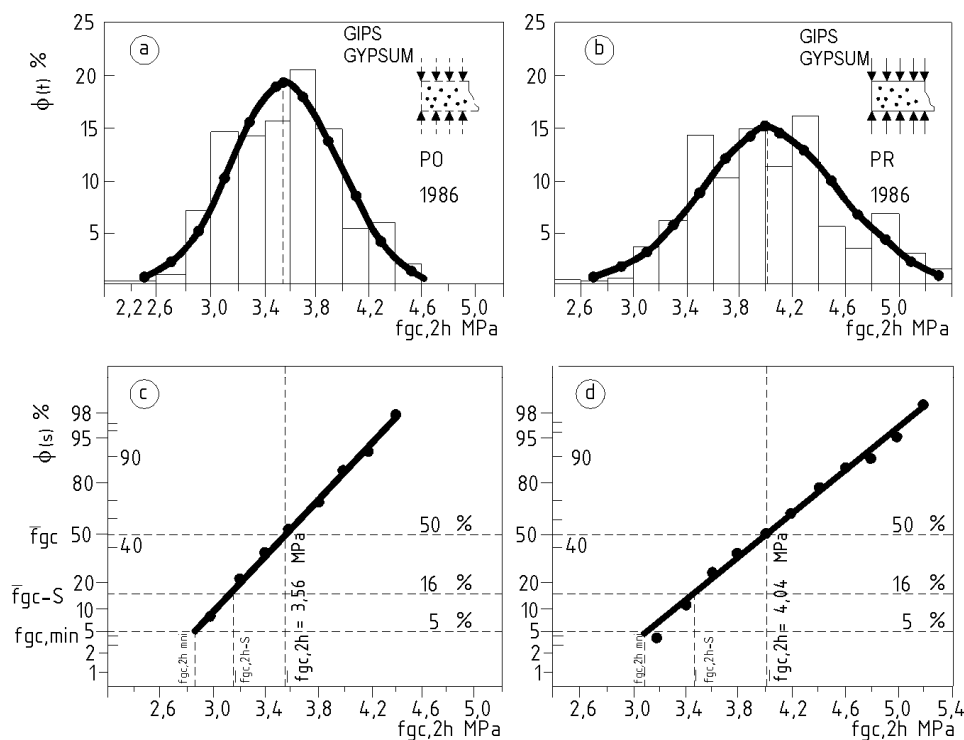
5.6. Zależności między wytrzymałością gipsu wilgotnego f_{2h} a jego wytrzymałością po wysuszeniu

Dla celów praktycznych ważna jest możliwość przeliczenia wytrzymałości normatywnej $f_{gc,2h}$ na ściskanie i $f_{gtb,2h}$ na rozciąganie przy zginaniu, w stanie wilgotności technologicznej, na odpowiadające im wytrzymałości f_{gc} i f_{gtb} w stanie wysuszonym do stałej masy. Na podstawie przeprowadzonych statystycznych badań własnych występuje oryginalna możliwość analitycznych przeliczeń. Dokumentacja tych badań podana jest na rysunku 5.12. Na uwagę wyjaśniającą zasługuje fakt, że wytrzymałości próbek po 2 h dojrzewania $f_{gc,2h}$ i $f_{gtb,2h}$ są w przybliżeniu równe wytrzymałości próbek suchych i następnie zamoczonych przed badaniem na okres $\tau_w = 2$ h. Natomiast próbki suche, a następnie moczone przez $\tau_w = 24$ h, charakteryzują się mniejszą wytrzymałością oznaczoną f_{gc}^w , co jest powodowane bardziej intensywnym osłabieniem powiązań międzykryształicznych w stwardniałym gipsie. Zależności między wytrzymałościami po 2 h dojrzewania i wytrzymałościami w stanie suchym opisane są w pracy współczynnikami $\alpha_1 \div \alpha_4$ (rys. 5.12 b, c, d, e i f). Liniowość uzyskanych zależności $\alpha_3 = f(W/G)$ i $\alpha_4 = f(W/G)$ pozwala określić interesujące zależności, w postaci związków (kładąc $W/G = \omega$):

$$\alpha_3 = \frac{f_{gc,2h}}{f_{gc}} = 0,30 + 0,153\omega \quad (5.18)$$

$$\alpha_4 = \frac{f_{gtb,2h}}{f_{gtb}} = 0,29 + 0,135\omega \quad (5.19)$$

Wygodniejsze w stosowaniu są zależności otrzymane w układzie współrzędnych jak na rysunku 5.13, na którym współrzędną x stanowi zmienna niezależna $G/W = \omega' = 1/\omega$. Poszukiwane zależności określają równania liniowe:



Rys. 5.11. Rozkłady częstości wyników badań wytrzymałości na ściskanie $f_{gc,2h}$ gipsu budowlanego GB-N1, uzyskanego z surowców naturalnych: a) rozkład normalny dla gipsów prażonych w piecach obrotowych PO, b) dla gipsów z prażarek PK, c) i d) graficzne opracowanie wyników na siatce laplaso-normalnej (na podstawie danych z produkcji przemysłowej w 1996 r.: Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130])

Fig. 5.11. Result frequency distributions of compressive strength $f_{gc,2h}$ of GB-N1 natural building plaster: a) normal distribution for gypsum roasted in PO rotary furnaces, b) for gypsum from PK roasters, c) and d) graphic representation of results on laplace-normal grid (on the basis of data from industrial production in 1996: Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130])

- opisujące wytrzymałość na ściskanie po 2 h dojrzewania i w stanie suchym:

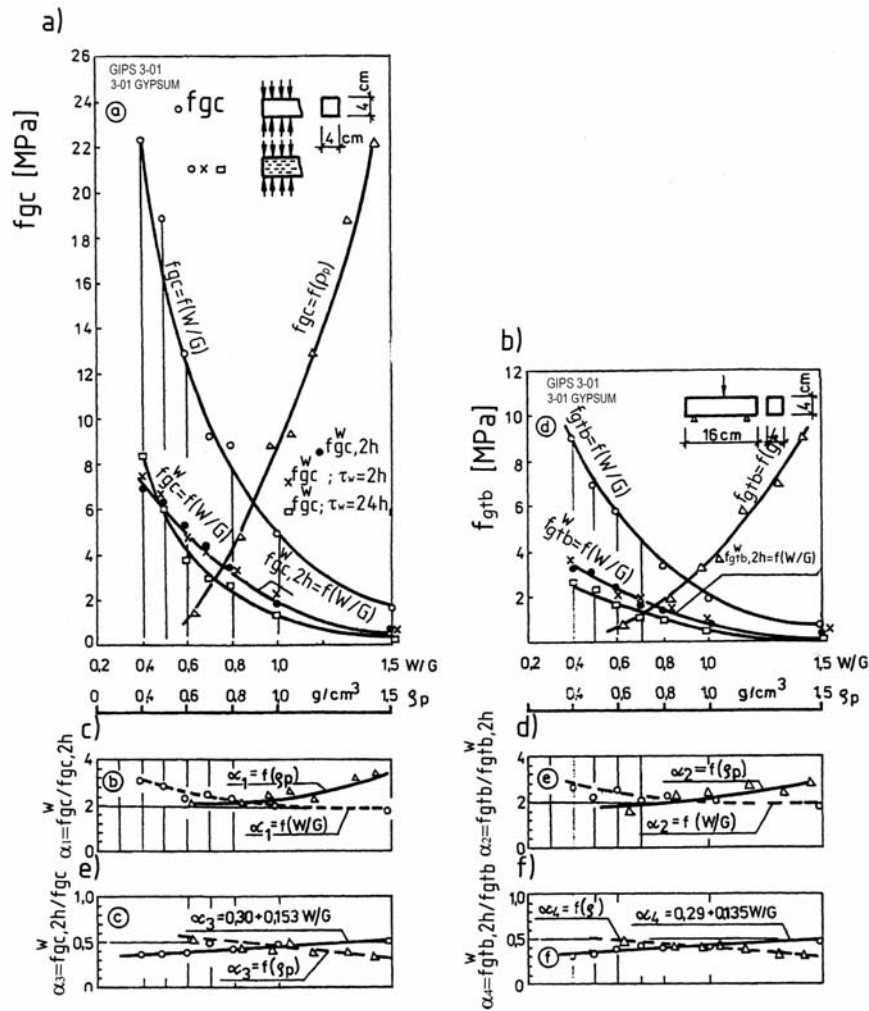
$$f_{gc,2h} = 3,9(\omega' - 0,46) \quad (5.20)$$

$$f_{gc} = 12,1(\omega' - 0,547) \quad (5.21)$$

- opisujące wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 2 h i w stanie suchym:

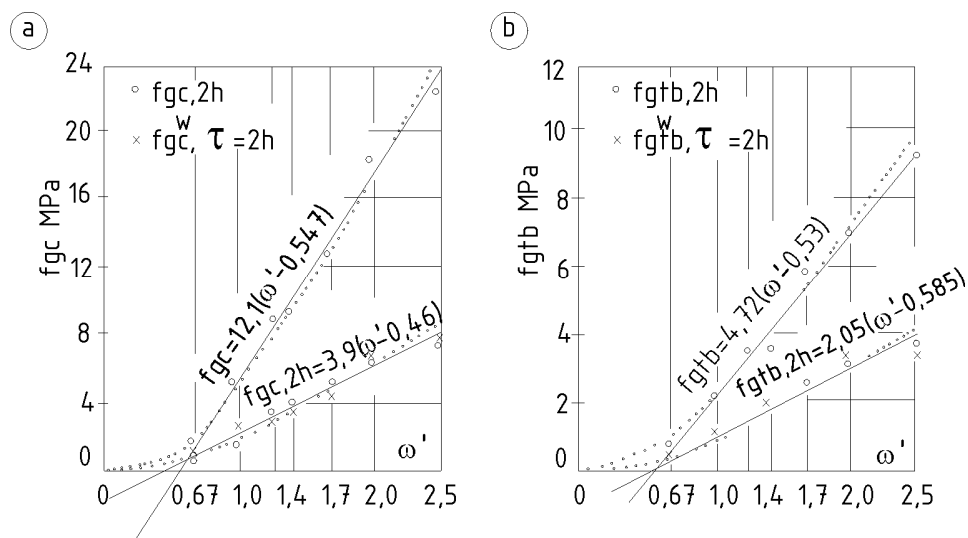
$$f_{gtb,2h} = 2,05(\omega' - 0,585) \quad (5.22)$$

$$f_{gtb} = 4,72(\omega' - 0,53) \quad (5.23)$$



Rys. 5.12. Krzywe zależności wytrzymałości f_g zaczynów gipsowych w funkcji narastania W/G : a) krzywe wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} = f(W/G)$, b) krzywe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{gtb} = f(W/G)$, c) krzywe zmian parametru $\alpha_1 = f(W/G)$, d) krzywe zmian parametru $\alpha_2 = f(W/G)$, e) krzywe zmian parametru $\alpha_3 = f(W/G)$, f) krzywe zmian parametru

Fig. 5.12. Curve of relation of gypsum paste strength f_g in the function of growing W/G : a) compressive strength curves $f_{gc} = f(W/G)$, b) curves of bending tensile strength $f_{gtb} = f(W/G)$, c) parameter change curves $\alpha_1 = f(W/G)$, d) parameter change curves $\alpha_2 = f(W/G)$, e) parameter change curves $\alpha_3 = f(W/G)$, f) parameter change curves $\alpha_4 = f(W/G)$



Rys. 5.13. Graficzne przedstawienie zmian wytrzymałości f_{gc} i f_{gtb} stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym oraz wytrzymałości normatywnych $f_{gc,2h}$ i $f_{gtb,2h}$ w funkcji wskaźnika $\omega' = G/W$: a) w zakresie wytrzymałości na ściskanie, b) w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Fig. 5.13. Graphic representation of strength changes of f_{gc} and f_{gtb} of hardened gypsum paste in dry state, and standard strengths $f_{gc,2h}$ and $f_{gtb,2h}$ in the function of coefficient $\omega' = G/W$: a) regarding compressive strength, b) regarding bending tensile strength

Zespół dogodnych zależności (5.20) ÷ (5.23) pozwala na obliczenie dowolnych relacji między czterema analizowanymi wytrzymałościami. Poszczególne punkty pomiarowe stanowią średnią z 30 próbek. Są to więc zależności podające wiarygodne relacje między poszczególnymi wytrzymałościami. Uzyskane zależności dotyczą jednak jednej losowej próby dostaw rynkowych gipsu, z którego wykonano wieloseryjne zbiory beleczek 4x4x16 cm dla każdego W/G. W rozdziałach dalszych określone zostaną zależności pomiędzy wytrzymałościami zaczynów gipsowych w różnych stanach naprężeń w układach podwójnie statystycznych: wieloliczne serie próbek dla szerokiego zakresu W/G, wykonane dla wielu rynkowych dostaw.

5.7. Propozycje klas wytrzymałości gipsu budowlanego

Wprowadzone w latach 1987–1989 marki gipsu w bloku polskich norm dla gipsu: autklawizowanego [373], ceramicznego [372], budowlanego [370] i górniczego [374] oraz dodatkowo w 1997 r. dla gipsu budowlanego [423] powinny ulec zmianie jako sformułowania nieprecyzyjne. Symbol liczbowy marki gipsu budowlanego (np. marki

GB-3) nie odpowiada ani wartości wytrzymałości średniej $\bar{f}_{gc,2h}$, ani wytrzymałości gwarantowanej $f_{gc,2h}^g$ z określonym prawdopodobieństwem. W istocie sformułowanie w normie o wytrzymałości „nie mniej niż” (patrz tab. Z-4, Z-5) jest jednoznaczne z warunkiem jak poniżej:

$$f_{i,\min} \geq f_{2h,n} \quad (5.24)$$

gdzie: $f_{i,\min}$ – najmniejszy losowy wynik w populacji danych, teoretycznie z nieograniczonego okresu;

$f_{2h,n}$ – nominal liczbowy marki gipsu.

Według powyższego kryterium produkowane w 1986 i w 1987 r. gipsy budowlane, zarówno z pieców obrotowych, jak i z prażarek, nie odpowiadają nawet najniższej z wymienionych marek GB-3 (patrz tab. 5.11), a gips PO z 1986 r. nie spełnia nawet wymagań marki GB-2, czyli były to produkty poza marką.

Losowo najniższy wynik $f_{i,\min}$ nie może być podstawą klasyfikacji wytrzymałościowej spoiwa. Podobny anachronizm występuje także w grupie spoiw cementowych w zakresie „in plus”. Przykładowo cement portlandzki CEM I 32,5 R charakteryzujący się wytrzymałością średnią $\bar{f}_c = 46,2\text{MPa}$, przy przyjęciu współczynnika zmienności wytrzymałości $v = 7,5\%$ (na podstawie prac autorów: Karyś, Zachara [117], Kurdowski, Błach [160], Zachara z zespołem [360]), mógłby być zakwalifikowany do klasy cementu C_c równej:

$$C_c = f_c^g = \bar{f}_c(1 - 1,64v_c) = 46,2(1 - 1,64 \cdot 0,075) = 40,5\text{MPa}$$

Marki gipsu występują w normach zagranicznych (między innymi: GOST [385], NF [386], ukraińska DSTY [449]). W normach europejskich klasy wytrzymałościowe wprowadzono dla spoiw anhydrytowych (EN 13454-1 [447]), przeznaczonych na podkłady podłogowe EN 13813 i polski przedruk PN-EN 13813 [450]. Inne uwarunkowania materiałowe i brak uwzględnienia kluczowego problemu: wpływu wilgoci na degradację właściwości materiału sprawia, że zaproponowana metodyka dla spoiw anhydrytowych nie może znaleźć zastosowania do klasyfikacji stwardniałych spoiw, zaczynów i betonów z gipsu budowlanego.

W odniesieniu do spoiw gipsowych autor proponuje następujący tok postępowania przy ustalaniu klas wytrzymałościowych spoiwa:

- a) jako wytrzymałość normatywną – do ustalenia dolnego nominalu klasy gipsu w stanie wilgotnym – zachowuje się normowe oznaczenie wytrzymałości na ściskanie $f_{gc,2h}$;
- b) wykorzystuje się równoległe – jako ważne oznaczenie – wytrzymałość na zginanie $f_{gtb,2h}$, jako testu o mniejszym rozrzucie badań laboratoryjnych u producenta; mniejsze współczynniki zmienności wytrzymałości przy zginaniu niż przy ściskaniu próbek normatywnych, dokumentują także szczegółowe badania własne w p. 10.2 i 10.3;
- c) przyjmuje się na obecnym etapie rozważania obliczeniowy rozrzut wytrzymałości na zginanie zaczynów normowych – w badaniach wykonanych u producenta z produkowanego na bieżąco gipsu – w wysokości $v_{tb} = 9,1\%$ dla gipsów z pieców

- obrotowych (PO), $v_{tb} = 5,5\%$ dla gipsów z prążarek (PK) i $v_{tb} = 8,4\%$ dla gipsów z pieców POP;
- d) porównawcze wartości współczynników zmienności wytrzymałości na ściskanie (w trybie normowych oznaczeń u producenta na półbeleczkach) przyjmuje się – na obecnym etapie rozpoznania statystycznego – w wysokości: $v_c = 12\%$ dla gipsów PO, $v_c = 14\%$ dla gipsów PK i $v_c = 10,3\%$ dla gipsów z pieców POP;
- e) rozdzwięk wartości współczynników zmienności v_c i v_{tb} dla trzech serii badań gipsów PO, PK i POP uzasadnia przyjęcie testu zginania jako dokładniejszego kryterium kwalifikacji spoiw gipsowych do określonych klas;
- f) wprowadza się dodatkowy wymóg całkowitej stabilizacji anhydrytu III w próbkach gipsu pobieranych do badań wytrzymałościowych, dotyczy to głównie gipsów z pieców obrotowych;
- g) w miejsce aktualnych marek gipsów budowlanych GB-3 i GB-4 wprowadza się klasy gipsu G-2,5, G-3, G-3,5 i G-4; nominały liczbowe odpowiadają wytrzymałości gwarantowanej na ściskanie $f_{gc,2h}^G$;
- h) na podstawie zależności (5.7) dla poszczególnych klas obliczono wartości oczekiwanych (wymaganych) średnich wytrzymałości na ściskanie $\bar{f}_{gc,2h}$, a także odpowiadające im wartości średnich wytrzymałości w stanie suchym \bar{f}_{gc} , obliczone na podstawie uzyskanych doświadczalnie zależności (5.18) i (5.19);
- i) dla wartości średnich wytrzymałości na ściskanie w stanie suchym \bar{f}_{gc} – obliczono odpowiadające wytrzymałości gwarantowane na ściskanie f_{gc}^G ;
- j) w kolejności dalszej ustalono analogicznie jak dla ściskania wymagane wartości wytrzymałości na zginanie, a tok postępowania ujmuje punkt k;
- przeliczenia założonych wyjściowo wytrzymałości gwarantowanych na ściskanie, odpowiadających klasie spoiwa (wiersz 2, tab. 5.11.), jako wielkości statystycznych – na inne wielkości statystyczne dla testów zginania – przeprowadzono przy następujących założeniach upraszczających:
 - w przypadku jednakowych wartości współczynników zmienności v_c i v_{tb} , dla rozkładów wytrzymałości ściskania i zginania w układzie współrzędnych $f = \Phi(t)$ jak na rysunku 5.11, losowe wytrzymałości średnie \bar{f}_{gc} i \bar{f}_{gtb} , wyznaczone z obu rozkładów, są identyczne z wartościami obliczonymi z zależności analitycznych (5.21) i (5.23), czyli odpowiadają parze wytrzymałości dla określonego zaczynu o danym $\omega_1 = W/G$, określonym odpowiednio z krzywych $f_{gc} = f(\omega)$ lub $f_{gtb} = f(\omega)$ jak na rysunku 5.13;
 - wobec faktu, że stosunek wytrzymałości gwarantowanej f^G do wytrzymałości średniej \bar{f} według wyrażenia:

$$\frac{f^G}{\bar{f}} = 1 - 1,65v \quad (5.25)$$

i jest stały dla serii rozkładu normalnego wytrzymałości ściskania i zginania, jak poniżej:

$$\frac{f_{gc}^G}{f_{gc}} = \frac{f_{gtb}^G}{f_{gtb}} = 1 - 1,65v, \text{ gdy założymy } v_c = v_b \quad (5.26)$$

także zdarzenia losowe $f_{gc,2h}^G$ i $f_{gtb,2h}^G$ zachodzą synchronicznie i odpowiadają skorelowanym wytrzymałościom dla określonego zaczynu o wskaźniku ω_2 , który można odczytać z krzywych $f = f(\omega)$ na rysunku 5.13;

- w przypadku $v_c \neq v_b$, czyli różnych charakterystyk rozkładu wytrzymałości w testach ściskania i zginania, przyjmuje się tok obliczeń z wykorzystaniem zależności (5.7), (5.25), oraz zależności (5.18) – (5.23), a rezultaty obliczeń wytrzymałości odpowiadających założonym klasom podano w tabeli 5.12.

Tabela 5.12
Table 5.12

Propozycje klas wytrzymałościowych gipsu budowlanego i wymagania towarzyszące
Proposal of strength classes of building gypsum and accompanying requirements

Lp. No	Cecha wytrzymałości Strength property	Jed- no- stka Unit	Marki gipsu (dotychczasowe) Gypsum brands (presently)		Klasy spoiwa gipsu budow- lanego Classes of gypsum building binder			
			GB-3	GB-4	G- 2,5/9	G- 3/11	G- 3,5/13	G- 4/15
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Wytrzymałość nie mniejsza niż f_{imin} Strength not less than f_{imin}	MPa	3	4				
2.	Wytrzymałość gwarantowana na ściskanie $f_{gc,2h}^G$ Guaranteed compressive strength $f_{gc,2h}^G$	MPa			2,5	3	3,5	4
3.1.	Wytrzymałość średnia statystyczna $\bar{f}_{gc,2h}$ wg (5.7) Statistical mean strength $\bar{f}_{gc,2h}$ according to (5.7):							
	• gips z prażarek (PK) $v_c=14\%$ gypsum from roasters (PK) $v_c=14\%$	MPa			3,25	3,90	4,55	5,20
	• gips z pieców obrotowych (PO) $v_c=12\%$ gypsum from rotary furnaces (PO) $v_c=12\%$	MPa			3,10	3,74	4,36	5,00
	• gips z pieców obrotowych (POP) $v_c=10,3\%$ gypsum from indirect rotary furnaces (POP) $v_c=10,3\%$	MPa			3,01	3,61	4,21	4,82

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.2.	<p>Odpowiadające wartości w stanie wysuszonym</p> <p>\bar{f}_{gc} wg (5.18, 5.20 i 5.21)</p> <p>Adequate values in dry state \bar{f}_{gc} according to (5.18, 5.20 and 5.21)</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PK <p>PK gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PO <p>PO gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy POP <p>POP gypsum</p>	MPa			9,0	11,0	13,0	15,0
		MPa			8,56	10,55	12,47	14,46
		MPa			8,28	10,14	12,00	13,90
3.3.	<p>Wytrzymałość gwarantowana na ściskanie w stanie suchym f_{gc}^G wg (5.7) ($v_c=9,76\%$, (rys. 9.4)$v_{tb}=9,3\%$ (tab. 7.1)), przyjęto $v_c=v_{tb}=10\%$</p> <p>Guaranteed compressive strength in dry state f_{gc}^G according to (5.7) ($v_c=9,76\%$, (rys. 9.4)$v_{tb}=9,3\%$ (tab. 7.1)), established $v_c=v_{tb}=10\%$</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PK <p>PK gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PO <p>PO gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy POP <p>POP gypsum</p>	MPa			7,52	9,20	10,87	12,54
		MPa			7,14	8,80	10,41	12,07
		MPa			6,91	8,46	10,00	11,60
4.1.	<p>Wytrzymałość średnia na zginanie</p> <p>$\bar{f}_{gtb,2h} = f(\bar{f}_{gc,2h})$</p> <p>według (5.20) i (5.22)</p> <p>Mean flexural strength $\bar{f}_{gtb,2h} = f(\bar{f}_{gc,2h})$ according to (5.20) i (5.22)</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PK <p>PK gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy PO <p>PO gypsum</p> <ul style="list-style-type: none"> • gipsy POP <p>POP gypsum</p>	MPa			1,45	1,79	2,13	2,47
		MPa			1,37	1,70	2,03	2,37
		MPa			1,32	1,64	1,95	2,27

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.2.	<p>Wytrzymałość gwarantowana na zginanie $f_{gtb,2h}^G$, odpowiadająca wartości $f_{gc,2h}^G$, wg (5.7)</p> <p>Guaranteed flexural strength $f_{gtb,2h}^G$, adequate to $f_{gc,2h}^G$, according to (5.7)</p> <ul style="list-style-type: none"> gipsy PK ($v_{gt}=5,5\%$, tab. 5.10, przyjęto $v_{gt}=6\%$) PK gypsum ($v_{gt}=5,5\%$, tab. 5.10, established $v_{gt}=6\%$) gipsy PO ($v_{gt}=9,1\%$, tab. 5.10, przyjęto $v_{gt}=10\%$) PO gypsum ($v_{gt}=9,1\%$, tab. 5.10, established $v_{gt}=10\%$) gipsy POP ($v_{gt}=8,42\%$, tab. 5.11, przyjęto $v_{gt}=9\%$) POP gypsum ($v_{gt}=8,42\%$, tab. 5.11, established $v_{gt}=9\%$) 	MPa			1,30	1,61	1,91	2,23
		MPa			1,14	1,42	1,70	1,98
		MPa			1,12	1,40	1,65	1,93
4.3.	<p>Odpowiadająca wytrzymałość na zginanie w stanie suchym $\bar{f}_{gtb} = f(\bar{f}_{gtb,2h})$ według (5.22) i (5.23)</p> <p>Adequate flexural strength in dry state $\bar{f}_{gtb} = f(\bar{f}_{gtb,2h})$ according to (5.22) i (5.23)</p> <ul style="list-style-type: none"> gipsy PK PK gypsum gipsy PO PO gypsum gipsy POP POP gypsum 	MPa			3,60	4,38	5,16	5,94
		MPa			3,41	4,17	4,93	5,71
		MPa			3,30	4,03	4,75	5,48
4.4.	<p>Wytrzymałość gwarantowana na zginanie w stanie suchym według (5.7)</p> <p>Guaranteed flexural strength in dry state according to (5.7)</p> <ul style="list-style-type: none"> gipsy PK ($v_{tb}=10\%$) PK gypsum ($v_{tb}=10\%$) gipsy PO ($v_{tb}=10\%$, tab. 7.1) PO gypsum ($v_{tb}=10\%$, tab. 7.1) gipsy POP ($v_{tb}=13\%$, tab. 13.2) POP gypsum ($v_{tb}=13\%$, tab. 13.2) 	MPa			3,00	3,65	4,30	4,96
		MPa			2,84	3,48	4,11	4,76
		MPa			2,60	3,16	3,72	4,30

6. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI POSZCZEGÓLNYCH FRAKCJI GIPSU BUDOWLANEGO

6.1. Przedmiot i cel badań

Przedmiotem badań jest gips budowlany jako podstawowe spoiwo gipsowe uzyskane w procesie prażenia i rozdrabniania surowców naturalnych.

Wykonane przez autora badania właściwości poszczególnych frakcji gipsu budowlanego, rozsianego na frakcje składowe f_1 - f_8 (tab. 6.1), miały następujące cele poznawcze:

- rozpoznanie zróżnicowania gęstości pozornej ziaren gipsu ρ_p i powierzchni właściwej A_g poszczególnych frakcji gipsu budowlanego,
- rozpoznanie zróżnicowania szybkości wiązania poszczególnych frakcji składowych gipsu,
- rozpoznanie stopnia hydratacji oraz wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie gipsu poszczególnych frakcji.

Rezultaty wykonanych badań dostarczają informacji, umożliwiających sformułowanie odpowiedzi na dwa poniższe pytania:

- Bezpośrednio: jakie jest zróżnicowanie właściwości poszczególnych frakcji składowych, przy relatywnie jednorodnym składzie chemicznym i mineralnym surowców naturalnych, w rozpoznanych warunkach produkcji w eksploatowanych złóż w dolinie rzeki Nidy?
- Pośrednio: jaki jest wpływ rozdrobnienia minerałów wyprażonego surowca na właściwości spoiwa gipsowego?

Do badań użyto gipsu z surowców naturalnych z pieców obrotowych PO, z losowej dostawy rynkowej, oznakowanego numerem 2-03b. Szczegółowo określone właściwości tego spoiwa w zakresie: składu chemicznego i mineralnego (tab. 5.4) oraz uziarnienia (rys. 5.4 i 5.5) wskazują, że spoiwo to można uznać za reprezentatywne, o składowych cechach zbliżonych do badanego zbioru losowych prób gipsu budowlanego GB-N1, jak podano w tabeli 5.4.

6.2. Gęstość pozorna i powierzchnia właściwa frakcji składowych gipsu budowlanego

Gęstość pozorna ρ_p gipsu w poszczególnych frakcjach f_1 - f_8 (tab. 6.1) wahała się w zakresie wartości: od $\rho_{p1} = 2,703 \text{ g/cm}^3$ dla frakcji f_1 (0–4 mm) do wartości $\rho_{p7} = 2,381 \text{ g/cm}^3$ dla frakcji f_7 (1–2 mm). Gęstość pozorna gipsu nierozsianego wynosi $\rho_p = 2,653 \text{ g/cm}^3$ i była zgodna z gęstością pozorną „ważoną” $\bar{\rho}_p = 2,654 \text{ g/cm}^3$, obliczoną analitycznie według zależności:

$$\bar{\rho}_p = \frac{\sum p_i \cdot \rho_{pi}}{100} \quad (6.1)$$

gdzie:

p_i , ρ_{pi} – zawartość procentowa frakcji składowych i gęstości pozorne poszczególnych frakcji gipsu.

Tabela 6.1

Table 6.1

Zestawienie gęstości poszczególnych frakcji ρ_{pi} i powierzchni właściwej A_{gi} dla poszczególnych frakcji gipsu budowlanego GB-N1

Comparison of densities of particular fractions ρ_{pi} and specific surface A_{gi} for particular fractions of GB-N1 building plaster

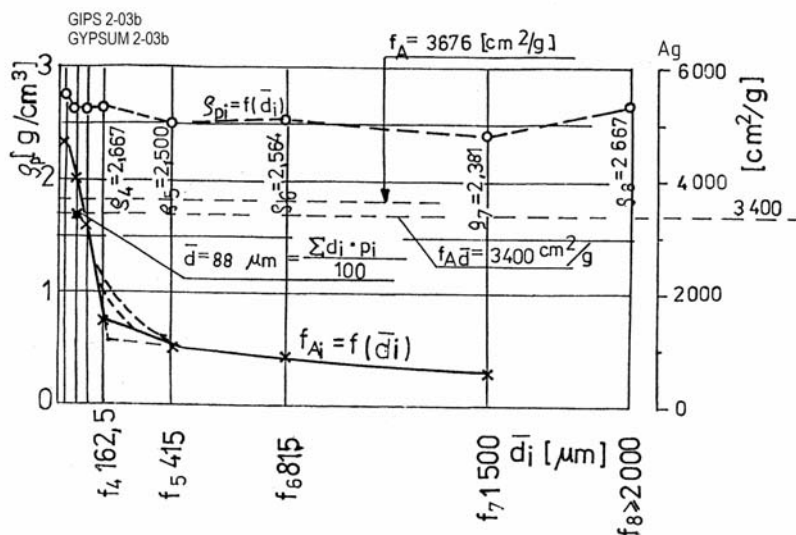
Lp. No	Frakcja Fraction	Zakres uziarnienia $d_i:d_{i+1}$ Graining range $d_i:d_{i+1}$	Zawartość frakcji p_i % Content of p_i fraction %	Gęstość frakcji ρ_{pi} g/cm^3 Fraction density ρ_{pi} g/cm^3	Gęstość „ważona” “Weighed” density $\frac{\rho_{pi}p_i}{100}$ g/cm^3	Powierzchnia właściwa A_{gi} cm^2/g Specific surface A_{gi} cm^2/g	Powierzchnia cząstkowa Particle surface $\frac{A_{gi}p_i}{100}$ cm^2/g
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	f_1	0-0,04	44,21	2,703	1,948	4640	2051
2.	f_2	0,04-0,08	38,48	2,632	1,0126	4166	1603
3.	f_3	0,08-0,125	5,26	2,632	0,1384	3116	164
4.	f_4	0,125-0,2	4,34	2,667	0,1157	1523	66
5.	f_5	0,2-0,63	5,72	2,500	0,1430	1021	58
6.	f_6	0,63-1	1,53	2,564	0,0392	852	13
7.	f_7	1-2	0,43	2,381	0,0102	634	3
8.	f_8	2-4	0,03	2,667	0,00004	15	–
9.	f_1 - f_8	0-4		2,653	2,6542	3676	3958

Oznaczone wartości gęstości pozornej gipsu są dostatecznie zbliżone do wartości gęstości $\rho = 2,63 \text{ g/cm}^3$, podawanych w literaturze dla czystego półhydratu (Skalmowski [305], Wichter [346]). Nieznacznie wyższy wynik oznaczonej przez autora gęstości średniej gipsu $\rho_{1-8} = 2,653 \text{ g/cm}^3$ wynikać może z faktu częściowej zawartości w każdym

spoiwie minerałów relatywnie cięższych: 1,78% stabilizowanego anhydrytu II i 0,26% anhydrytu II (tab. 5.3) o gęstościach $\rho_p = 2,93\text{--}2,97 \text{ g/cm}^3$.

Gęstość pozorna frakcji f_2 i f_3 badanego gipsu wynosiła dokładnie $\rho_{pi} = 2,63 \text{ g/cm}^3$. Mniejsze gęstości gipsu frakcji grubych $f_5\text{--}f_7$ wynikają z faktu, że ziarna te stanowią aglomeraty kryształów z pustkami międzykrystalicznymi. Najwyższe gęstości uzyskano dla frakcji składowych f_1 i f_8 . Ziarna frakcji f_8 (2–4 mm) stanowią najbardziej zwartą grupę minerałów, o największej gęstości. Właśnie ziarna o najwyższych wytrzymałościach na rozłupywanie „lokują” się w strefie frakcji najgrubszych. We frakcji najdrobniejszej f_1 (0–0,04 mm) na uzyskane wyniki oznaczenia gęstości wpływ mają minerały nieaktywne i zanieczyszczenia.

Ilustrację graficzną zależności gęstości pozornej ρ_{pi} badanego spoiwa gipsowego, od średniej średnicy ziaren d_i , dla poszczególnych frakcji, w postaci krzywej $\rho_i = f(\bar{d}_i)$, podano na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Gęstość pozorna ρ_p i powierzchnia właściwa A_{gi} poszczególnych frakcji gipsu budowlanego GB-N1, z surowców naturalnych

Fig. 6.1. Apparent density ρ_p and specific surface A_{gi} of particular fractions of GB-N1 natural building plaster

Powierzchnia właściwa dla badanego gipsu próby losowej 2–03b, oznaczona todą Blaine'a, wynosiła $A_g = 3676 \text{ cm}^2/\text{g}$. Metoda Blaine'a nie jest dobrą metodą do oceny powierzchni właściwej gipsu, z uwagi na porowatość ziaren w formie aglomeratów kryształów i nie daje ona właściwych wyników powierzchni zespołu ziaren w spoiwie gipsowym (Michalska [203]). Wykonane poniżej badania powierzchni właściwej należy

traktować jak oznaczenia relacji względnych między powierzchnią właściwą frakcji składowych tego samego spoiwa, w konkretnej próbie losowej. Powierzchnia właściwa dla kolejnych frakcji gipsu f_1 - f_8 , wahała się w zakresie wartości: od $A_{g1} = 4640 \text{ cm}^2/\text{g}$ dla frakcji najdrobniejszej f_1 do wartości $A_{g7} = 634 \text{ cm}^2/\text{g}$ dla frakcji f_7 . Dla frakcji f_8 (2–4 mm) powierzchnię właściwą A_g wyznaczono analitycznie w oparciu o zależność (6.2), na podstawie literatury problemu dotyczącej uziarnienia spoiw (Kuczyński [31]):

$$A = \frac{\alpha}{100\rho} \sum \frac{p_i}{d_i} \quad (6.2)$$

gdzie:

p_i – procentowe zawartości masy ziaren o średnim wymiarze d_i ,

ρ – gęstość minerału

α – współczynnik kształtu ziaren, dla kul $\alpha = 2,26$, dla kruszywa łamanego $\alpha = 12$.

Przyjmując parametry $\rho = 2,63 \text{ g/cm}^3$ i $\alpha = 12$, obliczono powierzchnię właściwą dla frakcji f_8 gipsu budowlanego równą $15 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Krzywa zależności powierzchni właściwej frakcji składowych gipsu A_{gi} od wymiaru średniego ziaren d_i , stanowi zależność $A_{gi} = f(\bar{d}_i)$, jak na rysunku 6.1, którą można zakwalifikować do zależności hiperbolicznych typu $y = ax^{-b}$ lub eksponencjalnych typu

$y = ae^{-bx}$. Na podstawie obliczeń statystycznych, uzyskaną doświadczalnie krzywą $A_{gi} = f(\bar{d}_i)$ jak na rysunku 6.1, lepiej opisuje zależność typu eksponencjalnego, w postaci relacji (rys. 6.3):

$$A_{gi} = 3555,7e^{-1,715\bar{d}_i} \quad (6.3)$$

ze współczynnikiem korelacji $R = 0,966$, gdzie:

A_{gi} – powierzchnia właściwa i-tej frakcji gipsu,

d_i – średni wymiar ziaren gipsu w danej frakcji.

Średnia ważona powierzchnia właściwa, obliczona jako suma powierzchni cząstkowych składowych frakcji, według zależności:

$$\bar{A}_g = \frac{\sum A_{gi} p_i}{100} \text{ cm}^2/\text{g} \quad (6.4)$$

dla badanej próby gipsu nr 2-03b wynosi $\bar{A}_g = 3958 \text{ cm}^2/\text{g}$ (tab. 6.1, kol. 8) i niewiele odbiega od wartości powierzchni nominalnej $A_g = 3676 \text{ cm}^2/\text{g}$, oznaczonej laboratoryjnie metodą Blaine'a dla badanej próby gipsu nierozsianego. Stosunek obu oznaczonych wartości wynosi:

$$\gamma = \frac{A_g}{\bar{A}_g} = \frac{3676}{3958} = 0,928 \quad (6.5)$$

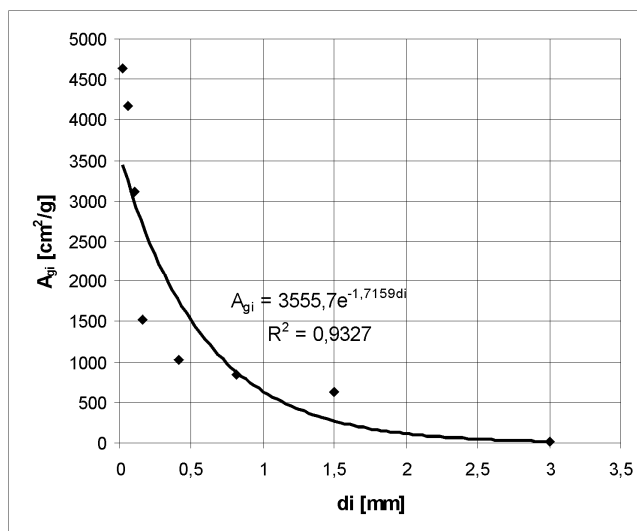
Bazując na powyższej zgodności wyników, autor stawia propozycję analitycznego sposobu określenia powierzchni właściwej gipsu na podstawie znajomości tylko zawartości frakcji składowych p_i , w oparciu o zależność:

$$A_g = \frac{\gamma}{100} \sum A_{gi} p_i \quad (6.6)$$

gdzie:

A_{gi} – powierzchnie właściwe frakcji składowych f_1 - f_8 ,

p_i – procentowa zawartość frakcji f_1 - f_8



Rys. 6.2. Aproxymacja zależności między powierzchnią właściwą A_{gi} poszczególnych frakcji gipsu a średnią średnicą ziaren d_i dla danej frakcji

Fig. 6.2. Approximation of relation between specific surface A_{gi} of particular gypsum fractions, with mean grain diameter d_i for given fraction

Autor zbadał powierzchnie właściwe różnych losowych dostaw gipsu budowlanego, wykonując równocześnie pomiary laboratoryjne metodą Blaine'a i metodą ną według zależności (6.6), wykorzystując tylko dane analizy sitowej. Różnice nywanych wartości nie przekraczają 7%, co jest wynikiem technicznie zadowalającym (Klin [129]). Należy zaznaczyć, że metoda Blaine'a – bazująca na oporach przepływu powietrza przez próbę ubitego spoiwa – ma wiele niedoskonałości w zakresie wiarygodności wyników (Ostrowski [256]), szczególnie w odniesieniu do gipsu (Michalska [203]), a metodycznie jest metodą wymagającą specjalistycznego sprzętu i jest czasochłonna. Z tych względów określanie powierzchni właściwej spoiw na podstawie danych z krzywej przesiewu jest tańszą metodą postępowania w tym zakresie; tym bardziej że

istnieje dodatkowa możliwość ograniczenia ilości sit do przesiewu gipsu, jako że o wartości powierzchni właściwej w głównej mierze decydują frakcje dolne. Dla spoiw cementowych Anselm i Wagner (cytowani w pracy [31]) opracowali wręcz nomogramy zależności powierzchni właściwej cementu A_c od pozostałości tylko na jednym sicie 90 μm . Z analizy danych przesiewu spoiwa gipsowego, podanych w tabeli 6.1 wynika, że największe znaczenie mają dwa sita dolne, ograniczające frakcje f_1 i f_2 , gdyż ponad 80% masy badanego gipsu to ziarna drobne poniżej 0,08 mm. Praktyczne propozycje określania powierzchni właściwej gipsu na podstawie pozostałości na sitach dolnych podał autor w pracy [129].

Występujące w aktach normatywnych wymogi dotyczące uziarnienia gipsu (tabl. Z-1), ustalane na podstawie oznaczeń pozostałości na wytypowanym sicie 0,2 mm, nie odzwierciedlają precyzyjnie uziarnienia spoiw gipsowych, gdyż ich powierzchnia właściwa kształtowana jest głównie w zakresie frakcji nadrobniejszych.

Spoiwa gipsowe powinny mieć charakteryzowane uziarnienie przez powierzchnię właściwą. Zaproponowana w pracy metoda określania powierzchni właściwej dla gipsu budowlanego, na podstawie danych z krzywych przesiewu według zależności (6.6), może być praktycznie wykorzystywana do ustalania charakterystyki rozdrobnienia spoiw gipsowych, przynajmniej do względnych pomiarów porównawczych jednorodności spoiw gipsowych w tym aspekcie.

6.3. Stopień hydratacji i wytrzymałość zaczynów z poszczególnych frakcji rozsegregowanego gipsu budowlanego

Stopień hydratacji nierozsegregowanego gipsu budowlanego próby nr 2-03b, czyli stopień hydratacji łącznie frakcji f_1 - f_8 w badanym gipsie, wynosił $h_{1-8} = 83,2\%$. Rozsiane frakcje składowe cechują się, jak podano na rysunku 6.3: zróżnicowanym stopniem hydratacji, od wartości $h_3 = 87,3\%$ dla frakcji f_3 , do wartości $h_7 = 43,85\%$ dla frakcji f_7 . Oznaczenia stopnia hydratacji dla frakcji f_8 nie wykonywano, z uwagi na jej szczątkową zawartość parcjalaną tylko 0,03%.

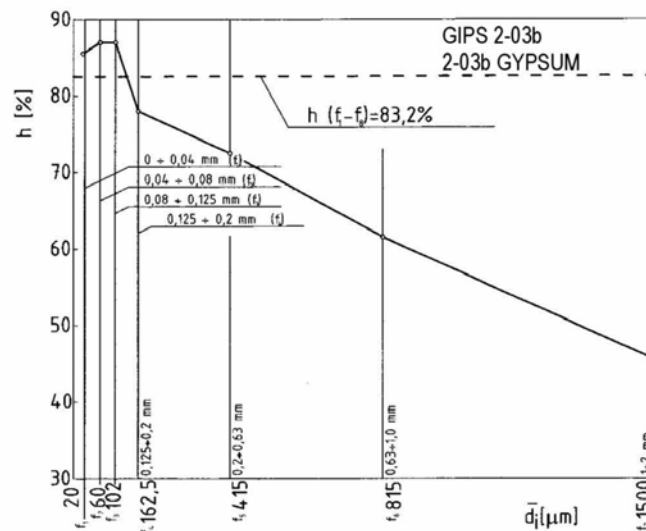
Średnio ważony stopień hydratacji gipsu budowlanego, oznaczony z zależności:

$$\bar{h}_g = \sum h_i p_i \quad (6.7)$$

wynosi $\bar{h}_g = 83,93\%$ i niewiele odbiega od wartości stopnia hydratacji $h_{1-8} = 83,2\%$ wyznaczonej laboratoryjnie dla nierozsianej próby gipsu w całości. Różnica oznaczeń, wynosząca 0,73%, stanowi nieduży błąd oznaczeń. Oznacza to, że wyznaczone w tab. 6.2 w kol. 5 parcjalne stopnie hydratacji h_i frakcji składowych mogą być przyjęte jako wartości wiarygodne do dalszych analiz problemu; na przykład do oznaczenia stopnia hydratacji gipsu budowlanego, w przypadku gdyby technologicznie odsiano (odrzucono) frakcje grubsze, uzyskując „dolne” kompozycje ziarnowe dla gipsu szpachlowego.

Stopień hydratacji poszczególnych frakcji rozsianego gipsu budowlanego GB-N1
Hydration degree of particular fractions of fractioned GB-N1 building plaster

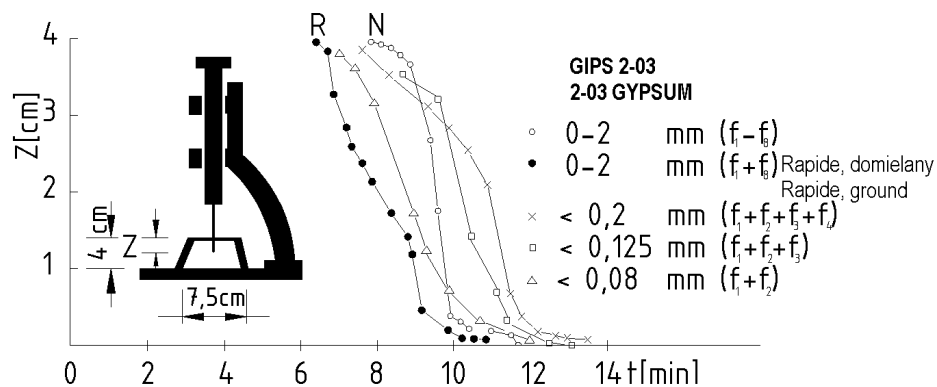
Lp. No	Nr frakcji f_i Fraction No f_i	Wymiary ziaren d_i-d_{i+1} mm Grain dimensions d_i-d_{i+1} mm	Zawartość frakcji p_i % Fraction content p_i %	Stopień hydratacji h_i Hydration degree h_i	$h_i \times p_i$
1	2	3	4	5	6
1.	f_1	0-0,04	44,21	0,8423	37,24
2.	f_2	0,04-0,08	38,48	0,8679	33,40
3.	f_3	0,08-0,125	5,26	0,8738	4,60
4.	f_4	0,125-0,2	4,34	0,7727	3,35
5.	f_5	0,2-0,63	5,72	0,7358	4,21
6.	f_6	0,63-1,0	1,53	0,6165	0,94
7.	f_7	1,0-2,0	0,43	0,4385	0,19
8.	f_8	2,0-4,0	0,03	–	–
9.	f_1-f_8	0-4	100		83,93



Rys. 6.3. Stopień hydratacji h frakcji składowych rozsegregowanego gipsu budowlanego:
 \bar{d}_i – średni wymiar ziaren

Fig. 6.3. Hydration degree of constituent fractions of segregated building plaster: \bar{d}_i – mean grain dimension

Interesujące są rezultaty badań szybkości wiązania gipsu budowlanego, z kolejno odrzucanymi frakcjami „górnymi”, jak podano na rysunku 6.4. Gips budowlany o uziarnieniu $d < 0,08$ mm, czyli złożony tylko z dwóch głównych frakcji $f_1 + f_2$ (jak podano w tab. 6.1), cechuje się wcześniejszym początkiem wiązania od gipsu o normalnie pełnym składzie ziarnowym. Ma na to wpływ większa szybkość rozpuszczania bardziej rozdrobnionego gipsu i szybsze procesy krystalizacji z przesyconych roztworów. Jednak koniec wiązania zaczynów z gipsu złożonego tylko z dwóch frakcji dolnych f_1-f_2 jest w przybliżeniu taki sam jak gipsu o pełnym składzie frakcji składowych. Wiązanie gipsu o pełnym składzie jest prawie natychmiastowe, od zaistnienia początku wiązania (prawie pionowa krzywa zależności $z_c = f(t)$ na rys. 6.4.). Natomiast gipsy budowlane o uziarnieniu $d < 0,125$ mm ($f_1+f_2+f_3$) i gipsy o uziarnieniu $d < 0,2$ mm ($f_1+f_2+f_3+f_4$), czyli gipsy z odrzuconymi frakcjami górnymi, cechują się powolniejszą szybkością tężenia. Należy wnosić, że w warunkach powstania przesyconych roztworów gipsu półwodnego zarodki krystalizacji półwodzianu mogą być zlokalizowane na powierzchni ziaren grubszych, których obecność przyspiesza proces hydratacji.



Rys. 6.4. Szybkość wiązania gipsu budowlanego o różnym uziarnieniu: z – zagłębienie igły w aparacie Vicata, t – czas wiązania od chwili zarobienia zaczynu gipsowego, $f_1 - f_8$ frakcje rozszanego gipsu

Fig. 6.4. Setting rate of building plaster of different graining: z – needle caving in Vicat apparatus, t – setting time from the moment of gypsum slurry pasting, $f_1 - f_8$ fractions of fractioned gypsum

6.4. Gęstość pozorna i wytrzymałość stwardniałych zaczynów gipsowych o różnym uziarnieniu

Gęstość pozorna stwardniałych zaczynów gipsowych, wykonanych selektywnie (wyłącznie) z wydzielonych frakcji gipsu budowlanego f_1 - f_7 , wahała się w zakresie wartości od $\rho_{gp} = 1,177 \text{ g/cm}^3$ dla zaczynów z frakcji f_3 do wartości $\rho_{gp} = 1,240 \text{ g/cm}^3$ dla zaczynów z frakcji f_7 (tab. 6.4, rys. 6.5a). Zależność gęstości pozornej od średniej średnicy ziaren $\rho_{gp} = f(\bar{d}_i)$ ma charakter krzywoliniowy, z ekstremum dolnym dla frakcji f_3 i z ekstremum górnym dla frakcji f_7 (rys. 6.5a). Z porównania jak wyżej: gęstości pozornej

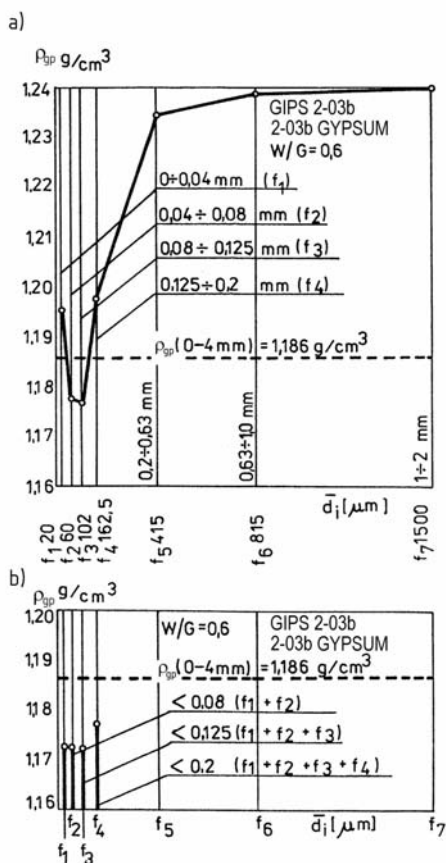
Tabela 6.3

Table 6.3

Gęstość pozorna i wytrzymałość zaczynów z gipsu budowlanego o stosunku W/G = 0,6, uzyskanych z różnych frakcji f_1 - f_7 rozsianego spoiwa gipsowego GB-N1
Apparent density and strength of building plaster paste with W/G = 0,6 ratio, obtained from different f_1 - f_7 fractions of GB-N1 fractioned gypsum plaster

Lp. No	Frakcja gipsu f_i Gypsum fraction f_i	Uziarnienie gipsu d_i - d_{i+1} mm Gypsum grainning d_i - d_{i+1} mm	Gęstość pozorna spoiwa gipsowego ρ_{pi} g/cm ³ Apparent density of gypsum plaster ρ_{pi} g/cm ³	Gęstość pozorna stwardniałych zaczynów gipsowych ρ_{gp} g/cm ³ Apparent density of hardened gypsum paste ρ_{gp} g/cm ³	Wytrzymałość na walcach ϕ x h = 2,25 x 2,25 cm Roller strength ϕ x h = 2,25 x 2,25 cm		Porowatość stwardniałego zaczynu gipsowego Hardened gypsum paste porosity $p = \left(1 - \frac{\rho_{gp}}{\rho_{pi}}\right) \%$
					na ściskanie f_{gc} MPa Compressive strength f_{gc} MPa	na rozciąganie metodą brazylijską f_{gt} MPa Tensile strength by means of Brazilian method	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	f_1	0-0,04	2,703	1,195	18,04	1,82	55,78
2.	f_2	0,04-0,08	2,632	1,178	18,70	1,74	55,24
3.	f_3	0,08-0,125	2,632	1,177	15,71	1,72	55,28
4.	f_4	0,125-0,2	2,667	1,198	10,87	1,05	55,08
5.	f_5	0,2-0,63	2,500	1,235	6,37	0,64	50,60
6.	f_6	0,63-1	2,554	1,230	1,70	0,22	51,48
7.	f_7	1-2	2,381	1,240	0,61	0,12	47,92
8.	f_1+f_2	0-0,08	2,660	1,163	18,11	1,62	56,28
9.	$f_1+f_2+f_3$	0-0,125	2,667	1,163	18,98	1,46	56,39
10.	$f_1+f_2+f_3+f_4$	0-0,2	2,667	1,175	17,11	1,46	55,94
11.	f_1 - f_8	0-4	2,653	1,186	14,51	1,46	55,29

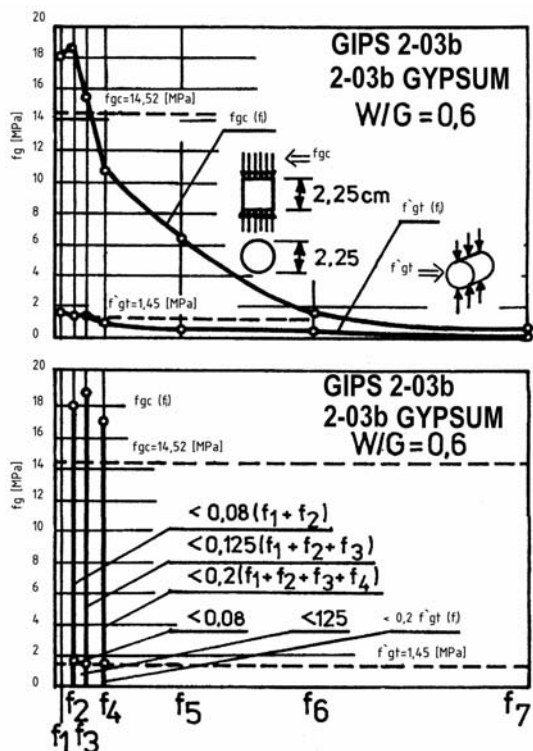
stwardniałych zaczynów gipsowych, z wartościami gęstości pozornej ziaren poszczególnych frakcji f_1 - f_8 spoiwa gipsowego, wynoszących $\rho_{pi} = 2,381$ - $2,703 \text{ g/cm}^3$ (tab. 6.1, rys. 6.1) oraz z wartością uśrednioną gęstości spoiwa gipsowego w całym zespole frakcji f_1 - f_8 wynoszącą $\rho_{p1-8} = 2,653 \text{ g/cm}^3$ – wynika oczywisty wniosek, że zaczyny gipsowe o relatywnie komfortowo plastycznej konsystencji w stanie świeżym, po związaniu cechują się zdecydowanie niższą gęstością od wyjściowej gęstości ziaren spoiwa przed zarobieniem wodą.



Rys. 6.5. Gęstość pozorna ρ_{gp} stwardniałych zaczynów gipsowych z różnych frakcji rozsianego gipsu budowlanego: a) zaczyny wykonane z pojedynczych frakcji f_i , b) zaczyny wykonane z zespołu „dolnych” frakcji, f_1 - f_7 – składowe frakcje rozsianego gipsu budowlanego, \bar{d}_i – średnia wartość średnicy ziaren spoiwa gipsowego w i-tej frakcji

Fig. 6.5. Apparent density ρ_{gp} of hardened gypsum paste of different fractions of fractioned building plaster: a) paste made from single fractions f_i , b) paste made from “lower” fraction set, f_1 - f_7 – constituent fractions of fractioned building plaster, \bar{d}_i – mean value of grain diameter of gypsum plaster in constituent fraction

Wytrzymałość na ściskanie f_{gc} zaczynów gipsowych, wykonywanych selektywnie z poszczególnych rozsianych frakcji gipsu budowlanego, zmniejsza się wraz ze wzrostem średniej średnicy ziaren \bar{d}_i . Zależność $f_{gc} = f(\bar{d}_i)$ na rysunku 6.6.a koreluje z podobną funkcją stopnia hydratacji $h_i = f(\bar{d}_i)$ dla tych samych zaczynów gipsowych. Na uwagę zasługuje fakt braku korelacji między gęstością pozorną tych samych zaczynów gipsowych $\rho_{gp} = f(\bar{d}_i)$ jak na rysunku 6.5a a wykresem zależności wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} = f(\bar{d}_i)$ jak na rysunku 6.6a.



Rys. 6.6. Wyniki badań wytrzymałości stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego o W/G = 0,6, wykonanych selektywnie z poszczególnych rozsianych frakcji gipsu budowlanego: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, f'_{gt} – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, $f_1 - f_7$ frakcje gipsu jak w tabeli 6.2

Fig. 6.6. Strength test results of hardened building plaster paste with W/G = 0,6, made selectively from particular separated fractions of building plaster: f_{gc} – compressive strength, f'_{gt} – tensile strength splitting, $f_1 - f_7$ gypsum fractions as in table 6.2

Przykładowo, zaczynają gipsowe wykonane jedynie z frakcji f_5 , f_6 czy f_7 cechują się relatywnie wysokimi gęstościami pozornymi (rys. 6.5b), a równocześnie najniższymi wytrzymałościami, sukcesywnie zmniejszającymi się wraz ze wzrostem średnicy ziaren selektywnej frakcji gipsu. Stwierdzony fakt należy tłumaczyć tym, że w przypadku ziaren grubych tworzy się mikrostruktura o większej gęstości ale o słabszych powiązaniach, co wpływa na obniżenie jej wytrzymałości.

Przedstawiony w rozdziale 6 cykl wykonanych badań i rozważań analitycznych jest interesujący dla celów poznawczych struktury i właściwości fizycznych kompozytów gipsowych. Do wykorzystania praktycznego są określone przez autora:

- porównawcze parcjalne powierzchnie właściwe frakcji składowych,
- parcjalne stopnie hydratacji poszczególnych frakcji.

W zakresie poszukiwań rezerw wytrzymałościowych w gipsie budowlanym interesujące są wyniki badań podane na rysunku 6.6. Wynika z nich, że odsianie frakcji grubszych powoduje istotny wzrost wytrzymałości. Największe wytrzymałości uzyskuje się dla spoiwa gipsowego złożonego z trzech frakcji dolnych $f_1+f_2+f_3$ (stanowiących łącznie 87,95% gipsu, czyli na odsiew należy przeznaczyć 12,05% masy wyprodukowanego spoiwa). Efektem tej operacji jest zwiększenie wytrzymałości gipsu z wartości $f_{gc} = 14,51$ MPa do wartości $f_{gc} = 18,98$ MPa, czyli wzrost wytrzymałości o 30,7%. Takie specjalne rozfrakcjonowanie spoiwa gipsowego, z odrzuceniem frakcji górnych, technologicznie łatwo można uzyskać przez zastosowanie cyklonów aerodynamicznych.

7. WPŁYW UZIARNIENIA SPOIWA GIPSOWEGO NA CECHY ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW ORAZ NA WŁAŚCIWOŚCI GIPSU DOJRZAŁEGO

W świetle rozważań dotyczących jednorodności uziarnienia spoiw gipsowych oraz w oparciu o analizy właściwości różnych frakcji gipsu budowlanego, czyli w istocie analiz właściwości spoiwa gipsowego o różnym uziarnieniu, podanych przez autora w p. 6 – wysuwa się na pierwszy plan złożone zagadnienie: wpływu uziarnienia spoiwa na cechy świeżego i stwardniałego zaczynu gipsowego. Problem ten był przedmiotem badań wielu badaczy (rozd. 2). W niniejszym rozdziale ograniczono się do podsumowania tego tematu, z własnymi wnioskami.

Zwiększenie powierzchni właściwej spoiwa gipsowego powoduje przyspieszenie reakcji hydratacji (badania własne, rys. 6.4), a równocześnie gips bardziej rozdrobniony wymaga więcej wody dla uzyskania tej samej konsystencji zaczynu (badania własne, rozdz. 8.2). Wzrost ilości wody przedłuża z kolei czas wiązania z powodu dłuższego okresu na osiągnięcie stanu przesylenia roztworu. Wzrost wskaźnika wodno-gipsowego W/G zwiększa także nadmiar wody w stosunku do ilości niezbędnej do hydratacji i wpływa na obniżenie wytrzymałości gipsu dojrzałego.

Badaniami wpływu stopnia zmielenia półhydratu gipsu na wytrzymałość zaczynów gipsowych zajmowało się wielu badaczy w ubiegłych latach. Akerman [2] przytacza zestawczo wyniki badań Jermakowa [103], Paniutyna [257], Kopelańskiego [143]. Uzyskano rozbieżne wyniki w zależności od tego, czy porównawcze zaroby wykonano przy zachowaniu $W/G = \text{const.}$, czy przy stałej konsystencji zaczynu.

Dla serii badań $W/G = \text{const.}$ uzyskano jednoznaczną zależność zwiększenia wytrzymałości gipsu wraz ze wzrostem jego rozdrobnienia. Próby spoiwa gipsowego o różnym rozdrobnieniu uzyskano poprzez oddzielenie drobniejszego gipsu, przesiewając go przez sito na przykład 0,15 mm; stosowano także sита 0,2 mm i 0,85 mm.

Wyniki badań autorów prac: Jermakow [103], Kopiałański [143], Paniutyn [257] znalazły potwierdzenie w późniejszych, dokładniejszych badaniach Fischera [65] dla gipsu półwodnego odmian α i β oraz w badaniach Lehmana z zespołem [170] dla gipsu sztukatorskiego. Z badań tych wynikają następujące wnioski:

- większe rozdrobnienie gipsu wpływa na przyspieszenie hydratacji i na wzrost wytrzymałości dojrzewającego gipsu, szczególnie w okresie pierwszych 30 min;

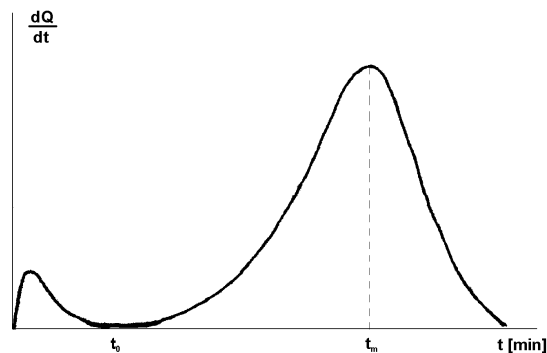
- w dalszym okresie dojrzewania wpływ rozdrobnienia gipsu (odmiany α i β) ma wyraźnie mniejszy wpływ na wytrzymałość na ściskanie normową po dwóch godzinach $f_{cg,2h}$ i wpływ ten jest tym mniejszy, im większy jest wskaźnik W/G;
- w zakresie zmian powierzchni właściwej zmielonego gipsu $A_B = 2600\text{--}6750 \text{ cm}^2/\text{g}$ dla gipsu α i zaczynów W/G = const. = 0,35–0,65 (według Fischera [65]) i w zakresie $A_B = 4000\text{--}12000 \text{ cm}^2/\text{g}$ dla gipsu sztukatorskiego (W/G = 0,8 według Lehmana z zespołem [170]) różnice wytrzymałości f_{2h} zaczynów gipsowych są praktycznie nieistotne;
- natomiast w serii badań zaczynów o stałej konsystencji, wykonanych z gipsów o różnym stopniu rozdrobnienia, uzyskano potwierdzenie dużego wzrostu wodożądności zaczynów gipsowych i równocześnie dużego spadku wytrzymałości gipsu stwardniałego wraz ze wzrostem powierzchni właściwej spoiwa gipsowego A_B . Według badań Lehmana [170] wzrost powierzchni właściwej, w zakresie wartości $A_B = 2000\text{--}22000 \text{ cm}^2/\text{g}$, powoduje zwiększenie wodożądności zaczynu gipsowego – dla uzyskania konsystencji normalnej według DIN 1168 [383] – odpowiednio od wartości W/G = 0,45 do wartości W/G = 1,0. Równolegle odnotowuje się spadek wytrzymałości, od wartości 25 MPa do wartości 10 MPa (oznaczanej na próbkach 4 x 4 x 16 cm według DIN 1168). Dla gipsu odmiany α , w zakresie zmian stopnia rozdrobnienia od $A_B = 2600 \text{ cm}^2/\text{g}$ do $A_B = 15200 \text{ cm}^2/\text{g}$, Fischer [65] odnotował odpowiednio wzrost wodożądności gipsu od wartości W/G = 0,35 do wartości W/G = 0,67 i równolegle spadek wytrzymałości na ściskanie $f_{cg,2h}$ od wartości 13 MPa do wartości 5,0 MPa.

Ogólnie na podstawie omówionych prac badawczych należy stwierdzić, że nie ma technicznej i ekonomicznej celowości domielania spoiw gipsowych w celu zwiększania ich rozdrobnienia. Także Ostrowski [251], badając anhydryt AII, stwierdza, że dodatkowe domielenie tego spoiwa wpływa minimalnie na polepszenie jego wytrzymałości.

8. METODY POMIARÓW I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ZACZYNÓW GIPSOWYCH W STANIE ŚWIEŻYM

8.1. Badanie szybkości wiązania gipsu

Szeroko i precyzyjnie rozpoznane są procesy hydratacji gipsu półwodnego odmiany α i β za pomocą mikrokalorymetrii izotermicznej (prace Karmazsina [112–115], Uszerow-Marszak [339], Levry'ego [182], Magnana [185]), dodatkowo z badaniami struktury wiązania poszczególnych faz w mikroskopie elektronowym (Kronert [152], Magnan, Cottin, Gardet [185]). Proces wydzielania ciepła, mierzonego w warunkach adiabatycznych, stanowi wygodny miernik postępu hydratacji gipsu (rys. 8.1). W procesie hydratacji gipsu $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ wyróżnić można tak zwany okres inkubacyjny,



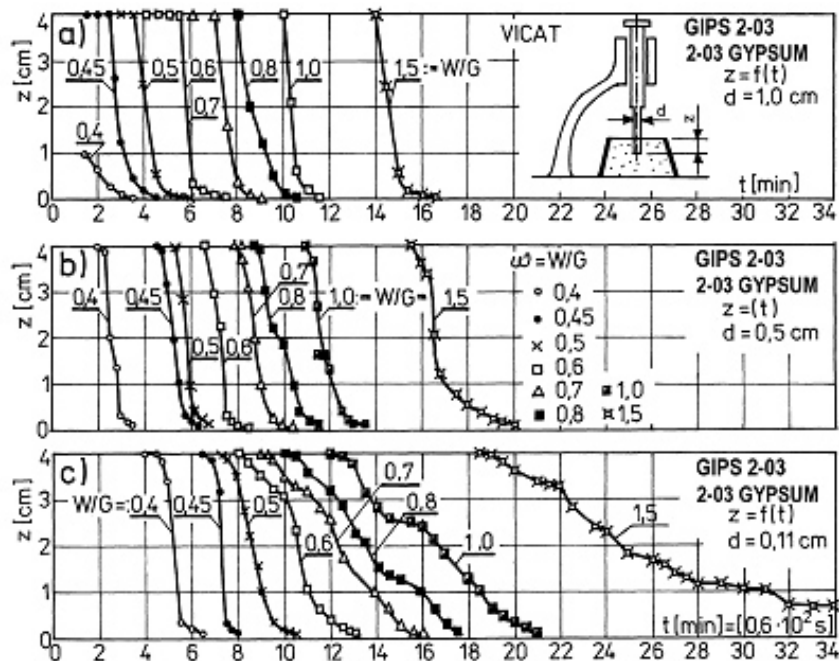
Rys. 8.1. Procesy termiczne w trakcie hydratacji gipsu $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ mierzone mikrokalorymetrycznie: $\frac{dQ}{dt}$ – zmiany cieplne, t – czas (Magnan, Cottin, Gardet [185])

Fig. 8.1. Thermic processes during gypsum hydration $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, measured microcalorimetrically: $\frac{dQ}{dt}$ – thermic changes, t – time (Magnan, Cottin, Gardet [185])

związany z pierwszymi reakcjami chemicznymi na styku fazy stałej i ciekłej, kiedy następuje absorpcja wody przez siatkę krystaliczną półwodzianu i następuje hydratacja w fazie stałej. Dalsze etapy hydratacji związane są kolejno (Magnan, z zespołem [185]): z absorpcją wody na powierzchni kryształów, następnie tworzeniem się przyległej warstwy cieczy, w której następuje rozpuszczanie gipsu i w końcu rodnikowanie oraz przyrost kryształów gipsu dwuwodnego z przesyconych roztworów.

Miarą praktyczną szybkości wiązania gipsu jest pomiar czasu początku i końca wiązania w aparacie Vicata, czyli przez zanurzenie igły w plastycznym zaczynie gipsowym. Metoda pomiaru czasu wiązania gipsu w aparacie Vicata jest normatywnie zalecana w normach międzynarodowych ISO 3050 [389] oraz w wielu normach krajowych (PN [359], NF [386], DIN [393] GOST [434]). W niektórych normach występują modyfikacje przez zastąpienie typowej igły o średnicy 1,1 mm (stosowanej powszechnie przy badaniu czasu wiązania cementu) na bolce o średnicy 10 mm (ASTM [406]) lub stożkowy konus o wymiarach $d_1 \times d_2 \times h = 1 \times 8 \times 50$ mm (NF [389]). W normie polskiej do oznaczania czasu wiązania stosuje się w aparacie Vicata igłę o średnicy $d = 1,1$ mm [369].

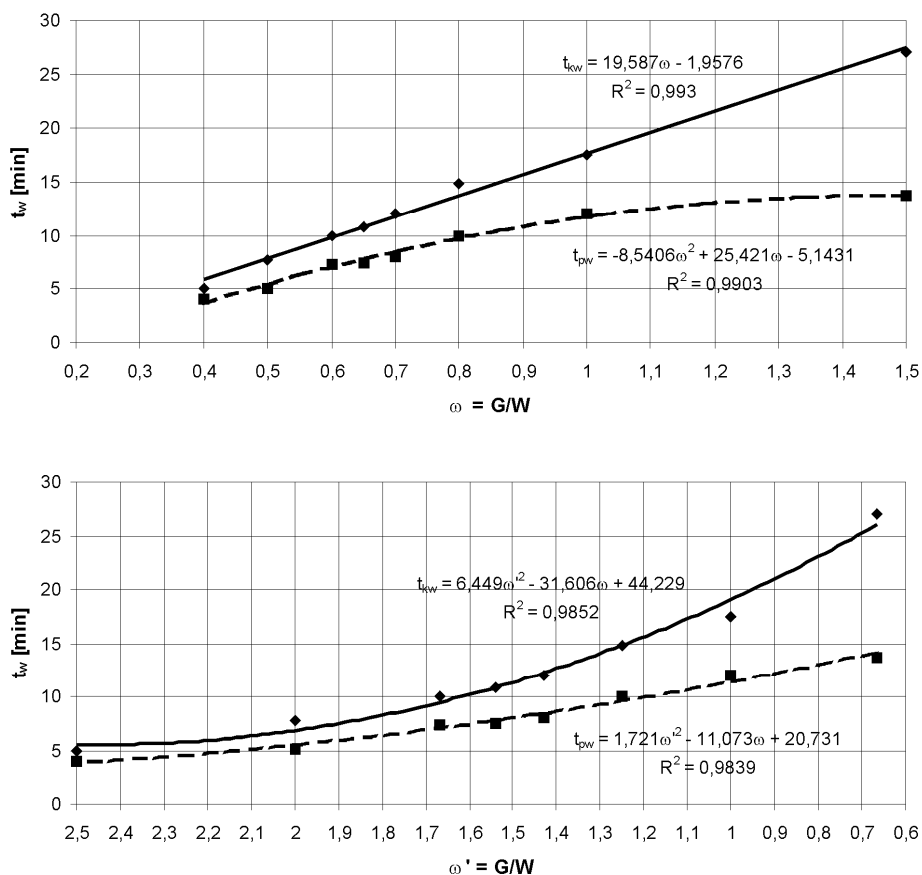
Wyniki własnych badań czasu wiązania zaczynów gipsu budowlanego, o różnym wskaźniku $W/G = 0,4-1,5$, z zastosowaniem typowej igły Vicata $d = 1,1$ mm, podano na rysunku 8.2c, a porównawczo z zastosowaniem bolca o średnicy $d = 5$ mm podano na rysunku 8.2b i z zastosowaniem bolca o średnicy $d = 10$ mm podano na rysunku 8.2a.



Rys. 8.2. Wyniki badań szybkości wiązania zaczynów z gipsu budowlanego o różnym $W/G = 0,4-1,5$
 Fig. 8.2. Test results of the setting rate of building plaster paste of different $W/G = 0,4-1,5$

W przypadku zaczynów ciekłych o $W/G = 1,5$, wytrzymałość tężącego normalnego zaczynu gipsowego jest niższa od naprężeń ścinających na przebicie igłą o średnicy $d = 1,1$ mm. Natomiast wprowadzenie bolca o średnicy $d = 5$ mm (rys. 8.2b) lub $d = 10$ mm (rys. 8.2c) sprawia, że uzyskuje się mierzalnie jednoznacznie wartości odczytów końca wiązania.

Czas początku i końca wiązania badanych zaczynów z gipsu budowlanego sukcesywnie rośnie wraz ze wzrostem wskaźnika WG (rys. 8.3). Zaczyny o większej wartości wskaźnika W/G osiągają później stan przesyconych roztworów, w których następuje zarodkowanie i krystalizacja gipsu dwuwodnego.



Rys. 8.3. Zależność czasu początku wiązania $t_{pw} = f(\omega)$ i końca wiązania $t_{kw} = f(\omega)$ w zależności od wskaźnika $\omega = W/G$ dla zaczynów gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1

Fig. 8.3. Relation of the time of setting start $t_{pw} = f(\omega)$ and setting end $t_{kw} = f(\omega)$ depending on $\omega = WG$ coefficient for GB-N1 natural building plaster paste

Czasy początku t_{pw} i końca t_{kw} wiązania, dla reprezentatywnej próby gipsu budowlanego nr 2-03, można opisać funkcją empiryczną w postaci zależności typu:

$$t_{pw} = -8,54\omega^2 + 25,42\omega - 5,14 \quad (8.1)$$

ze współczynnikiem korelacji $R = 0,995$,

$$t_{kw} = 19,59\omega - 1,96 \quad (8.2)$$

ze współczynnikiem korelacji $R = 0,996$, gdzie: $\omega = W/G$,

8.2. Pomiary konsystencji zaczynów jako miernika wodożądności spoiw gipsowych

8.2.1. Metody pomiarów konsystencji zaczynów

W zależności od wymagań technologicznych konsystencja zaczynów gipsowych oscyluje od lejnnej do plastycznej.

Metody pomiarów i urządzenia badawcze są zróżnicowane, stosownie do poziomów konsystencji zaczynów gipsowych.

Według normy amerykańskiej ASTM C 26-54 dla konsystencji lejnych stosowano lepkościomierz wypływowy: zaczyn gipsowy umieszcza się w lejku blaszanym i miarą konsystencji jest średnica placka uformowanego po wypłynięciu zaczynu (zaprawy) z lejka. Płynność rzadkoplastycznych zaczynów gipsowych określa się za pomocą aparatu Vicata wyposażonego w sondę stożkową (ASTM C 427-84 [406]). Miarą konsystencji jest zagłębienie sondy w zaczynie. Właściwą ilość wody ustala się za pomocą miernika pomiarowego o średnicy $d = 10$ mm. Konsystencja normowa zaczynu gipsowego odpowiada zanurzeniu na głębokość 30 ± 2 mm.

Norma francuska FD B 12402 [389] do badań konsystencji zaczynów stosuje sondę stożkową, a norma angielska BS 1191 [380] aparat ze stalową kulą łożyskową o średnicy 1 cala i masie 66,7 g, opuszczaną z wysokości 254 mm. Głębokość wgniecenia kulki jest miarą konsystencji zaczynu gipsowego.

W normie rosyjskiej GOST 125-57 wprowadzono badanie konsystencji zaczynu gipsowego za pomocą lepkościomierza AKW-3, a konsystencja gipsów tynkarskich i zapraw gipsowych jest ustalana za pomocą stożka pomiarowego Nowikowa o masie 300 g.

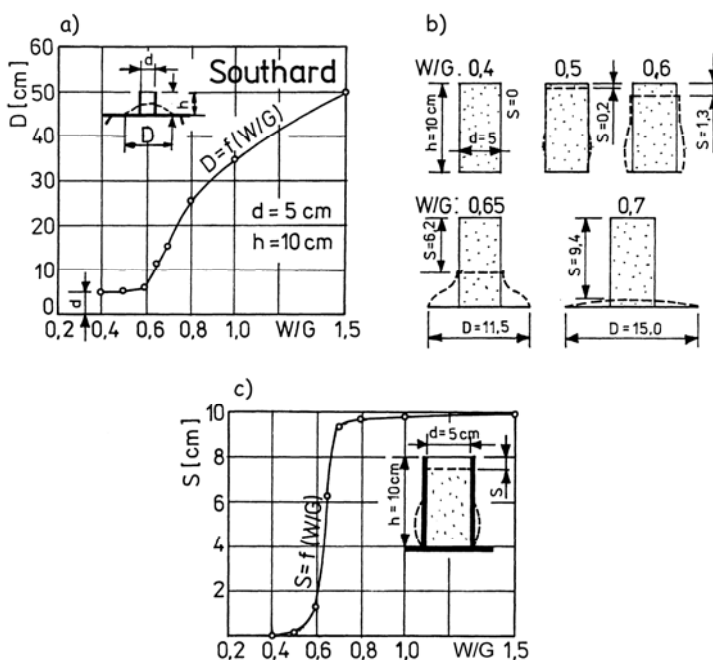
Norma francuska NFB 12401 [386] oraz norma niemiecka DIN 1168 z 1975 r. [383] zalecały metodę współczynnika rozwodnienia gipsu przez pomiar ilości gipsu potrzebnego do nasycenia 100 g spoiwa gipsowego. Wskazana metoda prowadzi do oznaczenia normatywnej, porównawczej wodożądności spoiw gipsowych.

Wyszczególnione powyżej przykłady standardowych postępowań, występujące w normach różnych krajów, wskazują na dużą różnorodność metod badawczych. Czynione próby porównania tych metod sprowadzają się w zasadzie do jakościowej prezentacji ich różnorodności (Lehman, Mathiak, Kurpiers [172], Ostrowski [246]). Występuje potrzeba

międzynarodowej standaryzacji oznaczeń konsystencji zaczynów i zapraw gipsowych, aby wyniki badań były ilościowo porównywalne. Pomiar konsystencji normowej spoiw gipsowych powinien być absolutnie ujednolicony, gdyż jest on wygodną miarą wodoodporności spoiw i może stanowić ważny parametr powódnawczy jakości spoiw gipsowych produkowanych w różnych krajach, różnymi metodami. Ma to znaczenie nawet w zakresie kontrolnej identyfikacji jakości spoiw gipsowych w obrocie międzynarodowym.

8.2.2. Własne badania porównawcze konsystencji zaczynów gipsowych dla różnych poziomów W/G według różnych metod

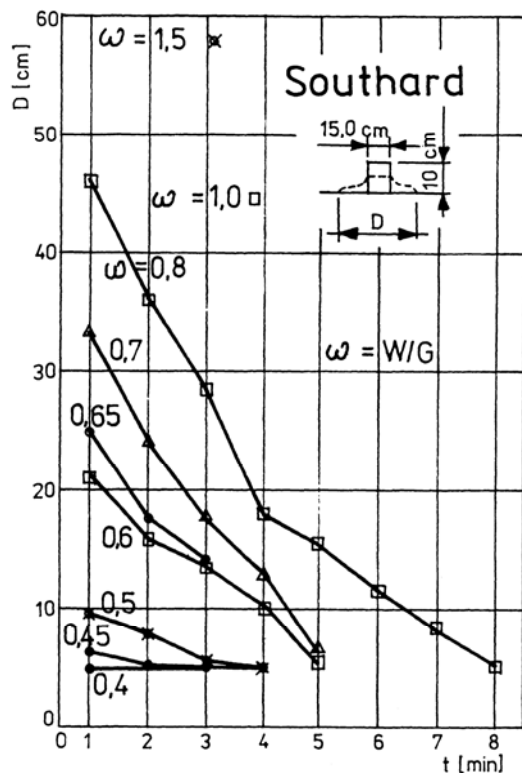
Klasykzną metodą normową badań zaczynów gipsowych jest pomiar średnicy rozplywu D na stoliku Southarda (rys. 8.4a). Metoda ta daje dobre rezultaty dla $W/G > 0,65$, czyli dla konsystencji rozplywnych. Zaczyny o niższych wartościach $W/G \leq 0,6$ ulegają nieznacznej deformacji plastycznej (rys. 8.4b) i bardziej efektywny jest pomiar osiadania walca pomiarowego (rys. 8.4c).



Rys. 8.4. Pomiar konsystencji zaczynów gipsowych o różnym wskaźniku WG, na stoliku Southarda [369]: a) średnica rozplywu D w funkcji wskaźnika W/G , b) deformacja próbek walcowych w zależności od wskaźnika W/G , c) pomiar osiadań s próbek walcowych

Fig. 8.4. Measurement of consistency of gypsum paste of different W/G index, on Southard's table [369]: a) D spreading diameter in the function of W/G index, b) deformation of cylindrical samples depending on W/G index, c) measurement of s settlings in cylindrical samples

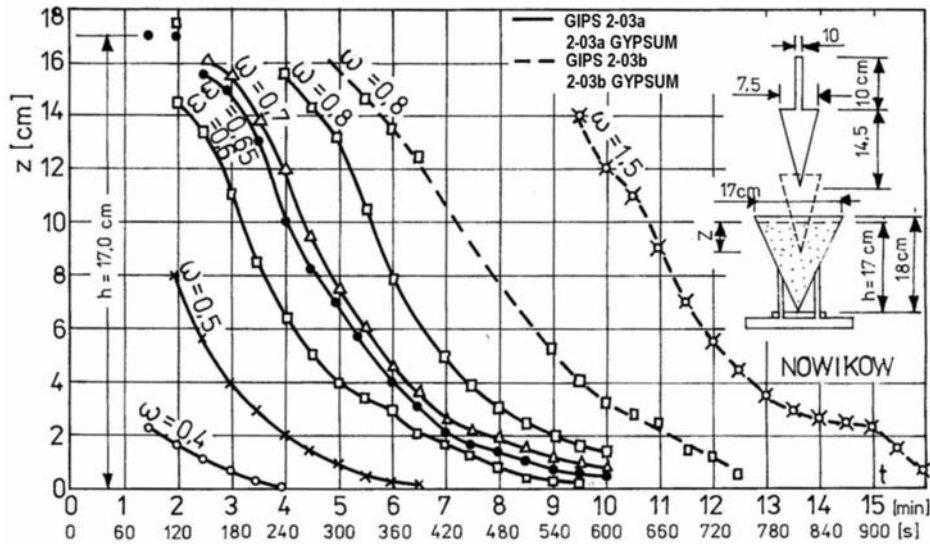
Zmiany średnicy rozplýwu D w funkcji upływu czasu t , od chwili zarobienia gipsu wodą, dla różnych poziomów wskaźnika W/G pokazano na rysunku 8.5.



Rys. 8.5. Zmiany zaczynów gipsowych o różnych wskaźnikach konsystencji W/G , mierzone wielkością rozplýwu próbki walcowej na stoliku Southarda, w funkcji upływu czasu mierzonego od początku zarobu

Fig. 8.5. Changes of gypsum paste of different W/G consistency indexes, measured by the size of the cylindrical sample spreading on Southard's table, in the function of time lapse measured from the beginning of pasting.

Uniwersalną metodą pomiaru zaczynów gipsowych, o konsystencji zbliżonej do zapraw tynkarskich, jest pomiar z użyciem stożka Nowikowa o masie 300 g. Metoda ta może być stosowana do pomiaru konsystencji zaczynów od $W/G = 0,4$ do $W/G = 1,5$ (rys. 8.6). Uzyskany doświadczalnie zestaw krzywych zagłębienia stożka Nowikowa $z = f(t)$ stanowi obraz zmian w konsystencji zaczynów w funkcji czasu t (od chwili zarobu gipsu wodą), dla szerokiego pasma zróżnicowanej konsystencji wyjściowej zaczynów gipsowych o $W/G = 0,4 - 1,5$.



Rys. 8.6. Zagłębienie stożka Nowikowa w zaczyny gipsowe o różnych wskaźnikach W/G, w funkcji czasu t od chwili zarobienia gipsu

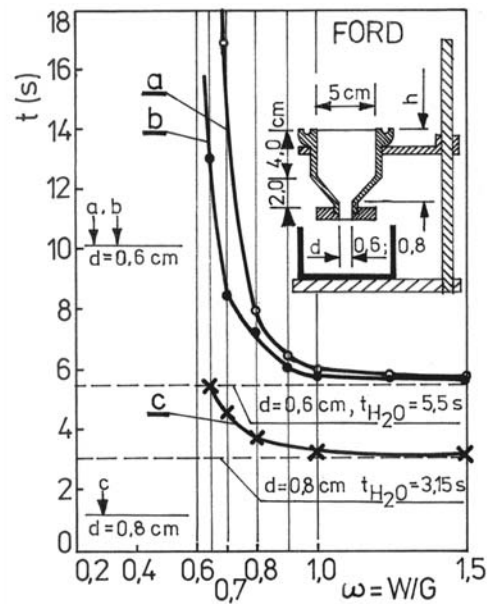
Fig. 8.6. The Nowikow cone penetration into gypsum paste of different WG indexes, in the function of time t from the moment of gypsum pasting

Dla konsystencji lejnej znajduje bardziej zastosowanie metoda pomiaru wypływu ciepłego zaczynu z kubka Forda (rys. 8.7). Zaczyny gipsowe $W/G > 1,0$ mają czas wypływu niewiele różniący się od czasu wypływu czystej wody H_2O .

Metodą kubka Forda można mierzyć porównawczo konsystencję zacinów gipsowych od $W/G = 0,65$ do 1,5. Na rysunku 8.7 podano zależności czasu wypływu t_s w funkcji wskaźnika W/G zacinu gipsowego.

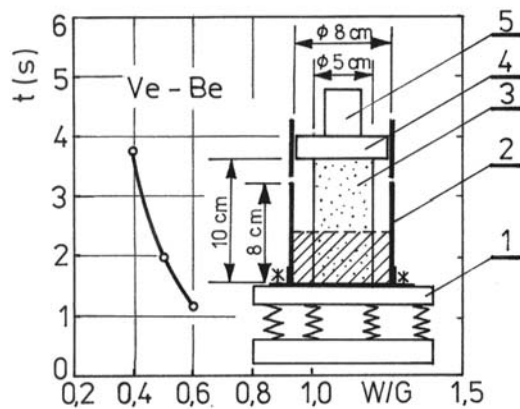
Dla skrajnie gęstoplastycznych zapraw gipsowych, w zakresie $W/G = 0,4-0,6$, autor proponuje własną metodę pomiaru na stoliku wibracyjnym aparatu Ve-Be, z zastosowaniem pomiaru rozplywu próbki walcowej $d \times h = 5 \times 10$ cm, ograniczonej w formie walcowej o średnicy $d = 8,0$ cm. Zależności czasu rozplywu t_s badanego zacinu, do stanu przyjęcia wyrównanej powierzchni poziomej, od wskaźnika W/G , podano na rysunku 8.8.

Zdolność zacinów gipsowych do plastycznej deformacji, w wyniku wymuszeń mechanicznych uderzeń na stoliku Paszkowskiego, podano na rysunku 8.9. Z dokumentacji wyników badań podanych na rysunku 8.9, wynika, że najwyższe efekty przyrostu średnicy rozplywu wtórnego D_r , w porównaniu do średnicy rozplywu pierwotnego D , osiągnięto dla zacinów o $W/G = 0,6$. Z obserwacji praktycznych istotnie wynika, że zaczyny gipsowe (z gipsu budowlanego) o $W/G = 0,6$ cechują się konsystencją optymalną do zagęszczeń wibracyjnych.



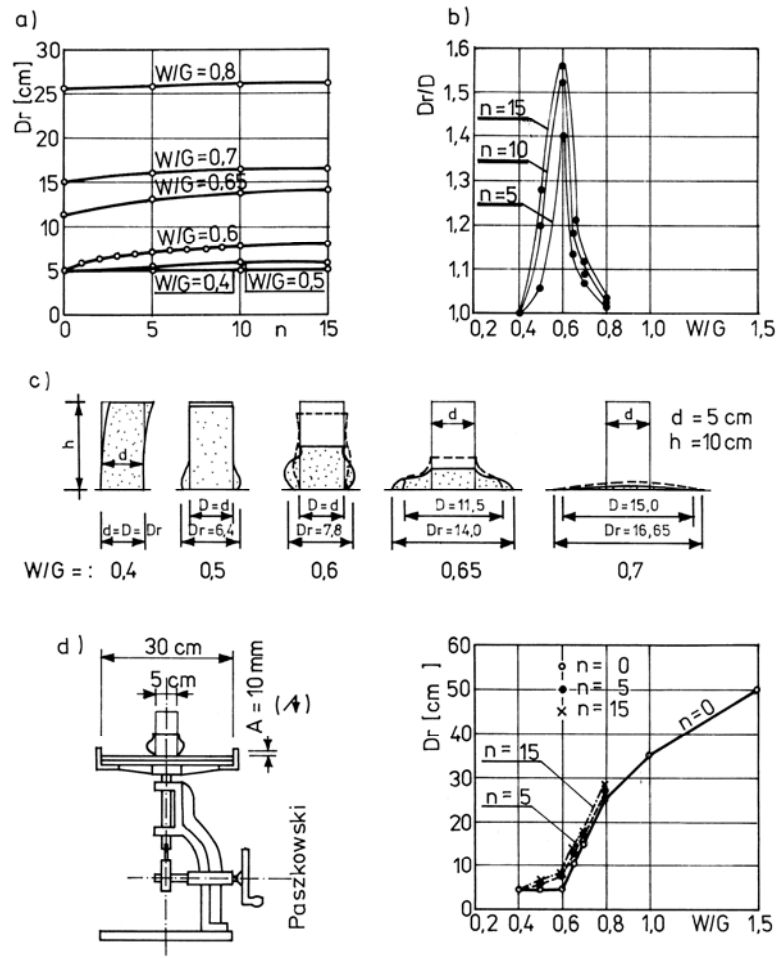
Rys. 8.7. Badania czasu wypływu z kubka Forda zaczynów gipsowych o różnym wskaźnikach W/G: d = 0,6 mm i 0,8 mm średnice otworu wypływu

Fig. 8.7. Time tests of outflow from the Ford cup of gypsum paste of different W/G indexes: d = 0,6 mm and 0,8 mm outflow opening diameters



Rys. 8.8. Stanowisko pomiaru konsystencji zaczynu gipsowego metodą wibracyjnego rozplywu: 1 – stolik wibracyjny Ve-Be; 2 – walec 8 x 8 cm; 3 – walec 5 x 10 cm wypełniony zaczynem gipsowym; 4 – krążek z pleksiglasu; 5 – obciążnik, masa $m_{4+5} = 314,7$ g

Fig. 8.8. Stand for gypsum paste consistency measurement by means of vibration spreading method: 1 – Ve-Be vibration table; 2 – cylinder 8 x 8 cm; 3 – cylinder 5 x 10 cm filled with gypsum paste; 4 – plexiglass disk; 5 – ballast, mass $m_{4+5} = 314,7$ g



Rys. 8.9. Wyniki badań podatności na wstrząsy mechaniczne zaczynów gipsowych o różnych wskaźnikach W/G: $a_1 = 10$ mm – wysokość opadania dynamicznego płyty stolika, D – średnica rozplywu pierwotnego, D_r – średnica rozplywu wtórny, n – ilość uderzeń wibracyjnych na stoliku Paszkowskiego

Fig. 8.9. Test results of mechanical shock susceptibility of gypsum paste with different W/G indexes: $a_1 = 10$ mm – rate of table plate dynamic falling, D – primary spreading diameter, D_r – secondary spreading diameter, n – number of vibration impacts on the Paszkowski table

Zaprezentowane w pracy testy badawcze, wykonane na tej samej próbce gipsu budowlanego GB-N1, dają możliwość porównania uzyskanych wyników, oraz wskazania optymalnego dobru prostych metod stosownie do poziomu konsystencji.

9. BADANIA I ANALIZY WŁASNE WYTRZYMAŁOŚCI GIPSU NA ROZCIĄGANIE

9.1. Ocena ogólna różnych metod badawczych oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie

Oznaczanie wytrzymałości zaczynów gipsowych, podobnie jak w przypadku spoiw cementowych, przeprowadzać można trzema metodami podanymi na rysunku 9.1. Metoda bezpośredniego rozciągania specjalnie wykształtowanych próbek, tak zwanych „ósemek” (rys. 9.1c), daje możliwość oznaczania wytrzymałości na osiowe rozciąganie f_{gt} . Wytrzymałość w tej metodzie określa się zależnością:

$$f_{gt} = \frac{F}{A_t} = \frac{F}{b \cdot d} \quad (9.1)$$

Błędy nierówności uchwytów, w stosunku do pionowej osi symetrii, powodują powstanie mimośrodowości obciążeń w przekroju $\gamma-\gamma$, przeciążenie włókien skrajnych i w konsekwencji – zaniżenie uzyskiwanych doświadczalnie wyników nośności przekrojów na rozciąganie.

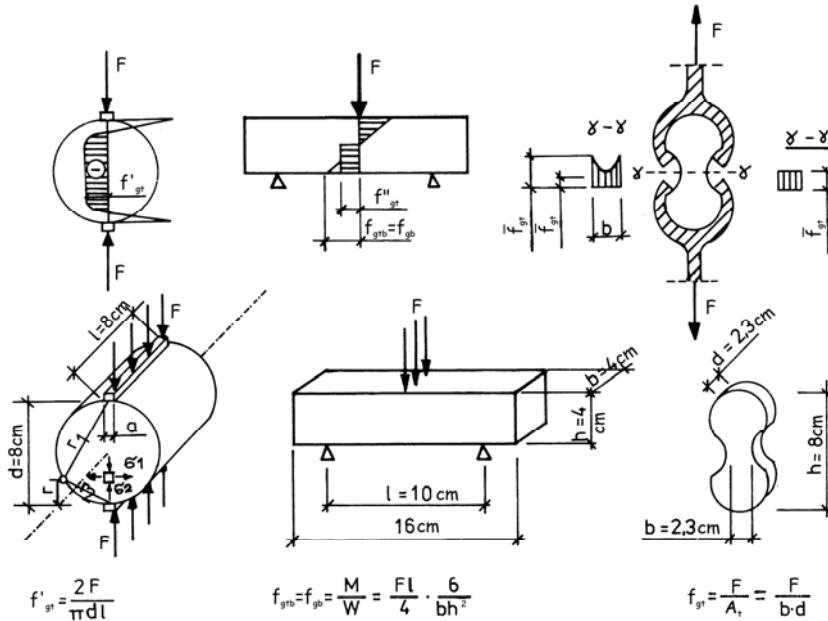
W badaniach wytrzymałości betonów na rozciąganie stosuje się próbki prostopadłościennie lub hiperboliczne, zmniejszające efekt tak zwanego kardus, a także stosuje się specjalne wbetonowane uchwyty, centrujące osiowość działania obciążenia (Zamorowski [361], Mańczak, Tomkowiak [192], Brooks, Neville [26]). Mimo to testy rozciągania są trudne w realizacji i stan czystego rozciągania jest zdarzeniem losowym. Uzyskanie stanu zbliżonego do osiowego rozciągania wymaga szczególnej precyzji urządzeń i staranności oznaczeń. Z tych względów w technice kontrolnych badań wieloseryjnych i licznych prób stosowane są metody szybsze i tańsze. Należą do nich metoda rozłupywania walców (rys. 9.1a) i zginania beleczek (rys. 9.1b).

Metoda zginania beleczek jest najpowszechniej stosowana na świecie, do oznaczania wytrzymałości spoiw budowlanych, ze względu na łatwość przeprowadzenia badań i dokładność wyników oraz z uwagi na fakt przyjęcia przez normy międzynarodowe ISO (dla gipsu ISO 3051) i normy większości państw tej metody jako podstawowego testu normatywnego. Metodę tę w odniesieniu do gipsu zalecają (zalecały) normy: polska [369], rosyjska [434], niemiecka [393], francuska [386], amerykańska [412] i innych państw oraz międzynarodowa ISO 3051 [404].

Naprężenia rozciągające przy zginaniu f_{gtb} określa się ze wzoru:

$$f_{gtb} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} \quad (9.2)$$

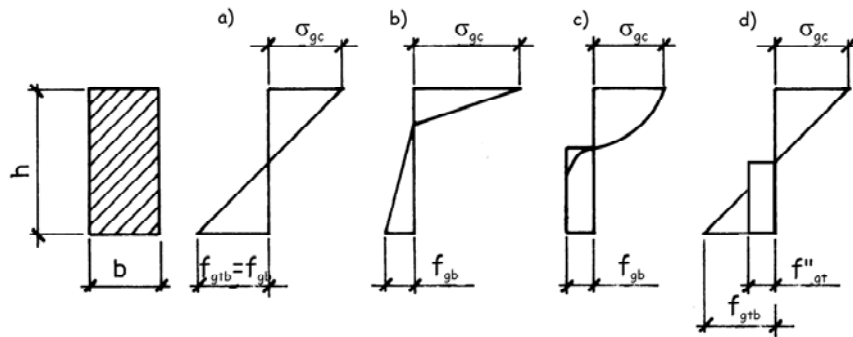
gdzie: M – moment zginający,
 $W = bh^2/6$ – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie.



Rys. 9.1. Metody oznaczania wytrzymałości gipsu na rozciąganie: a) rozłupywanie walców, b) zginanie beleczek, c) rozciąganie „ósemek”

Fig. 9.1. Methods of gypsum tensile strength testing: a) splitting of cylinders, b) bending of beams, c) tension of 8-shaped samples

Zależność (9.2) jest słuszna dla materiałów jednorodnych, izotropowych, o jednakowej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, dla których obowiązuje liniowy rozkład naprężeń normalnych (według rys. 9.2a). Na podstawie badań przeprowadzonych przez różnych autorów, dla wielu spoiw: cementowych i wapiennych oraz kompozytów z zastosowaniem tych spoiw (Bukowski [30], Kuczyński [31]) stwierdzono, że obliczona według (9.2) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{tb} znacznie różni się od wytrzymałości na rozciąganie osiowe f_t (por. (5.22)). W literaturze technicznej (Kuczyński [31], Suwalski [32]) wysuwa się szereg propozycji obliczeniowych i wykresów naprężeń w przekroju zginanym (jak na rys. 9.2b, c). Norma obliczeń przekrojów betonowych niezbrojonych [422] przyjmuje obliczeniowy wykres naprężeń w przekrojach zginanych jak na rysunku 9.2d.



Rys.9.2. Rozkłady naprężeń normalnych w zginanych materiałach kruchych
Fig. 9.2. Normal stress distributions in bent brittle materials

Trzecia metoda oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie – wprowadzona najpóźniej – polega na rozłupywaniu walców wzdłuż tworzącej. Rozkład sił wewnętrznych w przekroju rozłupywanej próbki w chwili zniszczenia podano na rysunku 9.1a, a wartość naprężeń rozciągających $f'_{gt} = \sigma_1$ określa zależność zaproponowana przez Corneiro [42]:

$$f'_{gt} = \sigma_1 = \frac{2F}{\Pi dl} \quad (9.3)$$

W przypadku przekazywania obciążeń przez podkładkę, w postaci pasma o szerokości a , wartość naprężeń rozciągających $f'_{gt} = \sigma_1$ określa zależność:

$$f'_{gt} = \sigma_1 = \frac{2}{\Pi} \cdot \frac{F}{dl} \cdot C_1 \quad (9.4)$$

gdzie:

$$C_1 = 1 - \frac{d}{2a} (\alpha - \sin \alpha) \quad (9.5)$$

$$\alpha = 2 \arctg \frac{a}{2r} \quad (9.6)$$

Współczynnik C_1 określa wpływ podkładki i zależy od parametru teoretycznej funkcji (9.5), a ponadto – jak wykazują badania doświadczalne próbek betonowych – od kształtu ciała próbnego, sposobu przyłożenia siły, od materiału podkładek (Feret [60]), a także od średnicy próbek walcowych (Olszak, Kajfasz, Pietrzykowski [236]).

W podsumowaniu problemu – oceny analizowanych trzech metod badań małościowych na rozciąganie – należy orzec, że „najczystsza” merytorycznie metoda bezpośredniego rozciągania jest technicznie trudna w realizacji i obciążona błędami

pomiaru. Natomiast pozostałe dwie, łatwiejsze w praktykowaniu metody: zginania beleczek i rozłupywania walców, cechują się:

- funkcjami finalnymi zależnymi od wielu parametrów i wymagających indywidualnych atestacji,
- brakiem możliwości dokładnej transformacji wyników na przypadek osiowego rozciągania.

Z tych względów, dla celów badań wytrzymałości zaczynów i tworzyw gipsowych, niezbędne jest opracowanie zależności analitycznych, dających możliwość wzajemnego przeliczania wytrzymałości uzyskiwanych w poszczególnych metodach.

9.2. Oznaczenia wytrzymałości gipsu na rozciąganie różnymi metodami w stanie suchym i nawilgoconym

Losowe rozkłady częstości $\phi(t)$ wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie różnymi metodami, dla zaczynu gipsowego W/G = 0,65, dla trzech serii próbek w stanie suchym, o liczebności 30 sztuk każda, wykonanych z jednolitej masy ujednorodnionego spoiwa gipsowego z surowców naturalnych GB-N1, podano na rysunku 9.3.

Oprócz aproksymowanej według (5.5) funkcji krzywoliniowej $\phi(t)$, na rysunku 9.3 podano także słupkowe histogramy częstości wyników ϕ_i , w poszczególnych przedziałach wytrzymałości $h(R)$, równe:

$$\phi_i = \frac{m_i}{n} \quad (9.7)$$

gdzie m_i , n – jak w opisie zależności (5.1)

Merytoryczne opracowanie wyników oznaczeń jak na rysunku 9.3 podano zbiorczo w tabeli 9.1. Dla każdej z metod oznaczeń wytrzymałości gipsu, w której uzyskano zbiór wyników o rozkładzie normalnym (co potwierdza liniowy układ punktów $\phi_s - f_g$ na siatce laplaso-normalnej w dolnych częściach rys. 9.3), przeprowadzono ocenę ufności i oszacowanie wartości średniej generalnej \dot{X} przy użyciu rozkładu t-Studenta, według zależności:

$$(\dot{X} - \bar{X}) < t(P; k) \frac{s}{\sqrt{m}} = \varepsilon \quad (9.8)$$

gdzie:

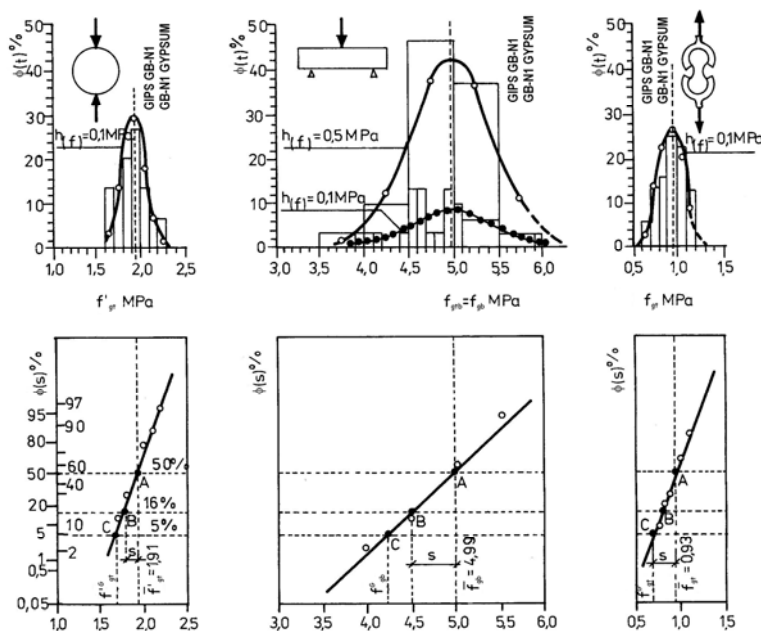
\dot{X} – wartość rzeczywista średniej arytmetycznej populacji generalnej o liczbie wyników $n \rightarrow \infty$,

\bar{X} – średnia arytmetyczna zbioru wyników o liczebności n ,

$t(P; k)$ – czynnik zależny od poziomu ufności P i od liczby stopni swobody $k = n - 1$.

Przy ocenie ufności przyjęto poziom istotności $\alpha = 1 - P = 0,1$, co oznacza, że 10% wyników może się znaleźć poza granicami tak wyznaczonego symetrycznego przedziału $\pm \varepsilon$. Średnia wytrzymałość z próby generalnej \bar{X} jest zawarta w przedziale:

$$\bar{X} - \varepsilon < \bar{X} < \bar{X} + \varepsilon \quad (9.9)$$



Rys. 9.3. Losowe rozkłady częstości $\phi(t)$ wyników badań wytrzymałości na rozciąganie f_{gt} stwardniałego zaczynu z gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym o $W/G = 0,65$, dla metod oznaczeń: a) „brazylijskiej”, b) zginania beleczek, c) rozciągania „ósemek”
Rys. 9.3. Random distributions of frequency $\phi(t)$ of tensile strength f_{gt} test results of hardened GB-N1 building plaster paste in dry state with $W/G = 0,65$, for the following testing methods: a) “Brazilian” method, b) beam bending, c) 8-shaped sample tension

Dla wartości $\alpha = 0,1$ i $k = 30 - 1 = 29$ odczytano wartość $t_\alpha = t(P;k) = 1,699$. Wartość symetrycznego przedziału ufności wynosi więc:

$$\varepsilon = \frac{1,699}{\sqrt{30}} \cdot s = 0,31s$$

Przedział ufności rzeczywistego odchylenia standardowego, na podstawie odchylenia standardowego s dla próby, wyznaczono wykorzystując znany w statystyce fakt,

że wartość $n \frac{s^2}{\sigma^2}$ ma rozkład χ^2 („chi-kwadrat”) z $n-1$ stopniami swobody. Przedział ufności dla odchylenia standardowego σ przedstawia zależność:

$$\sqrt{s^2 \frac{n}{\chi_1^2}} \leq \sigma \leq \sqrt{s^2 \frac{n}{\chi_2^2}} \quad (9.10)$$

Po przyjęciu, że 5% z każdej strony przedziału ufności może znaleźć się poza granicami, czyli $P_1 = 0,05$ i $P_2 = 0,95$, odczytano z tablic [28] wartości χ^2 :

$$\chi_1^2 = 42,557; \chi_2^2 = 17,708.$$

Stąd wartości przedziału ufności wynoszą:

$$s_{\min} = 0,8396s \leq \sigma \leq 1,3016s = s_{\max}$$

Tym samym można oszacować wartość przedziału ufności wytrzymałości gwarantowanej f_{\min} :

$$\bar{R} - 1,65s_{\min} \geq f_{\min} = f^g \geq \bar{R} - 1,65s_{\max} \quad (9.11)$$

Porównanie otrzymanych statystycznych cech rozkładów wytrzymałości na rozciąganie – z analogicznymi wynikami dla prób ściskania w stanie suchym – stanowią wyniki badań podane na rysunku 9.4.

Wnioski wynikające z badań porównawczych zaczynów gipsowych w stanie suchym są następujące:

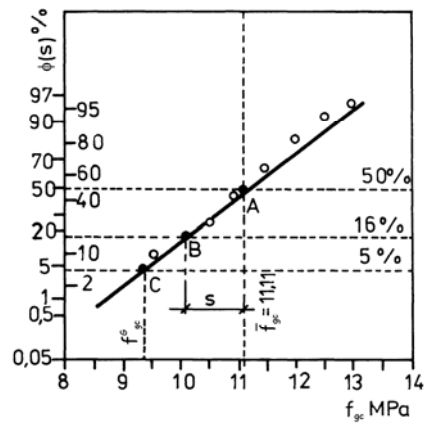
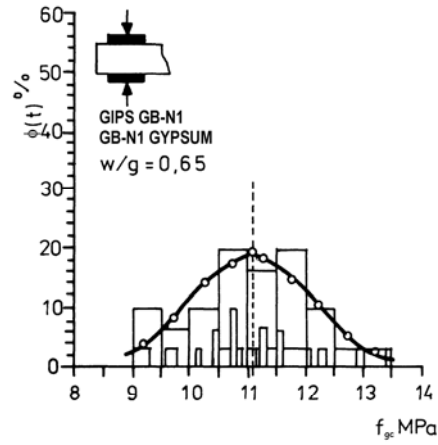
- a) Stwierdza się duże zróżnicowanie wartości średnich wytrzymałości zaczynów gipsowych na rozciąganie, uzyskanych przy stosowaniu różnych metod oznaczeń. Stosunki wzajemne wartości średnich kolejno dla: rozciągania osiowego, rozłupywania i zginania wynoszą:

$$f_{gt} : f'_{gt} : f_{gtb} = 1 : 2,05 : 5,35$$

Na uwagę zasługuje mała wartość wytrzymałości na rozciąganie osiowe „ósemek” f_{gt} , która w relacji do wytrzymałości na zginanie wynosi tylko $f_{gt} = 0,187f_{gm}$. Dla zapraw cementowych Feret [60] zaproponował relację $f_{ct} = 0,5f_{cm}$, ale dla zaczynów polskiego gipsu budowlanego Rusiecki [289] otrzymał relację $f_{gt} = 0,28 \div 0,32f_{gm}$.

- b) Z przeglądu stanu wiedzy (rozd. 2) i z dalszych analiz własnych relacji między poszczególnymi wytrzymałościami gipsu (rozd. 11) wynika wniosek, że obiektywną ocenę wyników badań wytrzymałości na rozciąganie stwarzają relacje ich wartości względem wytrzymałości na ściskanie f_{gc} . Dla prezentowanych wyników badań własnych wynoszą one odpowiednio:

$$f_{gt} / f_{gc} : f'_{gt} / f_{gc} : f_{gm} / f_{gc} = 0,084 : 0,172 : 0,449$$



\bar{f}_{gc} MPa	11,11
s MPa	1,085
f_{gc}^o MPa	9,33
$v_{gc} = s / \bar{f}_{gc}$	9,76 %
$k_{gc} = f_{gc}^o / \bar{f}_{gc}$	84,0 %

Rys. 9.4. Rozkłady częstości $\phi(t)$ wyników oznaczeń wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , w serii próbek $n = 30$, zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 o $W/G = 0,65$, w stanie suchym
 Fig. 9.4. Frequency distributions $\phi(t)$ of compressive strength f_{gc} testing results in a series of samples $n = 30$, of GB-N1 building plaster paste with $W/G = 0,65$, in dry state

Dla rozciąganych próbek prostopadłościennych z zaczynu gipsowego $W/G = 0,7$ (por. rys. 2.13) Wianecki [345] uzyskał wynik $f_{gt}/f_{gc} = 0,162$, który jest dostatecznie bliski uzyskanej w badaniach własnych relacji $f_{gt}/f_{gc} = 0,172$. Biorąc pod uwagę fakt, że Stupnicki [317] wykazał dla betonów cementowych relację wytrzymałości przy rozciąganiu walców $\phi 15 \times 30$ i rozłupywaniu walców w stosunku $f_{ct} : f'_{ct} = 1,0 : 0,955$, a przy porównaniu identycznych wyników dla próbek prostopadłościennych 10×20 cm i walców $\phi 16 \times 16$ cm relację $0,977 : 0,955$ – przybliżyła to do stwierdzenia, że wyniki badań z metody rozłupywania walców można uważać za dostatecznie bliskie do uzyskiwanych przy testach rozciągania próbek walcowych czy prostopadłościennych.

- c) Współczynniki zmienności wytrzymałości kolejno dla metod rozciągania „ósemek”, rozłupywania walców i zginania beleczek wynoszą (tab. 9.1):

$$v_t : v'_t : v_{tb} = 16,2\% : 6,7\% : 9,3\%$$

W metodzie rozciągania „ósemek” rozrzut wyników jest największy (16,2%). Współczynnik zmienności dla zginania $v_{tb} = 9,31\%$ jest bliski wartości w testach ściskania półpróbek $v_c = 9,76\%$ (rys. 9.4). Najniższy rozrzut wyników uzyskano dla metody rozłupywania walców $v'_t = 6,7\%$.

- d) Przedział wartości ε jest stosunkowo wąski i wynosi w kolejności metod jak na rysunku 9.2: 2,1%, 2,9% i 5,1%, co świadczy za tym, że wartość średnia z próby \bar{f}_{gt} i średnia generalna f_{gt}^* są prawie sobie równe.
- e) Wartość średnia gęstości pozornej ρ_p próbek walców i beleczek (i półbeleczek) są prawie równe ($1,05$ i $1,06$ g/cm³, por. rys. 9.5), a współczynniki zmienności v_p są na niskim poziomie 1,98% i 2,02% (tab. 9.1). Świadczy to za tym, że małe rozrzuty gęstości i podobieństwo wartości $\bar{\rho}_p$ nie zakłóciły porównywalności analizowanych metod i dominującego wpływu właśnie metodyki oznaczeń wytrzymałości na parametry statystyczne rozkładu.

Analiza wyników analogicznych badań wytrzymałości na rozciąganie, określana różnymi metodami, dla zaczynów gipsowych $W/G = 0,65$ (z dostaw gipsu nr 2-01) w stanie nasycenia wodą (rys. 9.6 i 9.7), w konfrontacji z wynikami doświadczeń dla serii badań próbek w stanie suchym (rys. 9.8), prowadzi do poniższych stwierdzeń:

- a) nasycenie próbek wodą nie tylko zmniejsza wytrzymałości średnie we wszystkich trzech metodach oznaczeń, ale zmienia też istotnie relacje między nimi jak poniżej:

stan suchy $f'_{gt} : f_{gtb} : f_{gt} = 1,56 : 3,69 : 1,00$

stan wilgotny $f'^w_{gt} : f^w_{gtb} : f^w_{gt} = 1,18 : 3,75 : 1,00$

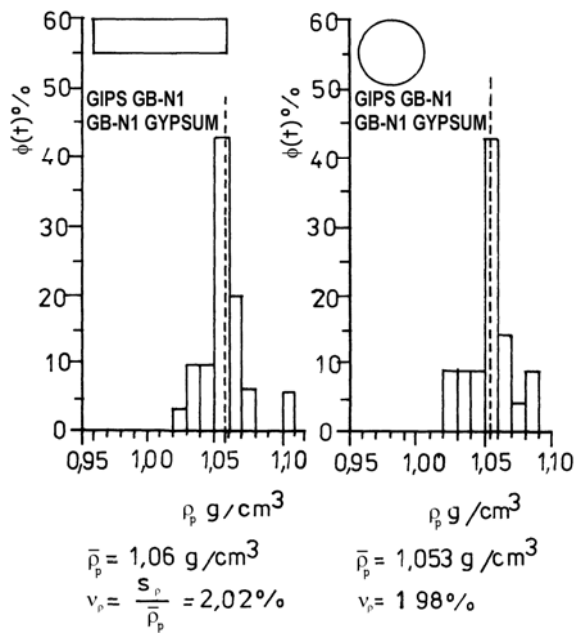
stan suchy $f'_{gt}/f_{gc} : f_{gtb}/f_{gc} : f_{gt}/f_{gc} = 0,17 : 0,40 : 0,11$

stan wilgotny $f'^w_{gt}/f_{gc} : f^w_{gtb}/f_{gc} : f^w_{gt}/f_{gc} = 0,16 : 0,50 : 0,13$

a ściślej, zwiększa różnice wartości oznaczeń f'^w_{gt} i f^w_{gt} , zwiększa wartość f_{gtb}/f_{gc} i f_{gt}/f_{gc} – co jest relacją prawidłową, gdyż materiały o mniejszej wytrzymałości są bardziej plastyczne (mniej kruche). Porównawczo dla betonów o wytrzymałości na ściskanie $f_{cc} = 5 \div 40$ Mpa – występują zbliżone relacje $f_{ct}/f_{cc} = 0,16 \div 0,11$;

b) współczynniki rozmiękania K dla poszczególnych serii badań wynoszą:

	walce	beleczki	ósemki	półbeleczki
gips 2-01	0,292	0,393	0,386	0,320



Rys. 9.5. Rozkłady częstości $\phi(t)$ wyników oznaczeń gęstości pozornej serii próbek $n = 30$ zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 o $W/G = 0,65$: a) beleczki $4 \times 4 \times 16$ cm, b) walce $d \times l = 8 \times 8$ cm

Fig. 9.5. Frequency distributions $\phi(t)$ of apparent density testing results of a series of samples $n = 30$ of GB-N1 building plaster paste with $W/G = 0,65$: a) beams $4 \times 4 \times 16$ cm, b) cylinders $d \times l = 8 \times 8$ cm

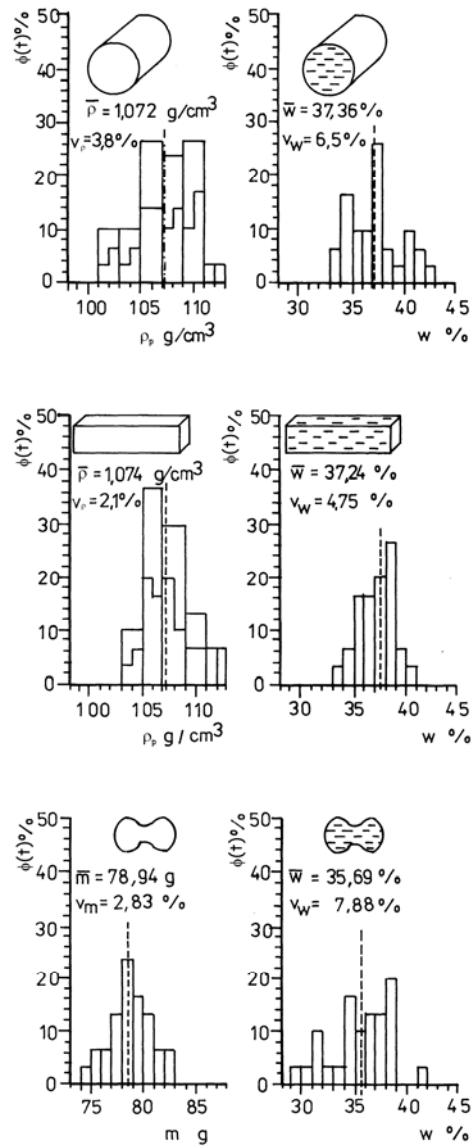
Tabela 9.1

Table 9.1

Cechy statystyczne zbioru wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na ściskanie, dla prób stwardniałych zaczynów gipsu budowlanego GB-N1 o W/G = 0,65, o liczebności 30 sztuk w każdej serii

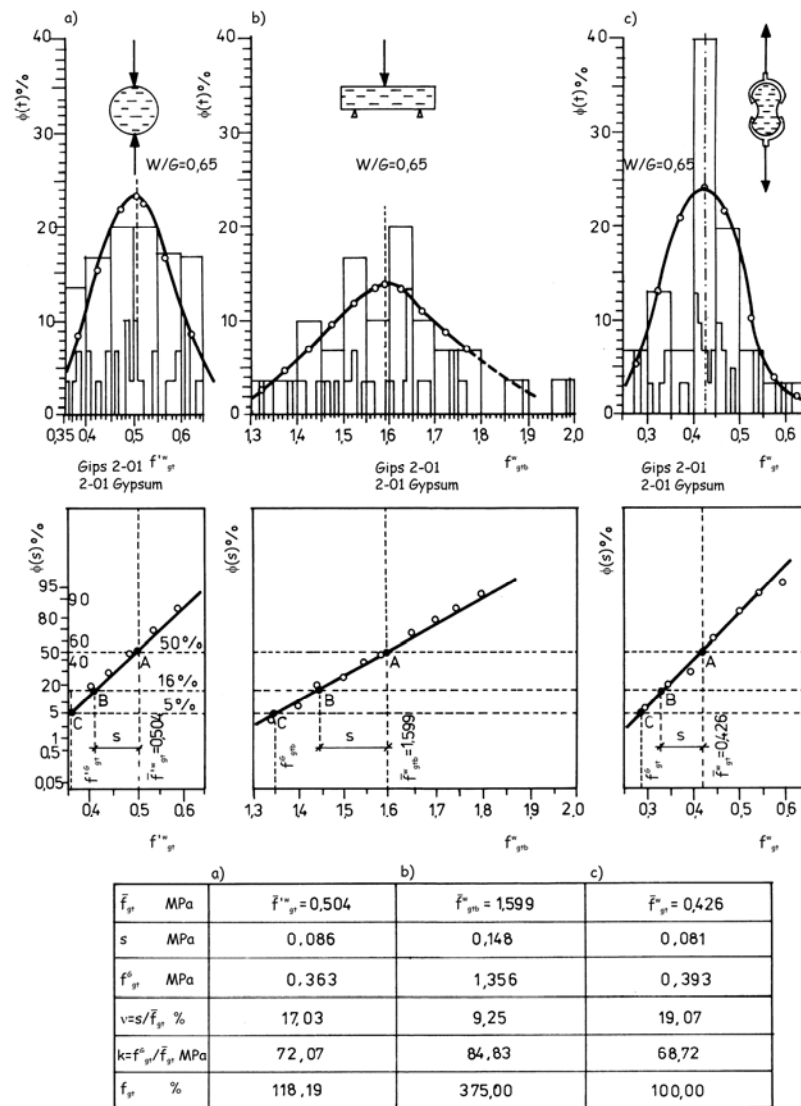
Characteristic features of set of results of tensile strength and compressive strength testing, for hardened GB-N1 building plaster paste samples with W/G = 0,65, with quantity of 30 pieces in each series

Symbol cechy statystycznej Statistic feature symbol	Rozciąganie – Tensile strength			Ściskanie półbeleczek Half-beam compressive strength	
	Metoda brazylijska Brazilian method	Zginanie beleczek Beam bending strength	Rozciąganie ósemek 8-shaped sample tensile strength	Symbol cechy statystycznej Statistic feature symbol	Wartość cechy Value of feature
\bar{f}_{gt}, f_{gm} MPa	1,91	4,99	0,93	\bar{f}_{gc} MPa	11,11
s MPa	0,13	0,46	0,15	s MPa	1,09
ε MPa	0,04	0,144	0,047	ε MPa	0,336
s_{min} MPa	0,11	0,39	0,13	s_{min} MPa	0,31
s_{max} MPa	0,17	0,60	0,20	s_{max} MPa	1,41
f_{gt}^G, f_{gm}^G MPa	1,70	4,23	0,65	f_{gc}^G MPa	9,33
$f_{gt,max}^G$ MPa	1,73	4,35	0,72	$f_{gc,max}^G$ MPa	9,61
$f_{gt,min}^G$ MPa	1,63	4,00	0,61	$f_{gc,min}^G$ MPa	8,80
$\vartheta = \varepsilon / \bar{f}_{gt}$ %	2,1	2,9	5,1	$\vartheta = \varepsilon / \bar{f}_{gc}$ %	3,0
$v = s / \bar{f}_{gt}$ %	6,7	9,3	16,2	$v = s / \bar{f}_{gc}$ %	9,8
$k_{gt} = f_{gt}^G / \bar{f}_{gt}$ %	88,9	84,7	73,4	$k_{gt} = f_{gc}^G / \bar{f}_{gc}$ %	84,0
\bar{f}_{gt} %	205	535	100		
$\bar{\rho}$ g/cm ³	1,05	1,06	–	$\bar{\rho}$ g/cm ³	1,06
$v_{\rho} = s_{\rho} / \bar{\rho}$ %	1,98	2,02	–	$v_{\rho} = s_{\rho} / \bar{\rho}$ %	2,02
$\bar{f}_{gt} / \bar{f}_{gc}$	0,172	0,449	0,084		



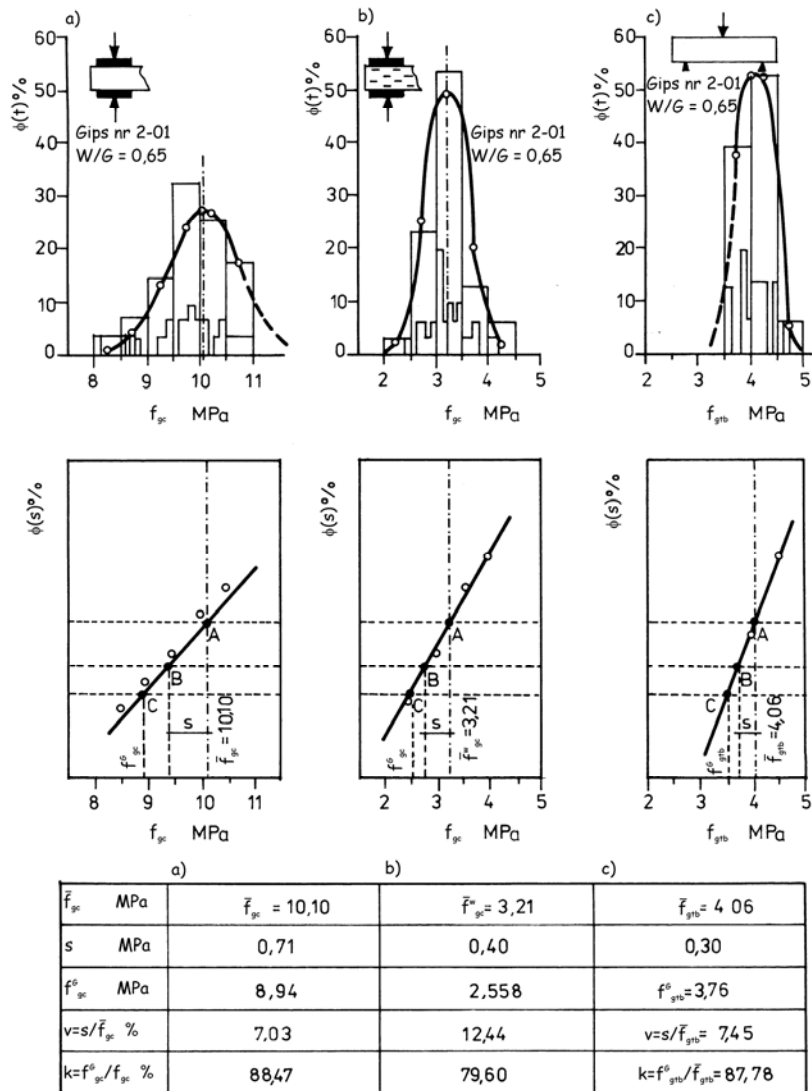
Rys. 9.6. Rozkłady częstości $\phi(t)$ wyników oznaczeń gęstości pozornej ρ_p , masy m i wilgotności w stanie nasycenia w , dla próbek gipsu budowlanego 2-01 o W/G = 0,65: a) próbki walcowe, b) beleczki, c) próbki „ósemkowe”

Fig. 9.6. Frequency distributions $\phi(t)$ of apparent density ρ_p testing results, mass m and humidity in saturation state w , for 2-01 building plaster samples with W/G = 0,65: a) cylinder samples, b) beams, c) 8-shaped samples



Rys. 9.7. Rozkłady częstości $\phi(t)$ w zbiorze wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie próbek gipsu budowlanego GB-N1, o $W/G = 0,65$, w stanie nasycenia wodą: a) – próbki walcowe, b) beleczki normowe, c) próbki „ósemkowe”

Fig. 9.7. Frequency distributions $\phi(t)$ in a set of tensile strength testing results of GB-N1 humid building plaster samples, with $W/G = 0,65$: a) cylindrical samples, b) standard beams, c) 8-shaped samples



Rys. 9.8. Rozkłady częstości $\phi(t)$ w zbiorze wyników oznaczeń wytrzymałości gipsu budowlanego, z surowców naturalnych GB-N1, z dostawy nr 2-01, o $W/G = 0,65$: a) wytrzymałość f_{gc} na ściskanie półbeleczek w stanie suchym, b) wytrzymałość f_{gc}^w na ściskanie półbeleczek w stanie nasycenia wodą, c) wytrzymałość na zginanie f_{gtb} beleczek w stanie suchym

Fig. 9.8. Frequency distributions $\phi(t)$ in a set of strength testing results of GB-N1 natural building plaster, from supply No 2-01, with $W/G = 0,65$: a) half-beam compressive strength f_{gc} in dry state, b) half-beam compressive strength f_{gc}^w in humid state, c) beam bending strength f_{gtb} in dry state

Tabela 9.2

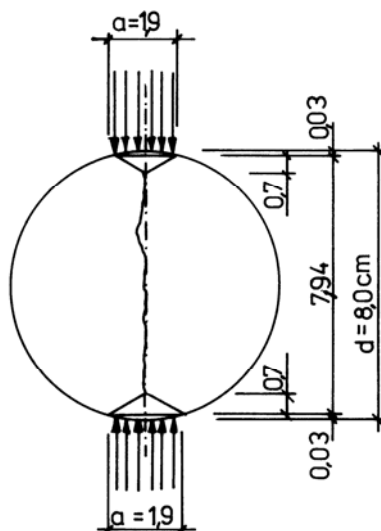
Table 9.2

Cechy statystyczne zbioru wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie różnymi metodami, dla serii próbek $n = 30$ sztuk z zaczynu z gipsu budowlanego nr 2-01, o $W/G = 0,65$, w stanie nasycenia wodą i w stanie suchym

Statistic features of set of tensile strength testing results by means of different methods, for a series of samples $n = 30$ coming from building plaster paste No 2-01, with $W/G = 0,65$, in humid state and in dry state

Symbol cechy statystycznej Statistic feature symbol	Wytrzymałość na rozciąganie oznaczona metodą Tensile strength determined by means of method			Wytrzymałość na ściskanie f_{gc}^w Compressive strength f_{gc}^w
	rozłupywanie walców f_{gt}^w cylinder splitting f_{gt}^w	zginanie beleczek f_{gtb}^w beam bending f_{gtb}^w	rozciąganie „ósemek” f_{gt}^w 8-shaped sample tension f_{gt}^w	
STAN NASYCENIA WODĄ – HUMID STATE				
\bar{f}_g MPa	0,50	1,60	0,43	3,21
s MPa	0,09	0,15	0,08	0,40
ε MPa	0,03	0,05	0,03	0,12
s_{min} MPa	0,07	0,12	0,06	0,33
s_{max} MPa	0,11	0,19	0,11	0,52
f_g^G MPa	0,36	1,36	0,29	2,56
$f_{g,max}^g$ MPa	0,39	1,39	0,31	2,66
$f_{g,min}^g$ MPa	0,32	1,28	0,25	2,35
$\vartheta = \varepsilon / \bar{f}_g$ %	5,3	2,9	5,9	3,8
$\nu = s / \bar{f}_g$ %	17,0	9,2	19,1	12,4
$k = f_g^G / \bar{f}_g$ %	72,1	84,8	59,1	79,6
\bar{f}_g %	118	375	100	–
$\bar{f}_{gt}^w / \bar{f}_{gc}^w$	0,16	0,50	0,13	–
STAN SUCHY – DRY STATE				
	f_{gt}'	f_{gm}	f_{gt}	f_{gc}
\bar{f}_g MPa	1,72	4,06	1,10	10,10
s MPa	0,08	0,30	0,13	0,71
ε MPa	0,06	0,14	0,08	0,22
f_g^G MPa	1,60	3,56	0,89	8,94
$\vartheta = \varepsilon / \bar{f}_g$ %	3,6	3,4	7,3	2,18
$\nu = s / \bar{f}_g$ %	4,4	7,5	11,7	7,0
$k = f_g^G / \bar{f}_g$ %	92,7	87,7	80,6	88,5
\bar{f}_g %	156	369	100	–
$\bar{f}_{gt}^w / \bar{f}_{gc}^w$	0,17	0,40	0,11	–
n sztuk	15	15	15	30

Najwyższy współczynnik rozmiękania, czyli największą wrażliwość na zawilgocenie, odnotowuje się w metodzie rozłupywania walców, co jest związane z dużą koncentracją naprężeń ściskających w strefie docisku (rys. 9.1a). Z dokumentacji rysunkowej jednej z badanych próbek z zaczynów $W/G = 0,65$, w stanie suchym po jej zniszczeniu (rys. 9.9), widać jest wyraźny klin odłamu, zgadzający się z teorią nośności granicznej w mechanice niszczenia materiałów kruchych (Izbicki, Mróz [97]), który rozgranicza strefę ściszaną i rozciąganą. W analizowanym typowym obrazie zniszczenia próbki wysokość strefy ścisanej w chwili zniszczenia wynosi $0,18 d$ z każdej strony, a szerokość pasma docisku $a = 0,21 d$.



Rys. 9.9. Deformacja w strefie kontaktowej i zarys linii ścicia przy rozłupywaniu walca z gipsu próby nr 1-05, o $W/G = 0,65$, w stanie suchym

Fig. 9.9. Deformation in contact zone and shearing line profile during gypsum cylinder splitting, sample No 1-05, with $W/G = 0,65$, in dry state

- c) W seriach badań próbek nawilgoconych wzrastają znacznie współczynniki zmienności wytrzymałości, choć należałoby się raczej spodziewać ich zmniejszenia dla bardziej plastycznego spoiwa. Z tabeli 9.2 wynika dobitny wzrost współczynników zmienności wytrzymałości v_f jak poniżej:

	rozłupywanie	zginanie	rozciąganie	ściskanie
$\alpha_6 = v^w/v$	3,86	1,22	1,63	1,77

Przyczynę tego zjawiska wyjaśniają wyniki badań podane na rysunku 9.6, które świadczą o tym, że nawilgocenie próbek zwiększa wyraźnie współczynniki nośności wytrzymałości próbek. Przykładowo, serie walców i beleczek o prawie jednakowych gęstościach pozornych ($\bar{\rho}_p = 1,072$ i $1,074 \text{ g/cm}^3$), praktycznie jednakowej

porowatości ($p = 53,8\%$ i $53,7\%$), nawet zbliżonej wilgotności średniej po nasyceniu ($\bar{w} = 37,36\%$ i $37,24\%$) – cechują się relatywnie dużymi współczynnikami zmienności tej wilgotności. Współczynnik zmienności nawilgocenia próbek „ósemkowych” wzrósł do wartości $v_w = 7,88\%$, podczas gdy zmienność masy w serii próbek chych wynosiła tylko $v_{tb} = 2,83\%$. Przyczyny tej zmienności należy upatrywać w zdecydowanie zróżnicowanych dla poszczególnych typów form (duże walce, długie beleczki, małe ósemki) warunków swobody zmian objętościowych i przenoszenia ciśnienia pęcznienia dojrzewającej masy gipsowej. Powstające naprężenia wewnętrzne oraz ponowne zmiany objętościowe przy nawilgacaniu powtórny testują defekty i niejednorodności struktury właśnie w badaniach wytrzymałości. Szczegółowe wienie tego problemu zawarł autor w pracach [123, 124].

- d) W rezultacie obu wpływów omówionych powyżej w p. b i c, dla rozłupywanych próbek walcowych w stanie suchym, względna jednorodność wytrzymałości ($v_f = 4,4\%$, tab. 9.2) staje się bardzo niejednorodna dla próbek nawilgoconych ($v_f = 17,0\%$, tab. 7.2). Metoda rozciągania ósemek charakteryzuje się współczynnikami zmienności v_f o wartości równej aż $19,1\%$. Najbardziej jednorodna okazała się metoda zginania beleczek ($v_f = 9,2\%$).
- e) Zwiększony rozrzut wyników wytrzymałości w stanie nawilgoconym sprawia, że obniżają się relatywne wartości wytrzymałości gwarantowanych (patrz wartości $k = f_g^G / \bar{f}_g$) w metodzie rozłupywania walców i rozciągania „ósemek”, a w metodzie zginania beleczek zmiany są już nieduże (z wartości $k = 87,7\%$ dla serii próbek suchych do $k = 84,8\%$ dla serii próbek nawilgoconych). Dla metody rozłupywania walców nawilgoconych wzrasta także wartość przedziału ufności ε .

W podsumowaniu analizowanych serii badań porównawczych, testujących różne metody oznaczeń wytrzymałości zaczynów gipsowych na rozciąganie, należy postawić następujące wnioski:

- metoda rozciągania „ósemek” powoduje zaniżenie wyników wytrzymałości średnich, cechuje się dużym rozrzutem – co obniża wytrzymałość gwarantowaną i staje się metodą o bardzo dużym rozrzucie dla próbek nawilgoconych – co w całości podważa dokładność oznaczeń tą metodą;
- metoda rozłupywania walców cechuje się: małym rozrzutem dla próbek w stanie suchym, a wartości wytrzymałości średnich są zbliżone do czystego rozciągania walców lub prostopadłościennych próbek. Przy oznaczaniu próbek nawilgoconych wzrasta znacznie rozrzut wyników, gdyż występują deformacje próbek w strefie skoncentrowanych naprężeń dociskowych. Można ją zalecać szczególnie do badań próbek w stanie suchym;
- metoda zginania beleczek jest najbardziej stabilna, z rozrzutami wyników na poziomie $v_f = 7,5 \div 9,3\%$ dla serii próbek suchych oraz wilgotnych i po przetestowaniu sposobu transformacji wyników z tej metody na przypadek osiowego rozciągania – może być istotnie metodą uniwersalną.

10. LOSOWY ROZKŁAD WYTRZYMAŁOŚCI I WYTRZYMAŁOŚĆ GWARANTOWANA STWARDNIAŁYCH ZACZYNÓW Z GIPSU BUDOWLANEGO W STANIE SUCHYM

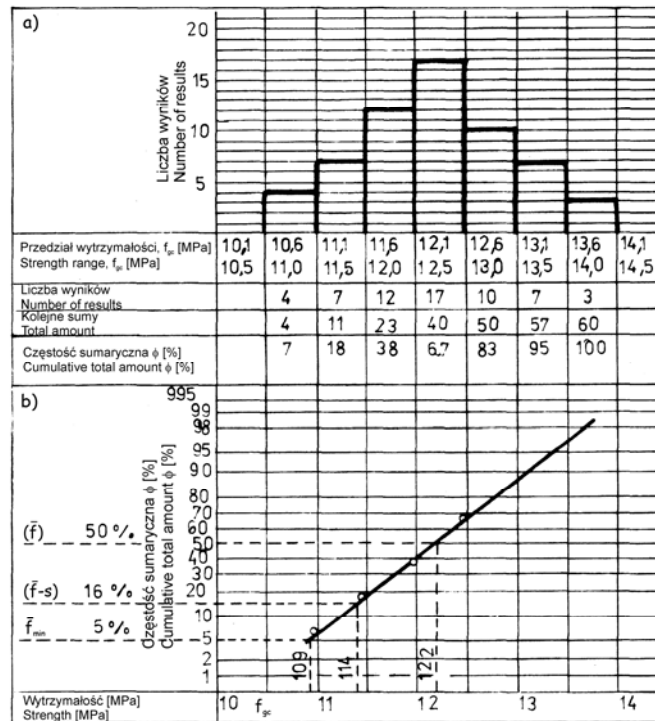
10.1. Opis wyników badań

Przeprowadzone badania odnoszą się do laboratoryjnych warunków przygotowywania zaczynów gipsowych i wykonywania próbek doświadczalnych. Losową partię świeżej dostawy workowanego gipsu budowlanego z surowców naturalnych typu GB-N1 ujednorodniono przez wymieszanie w dużym pojemniku suchego spoiwa gipsowego z losowo wybranych worków. Skład mineralny losowej próby, oznaczonej nr 2-02, podano w tabeli 5.4. Z ujednorodnionego spoiwa gipsowego wykonano zaczyny gipsowe, o stosunku W/G równym kolejno: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 i 0,8. Dla każdego z wymienionych zaczynów wykonano 30 sztuk ciał próbnych w postaci beleczek 4 x 4 x 16 cm i równocześnie po 30 sztuk walców $d \times h = 8 \times 8$ cm. Warunki doświadczeń dla wszystkich serii były identyczne, zgodne z typowymi ustaleniami normowymi według PN-B-04360 [368, 369].

Celem przeprowadzonych badań było określenie losowych rozkładów wytrzymałości, dla różnych serii prób o zmiennym W/G, czyli określenie tym samym wiarygodnych, statystycznych zależności funkcyjnych wytrzymałości dojrzałego zaczynu f_g od wskaźnika W/G oraz rozrzutu wyników wytrzymałości zależnie od zmiennej konsystencji zaczynów gipsowych, wartościowanej zmiennością wskaźnika W/G. Określenie relacji między parametrami statystycznych rozkładów wytrzymałości dla serii prób beleczkowych, z serią prób walcowych, jest niezbędnym etapem rozpoznania do zdeterminowania reprezentatywnych wytrzymałości gipsu dojrzałego w funkcji wskaźnika W/G.

10.2. Losowe rozkłady wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym

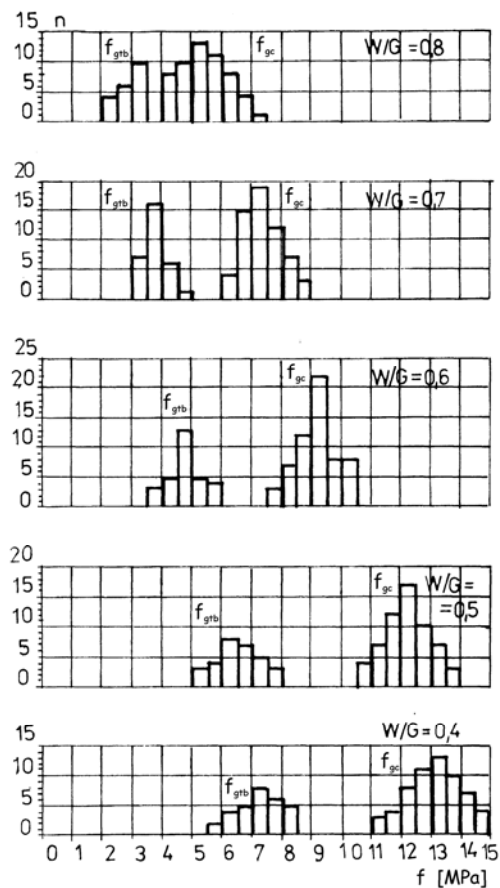
Typowy histogram rozkładu wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych o wskaźniku $W/G = 0,5$, dla losowej i -tej dostawy nr 2-02 spoiwa gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1, podano na rysunku 10.1. Rozkład wytrzymałości badanego gipsu przynależy do rozkładu normalnego, co potwierdza regularnie liniowy układ par punktów częstość sumaryczna $\phi(s)$ – wytrzymałość gipsu f_{gc} , na siatce laplaso normalnej (rys. 10.1b).



Rys. 10.1. Losowy rozkład wytrzymałości na ściskanie f_{gc} stwardniałych zaczynów gipsu budowlanego o $W/G = 0,5$, w serii 60 połówek beleczek $4 \times 4 \times 16$ cm: a) histogram rozkładu wytrzymałości, b) wykres liniowy do oznaczeń parametrów rozkładu losowego na siatce laplaso-normalnej. Próby z gipsu budowlanego GB-N1

Fig. 10.1. Random compressive strength f_{gc} distribution of hardened building plaster paste with $W/G = 0,5$, in a series of 60 $4 \times 4 \times 16$ cm beam halves: a) strength distribution histogram, b) line chart for testing of random parameter distribution on laplace-normal grid. GB-N1 building plaster samples

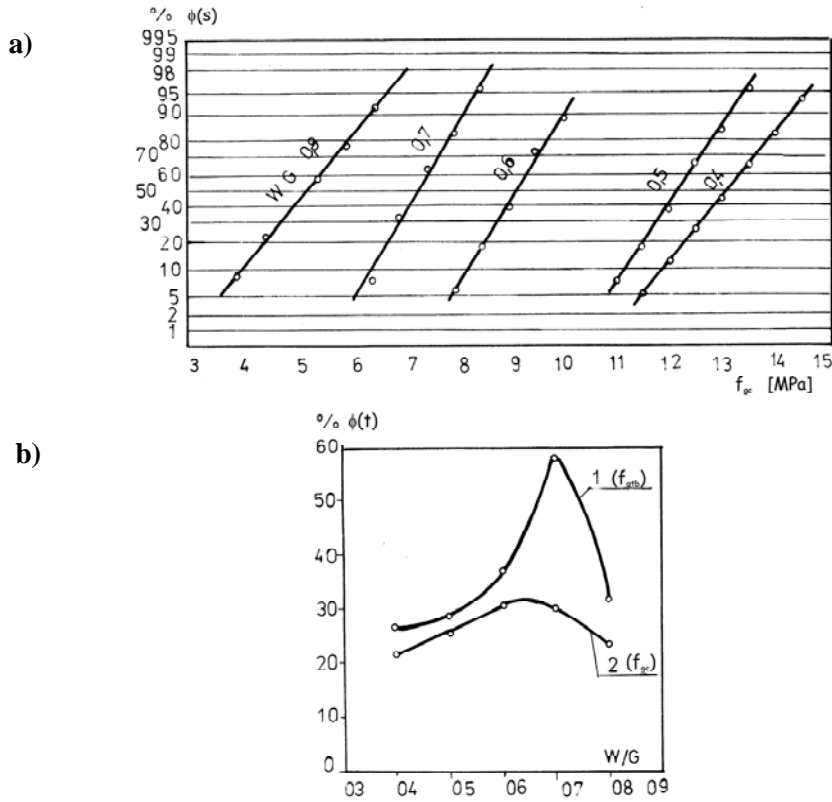
Zestawienie zbiorcze histogramów rozkładu wytrzymałości na ściskanie f_{gc} i rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym, dla zbiorów prób o zmiennym wskaźniku $W/G = 0,4 - 0,8$, podano na rysunku 10.2. Serie prób na zginanie były w liczbie 30 sztuk, a serie badań na ściskanie były w liczbie 60 sztuk. Bardziej liczebne serie i wyniki badań prób na ściskanie stanowią zbiory o rozkładzie normalnym, co potwierdza liniowy układ par punktów $\phi_s - f_{gc}$ na siatce laplaso-regularnej (rys. 10.3).



Rys. 10.2. Histogramy rozkładów losowych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} i wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego o zmiennym wskaźniku W/G : n – liczba wyników mieszcząca się w poszczególnych przedziałach wytrzymałości. Losowa rynkowa próba gipsu budowlanego GB-N1

Fig. 10.2. Histograms of random distributions of bending tensile strength f_{gtb} and compressive strength f_{gc} of hardened building plaster paste with variable W/G index: n – number of results included in particular strength ranges. Random market GB-N1 building plaster sample

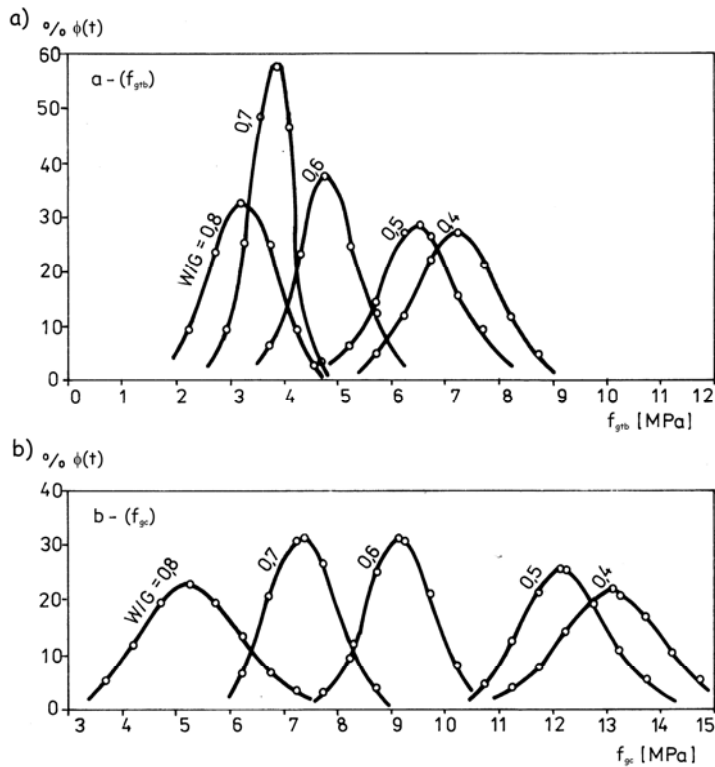
- Wyniki badań podane na rysunku 10.2 prowadzą do dwóch głównych stwierdzeń:
- w miarę wzrostu wskaźnika W/G oczywiście maleją wartości wytrzymałości na zginanie f_{gtb} i na ściskanie f_{gc} , dla badanych spoiw gipsowych;
 - występuje ciekawa regularność, że dla zaczynów o kolejno zmniejszających się wskaźnikach W/G i tym samym rosnących wytrzymałościach f_{gtb} i f_{gc} rośnie sukcesywnie różnica wytrzymałości $\Delta f = f_{gc} - f_{gtb}$.



Rys. 10.3. a) Sprawdzenie przynależności do rozkładów normalnych zbioru wyników badań wytrzymałości na ściskanie stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego o różnym W/G, na siatce laplaso-regularnej: $\phi(s)$ – częstość sumaryczna, f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie półbełeczek 4 x 4 x 16 cm. Gips budowlany GB-N1; b) charakterystyka funkcji $f_{gtb} = f(\omega)$ i $f_{gc} = f(\omega)$, gdzie $\omega = W/G$

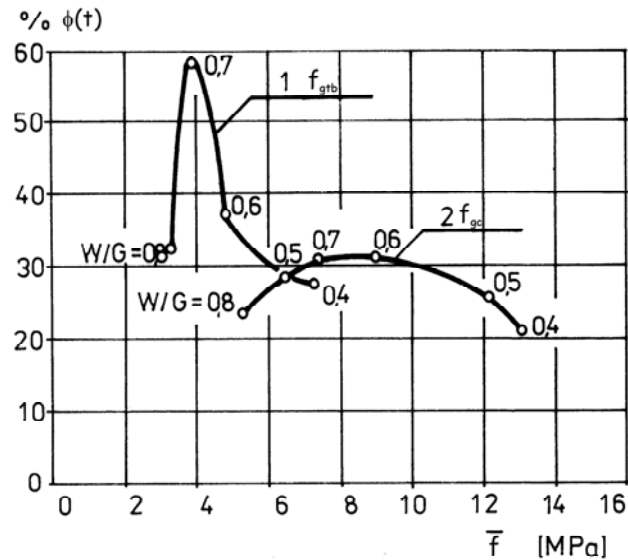
Fig. 10.3. a) Check of normal distribution conformity of a set of compressive strength test results of hardened building plaster paste with different W/G, on laplace-regular grid: $\phi(s)$ – total frequency, f_{gc} – compressive strength of half-beams 4 x 4 x 16cm. GB-N1 building plaster; b) function characteristics $f_{gtb} = f(\omega)$ i $f_{gc} = f(\omega)$, where $\omega = W/G$

Na rysunku 10.4 podano krzywe rozkładu częstości wyników badań wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych, odpowiednio: na rysunku 10.4a dla serii badań wytrzymałości na zginanie i na rysunku 10.4b dla serii badań wytrzymałości na ściskanie. Krzywe rozkładu normalnego częstości wyników badań wytrzymałości opracowano stosując tok analityczny, podany wzorami (5.1) – (5.5). Krzywe podane na rysunku 10.4 potwierdzają, że rozkłady wytrzymałości gipsu – zarówno na zginanie, jak i na ściskanie – mają charakter rozkładu normalnego.



Rys. 10.4. Krzywe rozkładu częstości $\phi(t)$ zbioru wyników badań wytrzymałości zaczynów z gipsu budowlanego: a) dla serii badań wytrzymałości na zginanie f_{gtb} ; b) dla serii badań wytrzymałości na ściskanie f_{gc} ; W/G – wskaźnik wodno-gipsowy. Próby z losowej dostawy nr 2-02 gipsu budowlanego GB-N1

Fig. 10.4. $\phi(t)$ frequency distribution curves of a set of strength test results of building plaster paste: a) for a series of bending strength tests f_{gtb} b) for a series of compressive strength tests f_{gc} ; W/G – hydro-gypsum index. Samples from random supply No 2-02 of GB-N1 building plaster



Rys. 10.5. Krzywe obwiedni największych wartości częstości wyników $\max \phi(t)$ z badań wytrzymałości dla zaczynów gipsowych o różnych wskaźnikach W/G: \bar{f}_{gtb} – średnia wytrzymałość gipsu na rozciąganie przy zginaniu, \bar{f}_{gc} – średnia wytrzymałość gipsu na ściskanie. Gips budowlany GB-N1, próbka nr 2-02

Fig. 10.5. Envelope curves of the highest values of result frequency $\max \phi(t)$ of strength tests for gypsum paste of different W/G indexes: \bar{f}_{gtb} – gypsum mean bending tensile strength, \bar{f}_{gc} – gypsum mean compressive strength. GB-N1 building plaster, sample No 2-02

Z danych podanych na rysunku 10.5 wynika wniosek, że najwyższe maksymalne wartości częstości $\max \phi(t)$ – odpowiadające wartościom średnich wytrzymałości dla krzywych rozkładu wytrzymałości jak na rysunku 10.4 – występują:

- dla serii prób W/G = 0,7 w przypadku badań wytrzymałości na zginanie f_{gtb} ,
- dla serii prób W/G = 0,6 w przypadku badań wytrzymałości na ściskanie f_{gc} .

10.3. Wytrzymałość średnia i wytrzymałość gwarantowana stwardniałych zaczynów gipsowych

Na rysunku 10.6 zestawiono uzyskane wyniki badań wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych w zależności od zmian wskaźnika wodno-gipsowego W/G. Analiza rezultatów badań prowadzi do następujących stwierdzeń:

- a) Wytrzymałość stwardniałych zaczynów gipsowych na zginanie f_{gtb} i ściskanie f_{gc} spada wraz ze wzrostem wskaźnika W/G, a uzyskane krzywe $f_g = f(W/G)$ mają charakter podobny do przebiegu analogicznych funkcji $f_{cc} = f(W/C)$ dla zaczynów cementowych (Bukowski [30], Neville [221]). Teoretycznie, maksymalna wytrzymałość zaczynów gipsowych i górne ekstremum funkcji $f_g = f(W/G)$ powinny wystąpić dla $W_1/G = 0,186$, gdyż ilość wody $W_1 = 0,186 G$ odpowiada stechiometrycznie reakcji hydratacji spoiwa gipsowego (5.11). Ze względu na urabialność i konsystencję już zaczyny gipsowe o $W/G = 0,4$ cechują się granicznie trudno urabialną konsystencją, na poziomie gęstoplastycznej (badania własne rys. 8.4). Podobnie jak w przypadku zaczynów cementowych względy technologicznej urabialności wymuszają konieczność zastosowania zaczynów gipsowych z ilością wody:

$$W > W_1 = 0,186 G \quad (10.1)$$

większą – jak powyżej – od ilości stechiometrycznej W_1 .
Im wyższy jest nadmiar wody ΔW równy:

$$\Delta W = W - W_1 \quad (10.2)$$

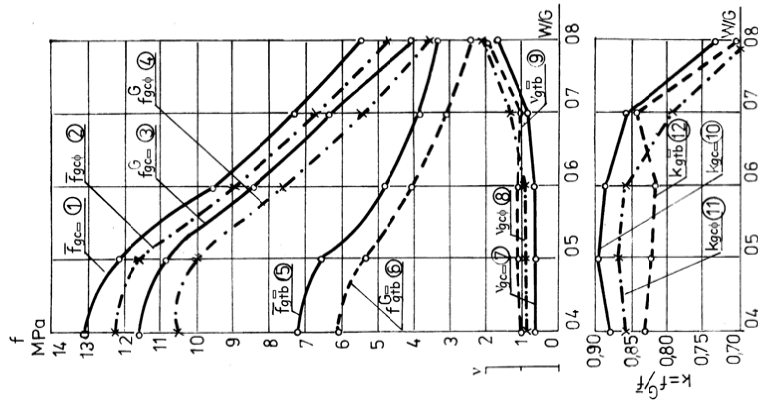
tym bardziej wzrasta ciekłość zaczynu gipsowego w stanie świeżym, ale równocześnie niezwiązana ilość wody ΔW stanowi objętość pór w stwardniałym zaczynie gipsowym, co wpływa na sukcesywne zmniejszanie się wytrzymałości dojrzałych zaczynów wraz ze wzrostem wskaźnika W/G.

- b) Krzywa zależności wartości średnich wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , badanych na próbkach beleczkowych $\bar{f}_{gc\Box}$ (krzywa 1) i krzywa analogicznych zależności wytrzymałości na ściskanie badanych na próbkach walcowych $\bar{f}_{gc\phi}$ (krzywa 2) mają w przybliżeniu przebieg równoległy, a średnia wartość relacji między tymi wytrzymałościami wynosi:

$$\bar{f}_{gc\Box} : \bar{f}_{gc\phi} = 1,0745 \quad (10.3)$$

Relacja (10.3) – uzyskana w wyniku badań statystycznie reprezentatywnych, liczebnych zbiorów prób – może stanowić wygodny przelicznik wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych uzyskanych na próbkach beleczkowych $4 \times 4 \times 16$ cm i próbkach walcowych $\phi = 8$ cm, według przekształconej zależności:

$$\bar{f}_{gc\phi} = \alpha_7 \bar{f}_{gc\Box}, \quad \text{dla } \alpha_7 = 1,075 \quad (10.4)$$



Rys. 10.6.

Wykresy zależności wytrzymałości średnich \bar{f}_g , wytrzymałości gwarantowanych f_g^G , wskaźników zmienności wytrzymałości v dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego od wskaźników $\omega = WG$: 1) wytrzymałość na ściskanie \bar{f}_{gc} , próbki beleczkowe; 2) wytrzymałość na ściskanie \bar{f}_{gc} , próbki walcowe; 3) wytrzymałość gwarantowana na ściskanie \bar{f}_{gc} , próbki walcowe; 4) wytrzymałość gwarantowana na ściskanie f_{gc}^G , próbki walcowe; 5) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu \bar{f}_{gfb} , próbki beleczkowe; 6) wytrzymałość gwarantowana na rozciąganie przy zginaniu f_{gfb}^G , próbki beleczkowe; 7) współczynnik zmienności wytrzymałości f_{gc} , próbki beleczkowe; 8) współczynnik zmienności wytrzymałości f_{gc} , próbki walcowe; 9) współczynnik zmienności wytrzymałości f_{gfb} , próbki beleczkowe; 10) współczynnik $k_{gc} = f_{gc}^G / \bar{f}_{gc}$, próbki beleczkowe; 11) współczynnik $k_{gfb} = f_{gfb}^G / \bar{f}_{gfb}$, próbki walcowe; 12) współczynnik $k_{gfb} = f_{gfb}^G / \bar{f}_{gfb}$, próbki beleczkowe

Fig. 10.6.

Charts of mean strength relations \bar{f}_g , guaranteed strengths f_g^G , strength variability indexes v for hardened building plaster paste from indexes $\omega = WG$: 1) compressive strength \bar{f}_{gc} , beam samples; 2) compressive strength \bar{f}_{gc} , cylinder samples; 3) guaranteed compressive strength f_{gc}^G , beam samples; 4) guaranteed compressive strength f_{gc}^G , roller samples; 5) bending tensile strength \bar{f}_{gfb} , beam samples; 6) guaranteed bending tensile strength f_{gfb}^G , beam samples; 7) strength variability coefficient f_{gc} , beam samples; 8) strength variability coefficient f_{gc} , cylinder samples; 9) strength variability coefficient f_{gfb} , beam samples; 10) coefficient $k_{gc} = f_{gc}^G / \bar{f}_{gc}$, beam samples; 11) coefficient $k_{gfb} = f_{gfb}^G / \bar{f}_{gfb}$, cylinder samples; 12) coefficient $k_{gfb} = f_{gfb}^G / \bar{f}_{gfb}$, beam samples

- c) Wytrzymałości średnie na rozciąganie przy zginaniu \bar{f}_{gtb} (krzywa 5) są – zgodnie z oczekiwaniami – niższe od wytrzymałości na ściskanie \bar{f}_{gc} . Stosunek wytrzymałości dojrzałych zaczynów gipsowych na rozciąganie przy zginaniu \bar{f}_{gtb} do ści na ściskanie \bar{f}_{gc} , badanych na próbkach beleczkowych 4 x 4 x 16 cm, wynosi lejno dla poszczególnych wartości W/G jak podano w tabeli 10.1. Relacje obu zowanych wytrzymałości można opisać zależnością:

$$\bar{f}_{gtb} = \alpha_8 \bar{f}_{gc} \quad (10.4)$$

Tabela 10.1

Table 10.1

Relacje statystyczne między średnimi wytrzymałościami na zginanie \bar{f}_{gtb} a wytrzymałościami na ściskanie \bar{f}_{gc} , stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego z pieców obrotowych PO, losowa próba dostaw rynkowych gipsu nr 2-02

Statistic relations between mean bending strengths \bar{f}_{gtb} and compressive strengths \bar{f}_{gc} of hardened GB-N1 building plaster paste from PO rotary furnaces, random test of market supplies of gypsum No 2-02

Współczynnik Coefficient	Zaczyny gipsowe o W/G Gypsum paste with W/G				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\alpha_8 = \bar{f}_{gtb} / \bar{f}_{gc}$	0,5195	0,5361	0,5190	0,5142	0,6226

Z analizy zmian współczynnika α_8 , w przedziale zmian wartości W/G = 0,4 – 0,8, należy wnioskować, że przebieg zmienności $\alpha_8 = f(W/G)$ posiada „dolne” ekstremum z najniekorzystniejszą wartością $\alpha_8 = 0,5142$ dla W/G = 0,7.

- d) Wytrzymałości gwarantowane na ściskanie f_g^G (krzywe 3 i 4) oraz na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb}^G (krzywa 6 na rys. 10.6), jako reprezentatywne wytrzymałości z prawdopodobieństwem 95% według (5.7), zmieniają się w zależności od wskaźnika W/G według krzywych $f_g^G = f(W/G)$, których przebieg jest zbliżony do odpowiadających wytrzymałości średnich.

Wytrzymałości gwarantowane f_g^G można określić zależnością:

$$f_g^G = \bar{f}_g - t \cdot s_f = \bar{f}_g - t \cdot v \bar{f}_g = \bar{f}_g (1 - tv) = k \bar{f}_g \quad (10.5)$$

gdzie:

v – współczynnik zmienności wytrzymałości według (5.6), równy $v_g = s_f / \bar{f}_g$;

s_f – średnie odchylenie standardowe według (5.4);

t – parametr rozkładu, dla rozkładu normalnego $t = 1,65$, zgodnie z zaleceniami CEB w statystycznych badaniach betonów cementowych przyjmuje się $t = 1,64$ (Dąbrowski [50], Kamiński [108]);

k – współczynnik relacji między wytrzymałością gwarantowaną i średnią.

Liczbowe wartości współczynników $k = f_g^G / \bar{f}_g$ i k , dla badanych zbiorów prób zaczynów gipsowych o zmiennym W/G, podano w tabeli 10.2, a krzywe zmienności wskaźników v i k w zależności od wskaźnika W/G podano na rysunku 10.6. Krzywe zmienności współczynników $k = f(W/G)$ dla próbek ściskanych mają charakter: z „górnym” ekstremum (krzywe 10 i 11 na rys.10.6), z najkorzystniejszą wartością max k dla zbioru prób o $W/G = 0,5$ ($k = 0,893$ dla serii próbek beleczkowych i $k = 0,869$ dla zbioru próbek walcowych). Należy stwierdzić, że zmiany wskaźnika k w przedziale wartości $W/G = 0,4 - 0,6$ są nieduże. Dla serii zaczynów o $W/G = 0,7$ wartości współczynników k wyraźnie są już niższe, a dla zaczynów o $W/G = 0,8$ wartość k wręcz skokowo obniża się. Jest to synchronicznie związane ze stwierdzonymi doświadczalnie następującymi faktami:

- dla gęstoplastycznych zaczynów (o $W/G = 0,4$) i plastycznych (o $W/G = 0,5$ i $0,6$) statystyczne współczynniki zmienności wytrzymałości $v = s_f / \bar{f}_g$, dla testów ściskania, niewiele zmieniają się (krzywe 7 i 8 na rysunku 10.6 i wartości liczbowe w tab. 10.2);
- dla zaczynów półciekłych (o $W/G = 0,7$) i ciekłych (o $W/G = 0,8$) statystyczne rozrzuty wytrzymałości na ściskanie rosną, a rosną skokowo w przypadku zaczynów o $W/G > 0,8$.

Tabela 10.2

Table 10.2

Współczynniki v i k charakteryzujące rozkłady statystyczne wytrzymałości stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 z pieców obrotowych PO, dla losowej dostawy rynkowej gipsu nr 2-02
 v and k coefficients characterising statistic strength distributions of hardened GB-N1 building plaster paste from PO rotary furnaces, for random market supply of gypsum No 2-02

Lp. No	Seria badań wytrzymałości Series of strength tests	Parametry rozkładu Distribution parameters	Wskaźnik WG WG index				
			0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Ściskanie beleczek Beam compressive strength	v_{gc}	7,16	6,52	6,83	8,65	16,14
		k_{gc}	0,871	0,893	0,874	0,824	0,679
2.	Zginanie beleczek Beam bending strength	v_{gtb}	10,05	10,82	11,08	9,01	18,96
		k_{gtb}	0,808	0,792	0,812	0,816	0,636

Krzywe zmian współczynnika zmienności wytrzymałości $v_{gc} = f(W/G)$, w zależności od zmian wskaźnika W/G, dla prób ściskania beleczek posiadają ekstremum „dolne” (krzywe 7 i 8 na rys. 10.6), a najniższe (najkorzystniejsze) wartości wskaźnika $v_{gc} = 6,52\%$ występują dla zbioru prób wykonanych z zaczynu o W/G = 0,5.

Dla przedziału zmian W/G = 0,4 – 0,7 wskaźniki zmienności wytrzymałości zmieniają się relatywnie w małym zakresie: zmienność wytrzymałości na ściskanie $v_{gc} = 6,5 – 8,6\%$, zmienność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $v_{gtb} = 9,5 – 11,2\%$.

Badania rozkładu wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych o różnych wskaźnikach W/G, wykonanych na reprezentatywnych statystycznie zbiorach prób, stanowią podstawę do opracowania propozycji klas wytrzymałościowych dojrzałych zaczynów gipsowych, czyli klas dla wyrobów z gipsu. W tabeli 10.3 podano wytrzymałości gwarantowane f_{gc}^G , odpowiadające poszczególnym wskaźnikom W/G oraz podano propozycje klas wytrzymałościowych gipsu i odpowiadające im wskaźniki W/G, dla zaczynów z gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1.

Tabela 10.3

Table 10.3

Propozycje klas wytrzymałościowych stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1
Proposals of strength classes of hardened GB-N1 building plaster paste

Lp. No	Parametry normalizacyjne Normalising parameters	Wskaźnik W/G W/G index				
		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2	3	4	5	6	7
1.	Wytrzymałość gwarantowana na ściskanie f_{gc}^G w stanie suchym, MPa Guaranteed compressive strength f_{gc}^G in dry state, MPa	11,5	10,8	8,1	6,3	3,9
2.	Propozycje klas wytrzymałościowych gipsu budowlanego Proposals of building plaster strength classes	G-11,5	G-10	G-8	G-6	G-4
3.	Odpowiadające klasie wartości współczynnika W/G Corresponding to W/G coefficient value class	0,43	0,53	0,62	0,71	0,79

Podane w tabeli 10.3 wartości odpowiadają laboratoryjnym warunkom wywania prób i wykonania badań wytrzymałościowych. W profesjonalnych zakładach produkcji wyrobów z gipsu budowlanego jednorodność wyrobów z gipsu może być śnie na takim samym poziomie jakości wykonawstwa, jaki jest możliwy do osiągnięcia przy stosowanej metodyce w warunkach laboratoryjnych. Na etapie wdrożenia systemu

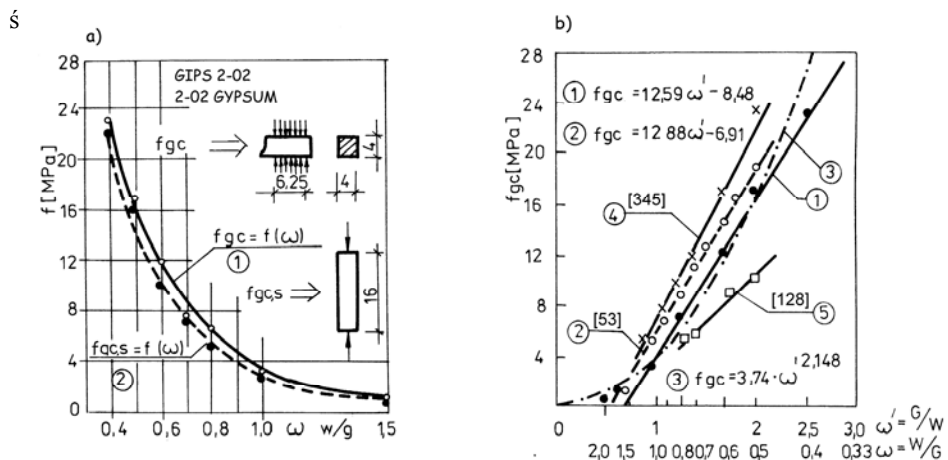
klasyfikacji wyrobów z gipsu, oczywiście, niezbędne są wieloseryjne kosztowne badania statystyczne.

Podane propozycje należy uważać za wstępne, a całościowe opracowanie zagadnienia klas wytrzymałościowych wyrobów z gipsu wymaga w zakresie ujęć normatywnych dalszych badań laboratoryjnych i poligonowych, w tym selektywnie dla poszczególnych rodzajów spoiw gipsowych z surowców naturalnych i syntetycznych.

11. OPIS ANALITYCZNY WYTRZYMAŁOŚCI STWARDNIAŁYCH ZACZYNÓW GIPSOWYCH W RÓŻNYCH STANACH NAPRĘŻEŃ

11.1. Funkcje analityczne opisujące wytrzymałość na ściskanie

Zależność między wytrzymałością na ściskanie f_{gc} w stanie suchym a wskaźnikiem wodno-gipsowym $\omega = W/G$, dla losowej próby gipsu nr 2-02, o właściwościach opisanych w tabeli 5.4, podano na rysunku 11.1. Krzywą ciągłą nr 1 oznaczono relację $f_{gc} = f(\omega)$ dla ściskania półbeleczek o smukłości $\lambda = 1$, krzywą przerywaną nr 2 oznaczono otrzymaną relację $f_{gc,s} = f(\omega)$ dla smukłości $\lambda = 4$. Niższe wartości wytrzymałości słupowej $f_{gc,s}$ obrazują wpływ smukłości na wytrzymałość elementów



Rys. 11.1. a) Wykresy zależności wytrzymałości na ściskanie f_{gc} stwardniałych zaczynów gipsowych od wskaźnika $\omega = W/G$; b) funkcje analityczne opisując zależność wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych na ściskanie f_{gc} od wskaźnika $\omega' = G/W$

Fig. 11.1. a) Charts of relation of hardened gypsum paste compressive strength f_{gc} and $\omega = W/G$ index ; b) analytical functions describing the relation of hardened gypsum paste compressive strength f_{gc} and $\omega' = G/W$ index

Zależność $f_{gc} = f(\omega)$ jest merytorycznie znana i przedstawiana graficznie przez wielu autorów. Wykres tej funkcji, tak jak i właściwości spoiwa gipsowego, zależą od składu mineralnego surowców, technologii i parametrów technologii prażenia, mielenia półhydratu, warunków przechowywania i wieku spoiwa gotowego. Krzywoliniowa zależność $f_{gc} = f(\omega)$ na rysunku 11.1a, po zmianie współrzędnej niezależnej na $\omega' = 1/\omega = G/W$, staje się w dostatecznym przybliżeniu zależnością liniową $f_{gc} = f(\omega')$, podaną na rysunku 11.1b. Zestawione wyniki badań wielu autorów wykazują, że dla praktycznego zakresu wartości parametru $\omega' = 1,0 - 2,0$, czyli dla $\omega = 0,5 - 1,0$, występuje liniowa zależność $f_{gc} = f(\omega')$, zarówno dla gipsu polskiego budowlanego (Klin [128], krzywe nr 1, nr 2 i nr 3), jak i dla gipsu francuskiego „Molda Normal” (Wianecki [345]) – krzywa 4, dla gipsu dentystycznego z Łądką – krzywa 5 (Denkiewicz [53]).

Dla dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego relację $f_{gc} = f(\omega')$ można zapisać w postaci zależności:

$$f_{gc} = 12,59\omega' - 8,48 \quad [\text{MPa}] \quad (11.1)$$

Zależność (11.1) można przekształcić do postaci:

$$f_{gc} = 12,59(\omega' - 0,67) \quad [\text{MPa}] \quad \text{wyniki autora} \quad (11.2)$$

$$f_{gc} = 12,88(\omega' - 0,54) \quad [\text{MPa}] \quad \text{wykorzystane wyniki z pracy (Nowaka [225])} \quad (11.3)$$

Uzyskane relacje (11.2) i (11.3) są zbliżone do wzoru Bułyczewa dla gipsów wysokowytrzymałościowych [33] i są podobnego typu jak znany wzór Bolomey'a dla betonów cementowych (Bolomey [18], Bukowski [30]).

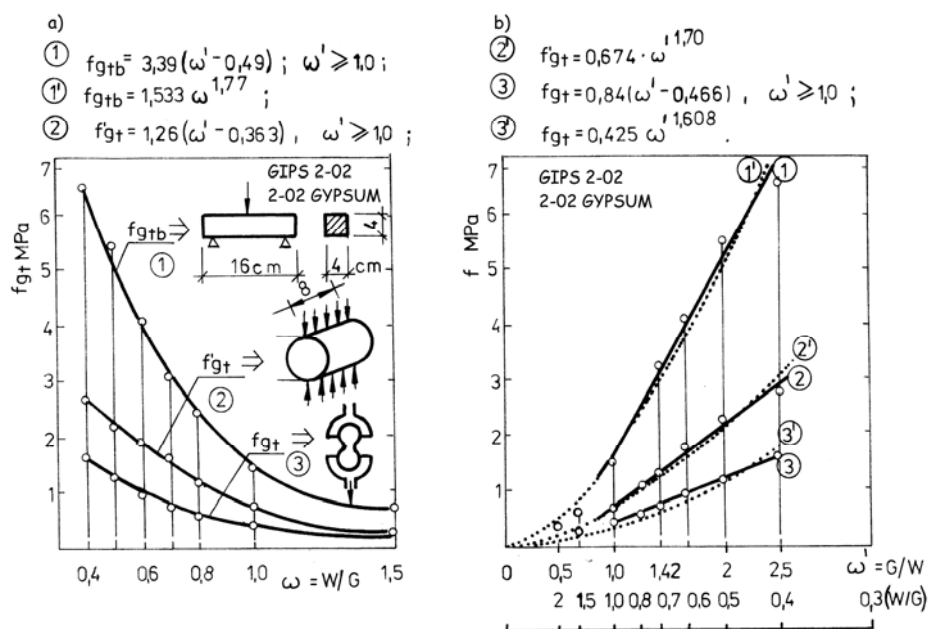
Parametr kierunkowy w zależności (11.2), równy $A = 12,59$ MPa, w przybliżeniu odpowiada wytrzymałości zaczynów z gipsu budowlanego o normowym rozplywie $d = 18$ cm. Zbieżność wyników podanych na rysunku 11.2 wskazuje, że przytoczone powyżej relacje (11.2) i (11.3) mogą stanowić podstawę zależności normatywnych, po opracowaniu statystycznym dostatecznie dużej populacji wyników.

Dla wartości $\omega' < 1$ (gipsy lekkie) ściślejsza jest otrzymana zależność potęgowa, opisująca cały zakres zmian parametru $\omega' = 0 - 2,5$:

$$f_{gc} = 3,742\omega'^{2,148} \quad [\text{MPa}] \quad (11.4)$$

11.2. Funkcje opisujące wytrzymałości na rozciąganie

Krzywe zależności wytrzymałości na rozciąganie f_{gt} stwardniałych zapraw gipsowych, w zależności od wskaźnika W/G – podane na rysunku 11.2 – są podobne do analogicznych wyników, jakie uzyskano dla serii badań wytrzymałości na ściskanie (rys. 11.1). Zestawione na rysunku 11.2a krzywe zależności $f_{gt} = f(\omega)$ prezentują różnice w wartościach wytrzymałości na rozciąganie, uzyskiwanych przy stosowaniu trzech podstawowych metod badawczych: zginania beleczek, rozłupywania walców i rozciągania „ósemek”.



Rys. 11.2. a) Krzywe zależności wytrzymałości na rozciąganie f_{gt} od wskaźnika W/G, dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie suchym: 1) w badaniach beleczek 4 x 4 x 16 cm, 2) w badaniach metodą rozłupywania walców, 3) w badaniach metodą rozciągania „ósemek”; b) analogiczne jak na rys. 11.2a krzywe zależności $f_{gt} = f(\omega' = G/W)$

Fig. 11.2.a) Curves of relation of tensile strength f_{gt} and W/G index, for hardened building plaster paste in dry state: 1) in tests of 4 x 4 x 16 cm beams, 2) in cylinder-splitting method tests, 3) in tests of 8-shaped sample tensile strength method; b) analogically as in Fig. 11.2.a curves of relation

Krzywoliniową zależność $f_{gt} = f(\omega)$, jak podano na rysunku 11.2a, po zmianie współrzędnej niezależnej na $\omega' = G/W$, można opisać:

- bądź równaniem prostej, dla zakresu $\omega' \geq 1 (\omega \leq 1)$;
- bądź krzywą potęgową typu $y = ax^b$.

Z wysoką korelacją, powyżej współczynnika korelacji $k = 0,98$, uzyskano następujące funkcje analityczne $f_{gt} = f(\omega)$:

- dla metody badawczej zginania beleczek $4 \times 4 \times 16$ cm:

$$f_{gtb} = 3,39(\omega' - 0,49) \text{ [MPa]} \text{ dla } \omega' \geq 1,0 \quad (11.5)$$

$$f_{gtb} = 1,533\omega'^{1,77} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega = 0 - 2,5 \quad (11.6)$$

- dla metody badawczej rozłupywania walców:

$$f'_{gt} = 1,26(\omega' - 0,363) \text{ [MPa]} \text{ dla } \omega' \geq 1,0 \quad (11.7)$$

$$f'_{gt} = 0,674\omega'^{1,70} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega = 0 - 2,5 \quad (11.8)$$

- dla metody badawczej „osiowego” rozciągania „ósemek”:

$$f_{gt} = 0,84(\omega' - 0,466) \text{ [MPa]} \text{ dla } \omega' \geq 1,0 \quad (11.9)$$

$$f_{gt} = 0,425\omega'^{1,608} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega = 0 - 2,5 \quad (11.10)$$

Zależności (11.5) – (11.10) pozwalają na przeliczanie wartości wytrzymałości na rozciąganie f_{gt} między poszczególnymi rodzajami badań. Przeliczenia można przeprowadzić z użyciem następujących funkcji:

- a) gdy za metodą bazową przyjmuje się zginanie beleczek:

- przeliczanie wyników na beleczki:

$$f_{gtb} = f'_{gt} \cdot f_1 = f'_{gt} \cdot \frac{f_{gtb}}{f'_{gt}} = f'_{gt} \cdot \frac{1,533\omega'^{1,77}}{0,674\omega'^{1,70}} \quad (11.11)$$

$$f_{gtb} = f'_{gt} \cdot 2,274\omega'^{0,07} \quad (11.12)$$

Wobec małej wartości czynnika potęgowego $\omega'^{0,07}$ można przyjąć, że wyniki z rozłupywania walców f'_{gt} można przeliczać na wyniki wytrzymałości przy zginaniu beleczek, wykorzystując relację:

$$f_{gtb} = 2,274f'_{gt} \quad (11.13)$$

- przeliczenie ósemek na beleczki:

$$f_{gtb} = f_{gt} \cdot f_2 = f_{gt} \cdot \frac{f_{gtb}}{f_{gt}} = f_{gt} \cdot \frac{1,533\omega'^{1,77}}{0,425\omega'^{1,608}} \quad (11.14)$$

$$f_{gtb} = f_{gt} \cdot 3,607\omega'^{0,162} \quad (11.15)$$

Opracowane analitycznie zależności (11.12), (11.13) i 11.15) stanowią istotne *novum* w dotychczasowych ustaleniach, gdyż relacje między poszczególnymi oznaczeniami gipsu podawane są jako funkcje zależne od wskaźnika $\omega = W/G$ lub $\omega' = G/W$.

11.3. Związki analityczne między wytrzymałościami na rozciąganie i ściskanie

Wykonanie oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie wymaga bardziej specjalistycznego i precyzyjnego sprzętu badawczego. Szczególnym problemem jest osiągnięcie idealnej osiowości obciążeń z uwagi na fakt, że mimośrodowość uchwytów i przekazu siły powoduje duże obniżenie wytrzymałości i jest powodem dużego rozrzutu wyników. Znany autorytet w dziedzinie technologii betonów prof. A.M. Neville [222] orzeka, że wytrzymałość betonu na rozciąganie nie jest jednoznaczna, gdyż zależy od kształtu próbek użytych do badań. Z tych względów przy określaniu wytrzymałości zapraw i betonów cementowych wykorzystuje się statystyczne relacje między wytrzymałościami na osiowe rozciąganie f_t i wytrzymałością na ściskanie f_c . Do najpopularniejszych należy wzór Fereta z 1937 r. [60] – odnoszący się do wytrzymałości zapraw i betonów cementowych – w postaci zależności:

$$f_t = 0,5\sqrt[3]{f_c^2} = 0,5f_c^{0,667} \quad (11.16)$$

W okresie późniejszym wielu autorów poprawiało wzór Fereta, w odniesieniu do betonów cementowych, do postaci zależności:

$$f_t = \alpha f_c^{\frac{2}{3}} \quad (11.17)$$

przyjmując: $\alpha = 0,65$ (Bukowski [30]), $\alpha = 0,3$ gdy f_t oznacza wytrzymałość na rozłupywanie walców (Oluokun [237]).

Próbie sformułowania analitycznych zależności dla badań dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego podjął autor w niniejszym rozdziale. Na rysunku 11.3a w układzie współrzędnych: wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} – wytrzymałość na ściskanie f_{gc} zestawiono pary wyników $f_{gtb} - f_{gc}$ z badań własnych (dla gipsu budowlanego), w konfrontacji z wynikami badań dla innych rodzajów gipsów, kolejno: dla gipsu dentystrycznego z (Denkiewicz [53]) i dla gipsu francuskiego „Molda Normal” (Wianecki [345]). Po zmianie współrzędnej niezależnej na parametr α_9 , równy stosunkowi dwóch analizowanych wytrzymałości:

$$\alpha_9 = \frac{f_{gtb}}{f_{gc}} \quad (11.18)$$

gdzie:

f_{gtb} – wytrzymałość dojrzałych zaczynów na rozciąganie przy zginaniu,

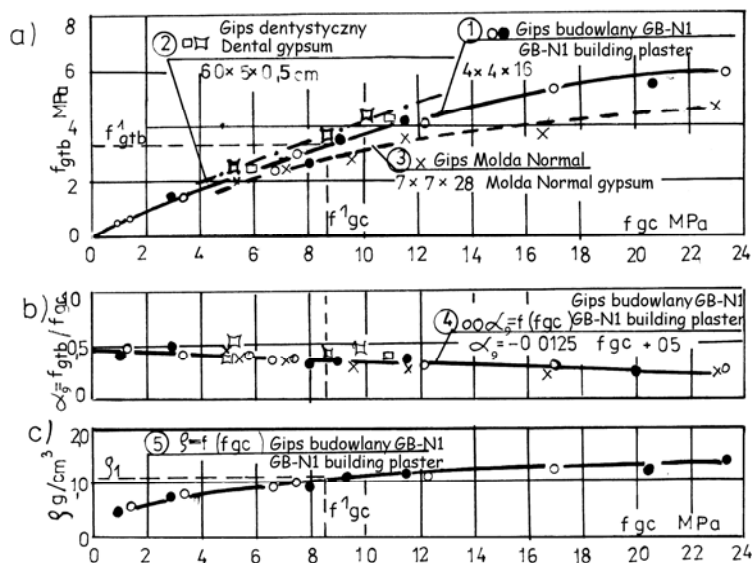
f_{gc} – wytrzymałość dojrzałych zaczynów na ściskanie,

uzyskano dla wszystkich analizowanych rodzajów gipsów układ par punktów $\alpha_9 - f_{gc}$ prawie idealnie wzdłuż linii prostej (rys. 11.3b), którą można opisać równaniem:

$$\alpha_9 = \frac{f_{gtb}}{f_{gc}} = -0,0125f_{gc} + 0,5 \quad (11.19)$$

Po przekształceniu równania (11.19) uzyskuje się zależność:

$$f_{gtb} = -0,125f_{gc}^2 + 0,5f_{gc} \quad (11.20)$$



Rys. 11.3. a) Wykresy zależności wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} , w funkcji ich wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , dla różnych rodzajów gipsów (krzywe nr 1, 2, 3); b) relacje zależności $\alpha_8 = f_{gtb}/f_{gc} = f(f_{gc})$; relacje zależności gęstości zaczynów $\rho = f(f_{gc})$

Fig. 11.3. a) Charts of relation of hardened gypsum paste bending tensile strength f_{gtb} in the function of their compressive strength f_{gc} for different types of gypsum (curves No 1, 2, 3); b) types of relations $\alpha_8 = f_{gtb}/f_{gc} = f(f_{gc})$; types of relations of paste density $\rho = f(f_{gc})$

Z analizy statystycznej wyników badań własnych [120, 123, 124, 128] uzyskano także inną relację, wyłącznie dla gipsu budowlanego z pieców obrotowych GB-N1, w postaci zależności:

$$f_{gtb} = 0,53f_{gc}^{0,808} \quad (11.21)$$

która jest związkiem zbliżonym do znanego wzoru Fereta (11.16).

11.4. Empiryczne związki pomiędzy porowatością a wytrzymałością na ściskanie stwardniałych zaczynów gipsowych

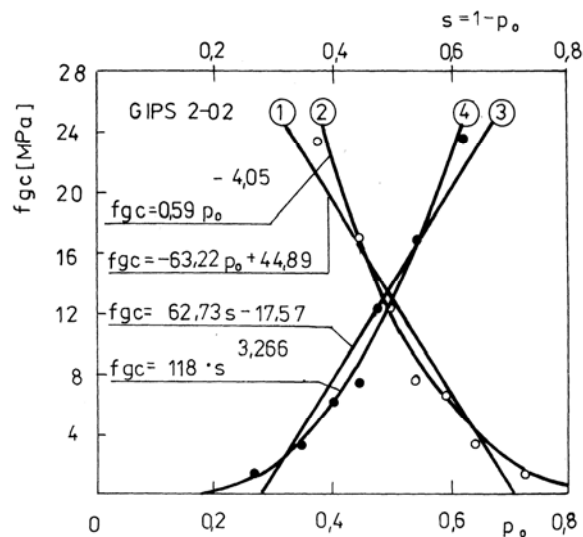
Pary wartości skorelowanych właściwości $f_{gc} - p_o$ (wytrzymałość na ściskanie – porowatość), dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, z losowej dostawy rynkowej nr 2-02 przedstawiono na rysunku 11.4. Układanie się punktów $f_{gc} - p_o$, wzdłuż regularnej krzywej, monotonicznie rosnącej, pozwala na opis relacji między analizowanymi właściwościami dojrzałych zaczynów gipsowych, w postaci związków:

$$f_{gc} = 0,59p_o^{-4,05} \quad [\text{MPa}] \quad (11.22)$$

dla przedziału porowatości $p_o = 0,38 - 0,72$ lub

$$f_{gc} = 118s^{3,266} \quad [\text{MPa}] \quad (11.23)$$

dla szczelności $s = 1 - p_o = 0,62 - 0,28$.



Rys. 11.4. Krzywe zależności $f_{gc} = f(p_o)$, dla dojrzałych zaczynów gipsowych o $W/G = 0,4 - 1,5$, z gipsu budowlanego GB-N1: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, p_o – porowatość, $s = 1 - p_o$ szczelność

Fig. 11.4. Curves of relation $f_{gc} = f(p_o)$, for hardened gypsum paste with $W/G = 0,4 - 1,5$, of GB-N1 building plaster: f_{gc} – compressive strength, p_o – porosity, $s = 1 - p_o$ tightness

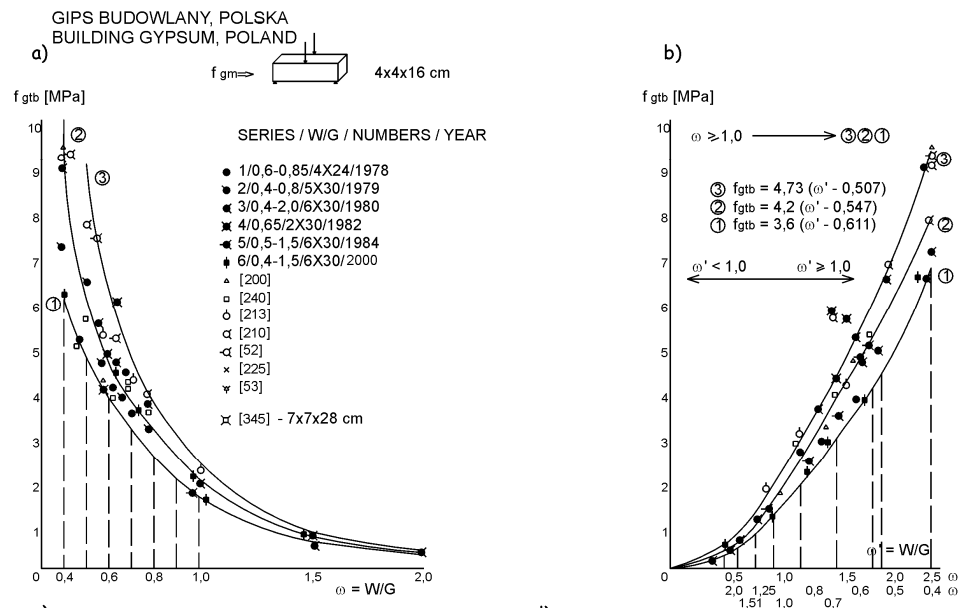
11.5. Analiza zmienności wytrzymałości gipsu budowlanego GB-N1 w losowych dostawach rynkowych z okresu wielu lat

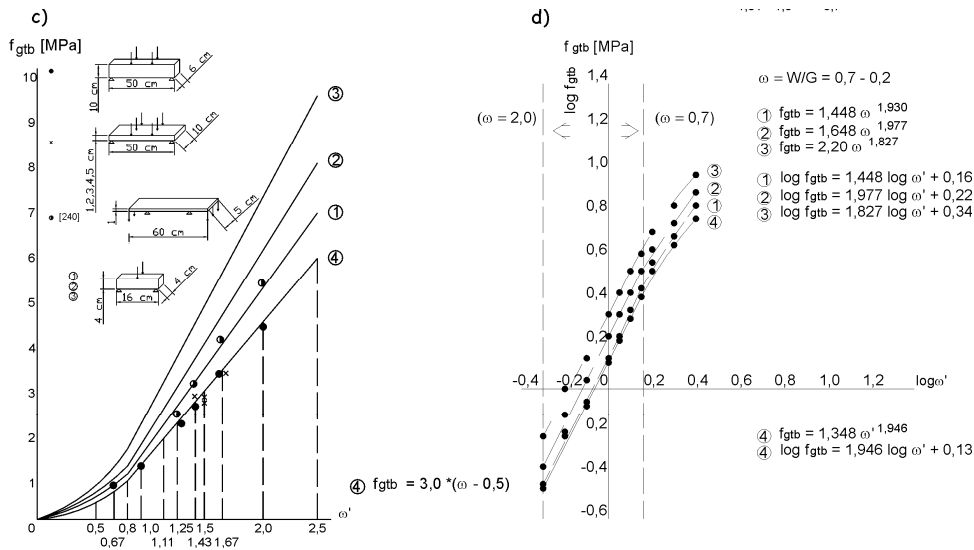
Na rysunku 11.5 zestawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 z surowców naturalnych, z pieców obrotowych PO, na podstawie:

- wieloletnich badań własnych, w oparciu o wieloseryjne zestawienia statystyczne z okresu lat 1978 – 2000,
- umieszczając również wyniki badań różnych autorów, zawartych w pracach autorów: Meuś, Rzepecki [200]; Osiecka [240]; Mizera [213]; Mizera, Denkiewicz [210]; Denkiewicz, Najzarek [52]; Nowak [225]; Denkiewicz [53]; Wianecki [345]; Urban [337]; Dutkowski [56]; Akerman [2].

Wyniki wszystkich badań dotyczą oznaczeń wytrzymałości dojrzałych zaczynów na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} , w funkcyjnej zależności od wskaźnika W/G.

Zbiór wyników badań $f_{gtb} - W/G$ na rysunku 11.5a układa się regularnie w paśmie funkcji monotonicznie malejących, podobnie jak wyznaczono charakterystyki zależności $f_{gtb} = f(W/G)$ dla pojedynczej, i-tej dostawy losowej spoiwa gipsowego (rys. 11.2). Zmienność wyników wyraźnie zmniejsza się w miarę wzrostu wskaźnika $\omega = W/G$ i odwrotnie – pasmo rozrzutu poszerza się dla niższych wartości $\omega = W/G$, czyli w zakresie wyższych wytrzymałości zaczynów (wyrobów) z gipsu budowlanego.





Rys. 11.5. a) Zmienność wytrzymałości gipsu budowlanego na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} w odniesieniu do przedziałów wartości wskaźników $\omega = W/G$. Zestawienie wyników wieloletnich badań własnych i z analiz różnych prac, dla losowych dostaw gipsu budowlanego GB-N1 w okresie lat 1978 – 2000; b) zestawienie wyników badań w relacji $f_{gtb} - \omega' = G/W$ dla beleczek 4x4x16 cm; c) zestawienie wyników badań dla elementów płytowych z gipsu; d) aproksymacje w układzie podwójnie logarytmicznym $\log f_{gtb} - \log \omega'$

Fig. 11.5.a) Variability of building plaster bending tensile strength f_{gtb} in relation to the range of values of $\omega = W/G$ indexes. Comparison of results of many-year own research and analysis of different research papers, for random market supplies of GB-N1 building plaster in the period of 1978 – 2000; b) comparison of test results in relation of $f_{gtb} - \omega' = G/W$ for 4x4x16 cm beams; c) comparison of test results for gypsum plate elements; d) approximations in the double-logarithmic system $\log f_{gtb} - \log \omega'$

Zbiór wyników, jak podano na rysunku 11.5a, można ograniczyć regularnymi obwiedniami skrajnymi (krzywa 1 i 3). W środku geometrycznym ograniczonego pasma wyrysowano krzywą środkową nr 2.

W celu opisanía obwiedni granicznych i krzywej środkowej przeniesiono cały zbiór wyników na rysunek 11.5b, w układzie współrzędnych $f_{gtb} - \omega' = G/W$. Relacje $f_{gtb} = f(\omega')$ opisano funkcjami jak poniżej:

– obwiednia dolna, krzywa nr 1

$$f_{gtb} = 3,6(\omega' - 0,61) \quad [\text{MPa}] \quad (11.24)$$

dla praktycznie stosowanego zakresu $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($\omega = W/G = 1,0 - 0,4$) przyjęto zależność:

$$f_{gtb} = 1,448\omega^{1,930} \quad [\text{MPa}] \quad (11.25)$$

w postaci funkcji potęgowej dla całego zakresu $\omega' = 0,5 - 2,5$

– krzywa środkowa nr 2:

$$f_{gtb} = 4,2(\omega' - 0,547) \quad [\text{MPa}] \quad (11.26)$$

dla praktycznie stosowanego zakresu $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($\omega = W/G = 1,0 - 0,4$):

$$f_{gtb} = 1,648\omega^{1,977} \quad [\text{MPa}] \quad (11.27)$$

w postaci funkcji potęgowej dla całego zakresu $\omega' = 0,5 - 2,5$

– obwiednia górna, krzywa nr 3:

$$f_{gtb} = 4,73(\omega' - 0,507) \quad [\text{MPa}] \quad (11.28)$$

dla początku ważnego praktycznie zakresu $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($\omega = W/G = 1,0 - 0,4$):

$$f_{gtb} = 2,20\omega^{1,827} \quad [\text{MPa}] \quad (11.29)$$

w postaci funkcji potęgowej dla całego zakresu $\omega' = 0,5 - 2,5$

Na rysunku 11.6a zestawiono zbiorczo wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w funkcji wskaźnika $\omega = W/G$, dla dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, uzyskanych z losowych dostaw tego spoiwa gipsowego w okresie lat 1978 – 2000. Podobnie jak na rysunku 11.5 zbiór wyników ograniczono przez obwiednie graniczne nr 1 i nr 3 oraz wykreślono krzywą środkową nr 2, w środku geometrycznym pasma ograniczonego obwiedniami skrajnymi.

Analogicznie jak w odniesieniu do wyników badań na rysunku 11.5 obwiednie graniczne zbioru i krzywą środkową opisano następującymi zależnościami:

– obwiednia dolna (krzywa 1):

$$f_{gc} = 8,33(\omega' - 0,6) \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla } \omega' \geq 1,0 - 2,5 \quad (11.30)$$

$$f_{gc} = 4,05\omega'^{2,67} \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla całego zakresu } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (11.31)$$

– krzywa środkowa:

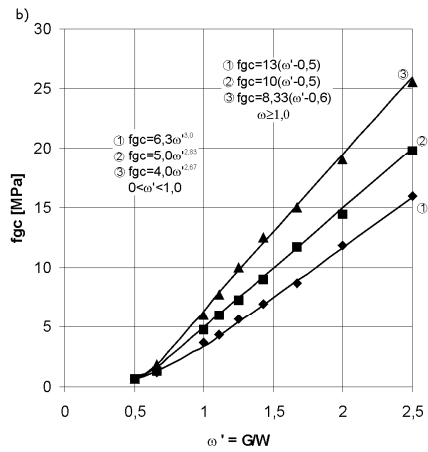
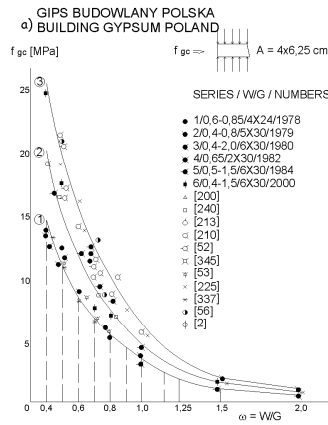
$$f_{gc} = 10,10(\omega' - 0,5) \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla } \omega' \geq 1,0 - 2,5 \quad (11.32)$$

$$f_{gc} = 5,10\omega'^{2,83} \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla całego zakresu } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (11.33)$$

– obwiednia górna:

$$f_{gc} = 13,08(\omega' - 0,5) \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla } \omega' \geq 1,0 - 2,5 \quad (11.34)$$

$$f_{gc} = 6,3\omega'^{3,0} \quad [\text{MPa}] \quad \text{dla całego zakresu } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (11.35)$$



Rys. 11.6a) Zbiorcze zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie f_{gc} dojrzałych zaczynów gipsowych, w odniesieniu do współczynników W/G, dla losowych dostaw gipsu budowlanego GB-N1 z lat 1978 – 2000; b) opis obwiedni granicznych zbiorów wyników jak na rys. 11.6a

Fig.11.6 a) Cumulative comparison of compressive strength f_{gc} test results of hardened gypsum paste, in reference to W/G coefficients, for random supplies of GB-N1 building plaster of the period of 1978 – 2000; b) envelope description of limit sets of results as in Fig. 11.6a

Obwiednie graniczne i krzywe środkowe podane na rysunkach 11.5 i 11.6 obrazują zmienność wytrzymałości finalnych wyrobów (produktów) z gipsu budowlanego, warunkowane zarówno zmiennością losową spoiwa gipsowego w zakładzie produkcji gipsu dla populacji n-dostaw, jak równocześnie losową zmiennością właściwości wyrobów z tytułu odchyłek w precyzji technologii wytwarzania elementów przez poszczególnych wytwórców, wykonanych z jednej i-tej dostawy spoiwa gipsowego.

Analiza zbioru wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (rys. 11.5) prowadzi do następujących stwierdzeń i zależności:

- krzywe $f_{gtb} = f(\omega')$ lepiej opisać jest zależnościami potęgowymi (11.25), (11.27), (11.29);
- szerokość pasma rozrzutu $\Delta f_{gtb} = f_{max} - f_{min} = f(\omega')$ opisuje zależność:

$$\Delta f_{gtb} = 2,20\omega'^{1,827} - 1,448\omega'^{1,930} \quad [\text{MPa}] \quad (11.36)$$

- stosunek równań krzywej środkowej $f_{gtb,m}$ do równań obwiedni dolnej $f_{gtb,min}$ opisać można zależnościami:

$$\frac{f_{gtb,m}}{f_{gtb,min}} = \frac{1,648\omega'^{1,977}}{1,44\omega'^{1,930}} = 1,144\omega'^{0,047} \quad (11.37a)$$

$$\frac{f_{\text{gtb},m}}{f_{\text{gtb},\min}} = \frac{4,2(\omega' - 0,547)}{3,6(\omega' - 0,61)} = 1,166 \cdot \frac{\omega' - 0,547}{\omega' - 0,61} \quad (11.37b)$$

- z relacją odwrotną w stosunku do zależności (11.37a) w postaci związku:

$$k_{\text{gtb}} = \frac{f_{\text{gtb},\min}}{f_{\text{gtb},m}} = 0,873\omega'^{-0,047} \quad (11.37c)$$

można przyjąć jako wzór na częściowy współczynnik bezpieczeństwa po stronie nośności materiału, wynikły z rozrzutu wytrzymałości losowych dostaw spoiwa gipsowego. Dla przedziału zmian wartości $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($W/G = 1,0 - 0,4$) wartość k_{gtb} waha się w zakresie wartości 0,873 – 0,911.

Analiza zbioru wyników oznaczeń wytrzymałości na ściskanie (rys. 11.6) prowadzi do następujących stwierdzeń i zależności:

- krzywe $f_{\text{gc}} = f(\omega')$ dla przedziału parametru $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($W/G = 1,0 - 0,4$) ściślej opisują równania liniowe (11.30), (11.32), (11.34);
- szerokość pasma rozrzutu $\Delta f_{\text{gc}} = f_{\text{max}} - f_{\text{min}} = f(\omega')$ opisuje zależność:

$$\Delta f_{\text{gc}} = 13,08(\omega' - 0,5) - 8,33(\omega' - 0,6) \quad [\text{MPa}] \quad (11.39)$$

- stosunek „dolnych” wartości wytrzymałości losowych opisujących obwiednię dolną do wartości opisanych krzywą środkową wynosi:

$$k_{\text{gc}} = \frac{f_{\text{gc},\min}}{f_{\text{gc},m}} = \frac{8,33(\omega' - 0,6)}{10,10(\omega' - 0,5)} = 0,824 \cdot \frac{\omega' - 0,6}{\omega' - 0,5} \quad (11.40)$$

Wartość współczynnika k_{gc} dla przedziału zmian wskaźnika $\omega' = 1,0 - 2,5$ ($W/G = 1,0 - 0,4$) zmienia się w zakresie wartości 0,66 – 0,78. Parametr k_{gc} można także interpretować jako częściowy współczynnik bezpieczeństwa po stronie nośności materiału, w zakresie wytrzymałości na ściskanie, wynikły z rozrzutu cech wytrzymałościowych losowych dostaw spoiwa gipsowego.

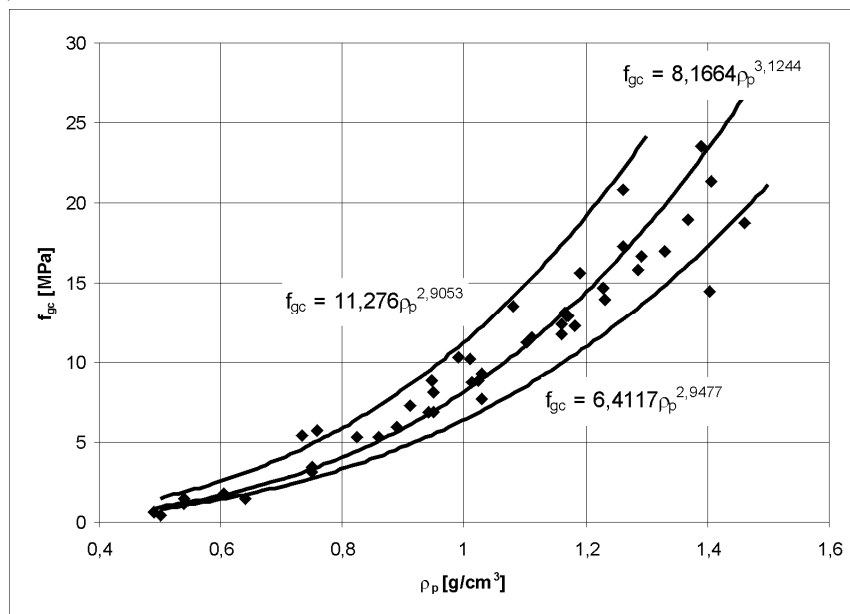
Oba parametry k_{gtb} i k_{gc} , określone zależnościami (11.37c) i (11.40), mogą być wzięte pod uwagę na etapie ustalania normatywnych współczynników bezpieczeństwa gipsu dla stanów granicznych nośności według metod obliczeń elementów i konstrukcji w oparciu o metodę stanów granicznych SG i wytyczne EUROCODE (EC).

11.6. Statystyczna zależność między gęstością pozorną i wytrzymałością na ściskanie stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego

Uzyskany doświadczalnie zbiór wyników podany na rysunku 11.7 wskazuje na występowanie korelacji między gęstością pozorną ρ_p [g/cm^3] a wytrzymałością na ściskanie f_{gc} [MPa], dla dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie suchym. Korelację analizowanych wartości można opisać równaniem:

$$\bar{f}_{gc} = 8,166\rho_p^{3,124} \quad (R^2 = 0,9377) \quad (11.41)$$

Uzyskana zależność (11.41) dla gipsu budowlanego, ze współczynnikiem korelacji $R = 0,968$, jest funkcją podobną do relacji $f_{gc} = K \cdot \rho_p^{3,1}$ ustalonej przez Wichtera [335] dla rosyjskich gipsów wysokowytrzymałościowych (stała $K_1 = 10 - 11$ MPa).



Rys. 11.7. Krzywe korelacyjne zależności $f_{gc} = f(\rho_p)$ dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, w oparciu o zbiory wyników badań własnych i innych autorów z okresu lat 1963–1987: f_{gc} – wytrzymałość gipsu na ściskanie, ρ_p – gęstość pozorną

Fig. 11.7. Correlative curves of relation $f_{gc} = f(\rho_p)$ for hardened GB-N1 building plaster paste, basing on a set of results from own research and other author's research papers of the period of 1963–1987: f_{gc} – gypsum compressive strength, ρ_p – apparent density

Równania opisujące obwiednie graniczne zbioru punktów jak na rysunku 11.7 podano poniżej:

– obwiednia dolna:

$$f_{gc} = 6,412\rho_p^{2,948} \text{ [MPa]} \quad (11.42)$$

– obwiednia górna:

$$f_{gc} = 11,276\rho_p^{2,905} \text{ [MPa]} \quad (11.43)$$

Pasmo rozrzutu wyników $f_{gc,max} - f_{gc,min} = f(\rho_p)$, zawartych między obwiedniami granicznymi, można opisać zależnością:

$$\Delta f_{gc} = f_{gc,max} - f_{gc,min} = 11,276\rho_p^{2,905} - 6,412\rho_p^{2,948} \text{ [MPa]} \quad (11.44)$$

Pasmo rozrzutu wyników Δf_{gc} dla gęstości $\rho_p = 1,2 \text{ g/cm}^3$ wynosi przykładowo:

$$\Delta f_{gc} = 19,14 - 10,97 = 8,16 \text{ MPa}$$

Wartość średnia $f_{gc,m}$ określona dla $\rho_p = 1,2 \text{ g/cm}^3$ wynosi (11.41): 14,43 MPa, czyli pasmo rozrzutu wyników wytrzymałości $f_{gc,m} \pm 0,5 \Delta f_{gc} = 14,43 \pm 4,08 \text{ MPa}$. W skali względnej, przyjmując f_{gcm} za jedność, pasmo rozrzutu wynosi $1 \pm 0,282$.

Wartości minimalne $f_{gc,min}$ w porównaniu do wartości średnich $f_{gc,m}$ opisuje zależność:

$$k_\rho = \frac{f_{gc,min}}{f_{gc,m}} = \frac{6,412\rho_p^{2,948}}{8,166\rho_p^{3,124}} = 0,785\rho_p^{-0,176} \quad (11.45)$$

Współczynniki k_ρ , dla gipsu w przedziale gęstości pozornej $\rho_p = 0,6 - 1,3 \text{ g/cm}^3$, wahają się w zakresie wartości $k_\rho = 0,858 - 0,750$

Określona statystycznie zależność (11.41) może stanowić podstawę do oszacowań wytrzymałości średnich na ściskanie \bar{f}_{gc} dojrzałych próbek (wyrobów) zaczynów z gipsu budowlanego, metodą nieniszczącą, tylko przez pomiar gęstości pozornej ρ_p . Zależność (11.41) jest ważna dla wyrobów z gipsu budowlanego GB-N1 (z surowców naturalnych, z pieców obrotowych PO). Regularność statystyczna zależności $f_{gc} - \rho_c$ wskazuje, że podobne relacje można wyznaczyć dla innych rodzajów spoiw gipsowych, produkowanych według różnych technologii.

Zależność (11.42) opisująca obwiednię dolną i zależność (11.45) opisująca relacje wartości minimalnych – w stosunku do wartości średnich – stanowić mogą podstawę do oszacowań wytrzymałości minimalnych na podstawie pomiarów poligonowych. Możliwe jest opracowanie standardowej metodyki statystycznych obliczeń, ze współczynnikami korekcyjnymi zależnymi funkcyjnie od gęstości pozornej gipsu.

12. WYTRZYMAŁOŚĆ STWARDNIAŁYCH ZACZYNÓW Z GIPSU BUDOWLANEGO W STANIE WILGOTNYM

12.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w stanie nawilgoconym

W niniejszym rozdziale podane są rezultaty „bliźniaczych”, statystycznych serii badań prób, wykonanych z tego samego gipsu budowlanego nr 2-02, dla stanów nawilgoconych. Podane poniżej zależności funkcyjne dotyczą relacji: wytrzymałość średnia – wskaźnik W/G.

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie f_{gt}^w , stwardniałych prób (wyrobów) z zaczynów gipsowych w stanie pełnego nasycenia wodą, podano na rysunku 12.1.

Wykresy zależności $f_{gt}^w = f(W/G)$ stanowią monotonicznie opadające krzywe, w układzie współrzędnych $f_{gt}^w - W/G$ (rys. 12.1a). Zestawienie wyników dla trzech podstawowych metod badawczych obrazuje różnice wartości wytrzymałości na rozciąganie, uzyskiwanych w poszczególnych metodach (jak wykazano w prezentacji statystycznych serii badań w p. 9).

Krzywoliniowe zależności $f_{gt}^w = f(W/G)$, podane na rysunku 12.1a, po zmianie współrzędnej niezależnej na $\omega' = G/W$, stają się zależnościami $f_{gt}^w = f(\omega')$, które można opisywać dwiema prostymi, z progiem rozdziału w punkcie $G/W = 1,0$, lub jedną krzywą potęgową dla całego przedziału $G/W = 0,5 - 2,5$, jak poniżej:

– metoda badań przez zginanie beleczek:

$$f_{gtb}^w = 1,46(\omega' - 0,65) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.1)$$

$$f_{gtb}^w = 0,465\omega'^{2,118} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (12.2)$$

– metoda rozłupywania walców:

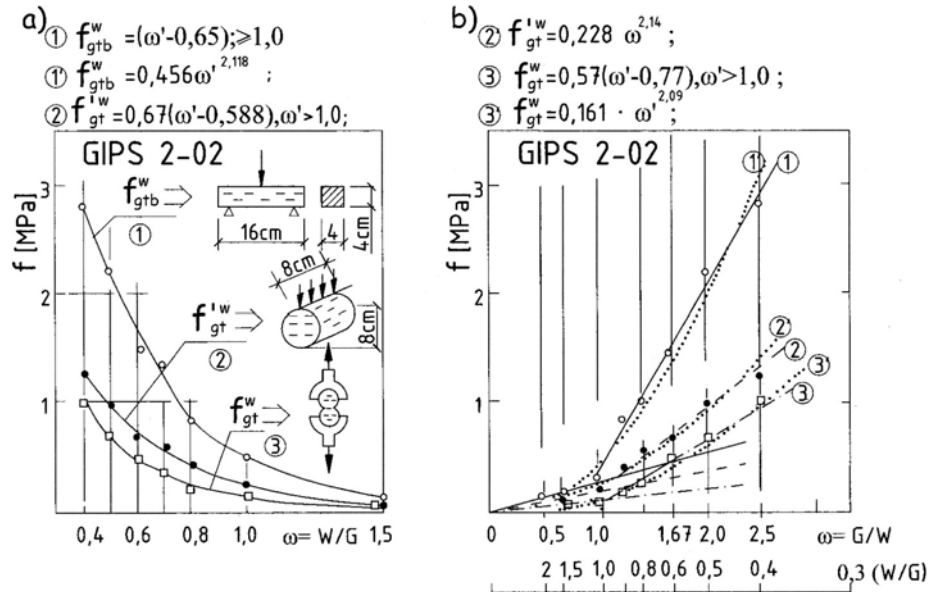
$$f_{gt}^w = 0,67(\omega' - 0,588) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.2)$$

$$f_{gt}^w = 0,228\omega'^{2,14} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (12.3)$$

– metoda rozciągania „ósemek”:

$$f_{gt}^w = 0,57(\omega' - 0,77) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.4)$$

$$f_{gt}^w = 0,161\omega'^{2,09} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (12.5)$$

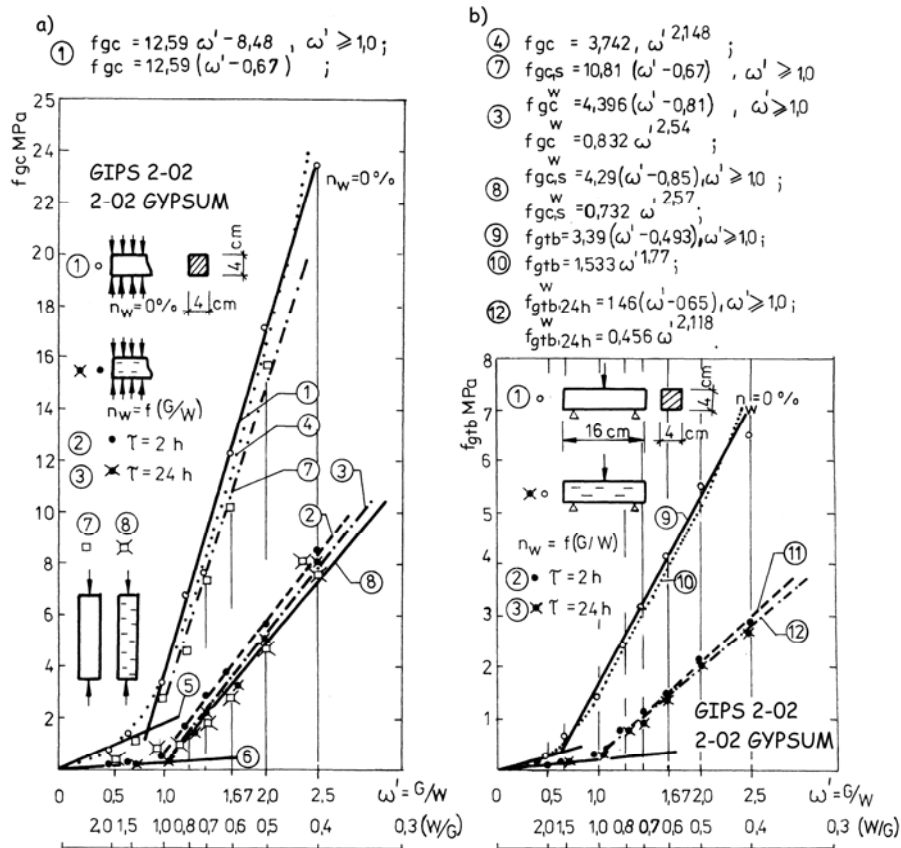


Rys. 12.1. Wytrzymałości średnie na rozciąganie dla serii prób stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie pełnego nasycenia wodą: a) w zależności od W/G, określane w metodach badań: 1) zginania beleczek 4 x 4 x 16 cm, 2) rozłupywania walców d x h = 8 x 8 cm, 3) osiowe rozciąganie „ósemek”; b) identyczne krzywe zależności w funkcji wskaźnika $\omega' = G / W$

Fig. 12.1. Mean tensile strengths for a series of samples of hardened fully-humid building plaster paste: a) depending on W/G, determined in test methods: 1) bending strength of 4 x 4 x 16 cm beams, 2) cylinder splitting d x h = 8 x 8 cm, 3) 8-shaped sample axial tensile strength

12.2. Wytrzymałość na ściskanie w stanie nawilgoconym

Na rysunku 12.2 zestawiono równocześnie: wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i na zginanie dla próbek w stanie suchym i w stanie pełnego nawilgocenia wodą, z moczeniem próbek przez okres $\tau = 2$ h oraz przez okres $\tau = 24$ h.



Rys. 12.2. Wyniki badań wytrzymałości próbek dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, dla losowej dostawy spoiwa gipsowego nr 2-02, w funkcji wskaźnika gipsowo-wodnego $\omega' = G/W$: a) wytrzymałości na ściskanie f_{gc} w stanie suchym, b) wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} w stanie suchym, f_{gc}^w i f_{gtb}^w wytrzymałości w stanie pełnego nawilgocenia wodą

Fig. 12.2. Strength test results of samples of hardened GB-N1 building plaster paste, for random supply of gypsum plaster No 2-02, in the function of gypsum-water index $\omega' = G/W$: a) compressive strength f_{gc} in dry state, b) bending tensile strengths f_{gtb} in dry state, f_{gc}^w and f_{gtb}^w strengths in fully-humid state

Układy punktów pomiarowych: wytrzymałość zaczynów gipsowych f_g – wskaźnik G/W zarówno dla serii próbek suchych, jak i dla serii próbek nawilgoconych, mają przebieg podobny do zależności dla betonów cementowych $f_{cc} = f(C/W)$ i można je opisać zależnościami podobnymi do wzoru Bolomey'a, aproksymując układ punktów pomiarowych do dwóch prostych. Ustalono, że dla zaczynów z gipsu budowlanego układ punktów pomiarowych $f_g - G/W$ – dla obu stanów: suchego i nawilgoconego – można opisać bądź równaniami dwóch prostych, ze strefą rozdziału $\omega' = 1,0$, lub jedną funkcją potęgową dla całego zakresu zmian wskaźników $\omega' = G/W = 0,5 - 2,5$.

Funkcje opisujące wytrzymałość na ściskanie:

- w stanie suchym, beleczki na płask, smukłość próbki $\lambda = \frac{b}{h} = 1,0$:

$$f_{gc} = 12,59(\omega' - 0,67) \text{ [MPa]}, \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (11.2),$$

$$f_{gc} = 3,742\omega'^{2,148} \text{ [MPa]}, \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (11.3)$$

- w stanie suchym beleczki pionowo $\lambda = \frac{b}{h} = 4,0$ (wytrzymałość słupowa):

$$f_{gc} = 10,81(\omega' - 0,67) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.7)$$

- w stanie pełnego nawilgocenia, próbki na płask, smukłość $\lambda = \frac{b}{h} = 1,0$, czas nawilgocenie $\tau = 24 \text{ h}$:

$$f_{gc}^w = 4,396(\omega' - 0,81) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.8)$$

$$f_{gc}^w = 0,832\omega'^{2,54} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (12.9)$$

- w stanie pełnego nawilgocenia, próbki pionowo, smukłość $\lambda = \frac{b}{h} = 4,0$, czas nawilgocenie $\tau = 24 \text{ h}$:

$$f_{gc,s}^w = 4,29(\omega' - 0,85) \text{ [MPa]} \text{ dla przedziału } \omega' \geq 1,0 \quad (12.10)$$

$$f_{gc,s}^w = 0,732\omega'^{2,57} \text{ [MPa]} \text{ dla całego przedziału } \omega' = 0,5 - 2,5 \quad (12.11)$$

Wpływ smukłości na wytrzymałość na ściskanie porównano dla próbek o smukłości $\lambda = 4,0$ i $\lambda = 1,0$, można opisać współczynnikiem α_{10} równym:

- stan suchy:

$$\alpha_{10} = \frac{f_{gc,s}}{f_{gc}} = \frac{10,81(\omega' - 0,67)}{12,59(\omega' - 0,67)} = 0,858 \quad (12.12)$$

- stan wilgotny:

$$\alpha_{11} = \frac{f_{gc,s}^w}{f_{gc}^w} = \frac{0,732\omega'^{2,57}}{0,832\omega'^{2,54}} = 0,88 \omega'^{0,03} \approx 0,88 \quad (12.13)$$

W oparciu o wykazane zależności funkcyjne można opisać funkcyjnie współczynnik rozmiękania gipsu, dla normowego czasu moczenia $\tau = 24 \text{ h}$, w postaci relacji:

- współczynnik rozmiękania w zakresie wytrzymałości na ściskanie:

$$K_{gc} = \frac{f_{gc}^w}{f_{gc}^w} = \frac{0,832\omega'^{2,57}}{3,742\omega'^{2,148}} = 0,222\omega'^{0,422} \quad (12.14)$$

- współczynnik rozmiękania w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu:

$$K_{gtb} = \frac{f_{gtb}^w}{f_{gtb}^w} = \frac{0,456\omega'^{2,118}}{1,533\omega'^{1,77}} = 0,297\omega'^{0,348} \quad (12.15)$$

Wartości współczynnika rozmiękania obliczone według zależności (12.14) i (12.15) podano w tabeli 12.1.

Tabela 12.1

Table 12.1

Wartości współczynników rozmiękania, określone na podstawie funkcyjnych zależności (12.14) i (12.15). Gips budowlany GB-N1, piece obrotowe PO
 Values of softening coefficients, determined on the basis of relations (12.14) and (12.15). GB-N1 building plaster, PO rotary furnaces

Współczynnik rozmiękania (spadek wytrzymałości) gipsów dojrzałych Softening coefficient (drop of strength) of hardened gypsum	Wskaźnik W/G (G/W) W/G (G/W) index							
	0,4 (2,5)	0,5 (2,0)	0,6 (1,67)	0,7 (1,43)	0,8 (1,25)	1,0 (1,0)	1,5 (0,67)	2,0 (0,5)
Ściskanie K_{gc} Compressive strength K_{gc}	0,327	0,297	0,275	0,258	0,244	0,222	0,187	0,166
Zginanie K_{gtb} Bending strength K_{gtb}	0,409	0,378	0,355	0,336	0,321	0,297	0,258	0,233

Podsumowując uzyskane związki analityczne (12.4) i (12.5) należy stwierdzić, że opis współczynników rozmakania próbek (wyrobów) z dojrzałego w funkcji wskaźnika W/G gipsu stanowi nowość w literaturze przedmiotu. Znajomość tych relacji pozwala na określenie relacji pomiędzy wytrzymałością w stanie suchym i nawilgoconym, czyli na określenie spadków wytrzymałości w wyniku nawilgocenia. Zależności określone dla gipsu budowlanego mogą mieć praktyczne znaczenie do projektowania wytrzymałości elementów z gipsu i do określania współczynników bezpieczeństwa w stanach „dolnych”, dla elementów w stanie pełnego nawilgocenia.

13. WPŁYW STABILNYCH TEMPERATUR PRAŻENIA W NOWOCZESNYCH PIECACH OB- ROTOWYCH I STEROWANEGO PROCESU MIE- LENIA NA WŁAŚCIWOŚCI GIPSU BUDOWLANEGO

13.1. Technologia stabilnego prażenia gipsu w piecach obrotowych przeponowych

Opis technologii prażenia gipsu w piecach obrotowych przeponowych, opalanych gazem, z automatyką sterowania temperatur we wszystkich fragmentach pieca na jego długości, podano w p. 5.2. Stabilne warunki termiczne prażenia są w tej technologii zbliżone do starszej technologii prażarek kotłowych PK.

Założenia technologii mielenia gipsu z użyciem podwójnych cylindrów obrotowych opisuje De Miecheli [51], podając doświadczenia francuskie w tym zakresie oraz Zisselmar [362], podając niemieckie osiągnięcia techniczne w tej technologii.

Opis wdrożenia krajowego nowoczesnych pieców obrotowych przeponowych POP i technologii mielenia w młynach walcowych zawarty jest w pracach Nowak [227, 228].

Wobec braku danych bibliograficznych o właściwościach spoiw gipsowych uzyskiwanych w tej technologii produkcji przemysłowej, tym bardziej z badań wieloletnich, autor przeprowadził badania własne tego spoiwa, dokonując dla celów badawczych zakupów gipsu ze świeżych dostaw rynkowych. Sondażowe wyniki badań kontrolnych udostępnił autorowi producent gipsu.

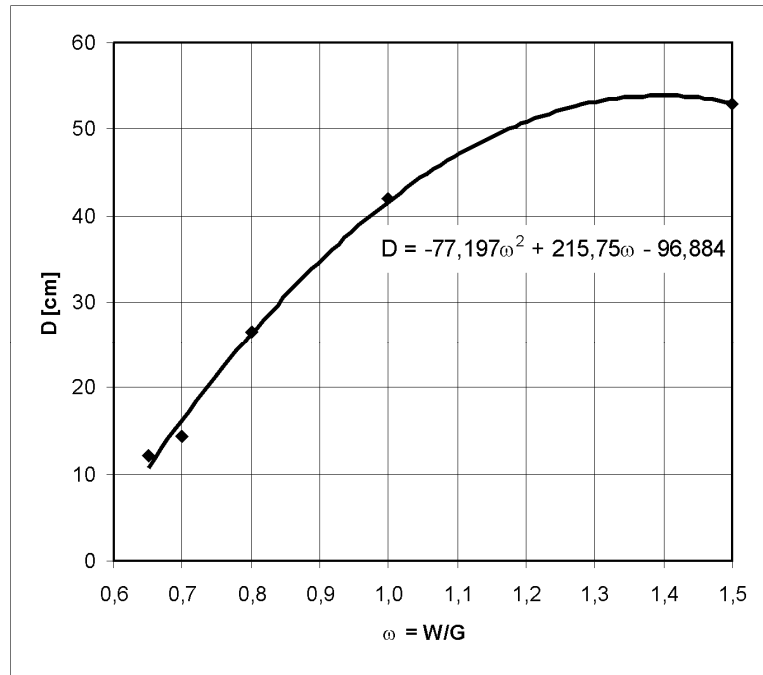
Z uwagi na przeprowadzany jeszcze proces optymalizacji produkcji zamieszczone w pracy wyniki badań nie powinny być traktowane jako: ani ujawnienie tajemnic produkcji, ani jako reklama wyrobów, a jedynie jako wstępna ocena zasadniczych różnic właściwości produkowanego gipsu budowlanego, na bazie surowców naturalnych, który jako nowe spoiwo jest już i będzie dominowało na rynku dostaw spoiw gipsowych. Fakt ten może wywołać zmiany w zakresie szczegółowej normalizacji właściwości spoiwa, założeń technologii dla wykonawstwa budowlanego oraz zmian w klasyfikacji wyrobów, w aspekcie jednorodności cech i gwarantowanych wytrzymałości. Gips budowlany wytwarzany według tej technologii określany jest w niniejszej pracy symbolem GB-N3.

13.2. Charakterystyka wodożądności gipsu budowlanego GB-N3

Rozpływ zaczynów gipsowych $D = f(\omega = W/G)$, mierzony w aparacie Southarda, można opisać funkcją wielomianu drugiego stopnia, typu:

$$D = -77,197\omega^2 + 215,75\omega - 96,884 \quad (13.1)$$

ze współczynnikiem korelacji $R^2 = 0,9952$.



Rys. 13.1. Rozpływ zaczynów z gipsu budowlanego GB-N3 w funkcji wskaźnika W/G, dla rynkowej dostawy spoiwa gipsowego, styczeń 2004

Fig. 13.1. Spreading of GB-N3 building plaster paste in the function of W/G index, for market supply of gypsum plaster, January 2004

Charakterystyka rozptywu gipsu budowlanego GB-N3, podana na rysunku 13.1, jakościowo i ilościowo jest w zasadzie podobna do analogicznej charakterystyki $D = f(W/G)$ dla gipsu budowlanego GB-N1, produkowanego według starej technologii pieców obrotowych opalanych węglem (rys. 8.4a).

Próby gipsu, z wcześniejszego okresu produkcji (2 marca 2003 r.), cechowały się zdecydowanie wyższym rozplywem, przykładowo: $D = 23,9$ cm dla $W/G = 0,6$ i $D = 36,4$ cm dla $W/G = 0,7$. Widać więc uległy istotnym zmianom parametry technologiczne przemianu i że aktualny stan z początku 2004 r. zbliża się do charakterystyki wodozadržności jak dla gipsu według starej technologii.

Normowy rozplyw $D = 18$ cm uzyskuje się dla wartości $\omega = W/G = 0,72$. Taki poziom konsystencji zaczynów gipsowych wymagany jest do produkcji płyt gipsowo-kartonowych.

13.3. Szybkość wiązania gipsu budowlanego GB-N3

Krzywe zależności czasu początku i końca wiązania, dla gipsu budowlanego GB-N3, podano na rysunku 13.2a w funkcji wskaźnika $\omega = W/G$ i na rysunku 13.2b w funkcji wskaźnika $\omega' = G/W$.

Czas wiązania można opisać funkcjami typu wielomianu drugiego stopnia (rys. 13.2b):

– początek wiązania:

$$t_{pw} = -2,8161\omega'^2 - 2,5832\omega' + 8,4176 \quad (13.2)$$

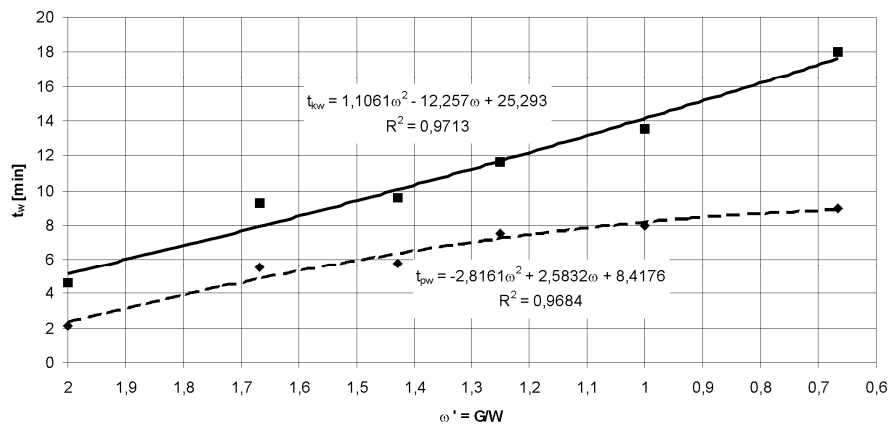
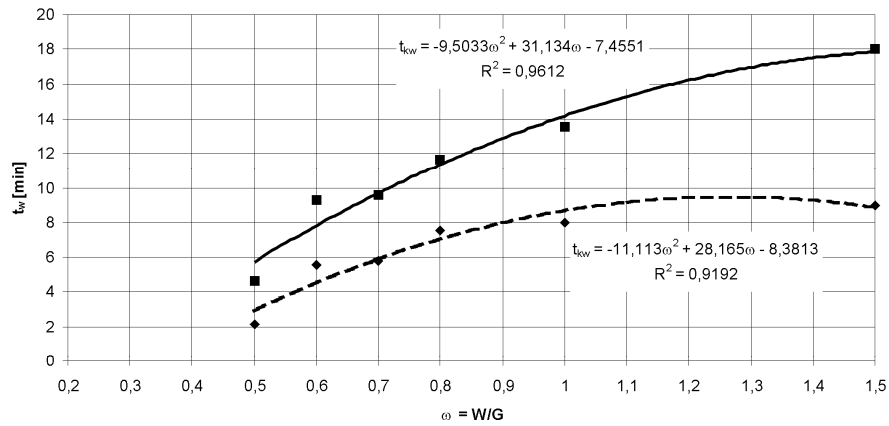
ze współczynnikiem korelacji $R^2 = 0,9684$ ($R = 0,984$),

– koniec wiązania:

$$t_{kw} = -1,1061\omega'^2 - 12,257\omega' + 25,293 \quad (13.3)$$

ze współczynnikiem korelacji $R^2 = 0,9713$ ($R = 0,985$).

Przedstawiona metodologia wskazuje, że możliwy i oczekiwany jest przekaz charakterystyk $t_{pw} = f(W/G)$ i $t_{kw} = f(W/G)$ dla spoiw gipsowych, opracowanych wręcz w relacjach statystycznych.



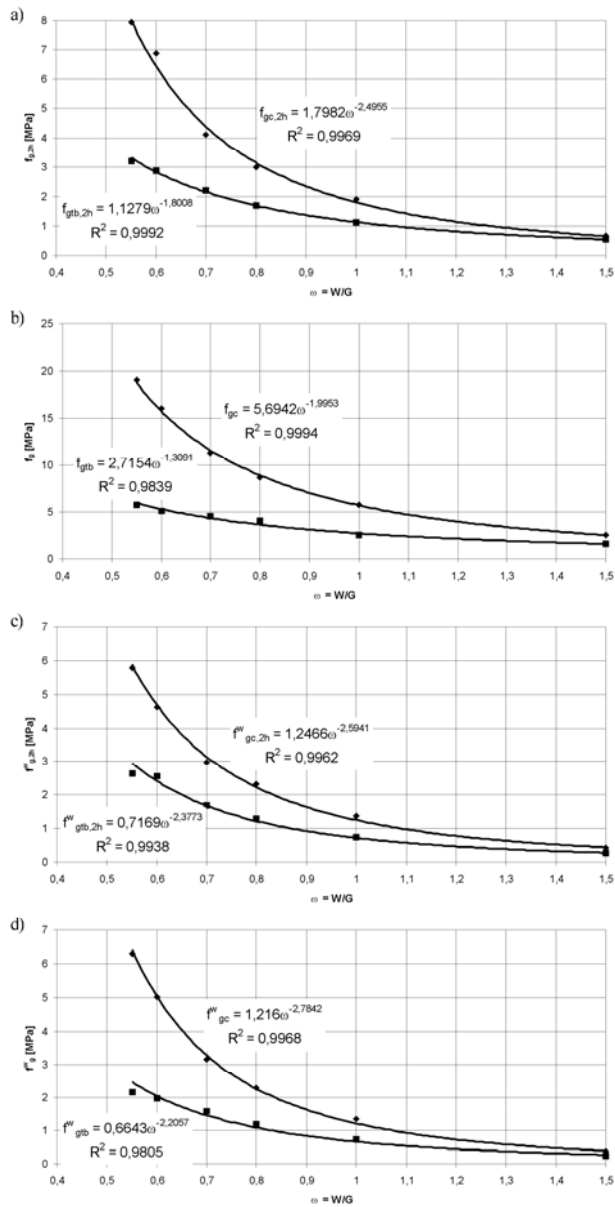
Rys. 13.2. Funkcyjny opis czasu początku t_{pw} i końca t_{kw} wiązania gipsu budowlanego GB-N3, dla losowej próby dostaw rynkowych 13.01.2004 r.

Fig. 13.2. Functional description of the time of setting start t_{pw} and setting end t_{kw} of GB-N3 building plaster, for random sample of market supplies 13.01.2004

13.4. Charakterystyka wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsu budowlanego GB-N3 w zależności od wskaźnika W/G

Na rysunku 13.3 zestawiono zbiorczo statystyczne serie badań:

- na rysunku 13.3a wytrzymałości normowe na ściskanie i zginanie po 2 h od zaformowania $f_{gc,2h} = f(W/G)$ i $f_{gtb,2h} = f(W/G)$,



Rys. 13.3. Charakterystyki funkcyjnych zależności opisujących wytrzymałości na ściskanie f_{gc} i na zginanie f_{gtb} , dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-3, w funkcji wskaźnika wodnogipsowego W/G: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, f_{gtb} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, $f_{g,2h}$ – wytrzymałość po 2 h dojrzwania, f_g^w – wytrzymałość w stanie nawilgoconym. Losowa próba gipsu z dnia 13.01.2004 r.

Fig. 13.3. Characteristics of functional relations describing compressive strengths f_{gc} and bending strengths f_{gtb} , for hardened GB-N3 building plaster paste, in the function of hydrogypsum W/G index: f_{gc} – compressive strength, f_{gtb} – bending tensile strength, $f_{g,2h}$ – strength after 2h of hardening, f_g^w – strength in humid state. Random gypsum sample of 13.01.2004

- na rysunku 13.3b wytrzymałości jak wyżej w stanie suchym,
- na rysunku 13.3c wytrzymałości jak wyżej po 2 h moczenia w wodzie,
- na rysunku 13.3d wytrzymałości jak wyżej po 24 h moczenia w wodzie.

Spoiwo gipsowe w tej serii badań pochodzi z losowych dostaw rynkowych w handlu detalicznym, z datą produkcji 13.01.2004 r.

Krzywe funkcyjnych zależności dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N3 od wskaźnika W/G, w postaci funkcji $f_g = f(W/G)$, są jakościowo i ilościowo podobne do analogicznych charakterystyk podanych w rozdziałach 10 i 11 dla losowej próby gipsu budowlanego nr 2-02 z 1980 r., produkowanego według starej technologii pieców obrotowych (PO) opalanych węglem.

Tabela 13.1

Table 13.1

Zestawienie funkcyjnych zależności opisujących wytrzymałości zaczynów z gipsu budowlanego GB-N3 od wskaźnika $\omega' = G/W$

Comparison of functional relations describing strengths of GB-N3 building plaster paste from index $\omega' = G/W$

Lp. No	Opis wytrzymałości Strength description	Wytrzymałość norma- wa 2 h Standard strength 2 h	Stan suchy Dry state	Stan pełnego nasyce- nia wodą (24 h) Fully humid state (24 h)
1	2	3	4	5
1.	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	$f_{gc,2h} = 1,246\omega'^{2,5941}$ $R^2 = 0,9962$ (13.4)	$f_{gc} = 5,6942\omega'^{1,9953}$ $R^2 = 0,9994$ (13.6)	$f_{gc}^w = 1,216\omega'^{2,7842}$ $R^2 = 0,9968$ (13.8)
2.	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu Bending tensile strength	$f_{gtb,2h} = 0,7169\omega'^{2,3773}$ $R^2 = 0,9938$ (13.5)	$f_{gtb} = 2,7154\omega'^{1,3091}$ $R^2 = 0,9839$ (13.7)	$f_{gtb}^w = 0,6643\omega'^{2,2057}$ $R^2 = 0,9805$ (13.9)

W tabeli 13.2 podano wyniki badań kontrolnych, w bieżącej produkcji przemysłowej gipsu budowlanego GB-N3 (w piecach obrotowych przeponowych POP i mielonych w młynach walcowych z separatorem) z wykorzystaniem surowców z jednorodnych złóż gipsu gruboziarnistego z rejonu doliny rzeki Nidy, dla prób wysuszonych do stałej masy.

Wyniki badań kontrolnych wytrzymałości gipsu podano w tabeli 13.2, ich statystyczne opracowania oparte są na relatywnie małym podzbiorze prób o liczebności 15 szt., pobranych z okresu produkcji jednego miesiąca. Celowe jest opracowanie statystyczne wyników zakładowych badań kontrolnych z dłuższego okresu produkcji, na przykład z półrocza lub z jednego roku.

Tabela 13.2

Table 13.2

Wyniki zakładowych badań gipsu budowlanego typu GB-N3 w okresie jednego miesiąca 2004 r.
Results of plant GB-N3 building plaster tests during one month of 2004

Lp. No	Właściwość gipsu, Cecha zbioru Gypsum property, Feature of set	Oznaczenie Denotation	Jednostka Unit	Wartość liczbową Numerical value
1	2	3	4	5
1.	Wytrzymałość na zginanie Bending strength	f_{gtb}		
1.1.	Wymagania normowe Standard requirements		MPa	$\geq 4,0$
1.2.	Wymagania zakładowe Plant requirements		MPa	$\geq 4,0$
1.3.	Liczebność podzbioru Subset size	n	szt.	15
1.4.	Wartość średnia niszcząca Mean damaging value	\bar{X}, \bar{f}_{gtb}	MPa	4,16
1.5.	Dolna granica przedziału ufności Lower limit of trust range	$\bar{X} - 9\bar{X}$	MPa	2,59
1.6.	Górna granica przedziału ufności Upper limit of trust range	$\bar{X} + 9\bar{X}$	MPa	5,74
1.7.	Wartość minimalna w zbiorze Minimal value in set	$\min f_{gtb}$	MPa	3,40
1.8.	Wartość maksymalna w zbiorze Maximal value in set	$\max f_{gtb}$	MPa	5,11
1.9.	Średnie odchylenie standardowe Mean standard deviation	s	MPa	0,52
1.10.	Współczynnik zmienności Variability coefficient	v	%	12,59
1.11.	Wytrzymałość gwarantowana Guaranteed strength	f_{gtb}^G	MPa	3,30
2.	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	f_{gc}		
2.1.	Wymagania normowe Standard requirements		MPa	$\geq 6,0$
2.2.	Wymagania zakładowe Plant requirements		MPa	$\geq 6,0$
2.3.	Liczebność podzbioru Subset size	n	szt.	15
2.4.	Wartość średnia niszcząca Mean damaging value	\bar{X}, \bar{f}_{gc}	MPa	12,30
2.5.	Dolna granica przedziału ufności Lower limit of trust range	$\bar{X} - 9\bar{X}$	MPa	4,83
2.6.	Górna granica przedziału ufności Upper limit of trust range	$\bar{X} + 9\bar{X}$	MPa	19,77

Tabela 13.2
Table 13.2

1	2	3	4	5
2.7.	Wartość minimalna w zbiorze Minimal value in set	$\min f_{gc}$	MPa	9,74
2.8.	Wartość maksymalna w zbiorze Maximal value in set	$\max f_{gc}$	MPa	18,04
2.9.	Średnie odchylenie standardowe Mean standard deviation	s	MPa	2,49
2.10.	Współczynnik zmienności Variability coefficient	v	%	20,25
2.11.	Wytrzymałość gwarantowana Guaranteed strength	f_{gc}^G	MPa	8,19
3.	Stosunek wytrzymałości $\bar{f}_{gtb,2h} / \bar{f}_{gtb}$ Strength ratio $\bar{f}_{gtb,2h} / \bar{f}_{gtb}$	α_4		0,492
4.	Stosunek wytrzymałości $\bar{f}_{gc,2h} / \bar{f}_{gc}$ Strength ratio $\bar{f}_{gc,2h} / \bar{f}_{gc}$	α_3		0,369
5.	Stosunek wytrzymałości $\bar{f}_{gtb,2h} / \bar{f}_{gc}$ Strength ratio $\bar{f}_{gtb,2h} / \bar{f}_{gc}$	α_{12}		0,451
6.	Stosunek wytrzymałości $\bar{f}_{gtb} / \bar{f}_{gc}$ Strength ratio $\bar{f}_{gtb} / \bar{f}_{gc}$	α_9		0,338

Na podkreślenie zasługuje fakt, że dobrane przez autora zależności $f_g = f(\omega)$, jak podano na rysunku 13.3 i w tabeli 13.1 dla i-tej próby losowych dostaw rynkowych gipsu GB-N3, są zgodne z wynikami zakładowych badań kontrolnych podanych w tabeli 13.2. Przykładowo dla zaczynów gipsowych o średniej wartości $\bar{\omega} = W/G = 0,66$ w serii badań zakładowych, obliczone analitycznie (na podstawie zależności podanych na rysunku 13.3 i tabeli 13.1) wartości wytrzymałości w stanie suchym wynoszą: na ściskanie $f_{gc} = 13,04$ MPa (wartość średnia w badaniach zakładowych wynosi $\bar{f}_{gc} = 12,30$ MPa), na rozciąganie przy zginaniu $f_{gtb} = 4,687$ MPa (w badaniach zakładowych $\bar{f}_{gtb} = 4,54$ MPa). Występuje duża zgodność porównywanych oznaczeń. Na drodze współpracy dwustronnej, po wykonaniu przez autora n serii badań $f_g = f(\omega)$, jak podano na rysunku 13.3, dla n losowych dostaw gipsu GB-N3 i równocześnie przy wykorzystaniu wielkoseryjnych badań zakładowych gipsu dla konsystencji normowej (czyli wartości w przedziale zmian $\omega = 0,643 - 0,676$, jak dla serii badań podanej w tabeli 5.11 i tabeli 13.2) można opracować reprezentatywne statystyczne relacje $f_g = f(\omega)$, z przedziałem tolerancji $\pm s$,
lub $\pm 1,65s$.

14. ANALIZA PORÓWNAWCZA WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNYCH, FIZYCZNYCH I WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH GIPSÓW SYNTETYCZNYCH I NATURALNYCH. BADANIA WŁASNE

14.1. Znaczenie gipsów syntetycznych w gospodarce materiałowej

Gips syntetyczny $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, uzyskiwany metodą przemysłową na drodze odsiarczania spalin (Kurdowski [163], Grzeszczyk [80]) z węgla kamiennego lub brunatnego, w instalacji opartej na technologii mokrej, przy spełnieniu warunku zawartości $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ powyżej 95%, swymi właściwościami jest zbliżony do właściwości gipsu naturalnego, co dokumentują badania: Osieckiej [239, 240], Grzeszczyk [81], Olejarza i Pietronia [235], Scholze [298], Mallona [188]. Stwierdzono małe zawartości pierwiastków radioaktywnych (Mikoś [205], Beckert [14]). Od roku 1983 odnotowuje się stale rosnące wytwarzanie gipsu syntetycznego REA do produkcji płyt gipsowo-kartonowych, mieszanek tynkarskich i prefabrykatów, co dokumentują liczne prace, między innymi autorów: Osieckiej [242, 243], Mikosia [205], Olejarza i Pabisa [234], Nulmana [231], Pietronia z zespołem [268], Grzeszczyk [80]. Przewodzącą pozycję mają Niemcy, którzy w 2000 r. wyprodukowali 6 280 000 ton gipsu REA (Hamm [86], Wirsching [350], Mallon [188], Hurbanic [92]). Również w Polsce od 1994 roku (uruchomienie pierwszej instalacji odsiarczania „czystego” gipsu w Bełchatowie) wzrasta sukcesywnie produkcja gipsu syntetycznego. W 2000 roku wyprodukowano łącznie 760 000 ton gipsu syntetycznego, a potencjał produkcyjny rocznego wydobycia wynosi 1 540 000 ton (Pichniarczyk [264]), plany dalekie wynoszą 2 500 000 ton (Olejarz, Pabis [234]), a plany bliższe 1 500 000 ton. W perspektywie 2003 roku łączne zużycie materiałów gipsowych w Polsce było szacowane na poziomie 3 300 000 ton, z deficytem wydobycia krajowego i importem gipsu z Niemiec, na poziomie 100 000 ton rocznie, głównie dla potrzeb cementowni.

Wobec olbrzymich zasobów złóż gipsów naturalnych w Polsce i równocześnie nie w pełni wykorzystanych możliwości w budowywania nowych instalacji odsiarczania spalin należy wnosić, że musi nastąpić większa aktywność inwestycji krajowych dla dobra ekologii i ekonomiki oraz dla wysycenia zapotrzebowań surowcowych dla dyna-

micznie rozwijającej się produkcji suchych mieszanek gipsowych i płyt gipsowo-kartonowych.

Wobec rosnącego znaczenia gipsów syntetycznych występuje celowość opracowania dla tych gipsów dokładnych analitycznych zależności, opisujących zmienność cech fizycznych i mechanicznych w funkcji podstawowych parametrów technologicznych.

14.2. Analiza porównawcza właściwości chemicznych oraz składu mineralnego gipsów syntetycznych i naturalnych

Gipsy z odsiarczania spalin w technologii mokrej wykazują znaczny stopień czystości, który w większości przypadków jest wyraźnie lepszy niż dla gipsu naturalnego (Nowakowski [230], Hamm [86]). Bogate doświadczenia badawcze i wdrożeniowe w Niemczech pozwoliły na ustalenie wymogów dla gipsów syntetycznych (Huber [91], Knauf [138]). Standardy niemieckie zostały przyjęte przez ośrodki badawcze i naukowe w Polsce (Skrzypek [308], Olejarz, Pietroń [235], Mikoś [205]). Ogólnie parametry składu chemicznego dla gipsów syntetycznych są zbliżone do wymagań dla gipsu naturalnego (tab. 14.1). Gipsy syntetyczne z odsiarczania spalin z węgla kamiennego są powszechnie uznawane jako surowiec ekwiwalentny z gipsami naturalnymi, z wykorzystaniem do produkcji suchych mieszanek, płyt G-K i prefabrykatów gipsowych, co dokumentują prace autorów: Mallon [188], Hamm [86], Olejarz i Pietroń [235], Galos [68], Beckert [14].

W przypadku gipsu syntetycznego z z odsiarczania spalin z węgla brunatnego podnosi się problem zawartości sadzy i pyłu węglowego (Pietroń z zespołem [268]), który można dobitnie ograniczyć przez zastosowanie górnego przebiegu oczyszczania (Hamm [86]), przez co uzyskuje się: redukcję Al_2O_3 0,18%/0,02%, redukcję Fe_2O_3 0,18%/0,04%, zyskuje się na stopniu białości 33%/65%, obniża się zawartość sadzy 0,29%/0,03%, obniża się też zawartość składnika nieaktywnego 1,49%/0,04%.

Gipsy syntetyczne z odsiarczania spalin z węgla brunatnego – z uwagi na wysoką zawartość chlorków – są wielokrotnie przemywane w końcowym etapie otrzymywania surowca syntetycznego, dzięki czemu uzyskuje się produkt o zawartości chlorków Cl⁻ w granicach 20–50 ppm (0,002-0,005%). Procesy te powodują osadzanie się na powierzchni kryształów gipsu syntetycznego zanieczyszczeń związkami Fe, Al, i Si. Problemem także jest osadzanie się w surowcu koksików – co w całości wpływa na obniżenie stopnia białości gipsów syntetycznych z węgla brunatnego (Skrzypek [308]). Z tych względów gipsy syntetyczne z węgla brunatnego są kierowane w Niemczech do specjalnych zastosowań: poprzez brykietyzację, do produkcji gipsu odmiany α w autoklawach i utylizację do wylewek podłogowych (Mallon [188]). Gips syntetyczny GS-B z odsiarczania spalin jednej z elektrowni Polsce, spalającej węgiel brunatny, spełnia na tyle reżimy techniczne składu chemicznego, że na spoiwach z tego surowca produkowane są z powodzeniem płyty G-K oraz były produkowane prefabrykaty ścienne dla budownictwa mieszkaniowego (Skrzypek [299], Pietroń [260]).

Tabela 14.1

Table 14.1

Wymagania kwalifikujące jakość dla gipsów syntetycznych nieprażonych [137, 350] i przykładowe wyniki badań gipsów syntetycznych z różnych wytwórni

Requirements qualifying the quality of non-roasted synthetic gypsum [137, 350] and exemplary test results of synthetic gypsum from different production plants

Lp. No	Składniki Constituents	Zawartość w % masowych – Content in mass %					
		Wymagania niemieckie [137] [350] German requirements [137] [350]	Gips syntetyczny (węgiel brunatny) Synthetic gypsum (brown coal)		Gips syntetyczny GS-B (węgiel brunatny) Polska [268] GS-B synthetic gypsum (brown coal) Poland [268]	Gips syntetyczny GS-K (węgiel kamienny) Polska [309] GS-K synthetic gypsum (hard coal) Poland	Wymagania Polska [309] Requirements Poland 309]
			górný obieg oczyszczania upper purification cycle	bez górnego obiegu without upper cycle			
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Wilgoć – Humidity	<10,0	9,5	10,0	6–9	8,3	<10,0
2.	CaSO ₄ · 2H ₂ O	>95,0	97,3	96,3	>92,5	96,8	>92,5
3.	Chlorki – Chlorides	<0,01			śląd – trace	0,007	<0,01
4.	CaCO ₃ + MgCO ₃	<1,50			<0,1		
5.	Na ₂ O + K ₂ O	<0,06					<0,01
6.	Al ₂ O ₃	<0,30	0,02	0,12	0,25		
7.	Fe ₂ O ₃	<0,15	0,04	0,18	śląd – trace		
8.	SiO ₂	<0,50			0,80	0,62	
9.	CaSO ₃ · 0,5H ₂ O	<0,50					<0,2
10.	pH	5–8			6,5–8	7,26	6–8
11.	Stopień białości Degree of whiteness	80%	65%	33%	50–65%	81,2%	
12.	Sadza i pył koksowy Soot and coke dust		0,04	0,29			
13.	Materiał nieaktywny Non-active material		0,44	1,45			
14.	Uziarnienie – Graining – poniżej 0,2 mm below 0,2 mm – poniżej 0,04 mm below 0,04 mm – d ₅₀ [µm]				1,2 55–75		<1 <50
15.	Radioaktywność Radioactivity – f ₁ – f ₂ [Bq]				0,02 4,47		<1 <185

Porównawcze przykłady zestawienia składu fazowego i parametrów fizycznych gipsu syntetycznego oraz gipsu naturalnego

Comparative examples of set of phase composition and physical parameters of synthetic and natural gypsum plaster

Lp. No	Skład fazowy i parametry fizyczne Phase composition and physical parameters	Jed- nostka Unit	Gips syntetyczny GS-B (węgiel brunatny) [268] Synthetic gypsum plaster GS-B (brown coal) [268]		Gips budowlany GB-N1 naturalny (1994 r.) GB-N1 natural building plaster (1994)	Gips budowlany GB-N3 naturalny (2004 r.) GB-N3 natural building plaster (2004)
			po prażeniu (1994 r.) after roasting (1994)	po 1 miesiącu stabilizacji after 1 month of stabilisa- tion		
1	2	3	4	5	6	7
1.	Woda krystaliczna Crystalline water	%	5,83	6,21		6,1
2.	Wilgotność w 47°C Humidity in 47°C	%	0,00	1,60		0,3
3.	CaSO ₄ · 0,5H ₂ O	%	85,5	92,5		85,0
4.	CaSO ₄ · 2H ₂ O	%	2,6	2,31		3,9
5.	Anhydryt III (rozpuszczalny) Anhydrite III (soluble)	%	6,18	0,00		0,0
6.	Anhydryt II-S Anhydrite II-S	%	0,9	0,80		0,0
7.	Anhydryt trudno rozpuszczalny Sparingly soluble anhydrite	%				0,5
8.	Materiał nieaktywny NR NR non-active material	%	0,9	0,8		0,0
9.	W/G normowe, rozpliw D = 18 cm Standard W/G, spreading D = 18 cm			0,6–0,62	0,6–0,7	0,70–0,75
10.	Początek wiązania t _{pw} Setting start t _{pw}	min		8–12	10–14	7–14
11.	Wytrzymałość: na zginanie f _{gtb,2h} bending strength f _{gtb,2h} na ściskanie f _{gc,2h} compressive strength f _{gc,2h}	MPa		3,4–4,1	2,2–2,5	1,8–2,2
		MPa		5,7–7,2	4,2–5,2	3–5,4

Tabela 14.2 cd.
Table 14.2 cont.

1	2	3	4	5	6	7
12.	Wytrzymałość na sucho zginanie f_{gtb} dry bending strength f_{gtb} ściskanie f_{gc} dry compressive strength f_{gc}	MPa MPa		5,6-8,5 13,5-18,7	4-4,6 8-8,7	3,4-4,4 9-14
13.	Współczynnik rozmiękania przy ściskaniu Softening coefficient during compressive strength			0,42-0,44	0,3-0,36	
14.	Wskaźnik pH pH index		7,5	7,5	7-7,5	

W tabeli 14.3 podano rzadko spotykane w publikacjach szczegółowe badania porównawcze analiz składu chemicznego, mineralnego, uziarnienia i radioaktywności dla gipsów syntetycznych z węgla brunatnego (elektrownia, Polska), w porównaniu do gipsu niemieckiego GS-K (firma Saarberg-Hotter-Lurgi SHL, węgiel kamienny) i holenderskiego gipsu syntetycznego GS-B (firma Hoogovens Technical Servis, Holandia, węgiel brunatny), w porównaniu do standardów wartości dopuszczalnych określonych przez licencjodawcę instalacji w Bełchatowie – Firmę HTS Holandia. Dane zawarte w tabeli 14.3 mają dużą wartość poznawczą. Zawartość niepożądanych: alkaliów $Na_2O + K_2O$, związków chloru Cl^- i magnezu Mg , które powodują powstawanie wykwitów soli na powierzchniach zewnętrznych tynków, zależy od przerostów skał płonnych w złożu węgla kamiennego czy brunatnego. Na uwagę zasługuje duża zawartość tych związków w gipsie syntetycznym SHL (Niemcy, węgiel kamienny) i porównawczo relatywnie mała zawartość tych związków w gipsie syntetycznym z węgla brunatnego (Polska), na poziomie niższym niż w gipsie syntetycznym firmy HTS (Holandia, węgiel brunatny). Regułą przemysłowych instalacji odsiarczania spalin jest wysoka zawartość gipsu $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; w tabeli 14.3 wszystkie wyniki są powyżej zawartości 95%.

W zakresie składu fazowego spoiw gipsowych, uzyskanych w wyniku porównywalnego prażenia gipsów naturalnych i syntetycznych surowych gipsów syntetycznych, nie występują istotne różnice (tab. 14.2, kol 4-6) i surowe gipsy syntetyczne z odsiarczania spalin z węgla kamiennego traktowane są w rejestrach europejskich organizacji przemysłu już nie jako materiał odpadowy, ale pełnowartościowy surowiec do produkcji spoiw gipsowych (Mallon [188]; Hurbanic, Bose, Raetker [92]).

W procesie prażenia surowych gipsów syntetycznych, podobnie jak w procesie prażenia surowych gipsów naturalnych, występuje także wyżej energetyczna faza anhydrytu III (w przypadku gipsu GS-B, tab. 14.2, kol. 4 w ilości 6.18%), która po okresie stabilizacji przechodzi całkowicie w fazę półhydratu $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$. Nieduża zawar-

tość anhydrytu II, poniżej 1%, świadczy o wystąpieniu lokalnym w instalacji wypału temperatur prażenia powyżej 370 °C. Obecność faz anhydrytu II nie degraduje jakości spoiw gipsowych, a wręcz przeciwnie, korzystnie spowalnia naturalnie zbyt szybką kinetykę początku wiązania spoiw gipsowych.

Tabela 14.3

Table 14.3

Wyniki analiz gipsów syntetycznych z elektrowni w Polsce, syntetycznych gipsów niemieckich i holenderskich oraz wartości dopuszczalnych ustalonych dla Bełchatowa przez licencjodawcę – Firmę HTS Holandia

Analysis results of synthetic gypsum plaster from polish power plant, German and Dutch synthetic gypsum plaster, and admissible values defined for Bełchatów by licensor – company HTS Holandia

Lp. No	Oznaczenie Denotation	GS-B Gips syntetyczny z elektrowni (węgiel brunatny) Polska GS-B Synthetic gypsum plaster from power plant (brown coal)	GS-K2 Gips syntetyczny firmy SHL Niemcy (węgiel kamienny) GS-K2 Synthetic gypsum plaster of SHL Niemcy (hard coal)	GS-B2 Gips syntetyczny firmy HTS Holandia (węgiel brunatny) GS-B2 Synthetic gypsum plaster of HTS Holandia (brown coal)	Wartości dopuszczalne przez licencjodawcę HTS Holandia Values admissible by licensor HTS Holandia
1	2	3	4	5	6
1.	H ₂ O fizyczne, % Physical H ₂ O, %	1,68	0,083	0,009	max. 10
2.	H ₂ O krystaliczne, % Crystalline H ₂ O, %	19,95	19,90	20,00	–
3.	P ₂ O ₅ rozpuszczalne w wodzie, % P ₂ O ₅ water-soluble, %	0,024	0,008	0,003	–
4.	P ₂ O ₅ całkowite, % Total P ₂ O ₅ , %	0,051	0,37	0,028	–
5.	F rozpuszczalne w wodzie, % F water-soluble, %	3,5	57	10	–
6.	Cl rozpuszczalny w wodzie, ppm Cl water-soluble, parts per million	pon. 1	260	nie wykryto not detected	max. 100
7.	MgO rozpuszczalny w wodzie, ppm MgO water-soluble, parts per million	2	170	nie wykryto not detected	max. 1000
8.	K ₂ O rozpuszczalny w wodzie, ppm K ₂ O water-soluble, parts per million	8	12	12	max. 1000

Tabela 14.3 cd.
Table 14.3 cont.

1	2	3	4	5	6
9.	Na ₂ O rozpuszczalny w wodzie, ppm Na ₂ O water-soluble, parts per million	21	120	37	max. 600
10.	Wolne kwasy (H ₂ SO ₄), % Free acids (H ₂ SO ₄), %	0,025	–	–	–
11.	Na ₂ O całkowite, % Total Na ₂ O, %	0,043	0,042	0,039	–
12.	F całkowite, % Total F, %	0,054	0,11	0,19	–
13.	K ₂ O całkowite, % Total K ₂ O, %	0,0061	0,0075	0,0075	–
14.	MgO całkowite, % Total MgO, %	0,012	0,059	0,022	–
15.	Fe ₂ O ₃ całkowite, % Total Fe ₂ O ₃ , %	0,081	0,143	0,074	max. 0,15
16.	Al ₂ O ₃ całkowite, % Total Al ₂ O ₃ , %	0,23	nie wykryto not detected	nie wykryto not detected	max. 0,3
17.	SiO ₂ całkowite, % Total SiO ₂ , %	0,81	0,60	0,41	max 2,5
18.	pH	7,6	7,6	6,9	6,5-8,0
19.	CaSO ₄ · 2H ₂ O, %	95,32	95,08	95,56	min. 92,5
20.	CaCO ₃ + MgCO ₃ , %	–	–	–	max. 1,0
21.	CaCO ₃ · 0,5H ₂ O, %	–	–	–	max. 0,2
22.	Zapach Smell	nat. gipsu of natural gypsum plaster	nat. gipsu of natural gypsum plaster	nat. gipsu of natural gypsum plaster	nat. gipsu of natural gypsum plaster
23.	Rozmiar cząstek 50–70 μm. Particle size 50–70 μm	~54	~2	~3	min. 40%
24.	Radioaktywność Ra 226 Radioactivity Ra 226	8,4±2,6 Bq/kg	5,6±3,36 Bq/kg	–	max. 10 Bq/kg
25.	Radioaktywność Th 232 Radioactivity Th 232	1,7±1,2 Bq/kg	0,7±1,6 Bq/kg	–	max. 2 Bq/kg

Występują drobne różnice w zakresie właściwości chemicznych, między gipsami syntetycznymi a naturalnymi:

- dokumentacje zdjęć z mikroskopów elektronowych wskazują, że surowe gipsy syntetyczne mają inny kształt ziaren, w postaci wydłużonych aglomeratów kryształów gipsu, ale o bardziej jednorodnym uziarnieniu (Beckert [14], Mallon [188]);
- w czasie prażenia gipsów syntetycznych przesunięte są o 20–30 °C punkty efektów endotermicznych, związanych z przemianami fazy anhydrytu III i anhydrytu II (Pietroń [268]).

Strydom z zespołem [318, 319] w badaniach z 1999 r. potwierdził przesunięcie piku kalorymetrycznego dehydratacji fosfogipsu z temperatury 140 °C (dla gipsu naturalnego) do temperatury 160 °C. Autorzy podali charakterystyki wzrostu powierzchni właściwej fosfogipsu w funkcji czasu mielenia. Stwierdzono duży wpływ temperatury mielonego wsadu na uzyskiwane powierzchnie właściwe, czyli rozdrobnienie spoiwa fosfogipsowego.

Zestawione w p. 14.2.1 i 14.2.2 analizy danych technologii, zastosowań i właściwości gipsów syntetycznych, stanowią niezbędny etap niniejszego opracowania monograficznego w celu udokumentowania spełnionego zaufania do właściwości spoiw z gipsów syntetycznych.

Należy stwierdzić, że w zakresie wszystkich cech składu chemicznego i mineralnego, łącznie z radioaktywnością, spoiwa wykonane w oparciu o gipsy syntetyczne mają cechy ekwiwalentne w porównaniu do gipsów naturalnych.

14.3. Analiza porównawcza właściwości technologicznych i wytrzymałościowych gipsów syntetycznych. Badania własne

14.3.1. Charakterystyka uziarnienia

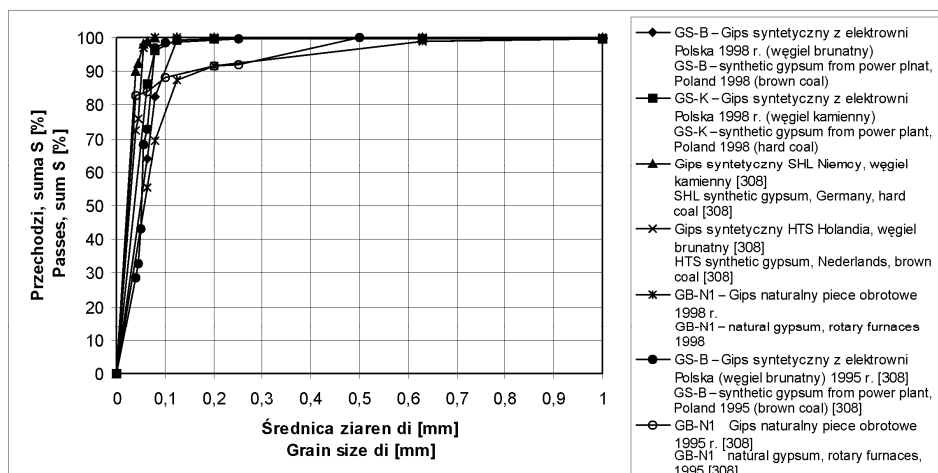
Na rysunku 14.1 podano zestawienie krzywych uziarnienia gipsów syntetycznych z węgla kamiennego i brunatnego, w porównaniu do krzywych uziarnienia dla gipsów naturalnych. Wyniki badań własnych i innych autorów (Skrzypek [308], Hurbanic [92]) prowadzą do następujących wniosków:

- nawet przy najwyższej staranności oznaczeń metodą analizy sitowej, włączając analizy przesiewu na mokro w strefie frakcji drobnych, krzywe przesiewu z analizy sitowej – obejmujące w zasadzie obszar uziarnienia od $d_{max} - 0,04$ mm nie obejmują bardzo ważnego obszaru uziarnienia poniżej 0,04 mm. Z porównania rezultatów badań podanych na rysunkach 14.1 i 5.7 wynika jednoznaczny wniosek: jedynie reprezentatywną charakterystyką uziarnienia drobnych spoiw typu: gips szpachlowy, gips budowlany z surowców naturalnych, cement, a także gipsy syntetyczne – jest charakterystyka oparta na analizie laserowej;
- uziarnienie suchych gipsów syntetycznych, które praktycznie niezmiennie przechodzą przez piece prażenia do etapu produkcji spoiw gipsowych, obejmuje znacznie węższy zakres zmienności wymiaru ziaren, niż to występuje w przypadku spoiw mineralnych wyprażonych gipsów naturalnych.

Polskie gipsy syntetyczne z odsiarczania spalin w elektrowniach: GS-B (węgiel brunatny) i GS-K (węgiel kamienny) spełniają w zakresie uziarnienia wymogi $d_{50} = 0,05-0,08$ mm. Cechują się więc uziarnieniem optymalnym do produkcji płyt G-K.

Podane na rys. 14.1 przykłady uziarnienia gipsów syntetycznych: niemieckiego SHL (węgiel kamienny, $d_{50} < 0,04$ mm, $f_{0-0,04} = 90\%$) i holenderskiego SHL (węgiel

kamienny, $d_{50} < 0,04$ mm, $f_{0-0,04} = 72\%$) nie spełniają wymogów surowców gipsowych do produkcji płyt G-K; mogą one znaleźć zastosowanie do produkcji suchych mieszanek gipsowych.



Rys. 14.1. Zestawienie krzywych uziarnienia gipsów syntetycznych i naturalnych (badania własne i badania ITB Warszawa, Skrzypek [308])

Fig. 14.1. Comparison of curves of grain size distribution for natural and synthetic gypsum plaster (own research and ITB research Warsaw, Skrzypek [308])

14.3.2. Podstawowe cechy technologiczne i wytrzymałościowe gipsów syntetycznych i naturalnych

Zbiorcze zestawienie podstawowych cech technologicznych i wytrzymałościowych dla różnych rodzajów gipsów syntetycznych i naturalnych, w oparciu o badania własne, porównawczo do wyników badań innych autorów, podano w p. 14.2. Analizę szczegółową poszczególnych właściwości podano selektywnie w p. 14.3.1–14.3.2

14.3.2.1. Wodożądność i konsystencja świeżych zaczynów z gipsów syntetycznych i naturalnych

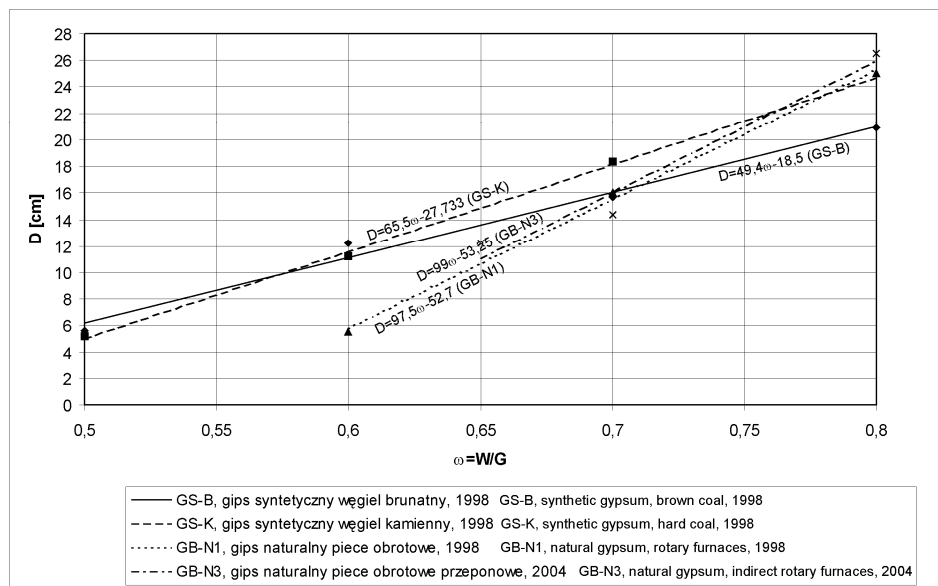
Zdecydowanie „grubsze” uziarnienie gipsów syntetycznych (rys. 5.7), z eliminacją frakcji drobnych, wpływa oczywiście na obniżenie wodożądności zaczynów, mierzonego wskaźnikiem W/G dla uzyskania konsystencji normowej [339], o rozplywie $D = 18,0$ cm. Badania własne podane na rysunku 14.2 potwierdzają powyższe stwierdzenie. Układy punktów pomiarowych wskazują, że dla wąskiego przedziału zmienności W/G = 0,5–0,8, czyli dla zakresu najczęściej stosowanego w technologii produkcji płyt G-K i prefabrykatów gipsowych, zależność rozplywu D w funkcji W/G można aproksymować do zależności liniowej.

Wyniki badań cech technologicznych i wytrzymałościowych zaczynów gipsowych przy normalnej konsystencji
Test results of physical and strength properties of gypsum paste, with normal consistency

Lp. No	Właściwość Property		Jedn. Unit	Rodzaj spoiwa gipsowego Type of gypsum plaster							
				Gipsy z surowców naturalnych, piece obrotowe Natural gypsum plaster, rotary furnaces		Gipsy syntetyczne z odsiarczonych spalin z węgla brunatnego Synthetic gypsum plaster from desulphurised flue gas of brown coal			Gipsy syntetyczne z odsiarczonych spalin z węgla kamiennego Synthetic gypsum plaster from desulphurised flue gas of hard coal		
				GB-N1 1995 [308]	GB-N1 1998 Polska	GS-B 1995 [308]	GS-B 1998 Polska	GS-B2 HTS [308]	GS-K2 SHL [308]	GS-K Polska	
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	
1.	Wytrzymałość na ściskanie f_{gc} Compressive strength f_{gc}	po 2h after 2h	MPa	6,52		9,66					
		Suche dry	MPa	17,32	14,6	18,35	12,58	11,43	10,92	12,98	
2.	Wytrzymałość na zginanie f_{gtb} Bending strength f_{gtb}	po 2h after 2h	MPa	3,14		40,6					
		Suche dry	MPa	6,01	5,73	6,09	4,49	4,20	4,45	4,23	
3.	Czas wiązania Setting time	t_{pw}	min	3	6	13	3,75	6	4	3,25	
		t_{kw}	min	10	8	21	6,25	9	6	5,30	
4.	Wielkość zmian liniowych Value of line changes		%	+0,02	+0,02	-0,01	-0,08				-0,05
5.	Gęstość objętościowa zaczynów po wysuszeniu ρ_g Volumetric paste density after drying ρ_g		g/cm ³	1,21		1,18		0,93	0,93		
6.	Mrozoodporność spadek (-), przyrost (+) wytrzymałości na ściskanie Freeze resistance decrease (-) increase (+) strength	ściskanie com- pressive strength	%	-5,2		-24,7					
		zginanie bending strength	%	+15,6		-6,2					

Tabela 14.4 cd.
Table 14.4 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7.	Wymywalność, ubytki masy przy moczeniu gipsu porównawczego Washing out quality, loss of mass during comparative gypsum soaking	przez 30 dni for 30 days	%	0,65		0,83		1,34	1,17	
		przez 60 dni for 60 days	%	0,69		0,99		2,76	2,86	
8.	W/G dla konsystencji normalnej, rozpląd d=18 cm W/G for normal consistency, spreading d=18 cm				0,72		0,74			0,70
9.	Nasiąkliwość wagowa n_w dla konsystencji normalnej Weight absorbability n_w for normal consistency	%	31,0	36,2	33,6	34,0				31,9



Rys. 14.2. Zestawienie wyników badań rozplądu świeżych zaczynów gipsowych, badanych w aparacie Southarda, w funkcji wskaźnika W/G

Fig. 14.2. Comparison of test results of fresh gypsum paste spreading, tested in the Southard apparatus, in the function of W/G index

Dla badanych rodzajów gipsów zależności $D = f(W/G) = f(\omega)$ podano poniżej:

- gips budowlany naturalny GB-N1, 1998 rok:

$$D = 97,5\omega - 52,7 \text{ [cm]} \quad R^2 = 0,998 \quad (14.1)$$

- gips budowlany naturalny GB-N3, stabilny termicznie proces prażenia w piecach obrotowych przeponowych, opalanych gazem, 2004 rok:

$$D = 99\omega - 53,25 \text{ [cm]} \quad R^2 = 0,9643 \quad (14.2)$$

- gips syntetyczny GS-K z węgla kamiennego, 1998 rok:

$$D = 65,5\omega - 27,73 \text{ [cm]} \quad R^2 = 0,9977 \quad (14.3)$$

- gips syntetyczny GS-B z węgla brunatnego, 1998 rok:

$$D = 49,4\omega - 18,5 \text{ [cm]} \quad R^2 = 0,9867 \quad (14.4)$$

Charakterystyki funkcyjne rozplywu D w funkcji zmian parametru ω , dla gipsów budowlanych z surowców naturalnych GB-N1 (piece obrotowe, młyny kulowe) i dla próby losowej ze stycznia 2004 r. gipsu GB-N3 (piece obrotowe przeponowe, młyny walcowe z separatorami), są praktycznie takie same. Specjalnie domielane gipsy syntetyczne, z uziarnieniem w przedziale 10–150 μm (p. 5.5.5.2, rys. 5.7) są mniej wodożądne i po dodaniu porównywalnej ilości wody cechują się większym rozplywem, ale tylko do wartości $W/G = 0,7$ (dla gipsu GS-B) i $W/G = 0,77$ dla gipsu GS-K, powyżej których rozplyw gipsów syntetycznych jest mniejszy niż w przypadku gipsów naturalnych. Wynika to z faktu, że dla uzyskanych wartości W/G , czyli większego upłynnienia, bardziej domielone gipsy naturalne GB-N1 i GB-N3 mają więcej zacinu „smarnego”, wpływającego na polepszenie właściwości reologicznych świeżych mieszanin, czego konsekwencją jest większy rozplyw mieszaniny.

Zestawienie wartości wskaźników $\omega_n = W/G$, odpowiadających konsystencji normowej, czyli odpowiadającej rozplywowi $D = 18 \text{ cm}$, wynoszą kolejno dla badanych gipsów:

gips naturalny GB-N1 $\omega_n = 0,72$

gips naturalny GB-N3 $\omega_n = 0,72$

gips syntetyczny, węgiel kamienny GS-K $\omega_n = 0,69$

gips syntetyczny, węgiel brunatny, GS-B $\omega_n = 0,74$

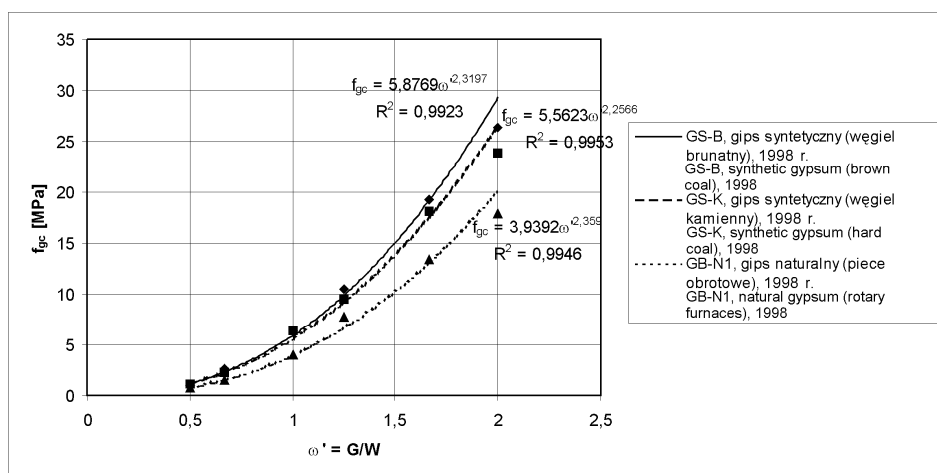
Wodożądność gipsów do uzyskania konsystencji normowej $D = 18 \text{ cm}$, zależy bardzo od składu granulometrycznego, czyli poziomu i sposobu domielenia. Statystyczne badania gipsu GB-N3 w procesie produkcji w miesiącu październiku 2004 r., wykazały średnią miesięczną wartość $\omega_n = 0,66$ (jest to wynik synchroniczny w stosunku do danych podanych w tab. 5.11 i 13.2). Różnice w tak opisanych właściwościach gipsu budowlanego GB-N3 świadczą o tym, że występował w analogicznym okresie etap optymalizacji procesu produkcji i sterowania uziarnienia produktu finalnego. Po ustabilizowaniu produkcji, w nowoczesnej technologii produkcji pieców obrotowych

przeponowych i sterowanym domielaniu w młynach walcowych z separatorami, uzyskuje się w przemysłowej produkcji gipsu budowlanego GB-N3 bardzo dobre cechy rodności, w zakresie $\omega_n = W/G$, w próbie miesięcznej o liczebności zbioru 33 oznaczeń, jak poniżej:

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_n &= \bar{X} = 0,659 \\ \min. \omega_{ni} &= \min. X_i = 0,643 \\ \max. \omega_{ni} &= \max. X_i = 0,676 \\ s &= 0,0056 \\ v &= \frac{s}{\bar{X}} = 0,008 = 0,8\%\end{aligned}$$

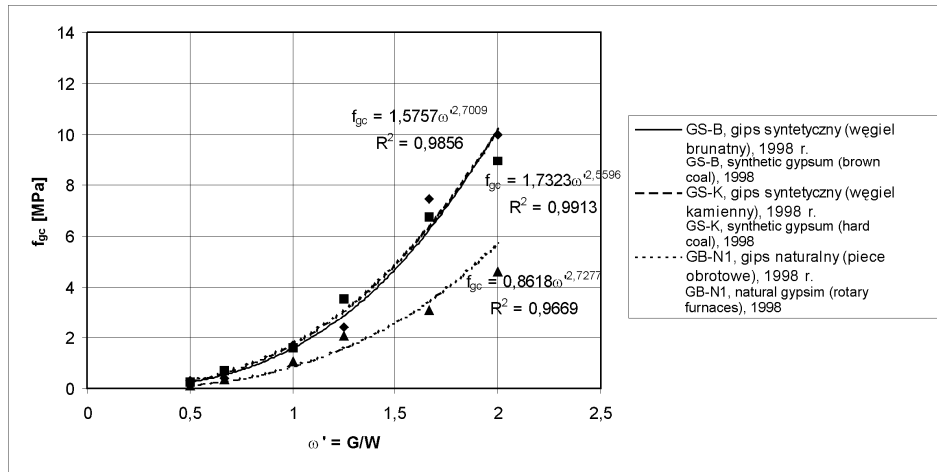
14.3.2.2. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów z gipsów syntetycznych w stanie suchym i nawilgoconym – wyniki badań i analityczne funkcje opisujące

Wyniki badań wytrzymałości stwardniałych zaczynów gipsowych, wykonanych z gipsów syntetycznych: GS-B (węgiel brunatny) i GS-K (węgiel kamienny), w porównaniu do budowlanego gipsu naturalnego GB-N1, podano na rysunkach 14.3–14.6. Badania zostały wykonane na reprezentatywnych statystycznie zbiorach próbek 4 x 4 x 16 cm, oddzielnie dla stanów suchych (wysuszonych do stałej masy) i nawilgoconych (w stanie pełnego nasycenia wodą, do stałej masy, okres moczenia w wodzie 24 h).



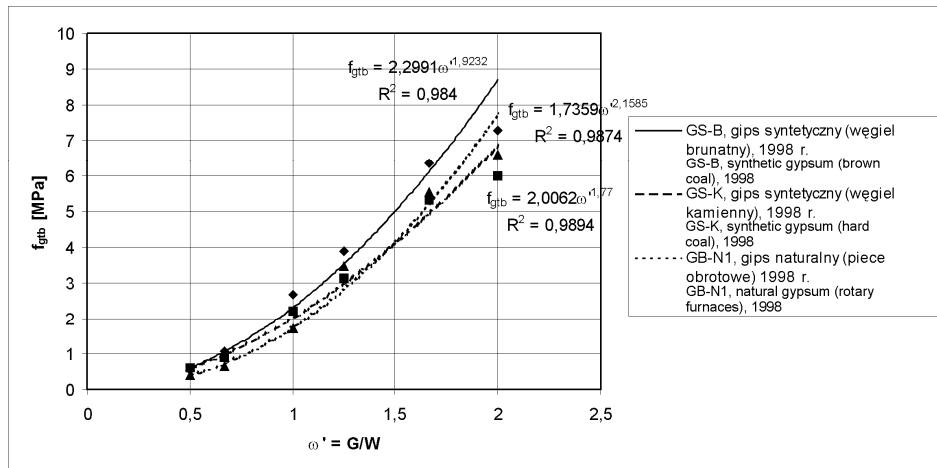
Rys. 14.3. Wykresy zależności wytrzymałości na ściskanie f_{gc} dla stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym od wskaźnika $\omega' = G / W$

Fig. 14.3. Charts of relation of compressive strength f_{gc} for hardened gypsum paste in dry state and $\omega' = G / W$ index



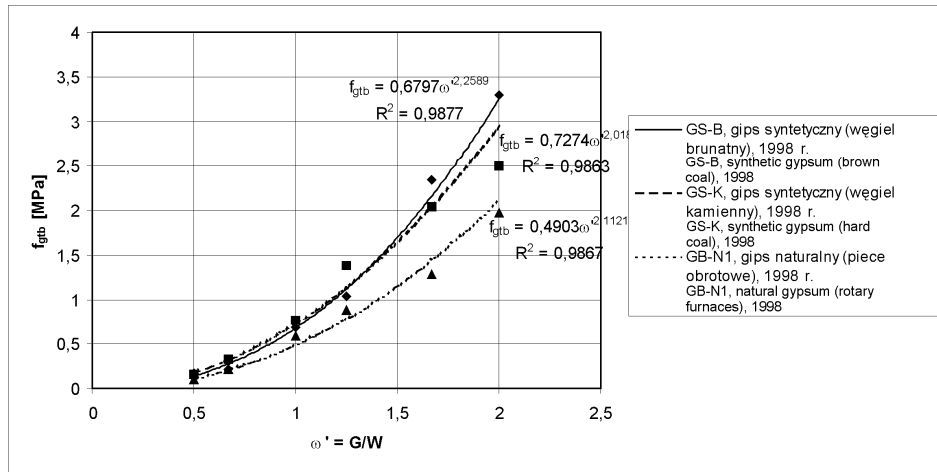
Rys. 14.4. Wykresy zależności wytrzymałości na ściskanie f_{gc}^W dla stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie nawilgoconym od wskaźnika $\omega' = G / W$

Fig. 14.4. Charts of relation of compressive strength f_{gc}^W for hardened gypsum paste in humid state and $\omega' = G / W$ index



Rys. 14.5. Wykresy zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} dla stwardniałych zaczynów gipsowych w stanie suchym od wskaźnika $\omega' = G / W$

Fig. 14.5. Charts of relation of bending tensile strength f_{gtb} for hardened gypsum paste in dry state and $\omega' = G / W$ index



Rys. 14.6. Wykresy zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb}^w dla stwardnia-
 łych zaczynów gipsowych w stanie nawilgoconym od wskaźnika $\omega' = G / W$

Fig. 14.6. Charts of relation of bending tensile strength f_{gtb}^w for hardened gypsum paste in humid
 state and $\omega' = G / W$ index

Układanie się regularne punktów $f_g - \omega'$, wzdłuż monotonicznych funkcji rosnących, pozwala na przyjęcie opisu relacji $f_g = f(\omega')$ w postaci funkcji potęgowych, podanych na rysunkach 14.3–14.6 i zestawionych w tabeli 14.5, z wartościami współczynników korelacji R^2 , kwalifikujących analityczne relacje (14.5) – (14.16) jako statystycznie wiarygodne.

Wskaźnik rozmiękania zaczynów z gipsów syntetycznych można opisać analitycznymi funkcjami jak poniżej:

– wskaźnik rozmiękania w testach ściskania, ogólną zależnością:

$$K_c = \frac{f_{gc}^w}{f_{gc}} \quad (14.17)$$

Zależności szczegółowe dla badanych gipsów:

gips syntetyczny GS-B:

$$K_c = 0,268\omega'^{0,381} \quad (14.18)$$

gips syntetyczny GS-K:

$$K_c = 0,314\omega'^{0,303} \quad (14.19)$$

gips naturalny GB-N1:

$$K_c = 0,219\omega'^{0,369} \quad (14.20)$$

Podobne relacje analityczne można ustalić dla prób zginania, w postaci funkcji ogólnej typu:

$$K_{tb} = \frac{f_{gtb}^w}{f_{gtb}} \quad (14.21)$$

z zależnościami szczegółowymi dla badanych gipsów:

gips syntetyczny GS-B:

$$K_{tb} = 0,195\omega^{0,3357} \quad (14.22)$$

gips syntetyczny GS-K:

$$K_{tb} = 0,362\omega^{0,248} \quad (14.23)$$

Tabela 14.5

Table 14.5

Zestawienie zależności opisujących zależności wytrzymałości dojrzałych zaczynów gipsowych w funkcji wskaźnika $\omega' = G / W$

Comparison of dependencies describing relations of hardened gypsum paste in the function of index $\omega' = G / W$

Lp. No	Rodzaj wytrzymałości, stan nawilgocenia Type of strength, humid state	Gips syntetyczny GS-B (węgiel brunatny) GS-B synthetic gypsum plaster (brown coal)	Gips syntetyczny GS-K (węgiel kamienny) GS-K synthetic gypsum plaster (hard coal)	Gips budowlany naturalny GB-N1 (piece obrotowe) GB-N1 natural building plaster (rotary furnaces)
1	2	3	4	5
1.	Wytrzymałość na ściskanie, stan suchy Compressive strength, dry state	$f_{gc} = 5,8769\omega'^{2,3197}$ [MPa] $R^2=0,9923$ (14.5)	$f_{gc} = 5,5623\omega'^{2,2566}$ [MPa] $R^2=0,9953$ (14.6)	$f_{gc} = 3,9392\omega'^{2,359}$ [MPa] $R^2=0,9946$ (14.7)
2.	Wytrzymałość na ściskanie, stan nawilgocony Compressive strength, humid state	$f_{gc}^w = 1,5757\omega'^{2,7009}$ [MPa] $R^2=0,9856$ (14.8)	$f_{gc}^w = 1,7323\omega'^{2,5596}$ [MPa] $R^2=0,9913$ (14.9)	$f_{gc}^w = 0,8618\omega'^{2,7277}$ [MPa] $R^2=0,9669$ (14.10)
3.	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, stan suchy Bending tensile strength, dry state	$f_{gtb} = 2,2991\omega'^{1,9232}$ [MPa] $R^2=0,984$ (14.11)	$f_{gtb} = 2,0062\omega'^{1,77}$ [MPa] $R^2=0,9894$ (14.12)	$f_{gtb} = 1,73591\omega'^{2,1585}$ [MPa] $R^2=0,9874$ (14.13)
4.	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, stan nawilgocony Bending tensile strength, humid state	$f_{gtb}^w = 0,67971\omega'^{2,2589}$ [MPa] $R^2=0,9877$ (14.14)	$f_{gtb}^w = 0,7274\omega'^{2,019}$ [MPa] $R^2=0,9863$ (14.15)	$f_{gtb}^w = 0,4903\omega'^{2,112}$ [MPa] $R^2=0,9867$ (14.16)

Określone zależności opisujące wytrzymałość stwardniałych zaczynów różnych gipsów w stanie suchym i nawilgoconym oraz opisy funkcyjne wskaźników rozmiękania mają duże znaczenie poznawcze i praktyczne, z uwagi na możliwość analitycznych obliczeń analizowanych cech. Podsumowanie porównawczych, statystycznych badań wytrzymałości spoiw z gipsów syntetycznych, w porównaniu do spoiw z gipsów naturalnych, prowadzi do następujących stwierdzeń:

- a) „Grubsze” uziarnienie gipsów syntetycznych, z mniejszą zawartością faz drobnych (rys. 5.7), a tym samym mniejsza wodożądność gipsu dla zaczynów o $W/G = \text{const.}$, ma wpływ na udokumentowany fakt, że stwardniałe zaczyny z gipsów syntetycznych cechują się wyższą wytrzymałością – od zaczynów z gipsów naturalnych (z pieców obrotowych opalanych węglem) o tym samym W/G i są wytrzymałością zbliżone do wytrzymałości stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N3.
- b) Z powodu mniejszej wodożądności zaczyny z gipsów GS-B i GS-K cechują się większym rozplywem, w porównaniu do zaczynów z gipsów naturalnych GB-N1 i GB-N3, ale tylko w zakresie niższych wartości ω_n (patrz rys. 14.2).

Tabela 14.6

Table 14.6

Porównanie wytrzymałości stwardniałych zaczynów o stałej konsystencji $D = \text{const.} = 18,0 \text{ cm}$, obliczonych analitycznie na podstawie ustalonych w pracy zależności funkcyjnych $f_g = f(\omega')$

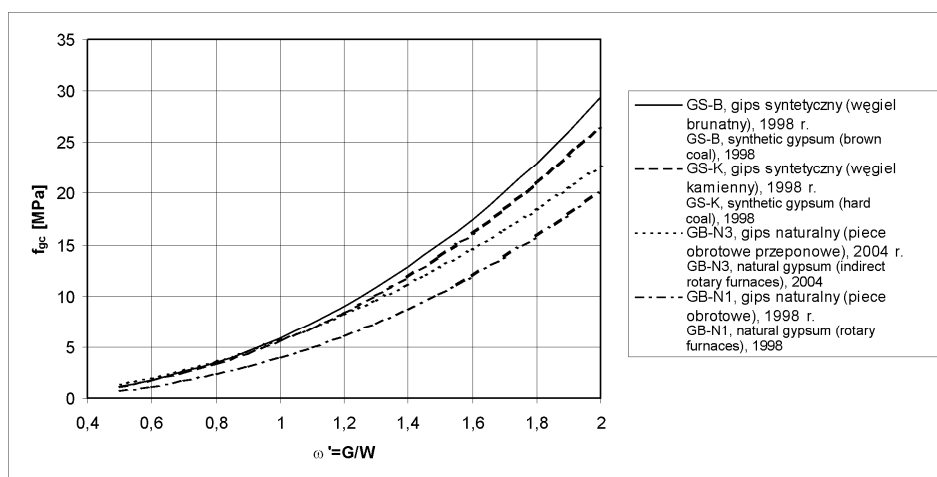
Comparison of strength of hardened paste of constant consistency $D = \text{const.} = 18,0 \text{ cm}$, calculated analytically on the basis of functional relations $f_g = f(\omega')$ defined in the research paper

Lp. No	Rodzaj spoiwa gipsowego Type of gypsum plaster	ω_n (rys. 14.2)	Nr funkcji analitycznej Analytical function No	Funkcja analityczna Analytical function [MPa]	Obliczona wytrzymałość f_{gc} [MPa] Calculated strength f_{gc} [MPa]
1	2	3	4	5	6
1.	Gips syntetyczny GS-B, węgiel brunatny GS-B synthetic gypsum plaster, brown coal	0,74	(14.5)	$f_{gc} = 5,8769\omega'^{2,3197}$	11,81
2.	Gips syntetyczny GS-K, węgiel kamienny GS-K synthetic gypsum plaster, hard coal	0,69	(14.6)	$f_{gc} = 5,5623\omega'^{2,2566}$	12,85
3.	Gips naturalny GB-N3 GB-N3 natural gypsum plaster	0,72	(13.6)	$f_{gc} = 5,6942\omega'^{1,9953}$	10,96
4.	Gips naturalny GB-N1 GB-N1 natural gypsum plaster	0,72	(14.7)	$f_{gc} = 3,9392\omega'^{2,359}$	8,55

- c) Jeżeli porówna się wytrzymałości analizowanych gipsów, oznaczanych na próbkach z zaczynów o porównywalnej konsystencji, mierzonej rozplywem $D = \text{const.} = 18 \text{ cm}$, to uzyskuje się – na podstawie określonych w pracy zależności analitycznych dla poszczególnych rodzajów gipsów – relacje obliczonych wytrzymałości jak podano w tabeli 14.6.

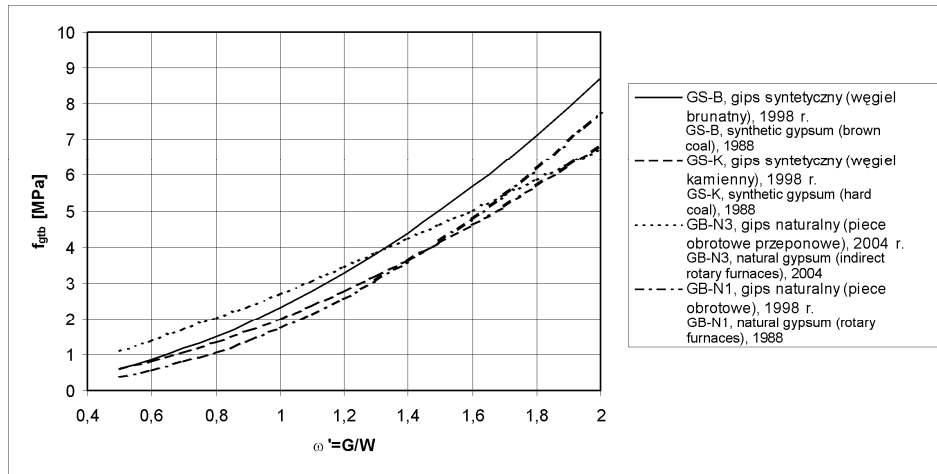
Obliczone w tabeli 14.6 wartości pokazują, że w warunkach porównywalnej konsystencji $D = 18 \text{ cm}$ gipsy syntetyczne cechują się większą wytrzymałością od gipsów naturalnych, a w grupie ostatniej: gipsy z pieców obrotowych GB-N1 cechują się istotnie mniejszą wytrzymałością na ściskanie od spoiw naturalnych GB-N3 z nowoczesnej technologii pieców obrotowych przeponowych.

- d) Na rysunkach 14.7 i 14.8 podano zestawczo krzywe zależności $f_{gc} = f(\omega')$ i $f_{gtb} = f(\omega')$, uzyskane z badań wieloseryjnych prób w stanie suchym, dla czterech losowych dostaw spoiw gipsowych:
- dla dwóch gipsów budowlanych z surowców naturalnych GB-N1 i GB-N3,
 - dla dwóch syntetycznych gipsów półwodnych β : BS-K z odsiarczania spalin z węgla kamiennego i BS –B z odsiarczania spalin z węgla brunatnego.



Rys. 14.7. Zestawienie krzywych zależności $f_{gc} = f(\omega')$, dla stwardniałych zaczynów z różnych spoiw gipsowych: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, $\omega' = G/W$ – wskaźnik gipsowo-wodny

Fig. 14.7. Comparison of curves of relation $f_{gc} = f(\omega')$, for hardened paste of different gypsum plaster: f_{gc} – compressive strength, $\omega' = G/W$ – gypsum-water index



Rys. 14.8. Zestawienie krzywych zależności $f_{g_{tb}} = f(\omega')$, dla stwardniałych zaczynów z różnych spoiw gipsowych: f_{g_c} – wytrzymałość na ściskanie, $\omega' = G/W$ – wskaźnik gipsowo-wodny

Fig. 14.8. Comparison of curves of relation $f_{g_{tb}} = f(\omega')$, for hardened paste of different gypsum plaster: f_{g_c} – compressive strength, $\omega' = G/W$ – gypsum-water index

Wykresy funkcyjne zależności $f_{g_c} = f(\omega')$ – podane na rysunku 14.7 – są monotonicznie rosnące i przejrzyste zróżnicowane, ustalające gradację wartości średnich, w poszczególnych przedziałach parametru zmiennego ω' , dla poszczególnych rodzajów spoiw gipsowych. Wykresy funkcyjne zależności $f_{g_{tb}} = f(\omega')$ – podane na rysunku 14.8 – są także monotonicznie rosnące, ale analizowane krzywe dla poszczególnych spoiw gipsowych przecinają się i orzeczenie o statystycznie istotnych różnicach przez to się komplikuje.

Statystyczną ocenę uzyskanych wyników wykonano z wykorzystaniem metody analizy statystycznej oceny rozbieżności dwóch średnich wartości, pochodzących z dwóch prób (Brunarski [28]), w oparciu o poniższe związki:

- dla każdego zbioru wyników, na podstawie którego ustalono wartość punktu pomiarowego $f_g - \omega' = \bar{X} - \omega'$, jak podano na rysunkach 14.3–14.6, obliczono granice przedziału ufności wartości średniej generalnej \dot{X} , w postaci związku:

$$\bar{X} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \dot{X} \leq \bar{X} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14.24)$$

gdy równocześnie tolerancja \mathcal{G} powinna spełniać warunek:

$$t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mathcal{G} \bar{X} \quad (14.25)$$

gdzie:

\bar{X} – średnia z próby,

n – liczebność próby,

s – średnie odchylenie standardowe,

t_α – parametr rozkładu t-Studenta, $t_\alpha = f(k = n - 1, \alpha)$ – zależy od ilości stopni swobody $k = n - 1$ i poziomu ufności α .

Ocenę rozbieżności dwóch średnich wartości \bar{X}_1 i \bar{X}_2 , pochodzących z dwóch prób o liczebności n_1 i n_2 , ustala się poprzez obliczenie:

- parametru t_0 :

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_0 \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (14.26)$$

gdzie odchylenie s_0 określone jest zależnością:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum X_1^2 - \bar{X}_1 \sum X_1 + \sum X_2^2 - \bar{X}_2 \sum X_2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (14.27)$$

Na podstawie obliczonych parametrów: t_0 i $k = n_1 + n_2 - 2$ można wyznaczyć parametr istotności α , który określa prawdopodobieństwo występowania wartości $t > t_0$.

Na podstawie wykonanych obliczeń statystycznych, dla serii prób będących podstawą oznaczeń zależności funkcyjnych $f_{gc} = f(\omega')$ i $f_{gtb} = f(\omega')$, dla czterech losowych dostaw różnych spoiw gipsowych, jak podano na rysunkach 14.7 i 14.8 – dla praktycznie ważnego przedziału $W/G = 0,65 - 0,75$, czyli dla przedziału $\omega' = 1,53 - 1,33$, można orzec, że:

- W zakresie wytrzymałości na ściskanie f_{gc} (rys. 14.7) rozbieżność średnich $\bar{X} = f(\omega')$ dla obu gipsów syntetycznych GS-B i GS-K jest statystycznie nieistotna. Także rozbieżność średnich $\bar{X} = f(\omega')$ dla gipsu syntetycznego GS-K i gipsu naturalnego GB-N3 jest statystycznie nieistotna. Orzeczenie to w odniesieniu do gipsu GB-N3 jest tym bardziej słuszne, biorąc pod uwagę duże współczynniki zmienności wytrzymałości gipsu GB-N3 na ściskanie w stanie suchym, w serii bieżących badań kontrolnych w zakładzie produkcyjnym (tab. 5.11 i tab. 13.1). Natomiast różnice średnich $\bar{X} = f(\omega')$ dla gipsu naturalnego GB-N1, w stosunku do gipsów syntetycznych GS-B i GS-K, a także w stosunku do gipsu naturalnego GB-N3, są statystycznie istotne.
- W zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (rys. 14.8) rozbieżności średnich $\bar{X} = f(\omega')$ dla gipsu syntetycznego GS-B i gipsu naturalnego GB-N3 są statystycznie nieistotne. Podobne orzeczenie dotyczy par spoiw gipsu syntetycznego GS-K i gipsu naturalnego GB-N1.

Obliczenia podane w tabeli 14.6 i stwierdzenia zawarte w p. 14.3.2.2 prowadzą do stwierdzenia, że istnieje możliwość opracowania uogólnionej relacji między wytrzymałością stwardniałych zaczynów gipsowych a wskaźnikiem $\omega' = G/W$, w postaci związków:

– w zakresie wytrzymałości na ściskanie:

$$f_{gc} = k_{gc,1} A_{gc} \omega'^{\beta_{gc} k_{gc,2}} \quad (14.28)$$

– w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu:

$$f_{gtb} = k_{gtb,1} A_{gtb} \omega'^{\beta_{gtb} k_{gtb,2}} \quad (14.29)$$

gdzie:

A_{gc} i β_{gc} – parametry równania bazowego dla spoiwa gipsowego standardowego, w zakresie wytrzymałości na ściskanie;

A_{gtb} i β_{gtb} – parametry równania bazowego dla spoiwa gipsowego standardowego, w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu;

$k_{gc,1}$, $k_{gc,2}$, $k_{gt,1}$, $k_{gt,2}$ – współczynniki liczbowe, charakterystyczne dla danego rodzaju spoiwa gipsowego typu $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Parametry te można funkcyjnie powiązać z konsystencją normową $\omega_n = (W/G)_n$, na podstawie analiz wieloseryjnych wyników prób kontrolnych w procesie bieżącej produkcji, przez poszczególnych wytwórców spoiw.

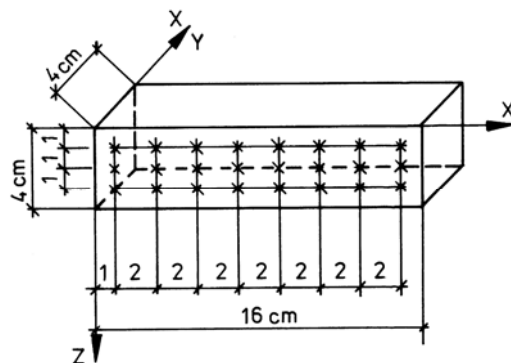
Jako gips standardowy należałoby przyjąć gips budowlany GB-N3, wytwarzany z surowców naturalnych z relatywnie jednorodnych złożów gipsu grubokrystalicznego, z doliny rzeki Nidy.

Znajomość bazowych funkcji analitycznych typu: $f_{gc} = \bar{X}_{gc} = f(\omega')$ i $f_{gtb} = \bar{X}_{gtb} = f(\omega')$, dla wybranego gipsu jako standardu odniesienia, dałaby możliwość analitycznego uporządkowania właściwości wytrzymałościowych pozostałych różnych rodzajów spoiw gipsowych, w odniesieniu do spoiwa bazowego.

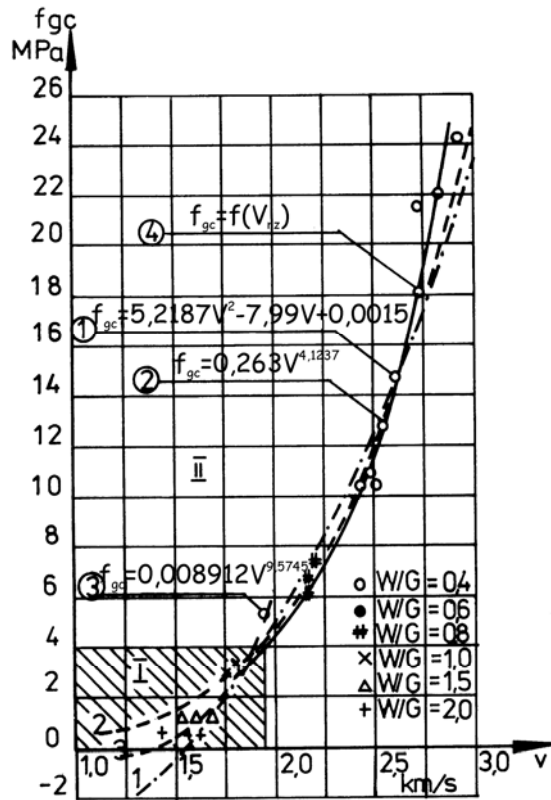
15. ULTRADŹWIĘKOWA OCENA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE STWARDNIAŁYCH ZACZYNÓW Z GIPSU BUDOWLANEGO

Do badań użyto gipsu budowlanego β z pieców obrotowych opalanych węglem typu GB-N1. Jako ciała próbne przyjęto beleczki $4 \times 4 \times 16$ cm, wykonane z zaczynów w szerokim zakresie zmian wskaźnika W/G = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0. Badania wykonano na próbkach suchych, przy użyciu aparatu ultradźwiękowego 540 UNIPAN i następnie oznaczono wytrzymałość na ściskanie próbek badanych w prasie wytrzymałościowej I klasy dokładności. Metodę badań opisano w publikacji Klin, Zachara [19].

Umieszczenie punktów pomiarowych podano na rysunku 15.1, a wszystkie krzywe regresji $f_{gc} - V$ dla badanych zaczynów podano na rysunku 15.2. Do opisu analitycznego uzyskanych relacji wykorzystano zestawienie wyników jak na rysunku 15.3, w skali podwójnie logarytmicznej.



Rys. 15.1. Rozmieszczenie punktów pomiarów ultradźwiękowych na próbce
Fig. 15.1. Location places of ultrasound measurements on the sample



Rys. 15.2. Krzywe regresji $f_{gc} - V$ dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, V – prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej, W/G – wskaźnik wodno-gipsowy zaczynów
 Fig. 15.2. Curves of regression $f_{gc} - V$ for hardened GB-N1 building plaster paste: f_{gc} – compressive strength, V – longitudinal ultrasound wave velocity, W/G – paste hydro-gypsum index

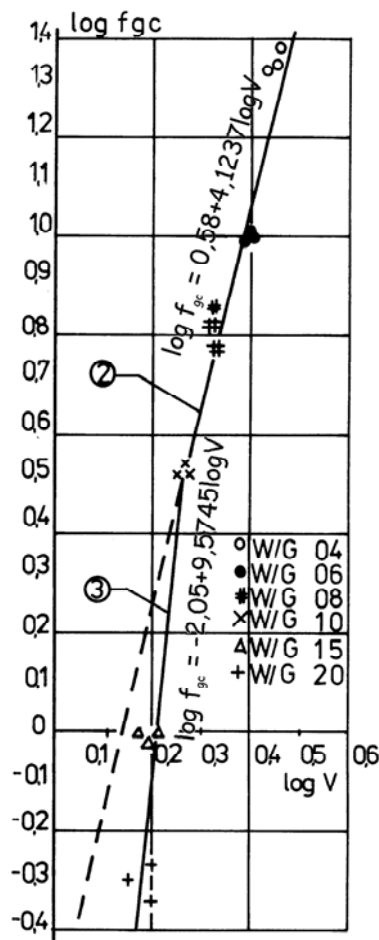
Charakter krzywej regresji $f_{gc} - V$ (na rys. 15.2 i układ punktów pomiarowych $\log f_{gc} - \log V$ na rys. 15.3) wskazuje, że w ogólnej relacji $f_{gc} - V$ występują wyraźnie dwa zakresy do oddzielnego opisu funkcyjnego:

- e) Zakres I: ważny dla $f_{gc} < 4$ MPa; $V < 1,85$ km/s, praktycznie dla zaczynów o $W/G > 1,0$, dla których ważna jest zależność:

$$f_{gc} = 0,008912V^{9,5745} \quad [\text{MPa}], V[\text{km/s}] \quad (15.1)$$

- f) Zakres II: ważny dla $1,0 > W/G > 0,4$, dla $f_{gc} > 4$ MPa, $V > 1,85$ km/s, dla którego uzyskuje się zależność:

$$f_{gc} = 0,263V^{4,1237} \quad [\text{MPa}], V[\text{km/s}] \quad (15.2)$$



Rys. 15.3. Zestawienie wyników badań $f_{gc} - V$, dla stwardniałych zaczynów gipsowych, w podwójnej skali logarytmicznej: f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie, V – prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej, W/G – wskaźnik wodno-gipsowy zaczynów

Fig. 15.3. Comparison of test results $f_{gc} - V$ for hardened gypsum paste, in double logarithmic scale: f_{gc} – compressive strength, V – longitudinal ultrasound wave velocity, W/G – paste hydro-gypsum index

Należy potwierdzić zgodność funkcyjną stwierdzonej doświadczalnie zależności $f_{gc} - V$, z udokumentowaną przez autora w badaniach niszczących relacją $f_{gc} = f(G/W)$ na rysunku 11.1 – gdzie także występują dwa przedziały składowe, ze strefą rozdziału w granicach $W/G = 1,0$.

Otrzymane przez autora zależności (15.1) i (15.2) mogą znaleźć praktyczne zastosowanie do oceny metodą nieniszcząca wytrzymałości stwardniałych gipsów wbudowanych w elementy budowlane.

16. NOŚNOŚĆ ELEMENTÓW GIPSOWYCH NA ZGINANIE W STANIE SUCHYM

16.1. Rozkład odkształceń i naprężeń w przekrojach normalnych zginanych belek gipsowych

Do badań użyto gipsów budowlanych z surowców naturalnych GB-N1, z bieżących dostaw rynkowych nr 2-02 i nr 2-03. Skład chemiczny i mineralny gipsów podano w tabeli 5.4 Jako ciała próbne stosowano beleczki 4x4x16 cm i równocześnie belki 6x10x50 cm; wykonane z zaczynów gipsowych o zmiennym W/G od 0,4 do 1,5. Pomiarów odkształceń w przekrojach zginanych dokonywano za pomocą sond tensooporowych (rys. 16.1), z równoczesnym pomiarem ugięć przy zastosowaniu czujników przemieszczeń. Szczegółową metodykę badań podał autor w publikacjach własnych [127, 128].

Przykłady rozkładu odkształceń w przekrojach normalnych zginanych belek gipsowych, wykonanych z zaczynów o W/G = 0,5 – 1,5, dla różnych poziomów σ_{gtb}/f_{gtb} , równych: 0,3; 0,6 i 0,9, podano na rysunku 16.2.

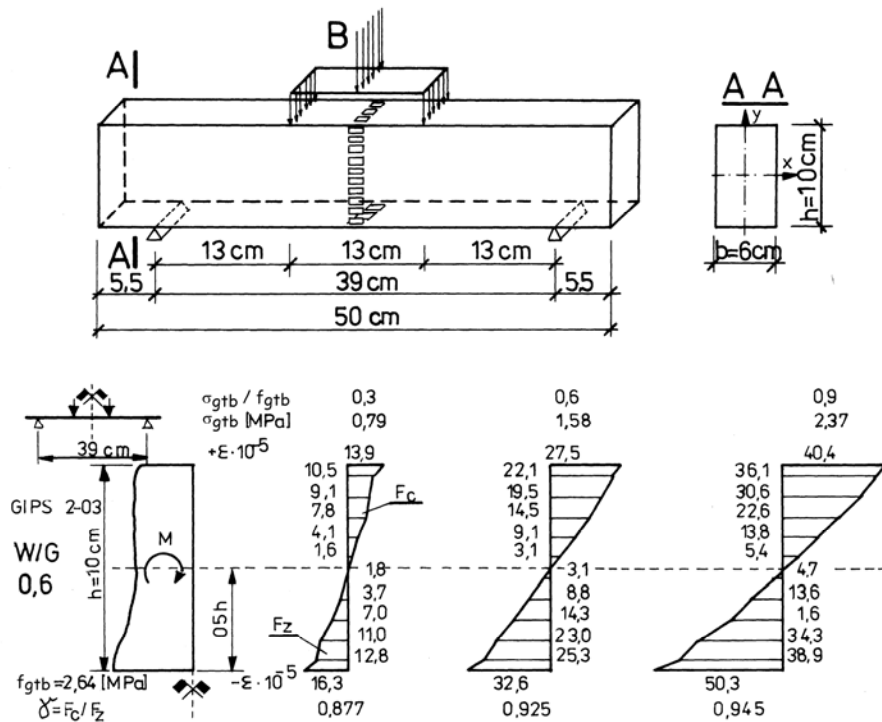
Naprężenia zginające oznaczono normatywnie według zależności:

$$\sigma_{gtb} = \frac{6M}{bh^2} \quad (16.1)$$

Dla każdej serii badań belek o danym W/G wykonano pilotażowe badania niszczące i określono wytrzymałość niszczącą f_{gtb} , przy której wystąpił kruchy przelom belki. Dla belek następnych wykonano już badania z sondami tensooporowymi, z pomiarami odkształceń ε dla trzech poziomów obciążeń $\sigma_{gtb}/f_{gtb} = 0,3; 0,6$ i $0,9$. Wyniki badań na rysunku 16.2. prowadzą do wniosku, że w przybliżeniu dla całego zakresu obciążeń $\sigma_{gtb}/f_{gtb} = 0,3 - 0,9$ można przyjąć słuszność zasady Bernoulliego: płaskich przekrojów przed i po odkształceniu. Dolne włókna rozciągane wykazują jednak tendencję do większych odkształceń (częściowe uplastycznienie). Oś obojętna przekroju z techniczną dokładnością jest zachowana w środku geometrycznym przekroju belki, dla całego zakresu stopniowo narastających obciążeń. Stosunek pola strefy ściskanej A_c , do pola strefy rozciąganej A_t , według zależności:

$$\gamma = \frac{A_c}{A_t} \quad (16.2)$$

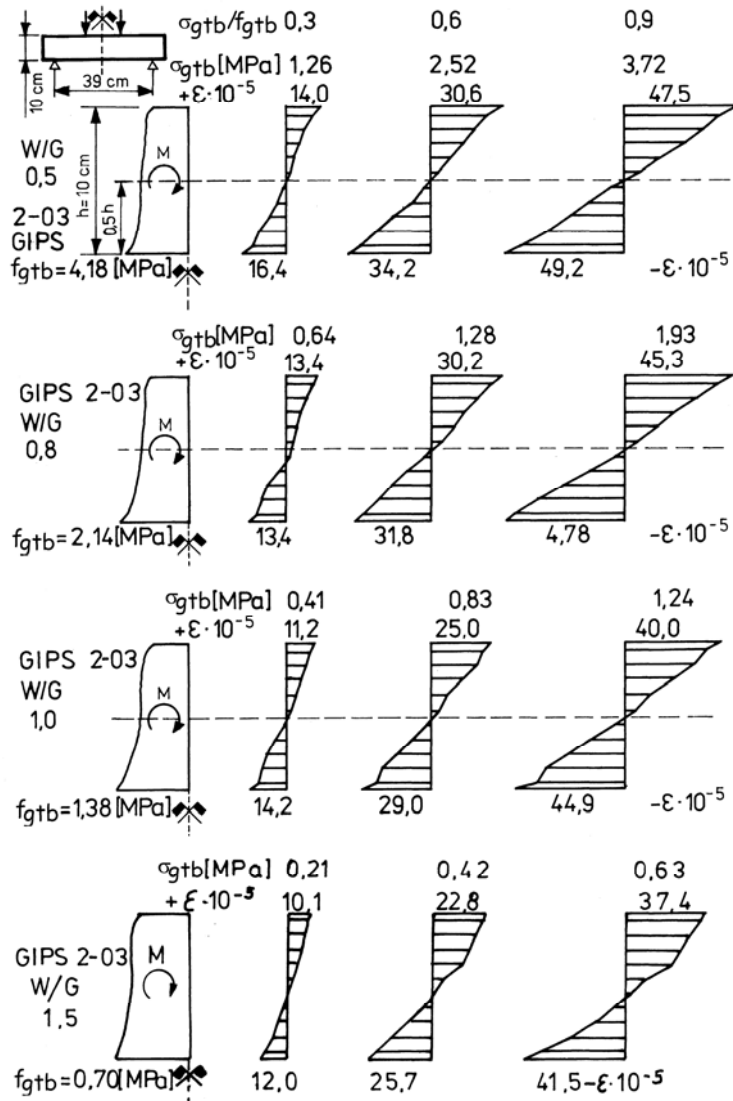
waha się w zakresie wartości: od 0,877 do 0,945. Z reguły więc występowała przewaga pola ciągnień w strefie dolnej nad powierzchnią ściskania w strefie górnej. Wyniki badań dla całej serii prób $W/G = 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5$ są jakościowo podobne.



Rys.16.1.a) Sposób obciążeń i rozmieszczenie sond tensometrycznych w zginanych belkach z gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym; b) wartości odkształceń ϵ w przekroju poprzecznym badanej belki gipsowej o $W/G = 0,6$: σ_{gtb} – naprężenia zginające w belce,

f_{gtb} – naprężenia graniczne (przełomowe)

Fig. 16.1. a) Load type and location of extensometers in GB-N1 building plaster beams in dry state; b) strain values ϵ in cross-section of tested gypsum beam with $W/G = 0,6$: σ_{gtb} – bending stress in beam, f_{gtb} – limit (breaking through) stress



Rys. 16.2. Rozkład odkształceń ϵ w przekrojach normalnych zginanych belek z gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym: σ_{gtb} – naprężenia normalne w belce zginanej (16.1), f_{gtb} – wytrzymałość na zginanie, W/G – wskaźnik wodno-gipsowy

Fig. 16.2. Distribution of strains ϵ in normal sections of bent GB-N1 building plaster beams in dry state: σ_{gtb} – normal stress in bent beam (16.1), f_{gtb} – bending strength, W/G – hydro-gypsum index

Na rysunku 16.3 podano wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla skrajnych włókien w teście zginania. Na rysunku 16.3a zestawiono wykresy $\sigma - \varepsilon_{gb}^+$ dla skrajnych włókien ściskanych, na rysunku 16.3b wykresy $\sigma - \varepsilon_{gb}^-$ dla skrajnych włókien rozciąganych, odpowiednio dla belek 6 x 10 x 50 cm i serii belek 4 x 4 x 16 cm, wykonanych z zaczynów o W/G od 0,5 do 1,5. Punkty skrajne tworzą obwiednię pomierzonych granicznych wartości ciągnięć ε_{gtb}^- , które dla stosowanych warunków badań wahały się w zakresie wartości:

$$\max. \varepsilon_{gtb}^- = (4,5 - 5,6) \cdot 10^{-4} \text{ dla belek } 6 \times 10 \times 50 \text{ cm,}$$

$$\max. \varepsilon_{gtb}^- = (5,0 - 6,7) \cdot 10^{-4} \text{ dla belek } 4 \times 4 \times 16 \text{ cm.}$$

Dla zginanych płyt z gipsu dentystycznego o W/G = 0,6 do 1,0 Denkiewicz [53] uzyskał podobne wartości ε_{gtb}^- od $5,5 \cdot 10^{-4}$ do $6,0 \cdot 10^{-4}$.

Na podstawie statystycznych analiz ustalono w pracy graniczną wartość odkształcalności granicznych w strefie ciągnięć ε_{gtb}^- , dla badanych serii belek zginanych, wykonanych z gipsu budowlanego GB-N1, w szerokim zakresie zmian wskaźnika W/G i wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , w postaci związku

$$\max. \varepsilon_{gtb}^- = 46,24 f_{gc}^{0,0888} \cdot 10^{-5} \quad (16.3)$$

ze współczynnikiem korelacji $R^2 = 0,9892$,

gdzie:

$\max. \varepsilon_{gtb}^-$ – odkształcenie graniczne skrajnych „włókien” rozciąganych w elemencie zginanym,

f_{gc} – wytrzymałość zaczynów na ściskanie.

Na rysunku 16.4a podano stwierdzone doświadczalnie funkcje wytrzymałości badanego gipsu budowlanego nr 2-03 na ściskanie $f_{gc} = f(\omega)$ i na zginanie $f_{gtb} = f(\omega)$. Rysunek 16.4a obrazuje dużą rezerwę nośności strefy ściskanej belek zginanych w stosunku do słabej wytrzymałościowo strefy rozciąganej. Na rysunku 16.4b naniesiono wartości $\varepsilon_{gtb,max}^-$, które rosną wraz ze wzrostem wytrzymałości f_{gtb} i skorelowanej wytrzymałości f_{gc} , według zależności 16.3. Na rysunku 16.4 podano także moduły sprężystości gipsu, wyznaczone dla włókien skrajnych odpowiednio:

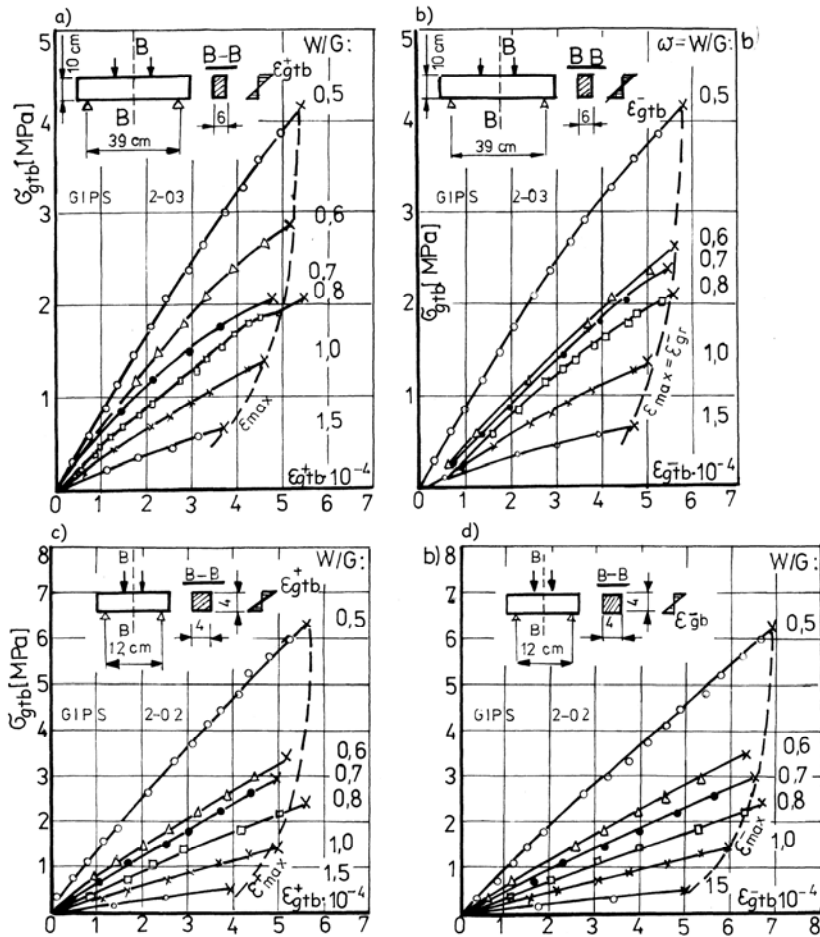
– moduł w strefie ściskań:

$$E_{gb}^+ = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{gb}^+} \quad (16.4)$$

– moduł w strefie rozciągań:

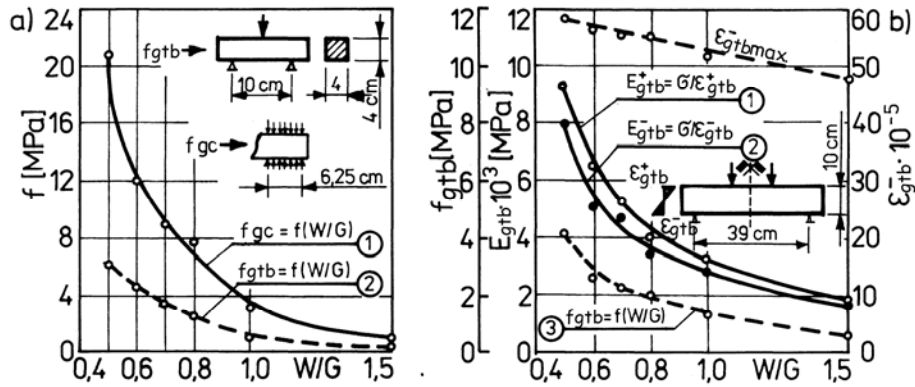
$$E_{gb}^- = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{gb}^-} \quad (16.5)$$

Moduły sprężystości E_{gb}^+ i E_{gb}^- rosną monotonicznie w funkcji malejących wartości W/G , zupełnie podobnie jak funkcje wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} = f(\omega)$. Stąd wystąpiła potrzeba opracowania korelacji $E_{gb} = f(f_{gc})$, podobnie jak stosuje się standardowo w mechanice betonów (Godycki [74], Kamiński [108, 109]).



Rys. 16.3. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla skrajnych włókien zginanych belek z gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym: a) i c) wykresy ε_{gb}^+ dla skrajnych włókien ściskanych, b) i d) wykresy ε_{gb}^- dla skrajnych włókien rozciąganych, W/G – wskaźnik wodno-gipsowy

Fig. 16.3. Charts $\sigma - \varepsilon$ for extreme fibres of bent GB-N1 building plaster beams in dry state: a) and c) charts ε_{gb}^+ for extreme compressed fibres, b) and d) charts ε_{gb}^- for extreme tensed fibres, W/G – hydro-gypsum index



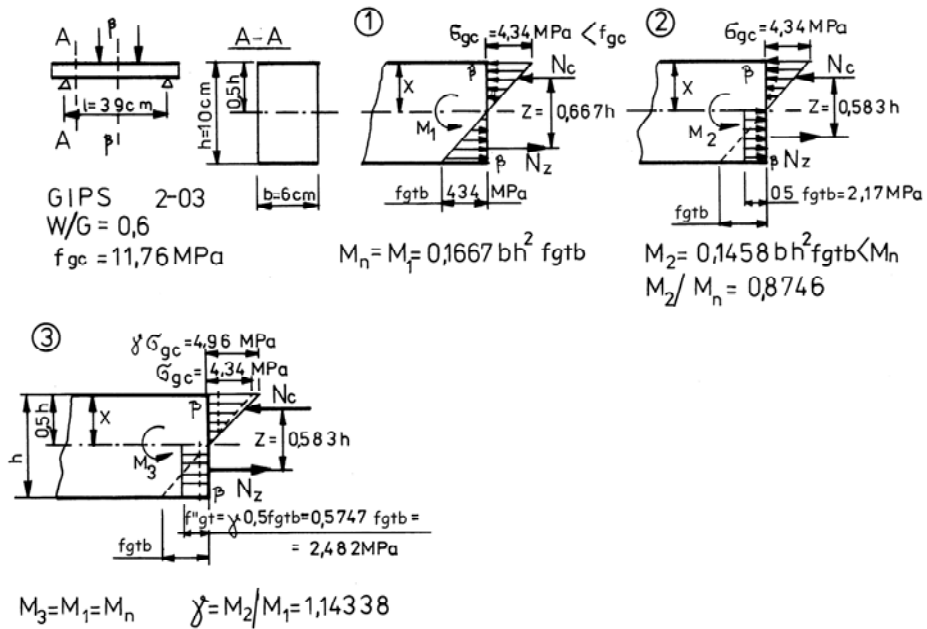
Rys. 16.4. a) Krzywe zależności wytrzymałości dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, z dostawy rynkowej nr 2-03 w stanie suchym, od wskaźnika W/G : f_{gb} – wytrzymałość na zginanie, f_{gc} – wytrzymałość na ściskanie; b) krzywe odkształceń ϵ i modułów sprężystości E dla dojrzałych zaczynów gipsowych o różnych wskaźnikach W/G : E_{gb}^+ – moduł odkształcalności skrajnych włókien ściskanych, E_{gb}^- – moduł odkształcalności skrajnych „włókien” rozciąganych, $\epsilon_{gb,max}^-$ – graniczne wartości odkształceń rozciągających dolne „włókna” beleczek zginanych

Fig. 16.4. a) Strength relation curves of hardened GB-N1 building plaster paste, from market supply No 2-03 in dry state and W/G index: f_{gb} – bending strength, f_{gc} – compressive strength; b) curves of strains ϵ and modules of elasticity E for hardened gypsum paste with different W/G indexes: E_{gb}^+ – elasticity module of extreme compressed fibres, E_{gb}^- – elasticity module of extreme tensed „fibres”, $\epsilon_{gb,max}^-$ – limit values of strains tensing the lower „fibres” of bent beams

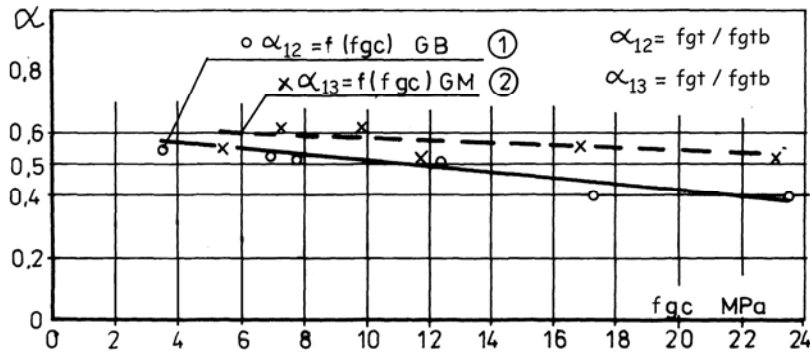
16.1. Analiza nośności na zginanie

Analityczne rozkłady sił wewnętrznych w zginanych elementach gipsowych podano na rysunku 16.5. Rozkład liniowy sił wewnętrznych, jak podano na schemacie 1 (rys. 16.5), prowadzi do wyznaczenia naprężeń rozciągających przy zginaniu σ_{gtb} i granicznych wartości wytrzymałości f_{gtb} dla włókien skrajnych, przy wyznaczonym doświadczalnie momencie niszcącym M_n . Dla schematu nr 1, stanowiącego odwzorowanie normowej zależności (16.1), moment niszcący M_n jest równoważony momentem sił wewnętrznych M_1 , według relacji:

$$M_n = M_1 = 0,1667bh^2f_{gtb} \quad (16.6)$$



Rys. 16.5. Schemat rozkładu sił wewnętrznych w belce zginanej z gipsu o $W/G = 0,6$ w stanie suchym (gips budowlany GB-N1)
 Fig. 16.5. Scheme of internal force distribution in gypsum bent beam with $W/G = 0,6$ in dry state (GB-N1 building plaster)



Rys. 16.6. Graficzne dane do aproksymacji zależności $\alpha_{12} = f_{gt}/f_{gb} = f(f_{gc})$ dla gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym (badania własne) oraz zależności $\alpha_{13} = f_{gt}/f_{gb} = f(f_{gc})$ dla gipsu „Molda Normal” w oparciu o wyniki Wianeckiego [345]
 Fig. 16.6. Graphic data for approximation of relation $\alpha_{12} = f_{gt}/f_{gb} = f(f_{gc})$ for GB-N1 building plaster in dry state (own research) and relation $\alpha_{13} = f_{gt}/f_{gb} = f(f_{gc})$ „Molda Normal” gypsum basing on Wianecki's results [345]

Jednak wyznaczona z zależności (16.6) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} jest zdecydowanie większa od wartości wytrzymałości gipsu na rozciąganie, wyznaczonej w próbach osiowego rozciągania f_{gt} czy w próbach rozłupywania walców f'_{gt} . Z wyników badań własnych wynika, że stosunek wartości wytrzymałości f'_{gt} do wartości wytrzymałości na zginanie f_{gtb} (wyznaczone z zależności (16.1)), w postaci relacji (16.7):

$$\alpha_{12} = \frac{f'_{gt}}{f_{gtb}} = f(f_{gc}) \quad (16.7)$$

zgodnie z analizą danych jak na rysunku 16.6 można aproksymować do liniowej zależności $\alpha_{12} = f(f_{gc})$, jak poniżej:

$$\alpha_{12} = 0,62 - 0,01f_{gc} \quad (16.8)$$

Z analizy wyników badań podanych na rysunkach 11.1 i 11.2. oraz rys.16.6 wynika wniosek, że wartość parametru α_{12} , dla zaczynów gipsowych o wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} < 12,0$ MPa (co odpowiada warunkom W/G > 0,6 dla spoiwa gipsu budowlanego GB-N1), wynosi:

$$\alpha_{12} < 0,5 \quad \text{dla } f_{gc} < 12,0 \text{ MPa,} \quad W/G > 0,6 \quad (16.9)$$

Na podstawie badań Wianeckiego [324] relację $\alpha_{13} = f_{gt}/f_{gtb} = f(f_{gc})$, dla gipsu francuskiego MOLDA NORMAL, można opisać zależnością (rys. 16.5):

$$\alpha_{13} = \frac{f_{gt}}{f_{gc}} = 0,62 - 0,0035f_{gc} \quad (16.10)$$

Wartości parametru α_{13} wahają się w przedziale $\alpha_{13} = 0,6 - 0,53$, dla szerokiego zakresu wytrzymałości gipsu na ściskanie, w przedziale wartości $f_{gc} = 2 - 22$ MPa.

Postawienie warunku, że skrajne włókna mogą przenosić wartość naprężeń rozciągających $\sigma_{gt} = 0,5f_{gtb}$, prowadzi do układu sił wewnętrznych jak w schemacie 2 na rysunku 16.5, przy przyjęciu pełnego uplastycznienia strefy rozciąganej, zgodnie z klasyczną już teorią Muraszewa, opracowaną dla elementów na spoiwie cementowym, na podstawie analizy nośności na zginanie, w oparciu o ówczesne normy RWPG (Rzyżyński [292]) i w oparciu o nowe normy EC (Kamiński z zespołem [108, 109]). Obliczona dla takiego schematu wartość sił wewnętrznych M_2 jest mniejsza od rzeczywistego momentu niszczącego, według relacji:

$$\begin{aligned} M_2 &= 0,1458bh^2f_{gtb} < Mn \\ M_2 : M_n &= 0,8746 \end{aligned} \quad (16.11)$$

Na schemacie 3 na rysunku 16.5 podano obliczony analitycznie schemat sił wewnętrznych w zginanej belce gipsowej, który spełnia dwa obiektywnie stwierdzone fakty doświadczalne:

- a) oś obojętna jest położona w środku wysokości belki (zgodnie z wynikami badań jak na rys.16.2.);
 b) moment sił wewnętrznych M_3 jest równy stwierdzonemu doświadczalnie momentowi niszczącemu M_n .

Warunki postawione dla układu sił jak w schemacie 3 na rysunku 16.5 prowadzą do określenia reprezentatywnej obliczeniowej wytrzymałości gipsu stwardniałego na rozciąganie przy zginaniu f_{gt}'' (w stanie suchym), w postaci zależności:

$$f_{gt}'' = \gamma 0,5 f_{gtb} = 0,5747 f_{gtb} \quad (16.12)$$

gdzie: parametr korygujący γ – współczynnik zwiększający równocześnie naprężenia w strefie ściskanej i rozciąganej, w celu spełnienia warunku $M_3 = M_n$; wartość parametru γ wynosi: $\gamma = M_2 / M_1 = 1,14338$.

Moment rysujący M_r , równy momentowi M_n niszczącemu zginaną belkę z gipsu niezbrojonego w stanie suchym, można określić zależnością:

$$M_r = M_n = W_f f_{gt}'' \quad (16.14)$$

gdzie:

W_f – sprężysto-plastyczny wskaźnik wytrzymałości na zginanie.

Wskaźnik W_f wyznaczono w toku poniższych analiz:

- warunek nośności:

$$M_n \leq W_f f_{gt}'' = W_f \gamma \cdot 0,5 f_{gtb} = W_f \gamma \cdot 0,5 \frac{6M_n}{bh^2} \quad (16.15)$$

- po obustronnym podzieleniu przez wartość M_n prowadzi do związku:

$$1 \leq W_f \gamma \cdot 0,5 \frac{1}{W_o} \quad (16.15a)$$

gdzie: W_o – „sprężysty” wskaźnik wytrzymałości na zginanie, równy:

$$W_o = \frac{bh^2}{6} \quad (16.16)$$

- po przekształceniu wyrażenia (16.15a) wyznacza się poszukiwaną wartość wskaźnika sprężysto-plastycznego W_f :

$$W_f = \frac{W_o}{0,5\gamma} = \beta W_o = 1,7496 W_o \quad (16.17)$$

Po wstawieniu wyrażenia (16.17) do zależności (16.16) otrzymujemy wzór na wskaźnik W_f równy:

$$W_f = 1,7496 \frac{bh^2}{6} = 0,2916 bh^2 \quad (16.18)$$

Uzyskana zależność dla zginanych przekrojów gipsowych w stanie suchym, wyprobowana na podstawie autentycznych wyników ilościowych badań własnych, okazuje się identyczna z przyjętą w normie konstrukcji betonowych [416], stosowaną do obliczeń przekrojów w elementach zginanych z betonu niezbrojonego.

Ostatecznie, po wstawieniu zależności (16.18) do (16.14), otrzymuje się wzór na nośność zginanych przekrojów w elementach gipsowych, w stanie suchym w postaci relacji:

$$M_n = W_f f_{gt}'' = 0,2916bh^2 f_{gt}'' \quad (16.19)$$

Wykorzystując wyniki oznaczeń wytrzymałości $f_{gt} = f(G/W)$, zgodnie z relacją (11.6), wartość obliczeniową wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu można określić zależnością:

$$f_{gt}'' = 0,5747f_{gtb} = 0,5747 \cdot 1,533\omega^{1,77} = 0,88\omega^{1,77} \quad [\text{MPa}] \quad (16.20)$$

gdzie:

parametr liczbowy w zależności $f_{gtb} = f(\omega')$ jest równy 1,533 MPa,

$\omega' = G/W$, parametr bezwymiarowy

tym samym nośność przekrojów zginanych z badanego gipsu budowlanego GB-N1, w stanie suchym, o danym wskaźniku G/W , można określić zależnością:

$$M_n = 0,2916bh^2 f_{gt}'' = 0,2916bh^2 \cdot 0,88 \left(\frac{G}{W}\right)^{1,77} \cdot 10^3 = 0,256bh^2 \left(\frac{G}{W}\right)^{1,77} \cdot 10^3 \quad [\text{kNm}] \quad (16.21)$$

gdzie:

b, h – szerokość i wysokość przekroju gipsowego w m,

0,88 – parametr liczbowy równania (16.20) w MPa,

10^3 – przelicznik, według relacji $\text{MPa} = 10^3 \text{kN/m}^2$.

Przy obliczaniu nośności przekrojów zginanych elementów wykonanych z różnych rodzajów gipsów należy stosować odpowiednie zależności wytrzymałościowe podane w rozdziałach 10–14.

17. ODKSZTAŁCALNOŚĆ DORAŻNA I MODUŁY SPRĘŻYSTOŚCI STWARDNIAŁYCH GIPSÓW W STANIE SUCHYM I NAWILGOCONYM

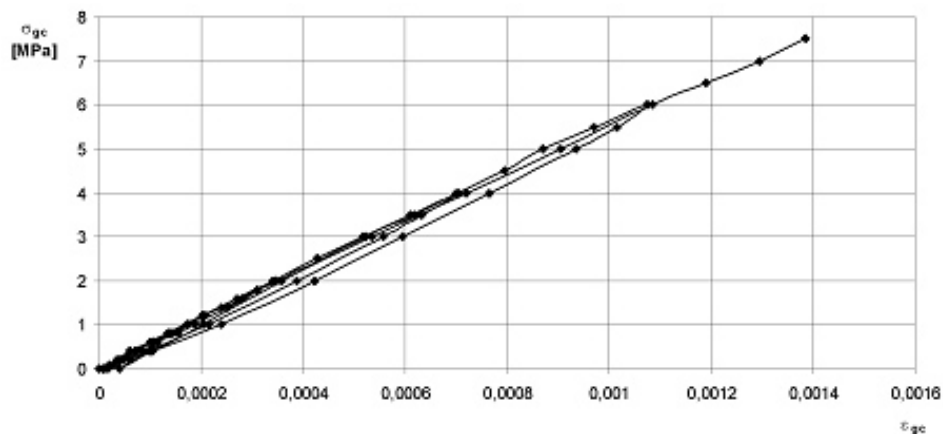
17.1. Odkształcalność i moduły sprężystości suchego gipsu w jednoosiowym stanie naprężeń ściskających

Stwardniały zaczyn gipsowy w stanie suchym o $W/G = 0,65$, reprezentatywny dla elementów prefabrykowanych, o wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} = 10,2$ MPa (belecзки 4x4x16 cm) i o wytrzymałości słupowej $f_{gc,s} = 8,65$ MPa, badany na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń, wykazuje w procesie cyklicznych obciążeń i odciążań relatywnie dużą sprężystość i praktycznie liniowość narastania odkształceń dla całego zakresu obciążeń $\sigma = 0 - f_{gc}$ (rys. 17.1). Dla przedziału obciążeń $\sigma = 0 - 6$ MPa ($\sigma/f_{gc} = 0 - 0,77$) odnotowano liniowy charakter $\sigma = f(\varepsilon)$, z wartością modułu sprężystości $E_{gc} = 5555$ MPa, a dla zakresu naprężeń $\sigma = 6,0 - 7,5$ MPa moduł sprężystości wynosi $E_{gc} = 4840$ MPa.

Badania wieloseryjne odkształcalności gipsu w stanie suchym, o wskaźnikach $W/G = 0,4-1,5$ przeprowadzono na losowej próbie gipsu budowlanego GB-N1 nr 2-02. Badania wykonano na próbkach 4x4x16 cm. Pomiar odkształceń ε wykonano równolegle: za pomocą sond tensooporowych i czujników odkształceń. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w prasach wytrzymałościowych I klasy dokładności. Stosowano obciążenia cykliczne rosnące, w postaci obciążeń i odciążań, o kolejno rosnącej amplitudzie siły jak podano na rysunku 17.1. Wartość modułów sprężystości określano normatywnie dla zakresu wyteżeń materiału $\sigma/f = 0,1 - 0,4$, jak postępuje się w przypadku oznaczeń modułów sprężystości dla betonów (Dąbrowski z zespołem [50], Kamiński z zespołem [108, 109]).

Stwierdzono, że moduły sprężystości gipsu w stanie suchym zależą funkcyjnie od wskaźnika $\omega = W/G$. Pary punktów pomiarowych $E_{gc} - \omega' = G/W$ układają się larnie wzdłuż krzywych monotonicznie rosnących (rys. 17.9), które można opisać

nościami typu (17.10) i (17.11). Zestawienie uzyskanych doświadczalnie krzywych i opis funkcji $E_{gc} = f(\omega')$ podano na rysunku 17.9 i zestawiono w tabeli 17.1.



Rys. 17.1. Charakterystyki odkształceń stwardniałego zaczynu gipsowego $W/G = 0,65$ w stanie suchym, w procesie cyklicznych obciążeń i odciążenia: σ_{gc} – naprężenie ściskające, ϵ_{gc} – odkształcenie jednostkowe. Próbkki walcowe o wymiarach 11,3 x 35,0 cm z gipsu budowlanego GB-N1 o $W/G = 0,65$

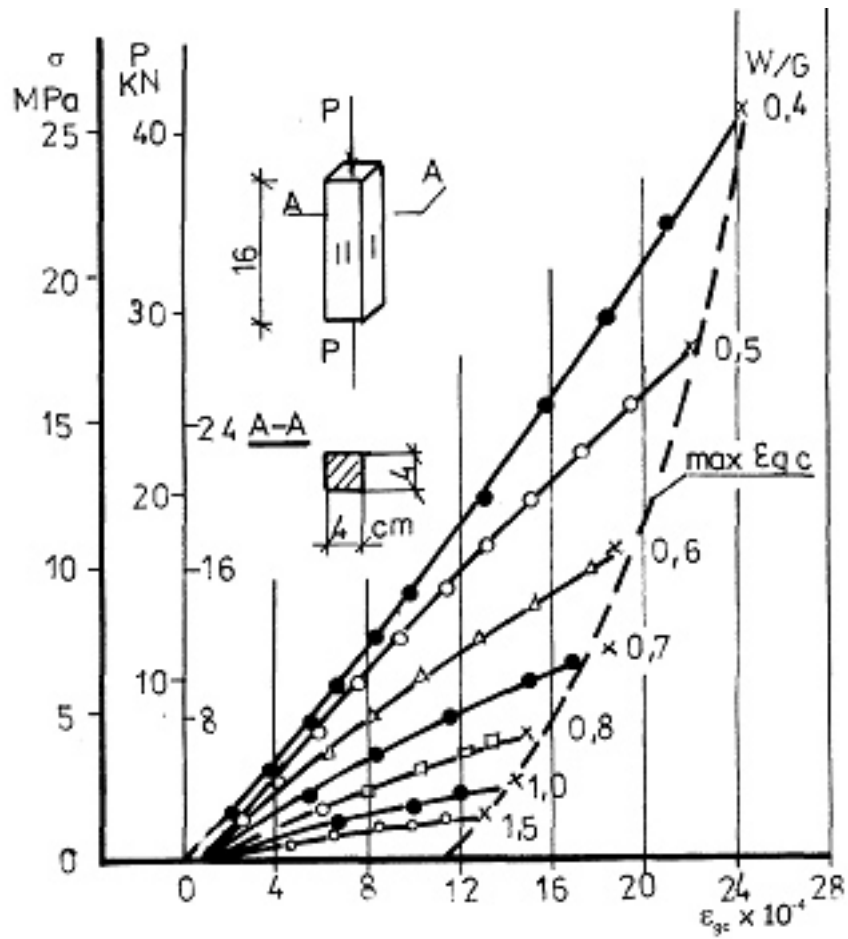
Fig. 17.1. Strain characteristics of hardened gypsum paste $W/G = 0,65$ in dry state, in the process of cyclic loading and unloading: σ_{gc} – compressive stress, f_{gc} – compressive strength, ϵ_{gc} – unit strain. Cylindrical 11,3 x 35,0 cm samples of GB-N1 building plaster with $W/G = 0,65$

Na rysunku 17.2 podano wykresy $\sigma - \epsilon$ dla ostatnich cykli obciążeniowych $\sigma_{gc} = 0 \rightarrow f_{gc}$, w celu dokumentacji wartości granicznych odkształceń $\max. \epsilon_{gc}$, dla badanej serii zaczynów w stanie suchym, w szerokim zakresie zmian wskaźnika $W/G = 0,4 - 1,5$. Wartości graniczne odkształceń $\epsilon_{gc,lim}$ tworzą rosnącą obwiednię, którą można opisać zależnością (17.1) i podaną na rys.17.3:

$$\max. \epsilon_{gc} = \epsilon_{gc,lim} = 10,7025f_{gc}^{0,2541} \cdot 10^{-4} \quad (17.1)$$

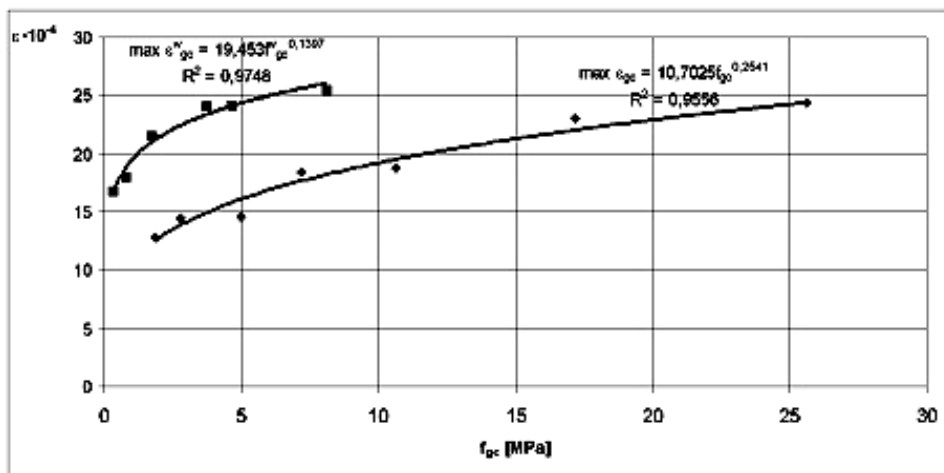
gdzie:

$\epsilon_{gc,lim}$ – odkształcenie jednostkowe przy ściskaniu elementów w stanie suchym,
 f_{gc} – wytrzymałość gipsu na ściskanie w MPa.



Rys. 17.2. Zestawienie krzywych $\sigma - \epsilon$ dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 w stanie suchym: σ_{gc} – naprężenia ściskające w MPa, P – wartość siły w kN, ϵ_{gc} – odkształcenia przy ściskaniu

Fig. 17.2. Comparison of curves $\sigma - \epsilon$ for GB-N1 building plaster hardened paste in dry state: σ_{gc} – compressive stress in MPa, P – value of force in kN, ϵ_{gc} – strains during compressive strength



Rys. 17.3. Krzywa zależności $\max. \varepsilon_{gc} = f(f_{gc})$ dla zaczynów gipsowych w stanie suchym (jak na rys. 17.1) oraz krzywa $\max \varepsilon_{gc}^w = f(f_{gc})$ dla zaczynów z gipsu w stanie pełnego nasycenia 24 h, wykonanych z gipsu budowlanego GB-N1: $\max \varepsilon_{gc}$ – graniczna wartość odkształceń ściskających w danym cyklu $\sigma - \varepsilon$, f_{gc} – naprężenia w chwili niszczenia próbki od obciążeń krótkotrwałych

Fig. 17.3. Relation curve $\max. \varepsilon_{gc} = f(f_{gc})$ of dry gypsum pastes and relation curve $\max. \varepsilon_{gc}^w = f(f_{gc})$ of fully saturated pastes (after 24 hour) made of building plaster paste GB-N1, as shown in Fig. 17.1: $\max \varepsilon_{gc}$ – limiting value of compressive strains in given $\sigma - \varepsilon$ cycle, f_{gc} – stress at failure of sample under short-lived load

17.2. Odkształcenia doraźne i moduły sprężystości gipsu nawilgoconego w jednoosiowym stanie naprężeń ściskających

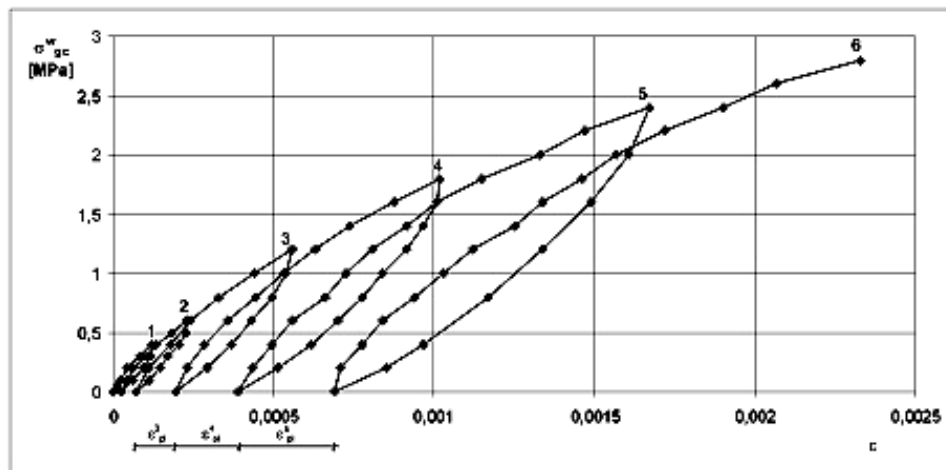
17.2.1. Odkształcenia doraźne gipsu w stanie nawilgoconym

Odkształcenia gipsu w stanie nawilgoconym składają się z następujących czynników składowych:

$$\varepsilon_g^w = \varepsilon_e + \varepsilon_{pl} - \varepsilon_v^+ + \varepsilon_p \quad (17.2)$$

gdzie:

- ε_e – odkształcenia sprężyste w chwili przekazania obciążeń o amplitudzie σ_{gc}^w (rys. 17.4);
- ε_{pl} – odkształcenia plastyczne gipsu, powstające w procesie narastania obciążeń doraźnych w przedziale $\sigma = 0 \rightarrow \sigma_{gc}^w$;
- ε_v^+ – pęcznienie gipsu suchego w wyniku wtórnego nawilgocenia, zależnie od wilgotności i wskaźnika W/G (rys. 18.2).
- ε_p – odkształcenia pełzania narastające w funkcji czasu działania obciążeń długotrwałych, dla $\sigma = \sigma_{gc}^w = \text{const.}$;

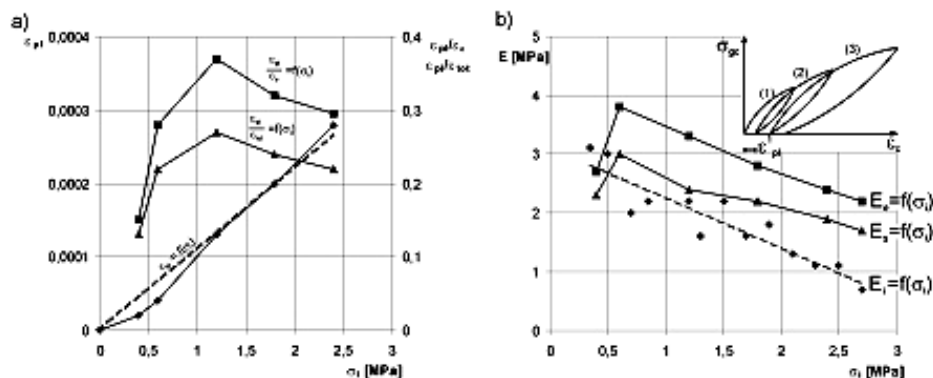


Rys. 17.4. Charakterystyka odkształceń doraźnych suchego gipsu W/G = 0,65 w stanie pełnego nawilgocenia: ε – odkształcenia, σ_{gc} – naprężenia ściskające, ε_{pl} – odkształcenia plastyczne. Próbki walcowe o wymiarach 11,3 x 35,0 cm z gipsu budowlanego GB-N1

Fig. 17.4. Temporary strain characteristic of dry gypsum with W/G = 0,65 in fully saturated state: ε – strains, σ_{gc} – compressive stress, ε_{pl} – plastic strains. Cylinder 11,3 x 35,0 cm samples of GB-N1 building plaster

W porównaniu do prawie sprężystej odkształcalności gipsu w stanie suchym (rys. 17.1), w stanie pełnego nawilgocenia dla identycznej próby gipsu o W/G = 0,65, o nasiąkliwości wagowej równej $n_w = 31,6\%$, odnotowuje się duże wartości odkształceń plastycznych w procesie kolejnych cyklicznych obciążeń i odciążenia, jak podano na rysunku 17.4. Zależność relacji naprężenie odkształcenie $\sigma_{gc}^w = f(\varepsilon)$ – dla każdego cyklu $i = 1 - 6$, o kolejno narastającej amplitudzie obciążeń σ_i (rys. 17.6) – ma charakter krzywoliniowy. Wartości reszkowych odkształceń plastycznych, trwałych ε_{pl} – odnotowane

dla każdego cyklu obciążenie – odciążenie – powiększają się wraz ze wzrostem amplitudy obciążeń σ_i w danym cyklu (rys. 17.5a). Reszkowe odkształcenia plastyczne można interpretować jako trwałe poślizgi na styku aglomeratów kryształów gipsu, które są proporcjonalne do amplitudy obciążeń, czyli proporcjonalne do pracy sił obciążających na odkształceniach wewnętrznych.



Rys. 17.5. a) Narastanie odkształceń reszkowych trwałych, plastycznych ε_{pl} w funkcji cyklicznych obciążeń doraźnych σ_i ; b) zmiany modułu sprężystości E_i w funkcji amplitudy obciążeń σ_i : E_e – moduł sprężysty, E_s – moduł sieczny, E_t – moduł bieżący $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. Próbki walcowe o wymiarach 11,3 x 35,0 cm, z gipsu budowlanego GB-N1, W/G = 0,65

Fig. 17.5. a) Increase of permanent plastic deformation ε_{pl} in function of cyclic temporary load σ_i ; b) Elastic modulus E_i changes dependent on load amplitude σ_i : E_e – tangential elastic modulus, E_s – secant elastic modulus, E_t – temporary tangential elastic modulus $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. Cylinder 11,3 x 35,0 cm samples of GB-N1 building plaster, W/G = 0,65

Odształcenia doraźne całkowite ε_{tot} , dla amplitudy obciążeń cyklicznych σ_i (jak na rys. 17.6), można opisać zależnością:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\sigma_i}{E_s} \quad (17.4)$$

gdzie:

E_s – moduł sprężystości sieczny $E_s = \tan\alpha_s$, w układzie współrzędnych jak na rysunku 17.6.

Dla materiałów gipsowych o krzywoliniowej charakterystyce $\sigma - \varepsilon$ sieczny moduł sprężystości $E_s = f(\sigma_i)$ obniża swą wartość wraz ze wzrostem amplitudy

obciążeń σ_i . Zgodnie z charakterystyką tej zmienności, jak podano na rysunku 17.5b, moduł sieczny można opisać w przybliżeniu funkcją liniową jak poniżej:

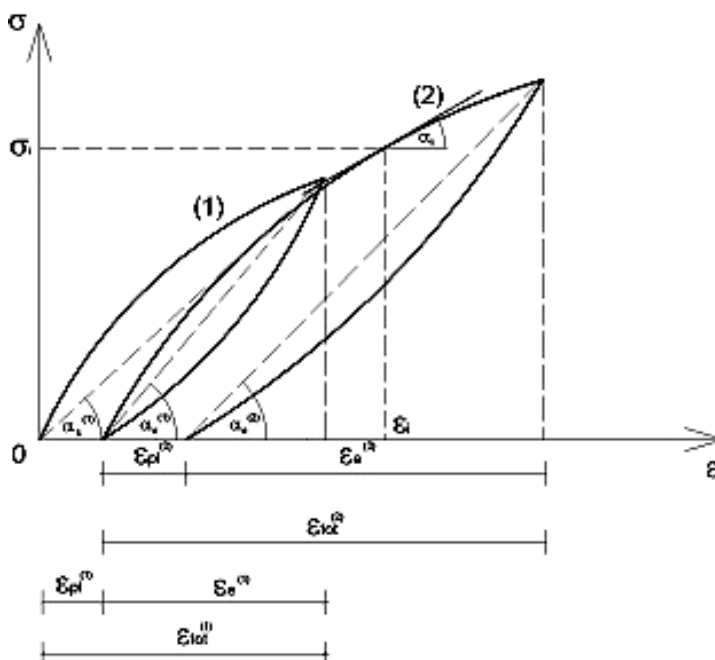
$$E_s = E_{s0} - a\sigma_i = 3264 - 584,4\sigma_i \quad (17.5)$$

gdzie:

σ_i – naprężenia w MPa, dla badanego nawilgoconego gipsu o $W/G = 0,65$, zawarte w przedziale $\sigma_i = 0 - 2,75$ MPa ($\sigma/f_{gc} = 0 - 1,0$);

E_{s0} – wyjściowy moduł sprężystości równy 3264MPa, dla początkowej amplitudy obciążeń $\sigma_i = 0,5$ MPa (rys. 17.5b);

$a = 584,4$ – parametr stały równania.



Rys. 17.6. Odształcenia dla próby z gipsu $W/G = 0,65$, w stanie pełnego nawilgocenia: σ_i – amplituda cyklicznych doraźnych obciążeń i odciążeń, ε_{pl} – odształcenia plastyczne, ε_{tot} – odształcenia całkowite, ε_e – odształcenia sprężyste

Fig. 17.6. Deformations of $W/G = 0,65$ gypsum sample, in fully saturated state: σ_i – amplitude of cycle temporary loading and unloading, ε_{pl} – plastic strain, ε_{tot} – total strain, ε_e – elastic strain

Odształcenia doraźne całkowite można opisać jako sumę odkształceń sprężystych ε_e i odkształceń plastycznych ε_{pl} (rys. 17.6), w postaci zależności:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma_i}{E_e} + \frac{\sigma_i}{E_{pl}} \quad (17.6)$$

Wartość modułu sprężystego $E_e = \tan \alpha_e$, opisanego wyrażeniem $E_e = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_e}$, nie jest dla badanego gipsu parametrem stałym, ale cechą zmienną, według zależności w przybliżeniu liniowej jak podano na rysunku 17.5b i 17.7:

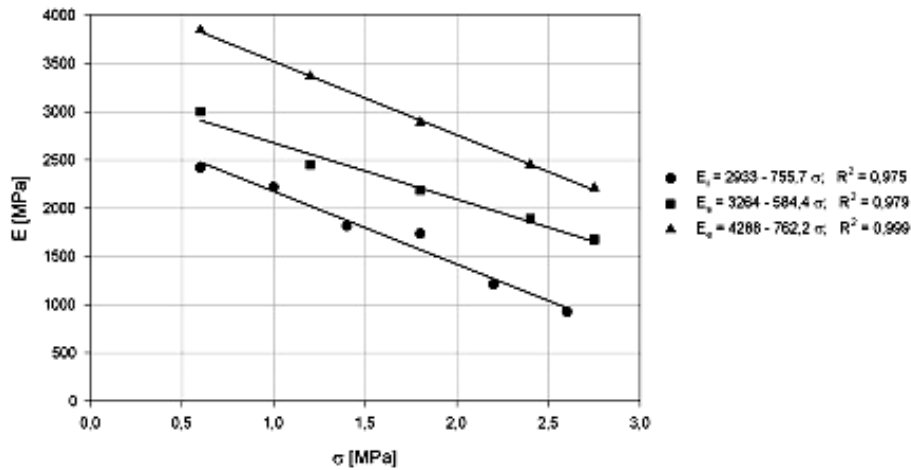
$$E_e = E_{e0} - a\sigma_i = E_e = 4288 - 762,2\sigma_i \quad (17.7)$$

gdzie:

σ_i – amplituda naprężeń ściskających w MPa;

E_{e0} – wyjściowy moduł sprężystości dla naprężeń $\sigma_i = 0,5$ MPa (rys. 17.5b), $E_{e0} = 4288$ MPa;

a – parametr stały równania, równy 762,2.



Rys. 17.7. Zmiany modułów odkształcalności gipsu: E_e – moduł sprężysty, E_s – moduł sieczny, E_i – moduł styczny $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$

Fig. 17.7. Change of gypsum deformability modulus: E_e – elastic modulus, E_s – secant modulus, E_i – tangential modulus $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$

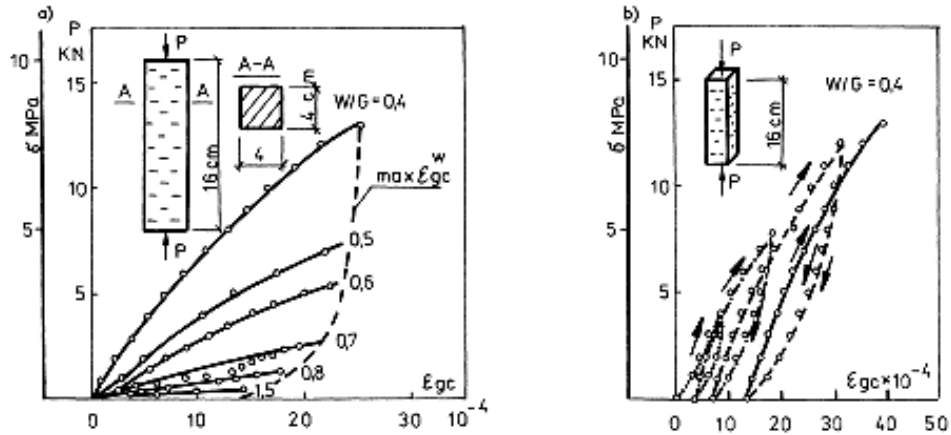
Wartość modułu odkształceń plastycznych E_{pl} jest parametrem funkcyjnym zależności $\varepsilon_{pl} - \sigma_i$ w przybliżeniu liniowej, uzyskanej doświadczalnie jak na rysunku 17.5a, w postaci funkcji:

$$\varepsilon_{pl} = a\sigma_i = E_{pl}\sigma_i \quad (17.8)$$

gdzie: $a = E_{pl} = 8333 \text{ MPa}$, jako $\text{tg}\alpha_{pl}$ wykresu $\varepsilon_{pl} = f(\sigma_i)$ podanego na rysunku 17.5a.

Charakter krzywej $\frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_e} = f(\sigma_i)$, podanej na rysunku 17.5a wskazuje, że stosunek odkształceń plastycznych ε_{pl} do odkształceń sprężystych ε_e , a także do odkształceń całkowitych ε_{tot} , jest złożoną funkcją zmienną, z górnym ekstremum i nie występują przejrzyste relacje w tym zakresie.

17.2.2. Badania odkształcalności doraźnej nawilgoconych gipsów o różnym W/G



Rys. 17.8. a) Zestawienie krzywych $\sigma - \varepsilon$ dla ściskanych próbek zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 (losowa dostawa nr 2-02), w stanie pełnego nawilgocenia wodą przez okres 24 h: σ_{gc} – naprężenia ściskające, P – siła obciążająca, ε_{gc} – odkształcenia pionowe;

b) wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla stosowanych typowo cyklicznych obciążeń

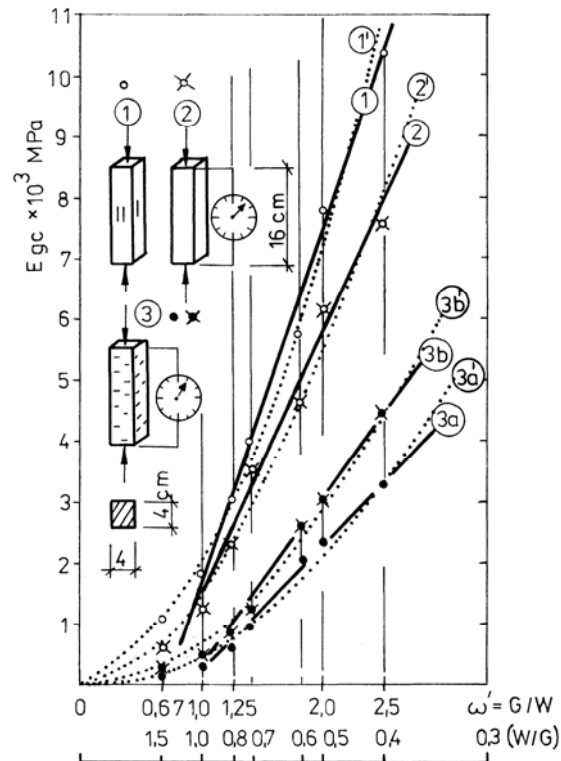
Fig. 17.8. a) Comparison of curves $\sigma - \varepsilon$ for compressed samples of GB-N1 building plaster paste (random supply No 2-02), in fully humid state for the period of 24 h: σ_{gc} – compressive stress, P – loading force, ε_{gc} – vertical strain; b) charts $\sigma - \varepsilon$ for cyclic loads used customarily

Wartości modułów odkształcalności badanych zaczynów gipsowych, określane według relacji:

$$E_g = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{dla przedziału } \frac{\sigma}{f_g} = 0,1 - 04 \quad (17.9)$$

podano w zestawieniu na rysunku 17.9. Punkty pomiarowe E_{gc} – G/W układają się regularnie wzdłuż monotonicznych krzywych potęgowych. Opis funkcyjny relacji $E_{gc} = f(G/W)$ podano w postaci dwóch typów zależności:

- | | | |
|------|---|---------|
| 1) | $E_{gc} = 5907(\omega' - 0,709)$ [MPa], $\omega' > 1,0$; | (17.12) |
| 1') | $E_{gc} = 2154\omega'^{1,768}$ [MPa] | (17.13) |
| 3a) | $E_{gc}^w = 2102(\omega' - 0,847)$ [MPa], $\omega' > 1,0$ | (17.14) |
| 3'a) | $E_{gc}^w = 442\omega'^{2,3}$ [MPa] | (17.15) |
| 3b) | $E_{gc}^w = 2953(\omega' - 0,953)$ [MPa], $\omega' > 1,0$ | (17.16) |
| 3'b) | $E_{gc}^w = 553\omega'^{2,25}$ [MPa] | (17.17) |



Rys. 17.9. Zestawienie krzywych $E_{gc} = f(\omega' = G/W)$ dla ściskanych próbek wykonanych z zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, w stanie suchym oraz pełnego nawilgocenia (próba losowa nr 2-02): E_{gc} – moduł sprężystości według (17.9), $\omega' = G/W$ – wskaźnik gipsowo-wodny

Fig. 17.9. Comparison of curves $E_{gc} = f(\omega' = G/W)$ for compressed samples made of GB-N1 building plaster paste in dry and fully humid state (random sample No 2-02): E_{gc} – elasticity modulus in accordance with (17.9), $\omega' = G/W$ – gypsum-water index

typ I:

$$E_{gc} = E_{01}(\omega' - a) \quad \text{dla } \omega' \geq 1,0 \quad (17.10)$$

typ II:

$$E_{gc} = E_{02}\omega'^b \quad \text{dla } \omega' = 0,67 - 2,5 \quad (17.11)$$

gdzie:

$\omega' = G/W$ – wskaźnik gipsowo-wodny,

E_{01}, E_{02} – stałe bazowe w MPa,

a, b – parametry funkcyjne.

Krzywe $\sigma - \varepsilon$ dla ściskanych próbek gipsowych w stanie pełnego nawilgocenia (przez zalanie wodą na okres 24 h), podane na rysunku 17.8, dokumentują mniejsze wartości graniczne wytrzymałości f_{gc}^w , większe wartości ε_{gc}^w oraz tendencję do plastycznych odkształceń (rys. 17.8b). Wartości graniczne odkształceń $\varepsilon_{gc,lim}^w$, oznaczane dla ostatniego, niszczonego cyklu obciążeń $\sigma_{gc}^w = 0 \rightarrow f_{gc}^w$, tworzą obwiednię graniczną wartości $\max. \varepsilon_{gc}^w$, którą można opisać zależnością (rys. 17.2):

$$\max. \varepsilon_{gc}^w = \varepsilon_{gc,lim}^w = 19,453f_{gc}^{w0,1397} \cdot 10^{-4} \quad (17.18)$$

gdzie:

ε_{gc}^w – graniczne odkształcenie jednostkowe przy ściskaniu elementu w stanie nawilgoconym,

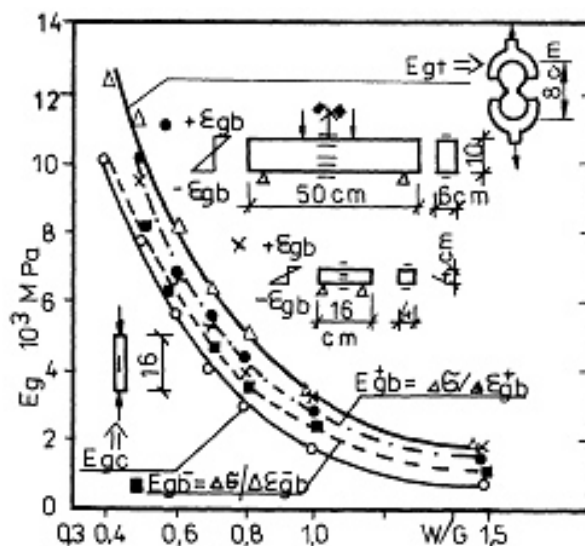
f_{gc}^w – wytrzymałość gipsu na ściskanie w stanie pełnego nawilgocenia, w MPa.

17.3. Odkształcenia „włókien” skrajnych w elementach zginanych w stanie suchym

Napężenia ściskające górną i rozciągające dołem w badanych belkach zginanych, w przekrojach w środku rozpiętości we włóknach skrajnych, są równe napężeniom głównym σ_1 i σ_2 (Dąbrowski [50], Godycki [74]). Oznacza to, że włókna skrajne w osi rozpiętości są w stanie jednoosiowego ściskania (górną) i rozciągania (dołem) – Kamiński z zespołem [109].

Moduły odkształcalności dla skrajnych włókien zginanych belek gipsowych o różnym W/G , z charakterystyką jak podano na rysunku 16.3, opracowano zgodnie z zależnością (17.9) i podano graficznie na rysunku 17.10. Na rysunku tym zestawiono zbiorczo rezultaty zależności funkcyjnych $E_{gb}^+ = f(W/G)$ i $E_{gb}^- = f(W/G)$, odpowiednio dla skrajnych włókien ściskanych i dla skrajnych włókien rozciąganych, dla dwóch dużych serii badań wykonanych na belkach $6 \times 10 \times 50$ cm oraz na beleczkach $4 \times 4 \times 16$ cm. Na rysunku 17.10 pokazano także krzywoliniową zależność modułu sprężystości w postaci funkcji $E_{gc} = f(W/G)$ jako rezultat opracowania wyników badań gipsu na ściskanie,

podanych na rysunku 17.2, oraz krzywe $E_{gt} = f(W/G)$ jako rezultat opracowania wyników badań odkształcalności gipsów na „osiowe” rozciąganie, uzyskane w serii badań rozciągania próbek ósemek z naklejonymi sondami tensooporowymi. Cztery krzywe: $E_{gt} = f(W/G)$, $E_{gb}^+ = f(W/G)$, $E_{gb}^- = f(W/G)$, $E_{gc} = f(W/G)$ mają jednakowo podobny przebieg funkcyjny i są ilościowo relatywnie do siebie zbliżone. Najwyżej położona jest krzywa $E_{gc} = f(W/G)$, uzyskana dla wyników ściskań relatywnie smukłych beleczek $4 \times 4 \times 16$ cm, o smukłości $\lambda = b/h = 4$. Najniższe wartości modułów $E_{gt} = f(W/G)$ uzyskano w serii badań rozciągania „ósemek”.



Rys. 17.10. Zestawienie wyników oznaczeń modułów odkształcalności doraźnej $E_g = f(W/G)$ gipsu budowlanego GB-N1: E_{gb}^+ – dla skrajnych włókien ściskanych w belkach zginanych, E_{gb}^- – dla skrajnych włókien rozciąganych w belkach zginanych, E_{gc} – dla osiowego ściskania belek $4 \times 4 \times 16$ cm

Fig. 17.10. Comparison of results of temporary deformability module denotations $E_g = f(W/G)$ of GB-N1 building plaster GB-N1: E_{gb}^+ – for extreme fibres compressed in bent beams, E_{gb}^- – for extreme fibres tensed in bent beams, E_{gc} – for axial compressive strength of beams $4 \times 4 \times 16$ cm

Hiperboliczne krzywe $E_g = f(W/G) = f(\omega)$, zestawione na rysunku 17.10, po zmianie współrzędnej niezależnej na $\omega' = \frac{G}{W} = \frac{1}{\omega}$, przybierają charakter linii prostych dla przedziału $G/W = 1,0 - 2,5$, czyli dla praktycznie stosowanego przedziału $W/G = 1,0 - 0,4$. Zestawienie transponowanych zależności $E_g = f(\omega') = f(G/W)$ podano

na rysunku 17.11. Podobnie jak w przypadku danych podanych na rysunku 17.9 zależności funkcyjne jak na rysunku 17.11 można opisać zależnościami liniowymi dla $\omega' = 1,0 - 2,5$ lub zależnościami potęgowymi dla całego przedziału $\omega' = 0 - 2,5$ (tab. 17.1).

Tabela 17.1

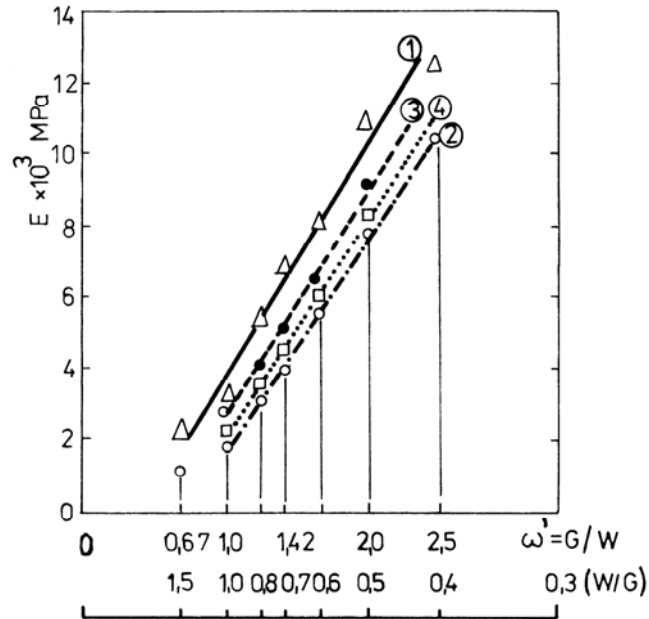
Table 17.1

Opis zależności modułów odkształcalności doraźnej w różnych stanach naprężeń, dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1, w funkcji wskaźnika gipsowo-wodnego $\omega' = G/W$, w stanie suchym i wilgotnym

Description of temporary deformability modules in different states of stress, for hardened GB-N1 building plaster paste, in the function of $\omega' = G/W$ gypsum-water index in dry and humid state

Lp. No	Stan naprężeń State of stress	Stan wilgotności State of humidity	Zakres ważności Validity range	Jednostka Unit	Funkcja opisująca Describing function	Nr wzoru Formula No
1	2	3	4	5	6	7
1.	Ściskanie osiowe Axial compressive strength	Suchy dry	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gc} = 5907(\omega' - 0,709)$	(17.12)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gc} = 2154\omega'^{1,768}$	(17.13)
2.	Ściskanie osiowe Axial compressive strength	nawilgocony 24 h humid 24 h	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gc} = 2102(\omega' - 0,874)$	(17.14)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gc} = 442\omega'^{2,3}$	(17.15)
3.	Ściskanie osiowe Axial compressive strength	świeży zaczyn po 2 h fresh paste after 2 h	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gc} = 2953(\omega' - 0,953)$	(17.16)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gc} = 553\omega'^{2,25}$	(17.17)
4.	Ściskanie włókien skrajnych w belkach zginanych Compressive strength of extreme fibres in bent beams	suchy dry	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gb}^+ = 6383(\omega' - 0,587)$	(17.19)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gb}^+ = 3159\omega'^{1,42}$	(17.20)
5.	Rozciąganie włókien skrajnych w belkach zginanych Tensile strength of extreme fibres in bent beams	suchy dry	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gb}^- = 5842(\omega' - 0,614)$	(17.21)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gb}^- = 2782\omega'^{1,463}$	(17.22)
6.	Osiowe rozciąganie („ósemek”) 8-shaped sample axial tensile strength	suchy dry	$\omega' \geq 1,0$	MPa	$E_{gt} = 6322(\omega' - 0,38)$	(17.23)
			$\omega' = 0,67 - 2,5$	MPa	$E_{gt} = 3658\omega'^{1,497}$	(17.24)

- ① $E_{gt} = 6332 (\omega' - 0,38) \text{ MPa}, \quad \omega' \geq 1,0 \quad (17.23)$
- ①' $E_{gt} = 3658 \omega'^{1,497} \text{ MPa}; \quad (17.24)$
- ② $E_{gc} = 5907 (\omega' - 0,709) \text{ MPa}, \quad \omega' \geq 1,0 \quad (17.12)$
- ②' $E_{gc} = 2154 \omega'^{1,768} \text{ MPa}; \quad (17.13)$
- ③ $E_{gb}^+ = 6383 (\omega' - 0,587) \text{ MPa}, \quad \omega' \geq 1,0 \quad (17.19)$
- ③' $E_{gb}^+ = 3159 \omega'^{1,42} \text{ MPa}; \quad (17.20)$
- ④ $E_{gb}^- = 5842 (\omega' - 0,614) \text{ MPa}, \quad \omega' \geq 1,0 \quad (17.21)$
- ④' $E_{gb}^- = 2782 \omega'^{1,463} \text{ MPa}. \quad (17.22)$

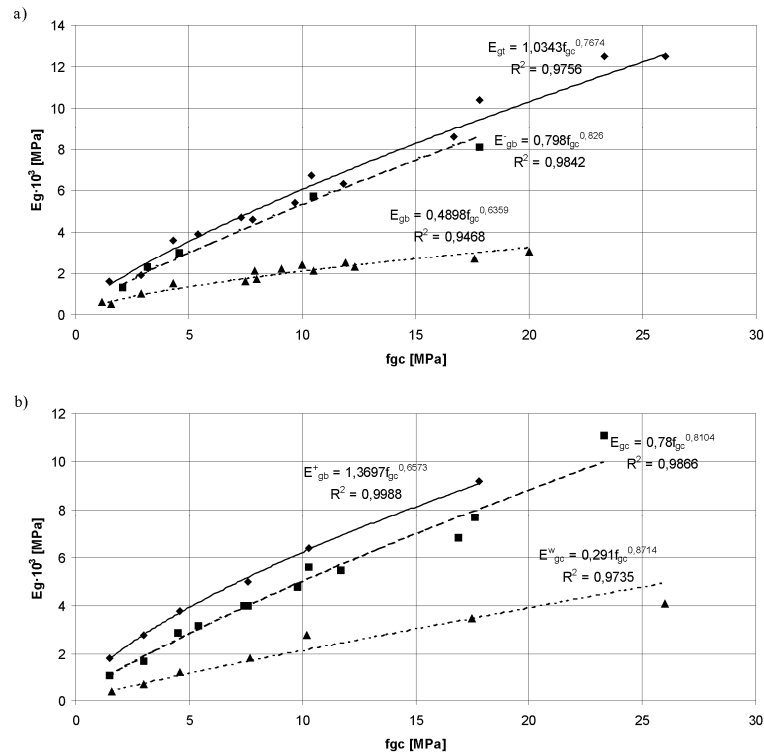


Rys. 17.11. Zestawienie wyników badań modułów odkształcalności doraźnej stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 (losowa próba gipsu nr 2-02). Opis krzywych podano w tabeli 17.1

Fig. 17.11. Comparison of test results of temporary deformability modules of hardened GB-N1 building plaster paste (random gypsum sample No 2-02). Description of curves presented in table 17.1

17.4. Moduły sprężystości gipsu w funkcji jego wytrzymałości na ściskanie

Na rysunku 17.12 podano zależność modułów sprężystości E_g stwardniałych zaczynów gipsowych dla różnych stanów naprężeń, jak opisano w tabeli 17.1, w funkcji wytrzymałości na ściskanie f_{gc} . Stwierdzono, że pary punktów $E_g - f_{gc}$ układają się regularnie wzdłuż krzywych monotonicznie rosnących, które można opisać funkcją typu $E_g = a \cdot f_{gc}^b$. Opis modułów sprężystości w postaci funkcji typu $E = f(f_c)$ jest standardowo stosowany w opisie normatywnym modułów odkształcalności betonów [74, 50, 109], gdyż łatwo uzyskać jest serię wyników wytrzymałości na ściskanie i na tej podstawie można przypisywać analitycznie moduł sprężystości, nie wykonując złożonych i pracochłonnych badań odkształcalności typu $\sigma - \varepsilon$.



Rys. 17.12. Wykresy i funkcje opisujące zależność modułu sprężystości stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 od ich wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , dla różnych stanów naprężeń i wilgotności

Fig. 17.12. Charts and functions describing the relation of elasticity module of hardened GB-N1 building plaster paste and their compressive strength f_{gc} , for various states of stress and humidity

Tabela 17.2

Table 17.2

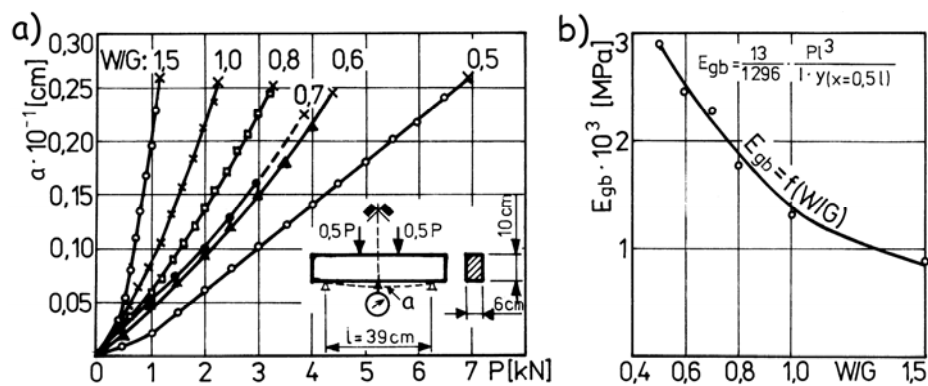
Opis zależności modułów sprężystości w różnych stanach naprężeń od wytrzymałości f_{gc} , dla stwardniałych zapraw z gipsu budowlanego GB-N1 (losowa dostawa rynkowa nr 2-02)
Description of relation of elasticity modules in different stress states and strength f_{gc} , for hardened GB-N1 building plaster mortar (random market supply No 2-02)

Lp. No	Stan naprężeń State of stress	Stan wilgotności State of humidity	Zakres ważności Validity range	Opis funkcyjny $E=f(f_{gc})$; gdzie f_{gc} [MPa] Functional description $E=f(f_{gc})$; for f_{gc} [MPa] [MPa]	Wsp. korelacji R^2 Correlation coefficient R^2	Nr wzoru Formula No
1	2	3	4	5	6	7
1.	Ściskanie osiowe Axial compressive strength	suchy dry	W/G=0,4-2,5	$E_{gc} = 0,78f_{gc}^{0,8104} \cdot 10^3$	0,9866	(17.25)
		nawilgocony 24 h humid 24 h	W/G=0,4-2,5	$E_{gc}^w = 0,291f_{gc}^{0,8714} \cdot 10^3$	0,9735	(17.26)
2.	Ściskanie włókien skrajnych w próbie zginania Compressive strength of extreme fibres in bending test	suchy dry	W/G=0,4-2,5	$E_{gb}^+ = 1,3698f_{gc}^{0,6573} \cdot 10^3$	0,9988	(17.27)
3.	Rozciąganie włókien skrajnych w próbie zginania Tensile strength of extreme fibres in bending test	suchy dry	W/G=0,4-2,5	$E_{gb}^- = 0,798f_{gc}^{0,826} \cdot 10^3$	0,9842	(17.28)
4.	Jednoosiowe rozciąganie „ósemek” 8-shaped sample uniaxial tensile strength	suchy dry	W/G=0,4-2,5	$E_{gt} = 1,0343f_{gc}^{0,7674} \cdot 10^3$	0,9756	(17.29)
5.	Moduł sprężystości przy zginaniu belki obliczony analitycznie ze wzorów na strzałkę ugięcia Elasticity module during beam bending calculated analytically from deflection formulas	suchy dry	W/G=0,4-2,5	$E_{gb} = 0,4898f_{gc}^{0,6359} \cdot 10^3$	0,9468	(17.30)

Uzyskane funkcje typu $E_g = f(f_{gc})$: dla ściskania osiowego $E_{gc} = f(f_{gc})$, ściskania przy zginaniu $E_{gb}^+ = f(f_{gc})$, dla rozciągania osiowego $E_{gt} = f(f_{gc})$ i rozciągania przy zginaniu $E_{gb}^- = f(f_{gc})$ są jakościowo i ilościowo do siebie zbliżone. Mniejsze wartości modułu przy ściskaniu próbek nawilgoconych $E_{gc}^w = f(f_{gc})$ są oczywiście oczekiwane. Odstająca funkcja $E_{gb} = f(f_{gc})$, dotycząca modułów sprężystości obliczonych analitycznie na podstawie strzałki ugięcia belek zginanych, jest omówiona szerzej w p. 17.5. Ustalone w pracy związki funkcyjne $E_g = f(f_{gc})$, dla różnych stanów naprężeń i wilgotności gipsu, są oryginalne dla mechaniki gipsu i mogą być przydatne praktycznie.

17.5. Porównawcze oznaczenia ugięć i modułów sprężystości belek i płyt przy zginaniu w stanie suchym

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale wyniki badań ugięć belek i płyt gipsowych stanowią ilustrację, w jakim zakresie obciążeń zginane elementy gipsowe w stanie suchym odkształcają się liniowo w funkcji wzrastających obciążeń i jaki jest wpływ wytrzymałości niezbrojonych gipsów na charakterystykę ugięć.



Rys. 17.13. a) Krzywe ugięcia belek 6 x 10 x 50 cm w stanie suchym, wykonanych z gipsu budowlanego GB-N1, dla ostatniego przedziału cyklicznie rosnących obciążeń: P – siła obciążająca, α – strzałka ugięcia, W/G – wskaźnik wodno-gipsowy materiału belki; b) obliczony analitycznie moduł sprężystości $E_{gb} = f(W/G)$ (losowa próba nr 2-03), dla stanu suchego

Fig. 17.13. a) Curves of 6 x 10 x 50 cm beam deflection made of GB-N1 building plaster in dry state, for the last range of cyclically growing loads: P – loading force, α – deflection, W/G – hydro-gypsum index of beam material; b) elasticity modulus $E_{gb} = f(W/G)$ calculated analytically for dry state (random sample No 2-03)

Na rysunku 17.13a podano krzywe narastania ugięć zginanych belek z gipsu budowlanego, o $W/G = 0,5 - 1,5$ – w funkcji wzrastających sił obciążających. Belki z gipsu o $W/G = 0,5$ o dużej wytrzymałości na ściskanie rzędu $f_{gc} = 15,0$ Mpa, zachowują liniowość narastania strzałki ugięcia $a = f(P)$ w całym zakresie obciążeń, aż do zniszczenia. Praktycznie najczęściej stosowane gipsy o $W/G = 0,6 - 0,8$ cechują się już krzywoliniową charakterystyką $a = f(P)$.

Gipsy lekkie, o $W/G = 1,0 - 1,5$, w przedziale wytrzymałości na ściskanie $f_{gc} = 3,5 - 1,0$ MPa, już cechują się krzywoliniową charakterystyką $a = f(P)$.

Analitycznie moduły sprężystości E_{gb} obliczono ze wzoru:

$$E_{gb} = \frac{13}{1296} \cdot \frac{Pl^3}{I_x a} \quad (17.31)$$

gdzie:

P – siła niszcząca,

l – rozpiętość belek jak na rysunku 17.13,

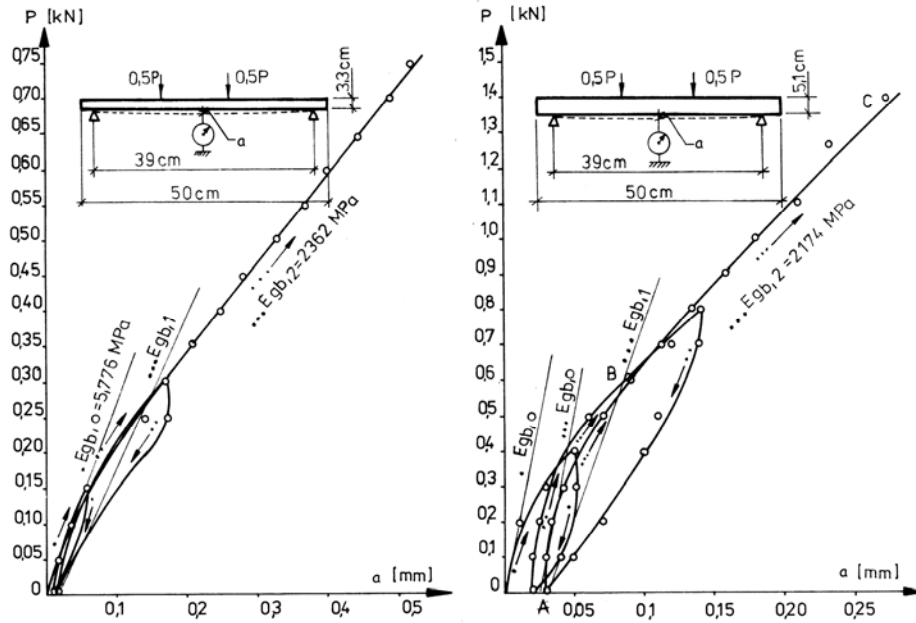
$I_x = \frac{bh^3}{12}$ – moment bezwładności przekroju belki, gdzie: szerokość i wysokość przekro-

ju poprzecznego belki,

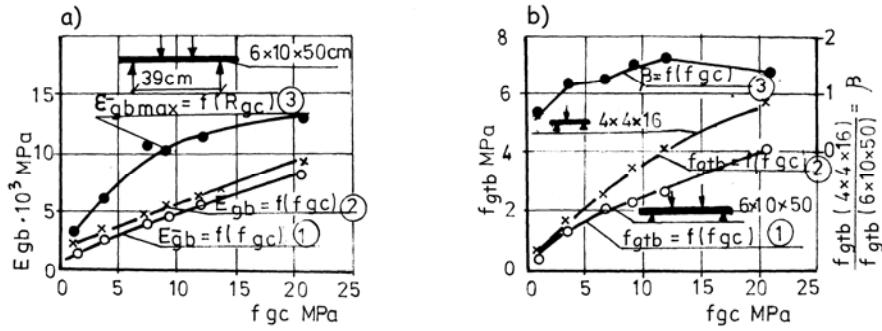
a – ugięcie belki.

Moduły sprężystości E_{gb} , obliczone na podstawie strzałki ugięcia a , dla sprężystego zakresu obciążeń $P_s = 0 - 0,4P_{gr}$, dla belek gipsowych o $W/G = 0,4 - 1,5$, podano na rysunku 17.13b. Krzywa $E_{gb} = f(W/G)$ jest funkcją podobną do krzywych podanych na rysunku 17.10. Wartości funkcji $E_{gb} = f(\omega)$ są odstająco mniejsze od „rodziny” zbliżonych do siebie reprezentatywnych wartości E_{gc} , E_{gb}^+ , E_{gb}^- i E_{gt} , podanych na rysunku 17.12a. Mniejsze wartości modułów sprężystości E_{gb} , obliczone ze wzoru (17.31), na podstawie badań jak na rysunku 17.13a, są spowodowane dodatkowo większymi odkształceniami plastycznymi i wgniotem w miejscach działania sił obciążających i odkształceń lokalnych gipsu w miejscach podparć punktowych.

Na rysunku 17.14 podano ugięcia różnych płyt i belek gipsowych w stanie suchym, w funkcji narastających cyklicznie obciążeń. Mimo wyraźnie odnotowywanych odkształceń plastycznych i zmienności początkowych modułów sprężystości $E_{gb,0}$, dla ustalonych charakterystyk w przedziale zmienności $P/P_{gr} = 0,1 - 0,4$, występuje już liniowość narastania ugięć w funkcji rosnących obciążeń. Dla obu badanych relatywnie smukłych elementów gipsowych, jak podano na rysunku 17.14, moduły E_{gb} – obliczane według zależności (17.31) – mają zbliżone wartości: $E_{gb,2} = 2174$ MPa (rys. 17.14b) i $E_{gb,2} = 2362$ MPa (rys. 17.14a).



Rys. 17.14. Charakterystyka ugięć płyt i smukłych belek gipsowych w stanie suchym, wykonanych z zaczynów o W/G = 0,6, z gipsu budowlanego GB-N1 (próba losowa nr 2-03)
 Fig. 17.14. Deflection characteristic of plates and limp gypsum beams, made of GB-N1 building plaster paste in dry state, with W/G = 0,6 (random sample No 2-03)



Rys. 17.15. Porównanie charakterystyk zależności wytrzymałości belek na zginanie f_{gtb} od ich wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , dla serii beleczek 4x4x16 cm i serii belek 6x10x50 cm. Gips budowlany typu GB-N1, próba losowa nr 2-03, elementy w stanie suchym
 Fig. 17.15. Comparison of characteristic of relation of beam bending strength f_{gtb} and their compressive strength f_{gc} , for a series of 4x4x16 cm beams and a series of 6x10x50 cm beams. GB-N1-type building plaster, random sample No 2-03, elements in dry state

Wyniki badań podane na rysunku 17.15 wskazują, że wytrzymałości na zginanie dla smuklejszych belek 6x10x50 cm są mniejsze od wytrzymałości oznaczanych na relatywnie krępych, normowych beleczkach 4x4x16 cm. Współczynnik przeliczeniowy jest podany na rysunku 17.15b przez parametr β ; wykazuje on jednak dużą zmienność w zakresie wartości od 0,75 do 1,55.

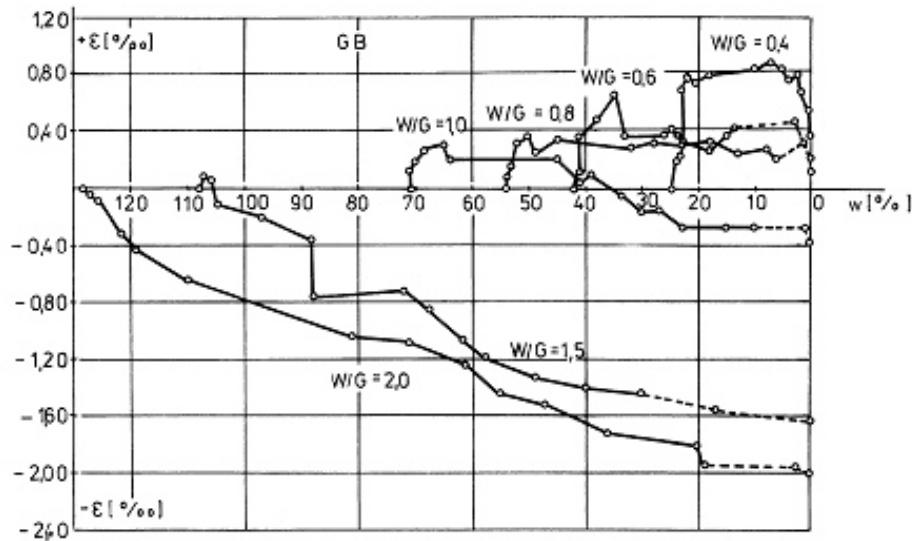
Opracowane w p. 17 charakterystyki odkształcalności $\sigma - \varepsilon$, dla gipsów stwardniałych w stanie suchym i pełnego nawilgocenia, w różnych stanach naprężeń i opracowane zależności opisujące moduły sprężystości w funkcji wskaźnika W/G czy w funkcji wytrzymałości gipsów dojrzałych na ściskanie f_{gc} stanowią propozycję kompleksowego ujęcia problemu: odkształcalności gipsu dla obciążeń doraźnych. Uzyskane relacje mogą mieć zastosowanie w badaniach wytrzymałościowych modeli z gipsu, odwzorowujących złożone konstrukcje inżynierskie.

18. ZMIANY OBJĘTOŚCIOWE GIPSU W PROCESIE WYSYCHANIA I PONOWNEGO NAWILGACANIA

18.1. Badania zmian liniowych świeżych zaczynów gipsowych w procesie odsychania

Zmiany objętościowe gipsu w procesie wiązania, twardnienia i wysychania mają istotne znaczenie przy produkcji elementów i prefabrykatów gipsowych. Zmiany objętościowe suchych elementów gipsowych – w wyniku ich wtórnego nawilgocenia – wywołują naprężenia wewnętrzne w konstrukcjach monolitycznych lub murowanych z prefabrykatów. Zmiany objętościowe stanowią więc wewnętrzny czynnik mający wpływ na stan naprężeń i odkształceń elementów gipsowych.

W procesie wiązania i twardnienia zaczyny gipsowe powiększają nieznacznie swoją objętość od 0,05% do 0,3%, co dokumentują prace autorów: Akerman [2], Meuś i Rzepecki [200], Woźniewski, Stambułko, Ferronska [354], Woźniewski i Ferronska [352]. Półhydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ w wyniku wiązania wody w procesie krystalizacji dwuwodnianu zwiększa swą objętość teoretycznie o 39,25%, a jednocześnie zaczyn gipsowy powinien ulegać skurczowi o 7,34% w stosunku do substratów przed reakcją (Warachim [343]). W praktyce zmniejszenie się objętości dwuwodnianu, w stosunku do sumy objętości substratów, nie powoduje skurczu zaczynu gipsowego, lecz wytworzenie się porów w materiale. Natomiast wzrost kryształów w materiale powoduje ekspansję objętościową dojrzewającego zaczynu gipsowego. Według Wichtera [346] sumaryczna ekspansja objętościowa gipsu wynosi 0,05% – 0,15%. Dutkowski i Chełkowska [54] wykonali kontrolę wpływu dodatku 3% wapna hydratyzowanego na zmniejszenie się ekspansji objętościowej zaczynu gipsowego o $W/G = 0,65$, oraz wykazali wzrost wydłużenia próbek przy dodatku 10% trocin i przy zwiększeniu wskaźnika W/G do wartości 0,73. Ostrowski [244] wykazał, że gipsy stabilizowane (z wyeliminowaną nietrwałą fazą anhydrytu III β – CaSO_4III) cechują się zwiększoną ekspansją objętościową. Ekspansję objętościową można też wykorzystać przy produkcji prefabrykatów gipsowych jako wstępne sprężenie (Kossatz [146]).



Rys. 18.1. Zmiany liniowe zaczynów gipsowych o różnym W/G w procesie sukcesywnego wysychania: $+\varepsilon$ – pęcznienie, $-\varepsilon$ – skurcz, w – wilgotność gipsu (ilość wolnej wody niezwiązanej). Próby z gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1

Fig. 18.1. Changes of linear dimension of drying gypsum paste of different W/G: $+\varepsilon$ – swelling, $-\varepsilon$ – shrinkage, w – gypsum humidity (volume of free unbounded water). Samples of GB-N1 natural building plaster

W nawiązaniu do cytowanych powyżej prac badawczych autor przeprowadził badania własne zmian liniowych próbek z zaczynów gipsowych, wykonanych z gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1, dla bardzo szerokiego zakresu zmian wskaźnika W/G = 0,4 – 2,0, czyli dla gipsów od konsystencji gęstoplastycznej do konsystencji ciekłej „śmietany”. Tak szeroki zakres wskaźnika W/G daje możliwość oceny przeciwstawnych wpływów ekspansji hydratacyjnej i skurczów z tytułu odparowywania nadmiaru wody niezwiązanej.

Analiza zmian liniowych próbek w procesie wysychania prowadzi do następujących stwierdzeń:

- jedynie zaczyny o W/G = 2,0, o zawartości niezwiązanej wody w ilości 152,9% w stosunku do masy dwuhydratu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, charakteryzują się skurczami liniowymi dla całego zakresu wilgotności w trakcie odsychania, do wartości $\varepsilon_s^- = -2,0\%$. Na rysunku 18.1 pomiary wilgotności rozpoczęto po upływie czasu 24 h, stąd punkt początkowy wilgotności dla W/G = 2,0 wynosi 130%;
- zaczyny o W/G = 1,5 tylko w początkowym zakresie wilgotności wagowej $w = 103 - 107\%$ zaakcentowały szczytkową ekspansję, natomiast w dalszym procesie sukcesywnego odsychania wystąpiły skurcze liniowe do wartości max. $\varepsilon_s^- = 1,6\%$;

- zaczyn o $W/G = 1,0$ w zakresie wilgotności $w = 70 - 35\%$ cechuje się pęcznieniami o wartości max. $\varepsilon_s^+ = +0,3\%$, natomiast w końcowej fazie odsychania dla wilgotności $W < 35\%$ występuje skurcz liniowy max. $0,3\%$;
- Zaczyny gipsowe w przedziale wartości $W/G = 0,8 - 0,4$ cechują się pęcznieniem na poziomie max. $\varepsilon_s^+ = (+0,4) - (+0,8)\%$ tym większym, im niższa jest wartość wskaźnika W/G .

Podsumowanie badań zmian liniowych zaczynów gipsowych w procesie wysychania:

- Duży nadmiar wody wolnej w zaczynach porowatych o $W/G = 2,0 - 1,0$ sprawia, że wewnętrzne siły skurczowe z tytułu odparowywania wody (ściągnięcie menisków w kapilarach) powodują przesunięcia, poślizgi kryształów gipsu na nawodnionych strefach stykowych, wywołując finalnie skurcz liniowy. Zmiany objętościowe próbek $4 \times 4 \times 16$, z tytułu skurczu $\varepsilon_s^- = -2\%$, powodują w przybliżeniu zmniejszenie objętości tylko o $\Delta V_1 = 0,51 \text{ cm}^3$, podczas gdy objętość odparowywanej wody w zaczynie o $W/G = 2,0$ wynosi aż $\Delta V_2 = 195 \text{ cm}^3$. Świadczy to o tym, że nawet w wodnistym zaczynie wytwarza się wcześniej struktura usztywniona kryształów (patrz fot. 20.1), która ogranicza zmiany objętościowe odsychającego gipsu.
- Zaczyny gipsowe o $W/G = 0,8 - 0,4$ tworzą relatywnie szybko siatkę zrостów kryształów gipsu, które są wyraźnie stabilne i nie obserwuje się, aby odparowywany nadmiar wody wywoływał poślizgi w zespołach aglomeratów kryształów.
- Należy wnosić, że w zaczynach gipsowych w przedziale $W/G = 1,5 - 1,0$ występuje taki stan w pierwszych przedziałach zmian wilgotności, dla którego występuje zrównoważenie efektów ekspansji hydratacyjnej i skurczów sił wewnętrznych wywołanych odparowywaniem wody, w którym odkształcenia sumaryczne $\varepsilon_s = 0$.
- Dla zaczynów gipsowych, z najczęściej stosowanego zakresu wskaźników $W/G = 0,65 - 0,75$, można orzec, że w przypadku gipsu budowlanego GB-N1 (z pieców obrotowych) swobodne pęcznienie liniowe wynosi $0,3\%$, czyli $0,3 \text{ mm/m}$ długości elementu.
- Szczególnie ważne jest stwierdzenie, że ekspansja objętościowa zaczynów gipsowych o $W/G = 0,8 - 0,4$ powstaje w momencie realtywnie szybkiej hydratacji gipsu i później, w procesie sukcesywnego wysychania, zachowuje wartość ustabilizowaną lub cechuje się małą zmiennością.
- Wykorzystując wyniki badań własnych można określić ciśnienie wewnętrzne od pęcznienia gipsu. Dla gipsu o $W/G = 0,65$ w stanie pełnego nawilgocenia moduł sprężystości wynosi $E_{gc}^w = 1,3 \cdot 10^3 \text{ MPa}$. Ciśnienie wewnętrzne od wpływów pęcznienia gipsu wyniesie:

$$\sigma_{gc} = \varepsilon_s \cdot E_{gc} = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 0,39 \text{ MPa} .$$

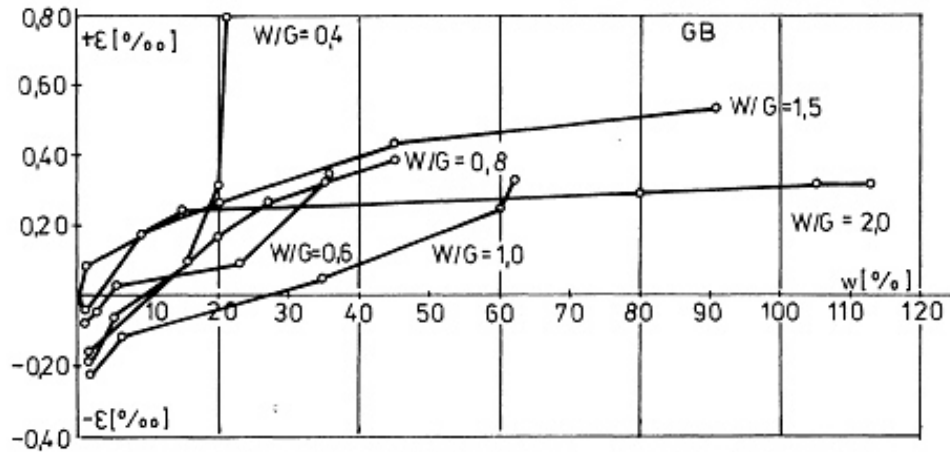
W przypadku wewnętrznej ściany wykonanej z gipsu budowlanego o grubości $b = 20 \text{ cm}$ nacisk ekspansyjnego gipsu na 1 mb wysokości ściany wyniesie:

$$F = \epsilon_s \cdot E_{gc}^w \cdot A = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,2 = 78 \text{ kN}$$

Siła ta powinna być wzięta pod uwagę przy obliczeniach ościeżnic drzwiowych, gdyby były zamontowane od razu w systemie deskowań. Ościeżnice więc także powinny być stężone rozporami, statecznymi na przeniesienie takiej siły rozporu. Siła ta ulegnie zmniejszeniu w wyniku pęcznienia gipsu nawilgoconego, będącego w stanie samospężenia od własnej ekspansji objętościowej.

18.2. Badania pęcznienia suchych gipsów w procesie nawilgacania

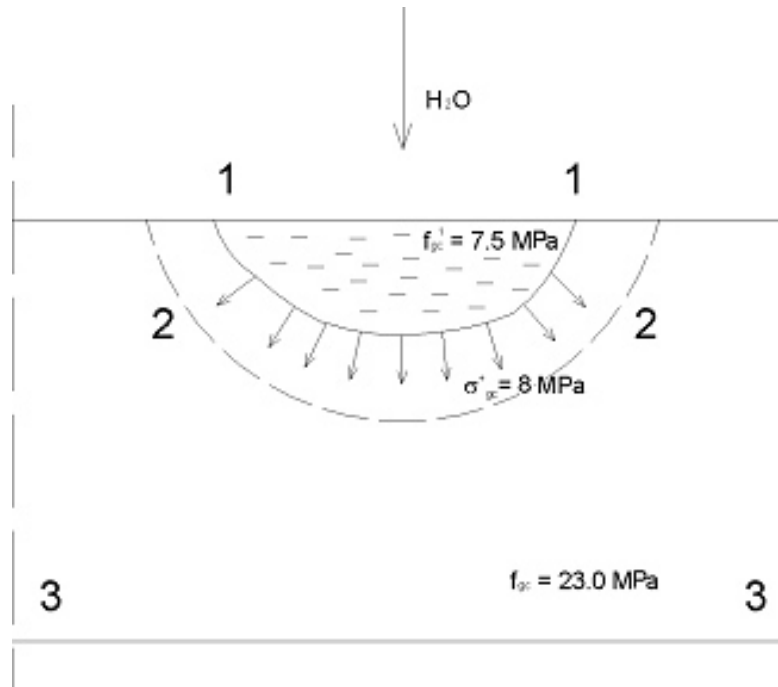
Proces sukcesywnego wzrostu nawilgocenia suchych zaczynów gipsowych, badanych w seriach $W/G = 0,4 - 2,0$, przeprowadzono przez ich przechowywanie w sterowanych automatycznie warunkach klimatycznych, zapewniających zmienność wilgotności, uzupełniając w stadium końcowym moczeniem próbek w wodzie. Przyrost wilgotności próbek wynosił od: 20% dla zaczynów o $W/G = 0,4$ do ponad 115% dla zaczynów o $W/G = 2,0$.



Rys. 18.2. Krzywe pęcznienia suchych stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego o $W/G = 0,4 - 2,0$, w procesie sukcesywnego nawilgacania: $+\epsilon$ – pęcznienie, $-\epsilon$ – skurcz liniowy, w – wilgotność wagowa w %. Próby z gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1

Fig. 18.2. Curves of swelling of dry hardened building plaster paste with $W/G = 0,4 - 2,0$, during humidification: $+\epsilon$ – swelling, $-\epsilon$ – line shrinkage, w – weight humidity in %. Samples of GB-N1 natural building plaster

- a) Dla wszystkich serii badanych gipsów, w początkowym stanie nawilgocenia, odnotowano skurcz o wartości maksimum $\varepsilon_s = -0,2\%$, wywołany zapewne przemieszczaniem się wilgoci w aglomeratach kryształów na zasadzie podsiąkania kapilarnego. Wywołane tym zjawiskiem siły wewnętrzne w kapilarach powodują początkowy skurcz w strukturze układu aglomeratów kryształów gipsu. Nie można wykluczyć poślizgu kryształów w nawodnionej strefie kontaktowej, wywołanego „odpuszczeniem” naprężeń rezydualnych (od termiki i zmian strukturalnych). Najmniejszy skurcz szczytkowy układu o wartości $0,03\%$ odnotowano dla zaczynów o W/G = 1,5 i 2,0, gdzie z racji największej porowatości, w kapilarach o relatywnie największych średnicach, siły podsiąkania kapilarnego i związane siły styczne są najmniejsze.



Rys. 18.3. Model zniszczenia struktury gipsu o niskim W/G, w wyniku ekspansji objętościowej od nawilgocenia stref suchych: 1 – 1 strefa nawilgocenia, 2 – 2 czoło przemieszczania wilgoci, 3 – 3 strefa suchego gipsu (niszczenie (miażdżenie) gipsu następuje w strefie 1-1 – 2-2, gdzie $f_{gc}^w < \sigma_{gc}^+$)

Fig. 18.3. Failure model of gypsum structure with low W/G, as a result of volumetric expansion caused by humidification of dry zone: 1 – 1 humidity zone, 2 – 2 humidity movement front, 3 – 3 dry gypsum zone (gypsum damaging (crushing) takes place in zone 1-1 – 2-2, where $f_{gc}^w < \sigma_{gc}^+$)

- b) Dla wyższych poziomów nawilgocenia gipsów dojrzałych, we wszystkich badanych seriach $W/G = 0,4 - 2,0$, występuje pęcznienie, czyli wzrost długości w elementach liniowych oraz wzrost objętości w elementach wielowymiarowych.
- c) Na szczególną ocenę zasługuje zaczyn gipsowy o $W/G = 0,4$, w którym z początkowego etapu skurczu $\varepsilon_s = -0,2\%$ następuje kompensacja zmian objętościowych na poziomie nasiąkliwości wagowej $w = 10\%$, by przy wilgotności $w = 20\%$ odnotować gwałtowną ekspansję do poziomu ponad $\varepsilon_s = +0,8\%$ – wywołaną pęcznieniem nawilżonych aglomeratów gipsu. Odnotowane jak wyżej zjawisko dobitnie tłumaczy doniesienia literaturowe, że prasowane próżniowo elementy gipsowe o W/G w przedziale $0,3 - 0,35$ mogą ulec wręcz samozniszczeniu. W objętości zwartej elementu gipsowego występuje przecież przestrzenna ekspansja. Jeżeli strefa nawadniana gipsu wywołuje nacisk na strefę przyległą w stanie suchym, to poziom ekspansji $\varepsilon_s = 0,8\%$ wywołuje naprężenia w gipsie suchym (o module $E_{gc} = 11 \cdot 10^3$ MPa) o wartości $\sigma_{gc}^+ = \varepsilon_s^+ \cdot E_{gc} = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \cdot 10^3 = 8$ MPa co stanowi wartość większą od wytrzymałości granicznej $f_{gc}^w = 7,5$ MPa dla gipsów nawilgoconych o $W/G = 0,4$. Nacisk ten jest jednak mniejszy od wytrzymałości strefy suchej $f_{gc} = 23$ MPa, dla gipsów w tym przedziale W/G . Zniszczenie może więc nastąpić w przejściowej strefie (1-2) przemieszczania się czoła pary wodnej (rys. 18.3).
- d) Dla najczęściej stosowanych w praktyce zaczynów o $W/G = 0,65 - 0,75$ poziom ekspansji objętościowej wynosi $0,3\%$ i jest w przybliżeniu taki sam jak pierwotna ekspansja w procesie hydratacji spoiwa gipsowego (rys. 18.1).
- e) Należy wnosić, że jest w pełni prawdopodobne, iż obserwowane w fazie początkowej odkształcenia skurczu ε_s^- , jak na rysunku 18.2, w procesie nawilgacania gipsów suchych, są wynikiem poślizgu wzrostów kryształów gipsu i odprężeniem struktury gipsu od naprężeń wewnętrznych, wywołanych pierwotną ekspansją hydratacyjną jak na rysunku 18.1. Fazą pierwszą towarzyszącą nawilgacaniu gipsów suchych jest więc odprężenie wewnętrzne. Fazą drugą jest jednak ponowna ekspansja objętościowa, wywołana powtórny nawilgoceniem aglomeratów kryształów gipsu.

19. WPŁYW OBECNOŚCI I MIGRACJI WODY NA WŁAŚCIWOŚCI STWARDNIAŁEGO WYROBU GIPSOWEGO

19.1. Spadek wytrzymałości stwardniałego gipsu w wyniku pierwszego zawilgocenia

Destrukcyjny wpływ wilgoci na właściwości wytrzymałościowe gipsu dojrzałego – to kluczowy problem analiz słabości tworzyw gipsowych w przypadku ich nawilgoce-
nia, zawartych w licznych pracach w tej problematyce. Szerokie omówienie tego proble-
mu autor zawarł w pracach własnych [128, 133], na podstawie literatury tego zagad-
nienia.

Wrażliwość gipsu na działanie wody jest powodowana jego budową molekularną,
krystaliczną oraz procesami nawadniania powierzchni porów, a także pustek międzykry-
stalicznych (co dokumentują między innymi prace: Grzymka [83], Brucknera [27], Kra-
mera [150], Kubika i Mizery [153]). Szczegółowe przyczyny małej odporności na dzia-
łanie wody wynikają z poniższych konstatacji, ustalonych na podstawie prac badawczych
autorów: Grzymka [83], Skalmowskiego i Szymańskiego [302, 303], Szymańskiego
[325], Osieckiej [240]:

- a) występowanie na bocznych powierzchniach kryształów dwuhydratu jonów Ca^{+2}
i SO_4^{-2} , silnie przyciągających cząsteczki wody;
- b) występowanie w sieci krystalicznej $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, między warstwami jonów Ca^{+2}
i SO_4^{-2} , słabo powiązanej warstwy wody;
- c) słabe energetycznie wiązania w zrostach krystalicznych.

Krzywe spadku wytrzymałości suchych dojrzałych zaczynów z gipsu budowlanego
o różnym W/G, w funkcji narastania nawilgocenia, podano na rysunkach 19.1, 19.2 i 19.3.

Funkcję spadku wytrzymałości gipsu, w zależności od wzrostu jego nawilgocenia,
można opisać zależnością typu:

$$f_{gc}^{w_i} = f_{gc}^s e^{-bw_i} \quad \text{dla } W/G = \text{const.} \quad (19.1)$$

gdzie:

$f_{gc}^{w_i}$ – wytrzymałość gipsu o wilgotności w_i , MPa,

f_{gc}^s – wytrzymałość gipsu w stanie suchym w MPa, dla $w = 0$,

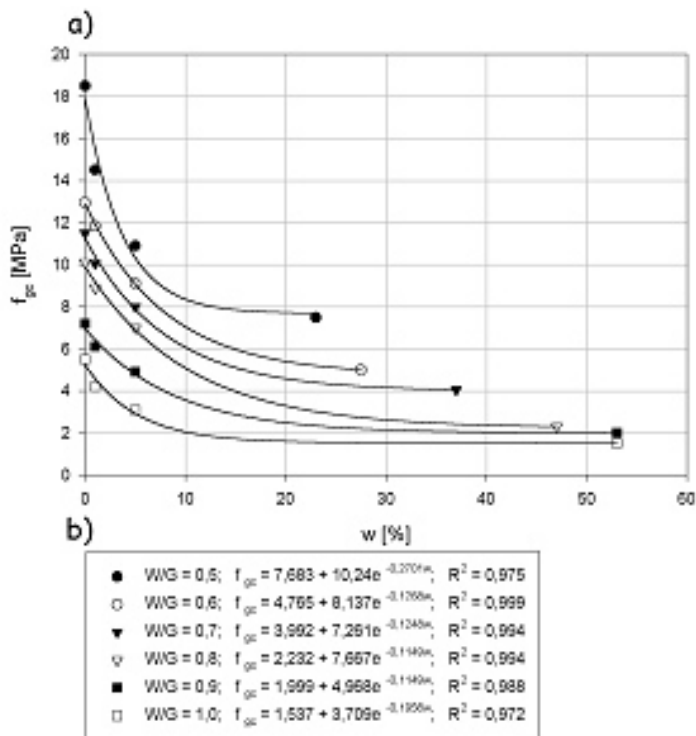
w_i – wilgotność wagowa w %,

b – parametr funkcji zależny od wskaźnika W/G.

Prosta i przejrzysta funkcja (19.1) nie opisuje właściwie początkowej, dynamicznej fazy spadku wytrzymałości i po analizach statystycznych należało ją zastąpić funkcją trójparametrową typu:

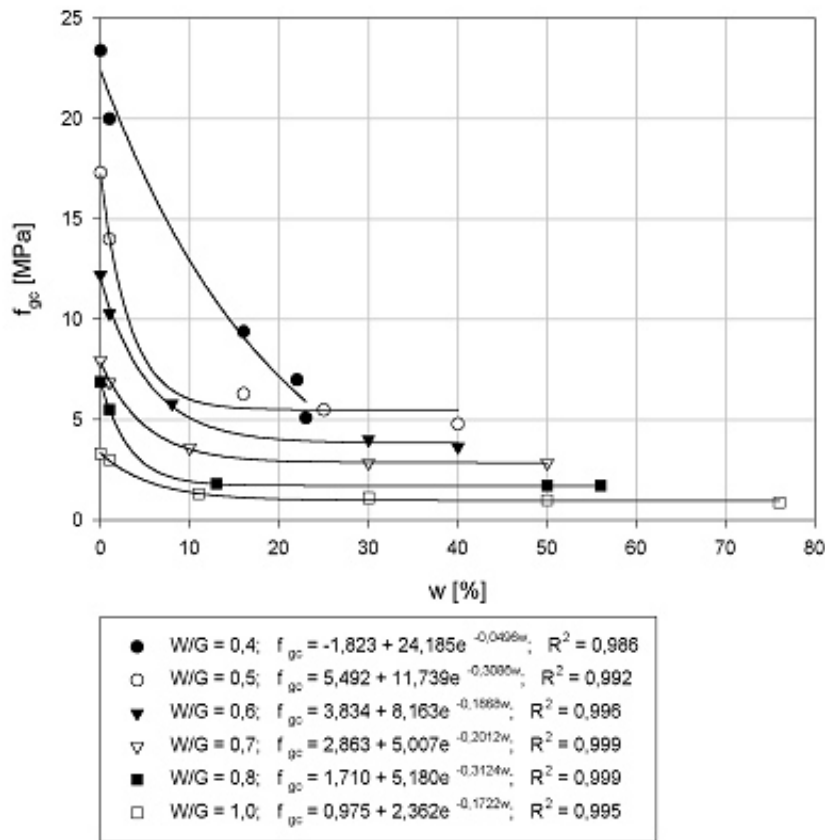
$$f_{gc}^{w_i} = A + Be^{-bw_i} \quad (19.2)$$

gdzie: A , B i b parametry zależne od wskaźnika W/G.



Rys. 19.1. a) Wyniki badań spadku wytrzymałości zaczynów z gipsu budowlanego (GB-N1 z surowców naturalnych) o różnych wskaźnikach W/G według Mizery [211], b) opis własny krzywych $f_{gc} = f(w)$ według zależności (20.2)

Rys. 19.1. a) Strength decrease test results of building plaster paste (natural GB-N1) with different W/G indexes after Mizera [205], b) own description of curves $f_{gc} = f(w)$ in accordance with relation (20.2)

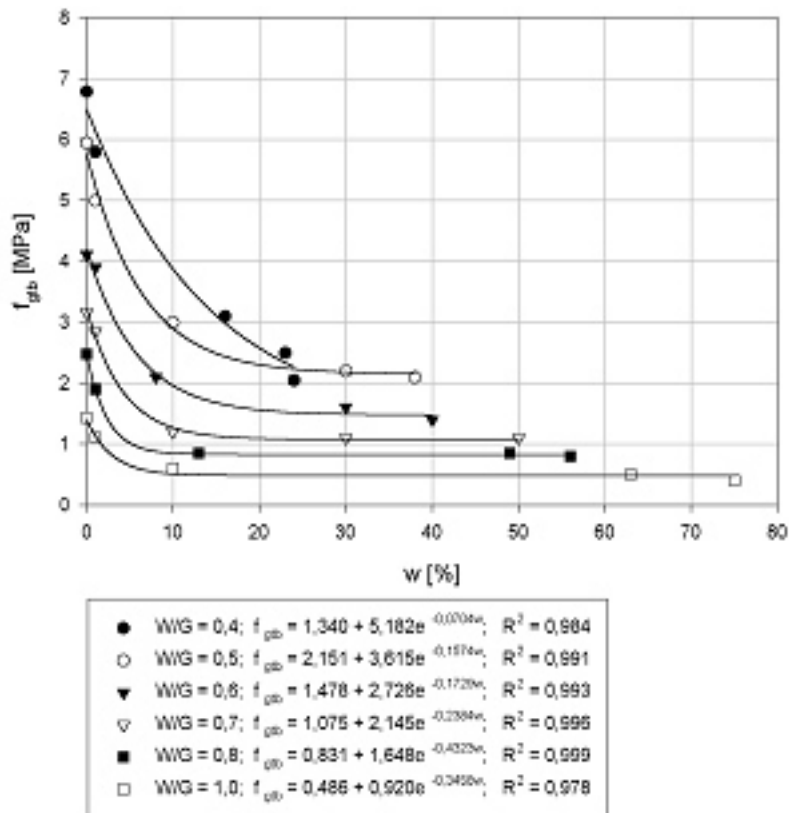


Rys. 19.2. a) Wyniki badań własnych spadku wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , zaczynów z gipsu budowlanego (GB-N1 z surowców naturalnych) o różnych wskaźnikach W/G, w zależności od stanu nawilgocenia; b) opis krzywych doświadczalnych funkcją typu (20.2)

Fig. 19.2. a) Own test results of compressive strength decrease f_{gc} of building plaster paste (natural GB-N1) with different W/G indexes, depending on humidity; b) experimental curve description by (20.2)-type function

Krzywe wytrzymałości na ściskanie $f_{gc}^{W_i} = f(w_i, W/G = \text{const.})$, podane na rysunkach 19.1 i 19.2, oraz krzywe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{gtb}^{W_i} = f(w_i, W/G = \text{const.})$, podane na rysunku 19.3, stanowią monotonicznie opadające krzywe, dla zakresu $W/G = 0,5-1,0$. Wyjątek stanowią krzywe dla zaczynów o $W/G = 0,4$, w przypadku których występują relacje nietypowe i gwałtowny spadek wytrzymałości związany jest z osłabieniem trwałości struktury „wysoko skoncentrowanego” gipsu, w wyniku ekspansji objętościowej nawilgoconych aglomeratów kryształów

dwuwodzianu. Odmiennie relacje – jak wyżej – dla zaczynów o $W/G = 0,4$ są zbieżne z anomaliami w charakterystykach odkształceń objętościowych w wyniku nawilgocenia, jak podano na rysunku 18.2.



Rys. 19.3. a) Wyniki badań własnych spadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{g_{tb}}$, zaczynów z gipsu budowlanego o różnych wskaźnikach W/G, w zależności od nawilgocenia; b) opis krzywych doświadczalnych funkcją typu (20.2)

Fig. 19.3. a) Own test results of bending tensile strength $f_{g_{tb}}$ decrease of building plaster paste with different W/G indexes, depending on humidity; b) experimental curve description by (20.2)-type function

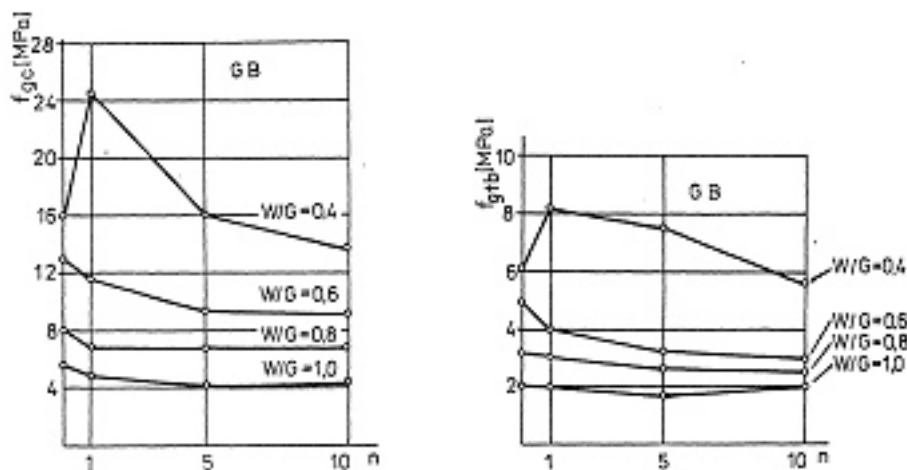
Podane przez autora analityczne zależności funkcyjne $f_{gc}^{W_i} = f(w_i, W/G = \text{const.})$

i $f_{g_{tb}}^{W_i} = f(w_i, W/G = \text{const.})$ stanowią w znanej literaturze po raz pierwszy propozycję opisu analitycznego relacji: wpływu poziomu nawilgocenia suchych stwardniałych gipsów na ich wytrzymałość na ściskanie f_{gc} i na rozciąganie $f_{g_{tb}}$.

19.2. Zmiany wytrzymałości gipsu w wyniku kolejnych cykli nawilgoceń i wysuszeń

Proces nawilgacania gipsu, do stanu wilgotności równej granicznej nasiąkliwości wagowej n_w , powoduje rozmiękanie gipsu, częściowe rozpuszczenie szczepów międzykrystalicznych w aglomeratach, przechodzenie fazy stałej do fazy ciekłej wód porowych. Wyszuszanie gipsu powoduje krystalizację rozpuszczonego gipsu, ale narosty krystaliczne powstają w różnych miejscach, a osłabienie struktury wytrzymałościowej aglomeratów pozostaje nie w pełni odbudowane.

Dla badanych zaczynów gipsowych o WG, w przedziale wartości $W/G = 0,6 - 1,0$, kolejne cykle n nawilgoceń i wysuszeń powodują obniżenie wytrzymałości wyjściowej (rys. 19.4). Wyjątek stanowi ponownie zaczyn o $W/G = 0,4$, w przypadku którego odnotowuje się wręcz w pierwszych 5 cyklach utrzymujący się wzrost wytrzymałości, w porównaniu do stanu wyjściowego. Oznacza to, że zaczyny o $W/G = 0,4$, o bardzo technologicznie trudnej konsystencji gęstoplastycznej, nie zapewniają warunków pełnej hydratacji z powodu wytwarzania się nierozdyspergowanych aglomeratów ziaren spoiwa gipsowego, otoczonych skorupą ziaren zhydratyzowanych. Dane podane na rysunku 19.4, dla zaczynów gipsowych o $W/G = 0,4$, stanowią dobitne wytłumaczenie anormalnych charakterystyk zaczynu gipsowego $W/G = 0,4$, w zakresie zmian objętościowych w chwili początkowego nawilgocenia (rys. 18.2) i dużego spadku wytrzymałości w wyniku nawilgocenia (rys. 19.2 i 19.3), spowodowanych destrukcyjną ekspansją objętościową.

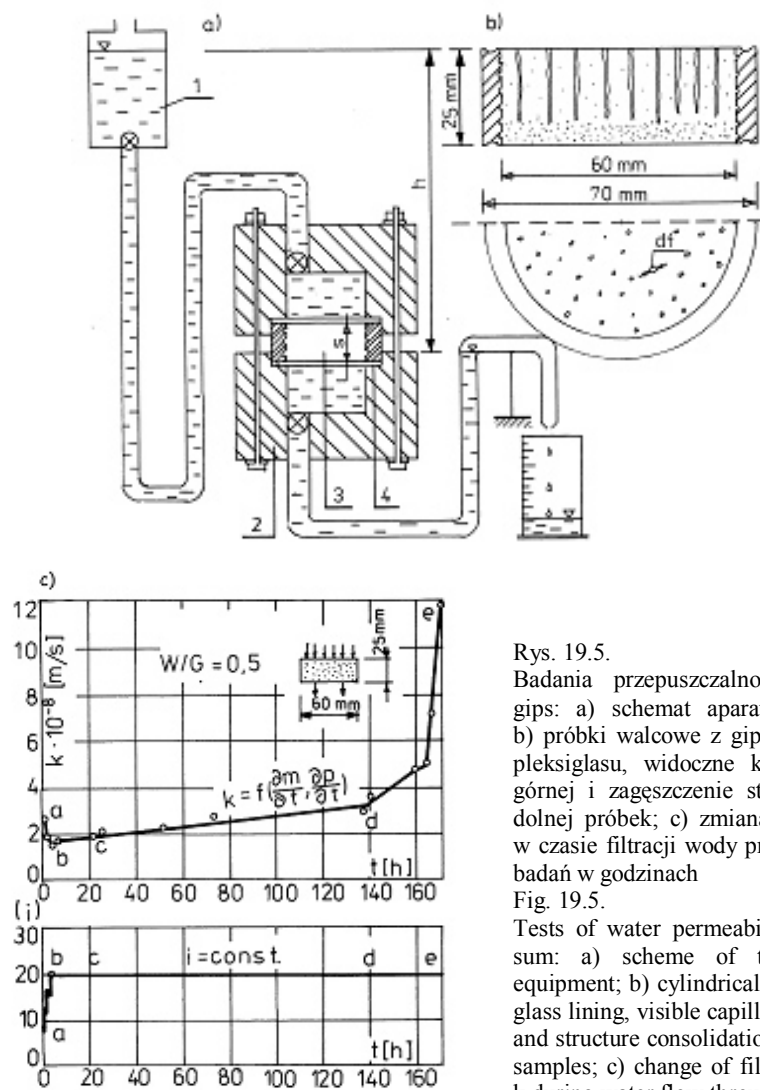


Rys. 19.4. Wpływ ilości n cykli nawilgacania i wysuszania dojrzałych zaczynów gipsu budowlanego GB-N1 o różnym W/G: a) zmiany wytrzymałości na ściskanie f_{gc} , b) zmiany wytrzymałości na zginanie f_{gtb}

Fig. 19.4. Influence of the number of humidifying and drying cycles of hardened GB-N1 building plaster paste with different W/G: a) changes of compressive strength f_{gc} , b) changes of bending strength f_{gtb}

19.3. Badania przepuszczalności wody przez gips

Oryginalne badania przepuszczalności wody przez gips podał autor w publikacjach [125, 126]. W niniejszym rozdziale podano jedynie te fragmenty tych prac, które są niezbędne do zaprezentowania problematyki teorii i praktyki kapilarnego podsiąkania wody przez dojrzałe zaczyny gipsowe oraz w zakresie niezbędnym do podania skorelowanych rozważań na temat struktury stwardniałych zaczynów gipsowych.



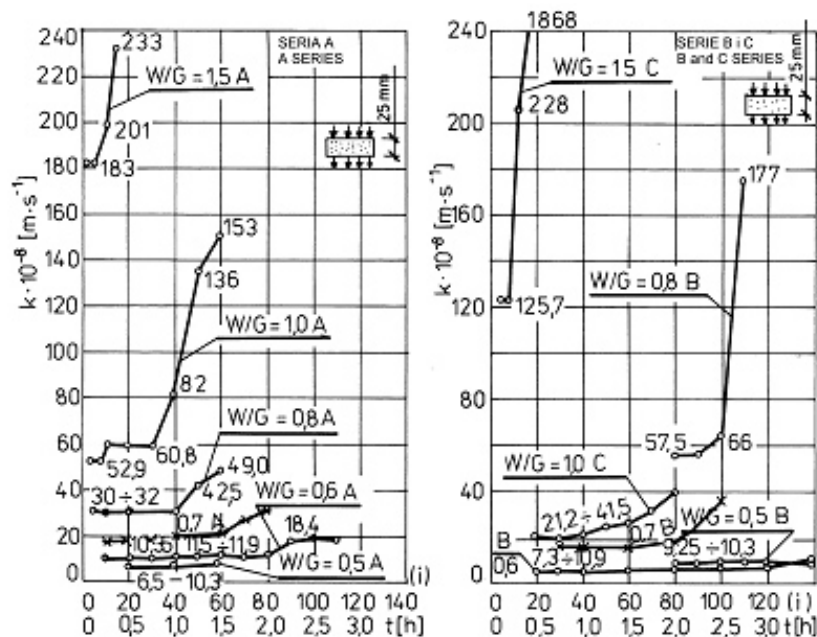
Rys. 19.5. Badania przepuszczalności wody przez gips: a) schemat aparatury pomiarowej; b) próbki walcowe z gipsu w obudowie z pleksiglasu, widoczne kanaliki w części górnej i zagęszczenie struktury w części dolnej próbek; c) zmiana stałej filtracji k w czasie filtracji wody przez gips, t – czas badań w godzinach

Fig. 19.5. Tests of water permeability through gypsum: a) scheme of the measurement equipment; b) cylindrical samples in plexiglass lining, visible capillaries in upper part and structure consolidation in lower part of samples; c) change of filtration coefficient k during water flow through gypsum

Metodykę badań wodoodporności gipsu na przepływ wody oraz badań filtracji wody przez gips podano w pracy własnej [125, 126]. Stwierdzono, że procesowi migracji i przepływu wody przez gips towarzyszy przemieszczanie się masy gipsu od strony odwodnej (infiltracji) do strony odpowietrznej (exfiltracji). W nawilgoceniu gipsu wytwarzają się uprzywilejowane drogi filtracji, czemu towarzyszy wytworzenie się od strony infiltracji widocznych kanalików o średnicy $\bar{d} = 0,15 - 0,34 \text{ mm}$, dla zacinów odpowiednio o $W/G = 0,5 - 1,5$ (rys. 19.5b). Równocześnie przemieszczanie się masy gipsu, wraz z migracją wody, powoduje uszczelnienie struktury od strony wypływu.

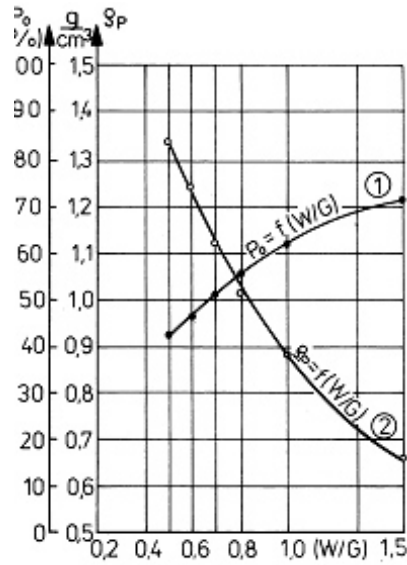
Zmiany współczynnika filtracji k wody przez zacinny gipsowy, o różnym wskaźniku W/G , podano na rysunku 19.6.

Dla poszczególnych obszarów ustabilizowanej filtracji, przy spadku hydraulicznym etapowo stałym $i = \text{const.}$, odnotowuje się małe zmiany wskaźnika filtracji k . W miarę wzrostu wskaźnika W/G , czyli w miarę wzrostu porowatości (rys. 19.7), odnotowuje się coraz większą niestabilność struktury gipsu, spowodowaną sukcesywnym przemieszczaniem się i wynoszeniem masy gipsowej z przepływającą wodą.



Rys. 19.6. Zmienność współczynnika filtracji k wody przez zacinny gips budowlanego o różnych wskaźnikach W/G – w zależności od zmian spadku hydraulicznego „ i ” oraz czasu trwania filtracji t w godzinach. Próby gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1

Fig. 19.6. Variability of filtration coefficient k for building plaster paste with different W/G indexes – depending on hydraulic gradient changes “ i ” and filtration duration t measured in hours. Samples of GB-N1 natural building plaster



Rys. 19.7. Zmiany porowatości p_o i gęstości pozornej ρ_p zaczynów z gipsu budowlanego, z surowców naturalnych GB-N1 w funkcji wskaźnika W/G

Fig. 19.7. Changes of porosity p_o and apparent density ρ_p of GB-N1 natural building plaster paste in the function of W/G index

Jeżeli przyjąć, że początkowe wartości współczynnika filtracji k charakteryzują wyjściową mikrostrukturę stwardniałych zaczynów gipsowych, to zestawienie wyników badań własnych jak na rysunku 19.8 podaje funkcyjne zależności współczynnika filtracji k_o od wskaźnika W/G zaczynu gipsowego lub od jego porowatości p_o . Uzyskane relacje doświadczalne opisano zależnościami statystycznymi w postaci wzorów (typ i równanie algebraiczne):

$$k_o = A_k \omega^3 \quad k_o = 52,3 \cdot 10^{-8} \omega^3 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (19.3)$$

$$k_o = A_p e^{10p} \quad k_o = 8,214 \cdot 10^{-10} e^{10p} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (19.4)$$

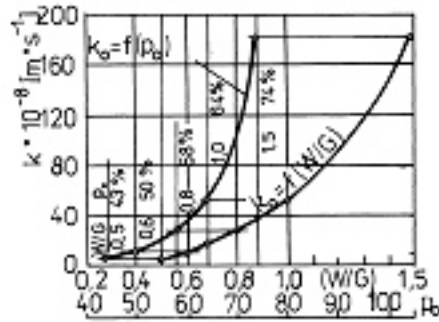
gdzie:

k_o – początkowy współczynnik filtracji, jak na rysunku 19.6, $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$;

$\omega = W/G$ – wskaźnik wodno-gipsowy, parametr bezwymiarowy, stosowany w przedziale $\omega = 0,5 - 1,5$;

$p = p_o$ – porowatość pozorna stwardniałego zaczynu gipsowego, parametr bezwymiarowy równy odpowiednio: $0,43 - 0,74$;

$A_k = 52,3 \cdot 10^{-8} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$; $A_p = 8,214 \cdot 10^{-10} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ – stałe równań odpowiednio (19.3) i (19.4).



Rys. 19.8. Zmiany współczynnika k filtracji wody przez gips w funkcji zmian wskaźnika W/G i porowatości pozornej p_0

Fig. 19.8. Changes of filtration coefficient k in the function of W/G index changes and apparent porosity p_0

Badania zawarte w pracach własnych [125, 126] po raz pierwszy w literaturze przedmiotu podają analityczny opis zjawisk towarzyszących filtracji wody przez gips.

19.4. Opis porowatości zaczynów gipsowych na podstawie parametrów filtracji wody

Dla ośrodków o zakładanej stałej strukturze porów i dla laminarnego zakresu prędkości przepływu v filtrującej wody przez pory, zależność v - i opisuje prawo Darcy:

$$v = ki \quad (19.5)$$

gdzie:

v – szybkość przepływu wody [$m \cdot s^{-1}$],

k – współczynnik filtracji [$m \cdot s^{-1}$],

i – spadek hydrauliczny $i = \frac{\Delta h}{s}$, gdzie: Δh – ciśnienie wody, s – grubość próbki w kierunku drogi filtracji.

Prędkość filtracji wody przez ośrodek oznacza się z zależności:

$$v = \frac{\Delta Q}{\Delta t A} \quad (19.6)$$

gdzie:

ΔQ – objętość przefiltrowanej wody w m^3 ,

Δt – czas przepływu w s ,

A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki prostopadła do strugi filtrującej wody w m^2 .

Z zależności (19.5) i (19.6) można wyznaczyć współczynnik filtracji k , równy:

$$k = \frac{\Delta Q_s}{\Delta t A \Delta h} \quad (19.7)$$

Rzeczywista prędkość filtracji v_f wody przez pory ośrodka – umownie jako pęku kapilar o promieniu r_f , o łącznej powierzchni A_f – jest większa od prędkości v , jak podano we wzorze (19.6) i na podstawie równania ciągłości strugi $v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{const.}$ wynosi:

$$v_f = \frac{v A}{A_f} = \frac{v}{p_f} = \frac{v}{\beta p_o} \quad (19.8)$$

gdzie:

p_f – porowatość powierzchniowa, w przybliżeniu równa porowatości objętościowej;

p_o – porowatość ośrodka równa $p_o = \frac{V_{\text{porów}}}{V_{\text{zarysowa}}} = \frac{V_p}{V}$ [%];

β – udział aktywnych porów w przewodzeniu wody.

Można przyjąć współczynnik β jako stopień nasycenia n porów wodą w trakcie filtracji, w postaci związku:

$$\beta = \frac{V_w}{V_p} \quad (19.9)$$

gdzie:

V_w – objętość wody w próbce,

V_p – objętość porów w próbce.

Jeżeli przyjmie się model porowatego zaczynu gipsowego jako pęk kapilar, których objętość w 1 cm^3 jest równa liczbowo czynnej porowatości objętościowej, to z wykorzystaniem prawa Hagena – Poiseuilego, opisanego w pracy [157], można porównać przepływ wody przez pęk m kapilar z przepływem przez ciało porowate opisane wzorem Darcy, w postaci związku dla jednostkowej objętości 1 cm^3 :

$$Q = m q = \frac{\Pi r^4 i g m}{8 \nu} = k i \quad (19.10)$$

gdzie:

Q – wydatek przepływu wody przez przekrój próbki,

q – wydatek przepływu wody przez pojedynczą kapilarę,

i – spadek hydrauliczny równy $i = \frac{\Delta h}{s}$, gdzie: Δh – spiętrzenie wody, s – grubość

próbki w kierunku filtracji,

ν – lepkość kinematyczna wody w m^2/s ,

k – współczynnik filtracji m/s .

Umowną liczbę kapilar m w 1 cm^3 objętości wyznacza się z zależności:

$$m\Pi r^2 = \beta p_o \quad (19.11)$$

wobec czego:

$$m = \frac{\beta p_o}{\Pi r^2} \quad (19.12)$$

gdzie:

βp_o – porowatość objętościowa czynna, w aspekcie przepływu wody.

Po wstawieniu zależności (19.12) do wzoru (19.10) uzyskujemy relację:

$$\frac{\beta p_o r^2 g}{8\nu} = k \quad (19.13)$$

i stąd promień umownej kapilary wynosi:

$$r = \sqrt{\frac{8\nu k}{\beta p_o g}} \quad [\text{m}] \quad (19.14)$$

Na podstawie wzoru (19.14) obliczono i podano w tabeli 19.1 umowne średnice kapilar, przyjmując dane:

- zaczyn gipsowy o $W/G = 0,5 - 1,5$ i odpowiadające im wartości porowatości p_o , według rysunku 19.7 i według zależności (19.16), w przedziale wartości odpowiednio – jak wyżej dla zaczynów – $p_o = 0,40 - 0,74$;
- lepkość kinematyczną wody $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$;
- przyspieszczenie ziemskie $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- β – stopień nasycenia porów wodą – odpowiednio dla zaczynów jak wyżej – $\beta_o = 0,838 - 0,928$;
- iloczyn βp_o wahał się w zakresie wartości $0,360 - 0,686$

W tabeli 19.1 w kol. 9 podano także wyniki oznaczeń średniej średnicy porów metodą porozymetryczną, według badań Nowaka [226].

Na uwagę zasługuje relatywna zgodność wyników badań wykonanych przez autora z badaniami filtracji, z rezultatami oznaczeń Nowaka [226] metodą porozymetrii rtęciowej. Należy podkreślić, że wzór (19.14), z wykorzystaniem zależności (19.3) i (19.4) z badań własnych – daje możliwość funkcyjnego opisu umownej kapilary zaczynu gipsowego w postaci związku:

$$d = 2r = 2 \sqrt{\frac{8\nu}{\beta p_o g}} \cdot \sqrt{8,214 \cdot 10^{-10} e^{10p_o}} = 5,732 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{8\nu}{\beta p_o g}} \sqrt{e^{10p_o}} \quad (19.15)$$

Przy uwzględnieniu zależności, że porowatość całkowitą dojrzałego zaczynu gipsowego można opisać zależnością:

$$p_o = \frac{\omega - 0,145}{\omega + 0,370} \cdot 100\% \quad (19.16)$$

oraz biorąc pod uwagę relację z badań własnych, opisującą zależność współczynnika filtracji k_0 od wskaźnika $\omega = W/G$ wg (19.3), uzyskać można opis średnicy umownej kapilary $d = 2r = f(W/G)$ w postaci związku:

$$d = 2r = 2 \cdot \sqrt{\frac{8v}{\beta \frac{\omega - 0145}{\omega + 0,370} g}} \cdot \sqrt{52,3 \cdot 10^{-8} \omega^3} = 14,46 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{8v}{\beta \frac{\omega - 0145}{\omega + 0,370} g}} \cdot \omega^3 \quad [\text{m}] \quad (19.17)$$

Wartości liczbowe średnic umownych kapilar $d = 2r$, dla poszczególnych stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego GB-N1 o różnym W/G , podano w tabeli 19.1, kolumna 8. Wykres zależności średnicy umownych kapilar od wskaźnika W/G podano na rysunku 19.10. Zależność $d = f(W/G)$ jest funkcją monotonicznie rosnącą, praktycznie liniowo, czyli średnice umownych kapilar d rosną liniowo wraz ze wzrostem wskaźnika $\omega = W/G$, według relacji:

$$d = 26192\omega - 6178 \quad (19.18)$$

gdzie:

d – średnica umownych kapilar w mikrostrukturze gipsu [\AA],

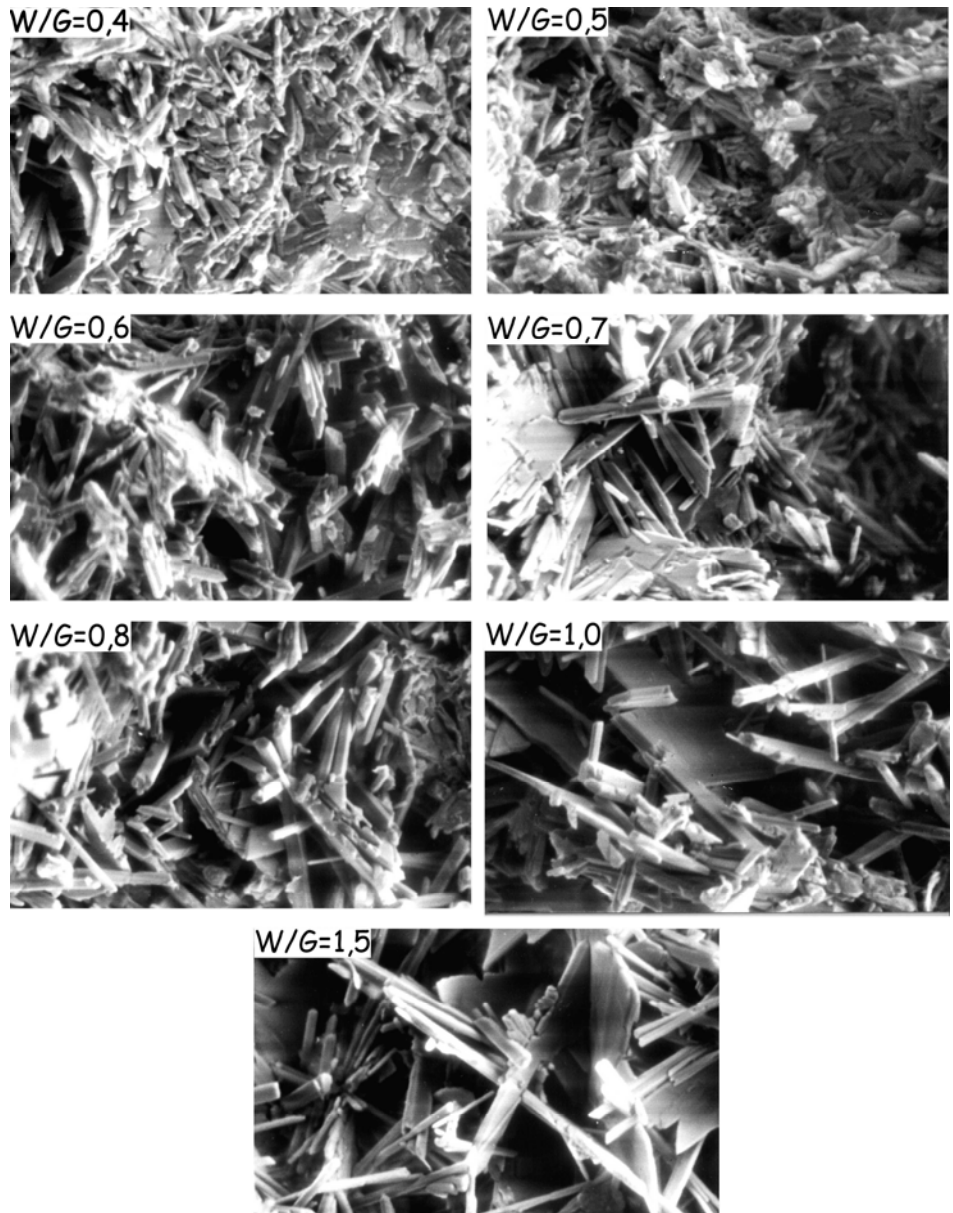
$\omega = W/G$ – wskaźnik wodno-gipsowy, parametr bezwymiarowy, parametry równania 19.18: 26192 i 6178 w [\AA].

Na zdjęciach mikrostruktury zaczynów gipsowych, wykonanych w mikroskopie skaningowym (fot. 20.1), widoczna jest struktura gipsu typu spilśnienia pojedynczych kryształów lub aglomeratów kryształów gipsu, która może być charakteryzowana przez umowne kapilary w procesie filtracji wody.

Uzyskanie oryginalnych ciągłych funkcyjnych relacji (19.15) i (19.17) daje możliwość opisu umownych kapilar w mikrostrukturze gipsu dla szerokiego zakresu zmian wskaźnika W/G , od wartości 0,5 do 1,5.

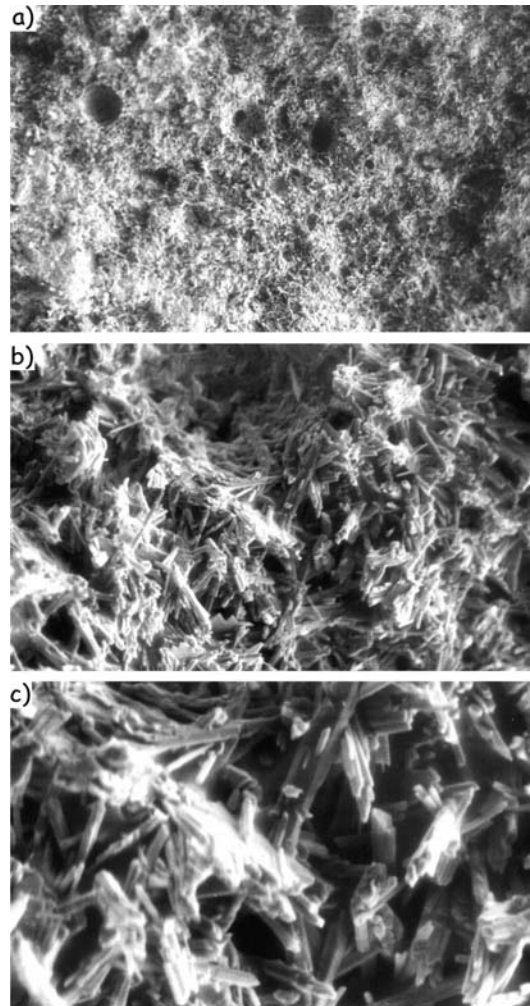
Tabela 19.1
Table 19.1Parametry struktury zaczynów z gipsu budowlanego o różnych wskaźnikach WG
Structure parameters of building plaster paste with different W/G indexes

Lp. No	Wskaźnik W/G W/G index	Nasiąkliwość wagowa n_{w_s} % Weight absor- bability n_{w_s} %	Gęstość pozorna P_p g/cm ³ Apparent densi- ty	Stopień nasycenia porów wodą β Pore saturation β	Porowatość p_0 Porosity p_0	Współczynnik filtracji k na podstawie (19.3) m/s Filtration coef- ficient k accord- ing to (19.3) m/s	Średnica kapilar d = 2r na podstawie (19.14) [Å] Capillary diame- ter d = 2r according to (19.14) [Å]	Średnia średnica porów metodą poro- zymetry rzeźbiowej wg [215] [Å] Mean pore diameter measured with mer- cury porosimetry method [215] [Å]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1,5	101,66	0,612	0,85	0,74	$1,77 \cdot 10^{-6}$	34592	
2.	1,0	59,17	0,869	0,83	0,63	$5,23 \cdot 10^{-7}$	20596	
3.	0,8	47,57	0,983	0,82	0,59	$2,68 \cdot 10^{-7}$	15417	13750
4.	0,7	36,55	1,141	0,83	0,53	$1,79 \cdot 10^{-7}$	13177	
5.	0,6	33,97	1,149	0,78	0,51	$1,13 \cdot 10^{-7}$	10998	8854
6.	0,5	22,68	1,340	0,73	0,44	$6,54 \cdot 10^{-8}$	9313	6534
7.	0,4	18,53	1,425	0,69	0,40	$3,35 \cdot 10^{-8}$	7159	



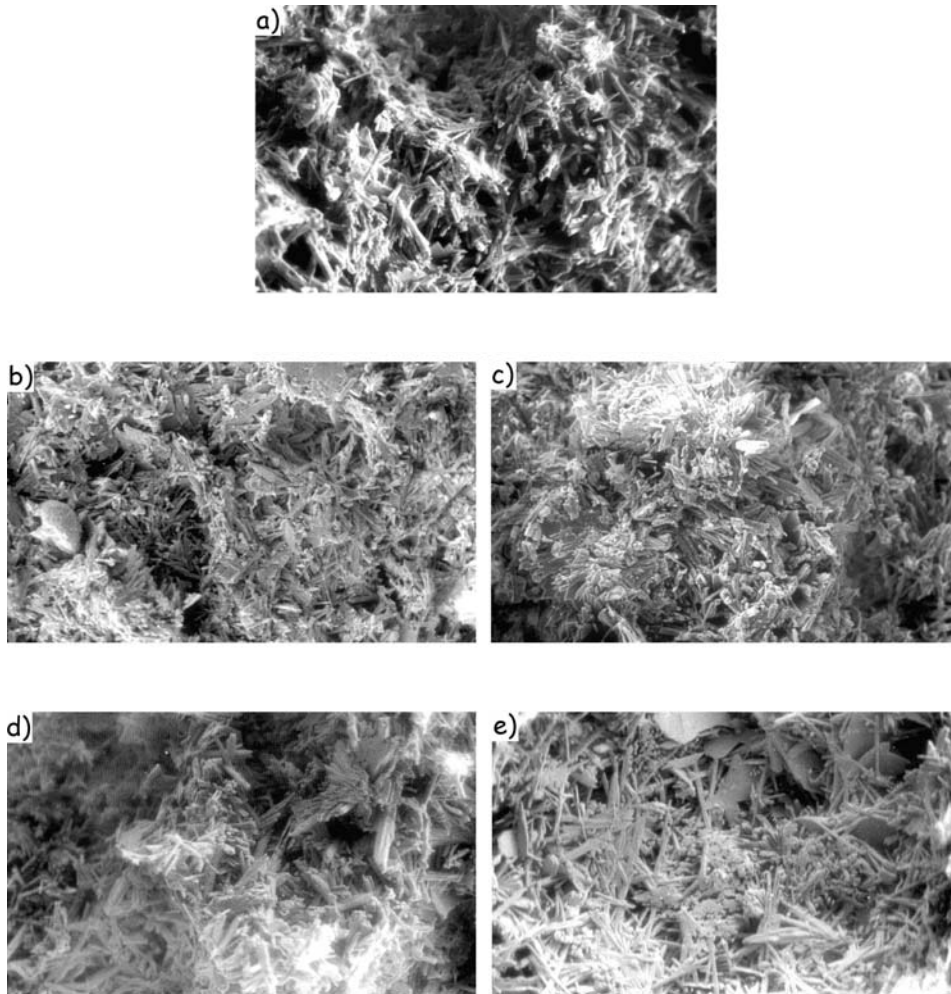
Fot. 19.1. Obraz struktury stwardniałych zaczynów gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1, o różnych wskaźnikach W/G, w mikroskopie skaningowym, badania własne, powiększenie x 3500

Phot. 19.1. Viwe of structure of hardened GB-N1 natural building plaster paste, with different W/G indexes, in scanning microscope, own research, enlargement x 3500



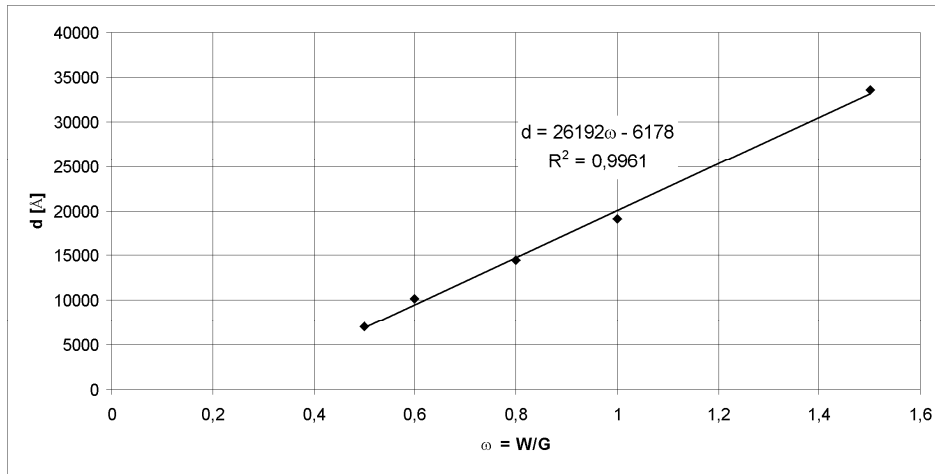
Fot. 19.2. Obraz w mikroskopie skaningowym tego samego stwardniałego zaczynu o $W/G = 0,6$, w różnych powiększeniach i różnych polach widzenia: a) $\times 140$ – widoczne „kratery” w strukturze gipsu w strefie pęcherzyków powietrza; b) $\times 1400$ – struktura aglomeratów kryształów gipsu, widoczny sferyczny układ kryształów w strefie pęcherzyka powietrza; c) $\times 3500$ – widoczna struktura szczepów aglomeratów kryształów gipsu, z dużym zróżnicowaniem ich liczebności. Próby z gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1. Badania własne

Phot. 19.2. View in scanning microscope of the same hardened paste with $W/G = 0,6$, in different enlargements and different fields of view: a) $\times 140$ – visible “craters” in gypsum structure in air bubble zone; b) $\times 1400$ – gypsum crystal agglomerate structure, visible spherical arrangement of crystals in air bubble zone; c) $\times 3500$ – visible strain structure of gypsum crystal agglomerates, with high diversity of their quantity. Samples of GB-N1 natural building plaster. Author’s research



Fot. 19.3. Struktura aglomeratów kryształów gipsu w stwardniałych zaczynach o $W/G = 0,6$ z rozsianych frakcji gipsu budowlanego GB-N1, x 1400: a) gips naturalny 0–2 mm, b) frakcja 0–0,04 mm, c) frakcja 0,8–0,125 mm; d) frakcja 0,2–0,63 mm; e) frakcja 0,63–1,0 mm. Badania własne

Phot. 19.3. Structure of gypsum crystal agglomerates in hardened paste with $W/G = 0,6$ from segregated fractions of GB-N1 building plaster, x 1400: a) natural building plaster 0–2 mm, b) fraction 0–0,04 mm, c) fraction 0,8–0,125 mm; d) fraction 0,2–0,63 mm; e) fraction 0,63–1,0 mm. Author's research

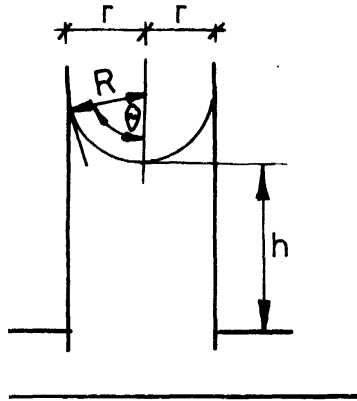


Rys. 19.9. Zależność średnicy d umownych kapilar według wzoru (19.18) od wskaźnika W/G dla stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego
 Fig. 19.9. Relation of diameter d of analytical capillaries in accordance with formula (19.18) and index W/G for hardened building plaster paste

19.5. Podsiąkanie kapilarne wody przez gips

19.5.1. Rozważania teoretyczne

Zagadnienia szybkości kapilarnego podsiąkania wody przez gips oraz maksymalnej wysokości kapilarnego podsiąkania ma istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne dla charakterystyki zachowania się wyrobów gipsowych, które znajdują się w strefie kontaktowej z awaryjnie powstałym zwierciadłem wody.



Rys. 19.10. Podsiąkanie wody w modelu kapilary
 Fig. 19.10. Water rise in capillary model

Przyjmując uproszczony model kapilary w postaci rurki o średnicy $d = 2r$, z meniskiem o promieniu R i z kapilarnym podsiąkaniem na wysokość h (rys. 19.10), wyprowadzono jak poniżej zależności opisujące kapilarne podsiąkanie w zaczynach gipsowych, wykorzystując badania własne filtracji wody przez gips (jak podano w p. 19.3) – stanowiące testy badawcze do określenia uśrednionych kapilar w strukturze porowatości gipsu oraz

zależności ogólne z teorii kapilarnego podsiąkania wody w ośrodkach porowatych (Kuczyński [157], Leśniewska i Pogorzelski [181]).

Zgodnie z równaniem Laplace'a, dla cieczy zwilżającej, ciśnienie kapilarne p_k wynosi:

$$p_k = p_m - p = -\frac{2\sigma_A}{R} \quad (19.19)$$

gdzie:

p_k – ciśnienie kapilarne,
 p_m – ciśnienie pod meniskiem,
 p – ciśnienie atmosferyczne,
 σ_A – napięcie powierzchniowe,
 R – promień krzywizny menisku.

Biorąc pod uwagę zależność:

$$\frac{r}{R} = \cos \theta \quad (19.20)$$

otrzymamy:

$$p_k = \frac{2\sigma_A \cos \theta}{r} \quad (19.21)$$

Ruch wody w kapilarze odbywa się pod wpływem następujących sił:

a) siły kapilarnej podciągającej:

$$\frac{2\sigma_A \cos \theta}{r} \Pi r^2 \quad (19.22)$$

b) sił przeciwdziałających:

– siły grawitacji:

$$\rho g h \Pi r^2 \quad (19.23)$$

– siły tarcia:

$$\frac{8\eta h}{r^2} \Pi r^2 \frac{dh}{dt} \quad (19.24)$$

– siły bezwładności:

$$\rho g h \Pi r^2 \frac{d^2 h}{d\tau^2} \quad (19.25)$$

gdzie:

η – dynamiczny współczynnik lepkości wody,

τ – czas,

ρ – gęstość wody.

Ze względu na ruch powolny podsiąkającej wody siły bezwładności można pominąć i równanie ruchu cieczy wznoszącej się w kapilarze opisuje związek:

$$\frac{2\sigma_A \cos \theta}{r} - \rho gh - \frac{8\eta h}{r^2} \frac{dh}{d\tau} = 0 \quad (19.26)$$

Prędkość ruchu kapilarnego wynosi:

$$v = \frac{dh}{d\tau} = \frac{r^2}{8\eta h} \left(\frac{2\sigma_A \cos \theta}{r} - \rho gh \right) \quad (19.27)$$

Całkując równanie (19.27) otrzymamy czas przepływu w funkcji wznoszenia:

$$\tau = \frac{16\eta\sigma_A \cos \theta}{r^3\rho^2g^2} \left(\ln \frac{2\sigma_A \cos \theta}{2\sigma_A \cos \theta - \rho gh} - \frac{\rho gh}{2\sigma_A \cos \theta} \right) \quad (19.28)$$

Równanie (19.28), przy pominięciu sił grawitacyjnych, przyjmuje postać:

$$\tau = \frac{2\eta h^2}{\sigma_A r \cos \theta} \quad (19.29)$$

Po przekształceniu zależności (19.29) można otrzymać wyrażenie określające wysokość kapilarnego podsiąkania w funkcji czasu podsiąkania τ :

$$h = \sqrt{\frac{\sigma_A r \cos \theta}{2\eta}} \sqrt{\tau} \quad (19.30)$$

Kąt nachylenia doświadczalnych krzywych zależności $h - \sqrt{\tau}$ (rys. 19.11–19.13) wynosi:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{\sqrt{\tau}} = \sqrt{\frac{\sigma_A r \cos \theta}{2\eta}} = a \left[\frac{\text{cm}}{\sqrt{\text{min}}} \right] \quad (19.31)$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{\sigma_A r \cos \theta}{2\eta} = a^2 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{min}} \right] = 166,7a^2 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Dynamiczny współczynnik lepkości wody, dla temperatury $T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$, można przyjąć o wartości:

$$\eta = 1001 \cdot 10^6 [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

Z zależności (19.26) i (19.27) uzyskuje się wyrażenie opisujące wysokość kapilarnego podsiąkania wody $h = h_{\max} = H$:

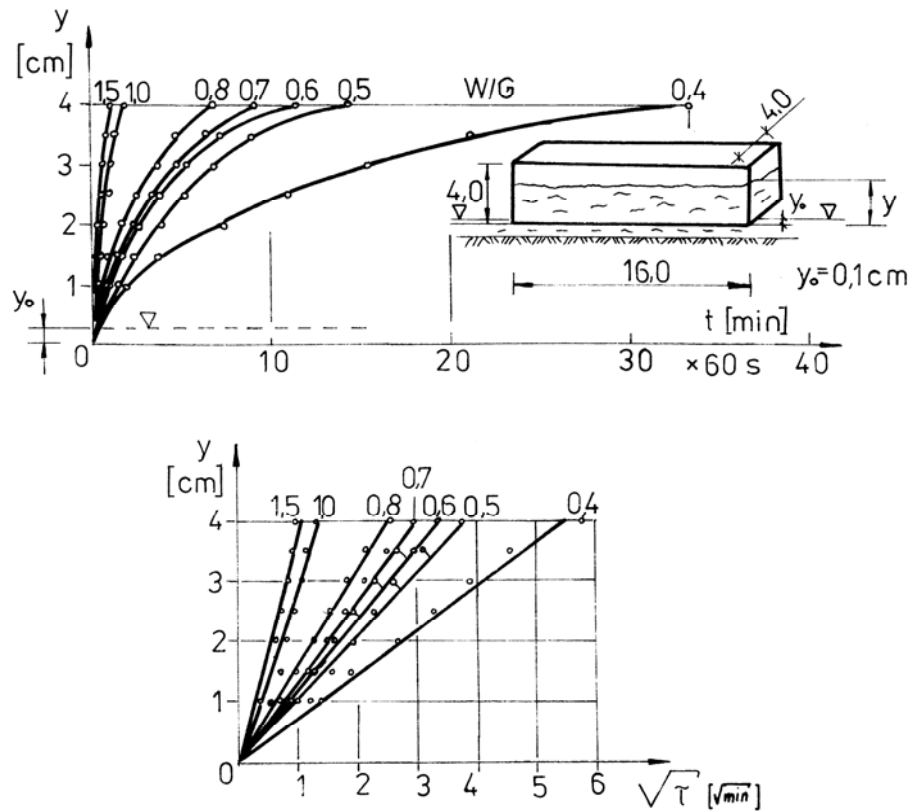
$$h_{\max} = \frac{2\sigma_A \cos \theta}{\rho gr} \quad (19.32)$$

19.5.2. Badania podsiąkania kapilarnego wody przez gips

Własne badania doświadczalne szybkości kapilarnego podsiąkania wody przez stwardniałe zaczyny gipsowe wykonywano w trzech seriach eksperymentów:

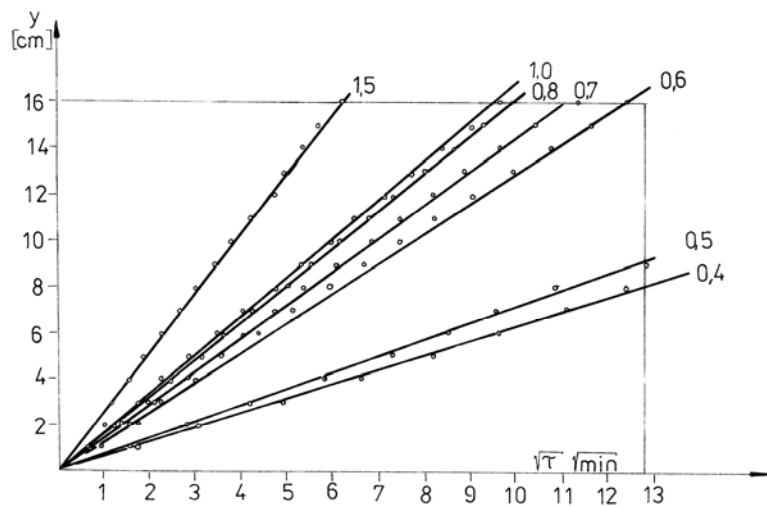
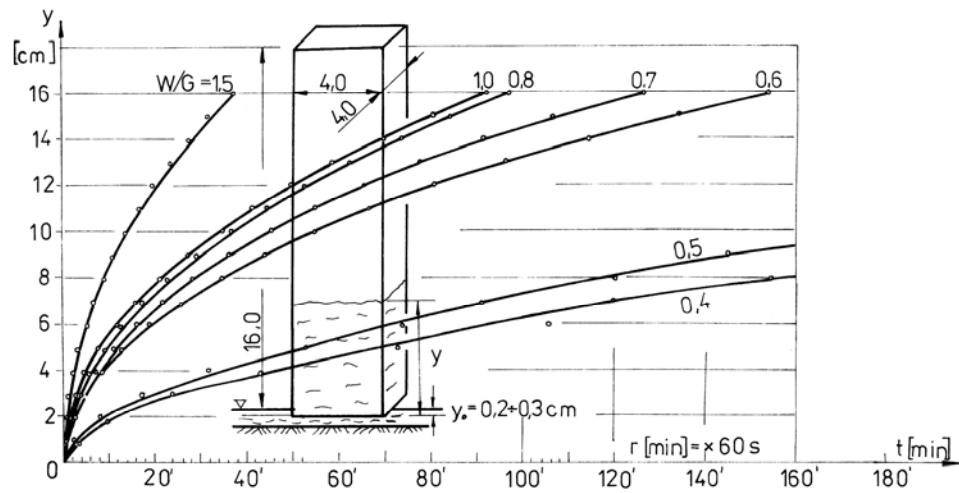
- na beleczkach 4 x 4 x 16 cm ułożonych na płask,
- na beleczkach 4 x 4 x 16 cm ułożonych na stojąco,
- na beleczkach 10 x 10 x 50 cm ułożonych na stojąco.

Badania wykonano dla zaczynów z gipsu budowlanego o W/G, w przedziale wartości W/G = 0,5 – 1,5. Warunki laboratoryjne otoczenia cechowały się parametrami: temperatura powietrza $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura wody $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



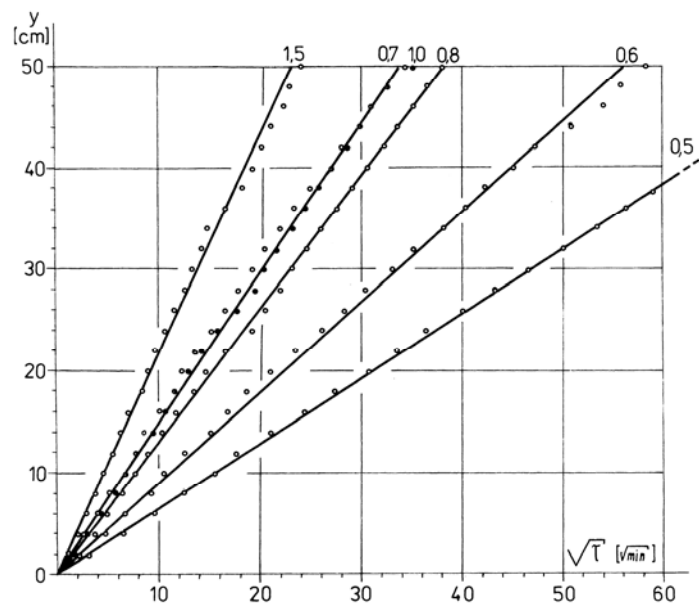
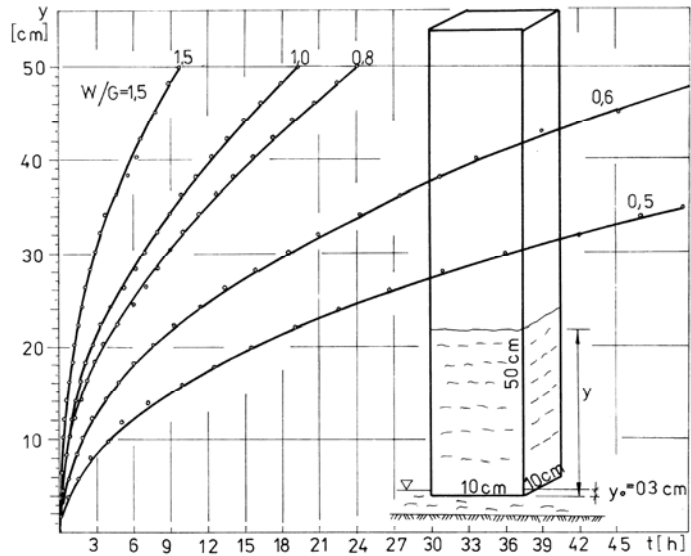
Rys. 19.11. Podsiąkanie kapilarne wody w stwardniałych zaczynach z gipsu budowlanego o W/G = 0,5 – 1,5: y – wysokość podsiąkania kapilarnego, $t = \tau$ – czas od chwili zanurzenia próbki w wodzie (beleczki pomiarowe 4x4x16 cm zanurzone w pozycji poziomej)

Fig. 19.11. Water capillary rise in hardened building plaster paste with W/G = 0,5 – 1,5: y – level of capillary rise, $t = \tau$ – time from the moment of sample immersing in water (measurement 4x4x16 cm beams immersed in horizontal)



Rys. 19.12. Podsiąkanie kapilarne wody w stwardniałych zaczynach z gipsu budowlanego o $W/G = 0,5 - 1,5$: y – wysokość podsiąkania kapilarnego, $t = \tau$ – czas od chwili zanurzenia próbki w wodzie (bełeczki pomiarowe 4x4x16 cm zanurzone w pozycji pionowej)

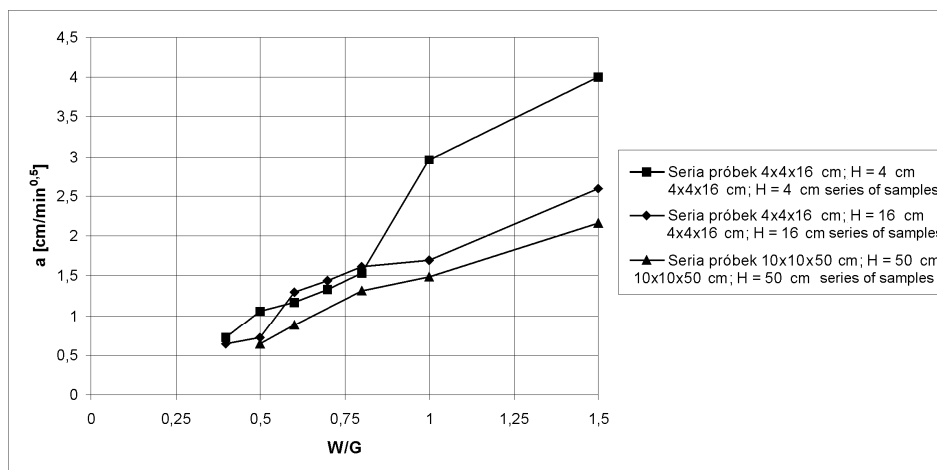
Fig. 19.12. Water capillary rise in hardened building plaster paste with $W/G = 0,5 - 1,5$: y – capillary rise level, $t = \tau$ – time from the moment of sample immersing in water (measurement 4x4x16 cm beams immersed in vertical position)



Rys. 19.13. Podsiąkanie kapilarne wody w stwardniałych zaczynach z gipsu budowlanego o $W/G = 0,5 - 1,5$: y – wysokość podsiąkania kapilarnego, $t = \tau$ – czas od chwili zanurzenia próbki w wodzie (próbki belkowe 10x10x50 cm)

Fig. 19.13. Water capillary rise in hardened building plaster paste with $W/G = 0,5 - 1,5$: y – capillary rise level, $t = \tau$ – time from the moment of sample immersing in water (10x10x50 cm beam samples)

We wszystkich seriach badań, podanych na rysunkach 19.11–19.13, występuje liniowość relacji $y = f(\sqrt{\tau})$, zgodnie z teoretycznym wzorem (19.30). We wszystkich seriach badań jest widoczne, że wraz ze wzrostem porowatości ośrodka rośnie szybkość narastania wysokości kapilarnego podsiąkania w funkcji czasu. Wartości parametrów a , czyli kątów nachylenia w relacji $y = a\sqrt{\tau}$, ogólnie rosną wraz ze wzrostem porowatości ośrodka (rys. 19.14).



Rys. 19.14. Zmiany parametru a ze wzoru (19.29) w zależności od wskaźnika W/G dla badanych stwardniałych zaczynów gipsowych

Fig. 19.14. Changes of parameter a of formula (20.29) depending on index W/G for tested hardened gypsum paste

Układ punktów pomiarowych $a - W/G$, dla dwóch serii próbek ustawionych na stojąco, jak na rysunkach 19.12 i 19.13, wskazuje na możliwość liniowej aproksymacji zależności $a = f(W/G)$, jak na rysunku 19.15, w postaci funkcji jak poniżej:

– seria próbek jak na rysunku 19.13, beleczki 4x4x16 cm, $H = 16$ cm:

$$a = 1,7254W/G + 0,0725 \quad (19.33)$$

– seria próbek jak na rysunku 20.14, belki 10x10x50 cm, $H = 50$ cm:

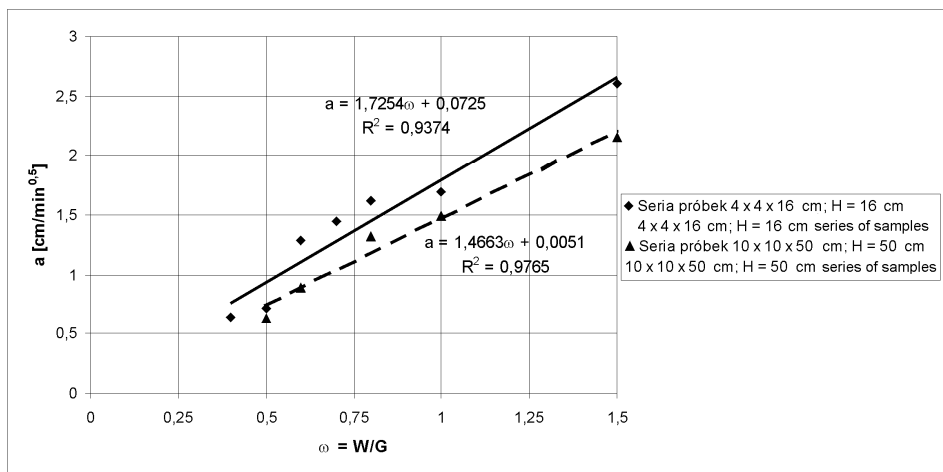
$$a = 1,4663W/G + 0,0051 \quad (19.34)$$

gdzie:

a – parametr nachylenia prostych, jak na rysunkach 19.11b, 19.12b, 19.13b [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-0,5}$]

W/G – wskaźnik wodno-gipsowy, parametr bezwymiarowy,

parametry liczbowe równań (19.33) i (19.34) w jednostkach [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-0,5}$].



Rys. 19.15. Aproksymacja liniowa zależności $a = f(W/G)$
 Fig. 19.15. Linear approximation of relation $a = f(W/G)$

Wyniki badań jak na rysunkach 19.15 i 19.16 wskazują, że im próbka jest wyższa – w osi kapilarnego podsiąkania – tym mniejsze są wartości parametru a , dla $W/G = \text{const}$. Na relację tę mają wpływ nieuwzględnione siły tarcia (19.24), rosnące wraz z wydłużeniem drogi kapilarnego podsiąkania.

Podane w niniejszym rozdziale wyniki badań pozwalają na oszacowanie wysokości kapilarnego podsiąkania H wody przez gips w określonym czasie τ .

Przykładowo, dla elementów wykonanych z zaczynów gipsowych o $W/G = 0,8$, w analogii do serii badań jak podano na rysunku 19.12, parametr $a = 1,315 \frac{\text{cm}}{\sqrt{\text{min}}}$. Dla

wartości $\tau = 60 \text{ min}$ wysokość kapilarnego podsiąkania wynosi $h = a\sqrt{\tau} = 10,18 \text{ cm}$. Wysokość jednej kondygnacji $h = 270 \text{ cm}$ podsiąkająca kapilarnie woda osiągnie po upływie czasu τ :

$$\sqrt{\tau} = \frac{h}{a} = \frac{270}{1,315} = 215,32\sqrt{\text{min}}$$

stąd:

$$\tau = 42157 \text{ min} = 29,3 \text{ doby}$$

Cennym dorobkiem badań zawartych w niniejszym rozdziale jest opis analityczny średnicy kapilar $d = 2r = f(\omega)$, jak we wzorze (19.17) i tabeli 19.1. Zależność $d = f(W/G)$ podano poglądowo graficznie na rysunku 19.10. Podane w pracy charakterystyki parametru $a = f(W/G)$, jak na rysunku 19.4 i 19.5, opisanego równaniami (19.33) i (19.34),

pozwalają – w oparciu o teorię filtracji – na ilościowe obliczenia szybkości kapilarnego podsiąkania wody w stwardniałych zaczynach z gipsu budowlanego.

Znajomość szybkości kapilarnego podsiąkania wody jest przydatna do określenia strefy zawilgoconej, na przykład ściany gipsowej od wytworzonego awaryjnie zwierciadła wody stojącej, w celu obliczeń sumarycznych odkształceń strefy suchej i strefy zawilgoconej.

20. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

20.1. Podsumowanie

Postawiony do realizacji w p. 3 kompleks zagadnień naukowo-badawczych został opracowany w większości w sposób zamknięty.

Autor wnosi, że opracowane oryginalnie w niniejszej pracy elementy mechaniki gipsu stwardniałego w „górnym” i „dolnym” stanach wytrzymałości, wraz z ustaleniem statystycznych rozkładów zmienności wytrzymałości i wytrzymałości gwarantowanych w różnych stanach naprężeń i wilgotności, wraz z analitycznym opisem cech wytrzymałościowych w funkcji wskaźnika W/G, czyli w funkcji mikrostruktury gipsu, a także wraz ze statystycznym ustaleniem relacji między poszczególnymi właściwościami gipsu – ma uniwersalne znaczenie poznawcze, niezależnie od kierunku zastosowań gipsu. Ustalone w pracy charakterystyki dokładności różnych metod badań cech wytrzymałościowych gipsu mogą stanowić standardy odniesienia dla laboratoryjnych badań kontrolnych jakości i jednorodności spoiw w procesie ich produkcji oraz dla poligonowych badań kontrolnych jakości wyrobów z gipsu. Dodatkowo pomocne w tym zakresie są opracowane statystyczne charakterystyki oceny wytrzymałości gipsów stwardniałych metodami nieniszczącymi: ultradźwiękową i przez pomiar gęstości pozornej.

Efekty niniejszej pracy mogą być wykorzystane do ustalenia metod badań jakości i kontroli wyrobów gipsowych w warunkach produkcji przemysłowej, łącznie z zastosowaniem ustalonych w pracy propozycji klasyfikacji wytrzymałościowej spoiw i wyrobów gipsowych, w nawiązaniu do probabilistycznych charakterystyk cech materiałów budowlanych.

Wykonane w ramach niniejszej pracy badania odkształcalności gipsów stwardniałych, w różnych stanach naprężeń i wilgotności, z określeniem analitycznych funkcji typu $E_g = f(W/G)$ – opisujących moduły sprężystości dla gipsów o zróżnicowanej mikrostrukturze, w szerokim paśmie zmian wskaźnika $W/G = 0,5-1,5$ – stanowią szeroką dokumentację mechaniki gipsu w zakresie odkształceń pod działaniem obciążeń doraźnych.

Skorelowane z powyższym blokiem zagadnień rozpoznanie statystyczne zmienności cech technologicznych i wytrzymałościowych gipsu budowlanego jako spoiwa, porównawczo z różnych technologii produkcji, z surowców naturalnych i syntetycznych, wraz z opisem analitycznym podstawowych właściwości tych spoiw, łącznie ze statystyczną charakterystyką zmienności cech składu chemicznego, mineralnego, w zakresie uziarnienia i czasu wiązania – sprawia, że właściwości różnych gipsów budowlanych

mogą być statystycznie przewidywalne i analitycznie obliczalne. Bardzo ważne jest ustalenie związków między właściwościami spoiwa gipsowego a cechami gipsu stwardniałego.

Opracowana oryginalnie propozycja klasyfikacji wytrzymałościowej spoiwa gipsu budowlanego, wraz z określeniem statystycznych zależności umożliwiających przeliczenia składowych charakterystyk między sobą, stanowić może podstawę normalizacji wytrzymałościowej spoiw gipsowych.

Szczególne znaczenie poznawcze i praktyczne ma statystyczne opracowanie charakterystyk gipsów syntetycznych, w porównaniu do gipsów naturalnych, co stanowi udokumentowaną nobilitację właściwości gipsów syntetycznych, o sukcesywnie rosnącym znaczeniu na rynku spoiw gipsowych.

W sposób oryginalny i poznawczo twórczy ustalony jest w pracy cały kompleks rozpoznania i opisu analitycznego zjawisk dotyczących wpływu obecności i migracji wody w gipsie stwardniałym, w zakresie zagadnień składowych:

- destrukcyjnego wpływu stopnia nawilgocenia w_i na cechy wytrzymałościowe gipsu, w postaci funkcji $f_g = f(w_i, W/G = \text{const.})$;
- zmian objętościowych gipsu stwardniałego w procesie pierwotnego odsychania i ekspansji ε_v w procesie ponownego nawilgocenia, wraz z możliwością określenia naprężeń naporu pęczniącego gipsu $\sigma_n = \varepsilon_v E_g^w$;
- wpływu cyklicznych nawilgoczeń i wysuszeń na wytrzymałość elementów z gipsu stwardniałego;
- zjawisk towarzyszących filtracji wody przez gips;
- opisu mikrostruktury gipsu stwardniałego przez umowne kapilary;
- opracowania funkcji opisujących podsiąkanie kapilarne wody przez gips.

Podane w pracy metody badań i analiz mogą mieć zastosowanie także w ocenie jednorodności właściwości cementów i ich statystycznej klasyfikacji wytrzymałościowej. Opracowana w rozdziale 16 problematyka nośności elementów na zginanie w stanie suchym może znaleźć zastosowanie do wytrzymałościowych badań modeli konstrukcji wykonywanych z gipsu.

Podana w pracy metoda badań, analiz i formułowania związków wytrzymałościowych może być przydatna także do rozstrzygnięć problematyki bezpieczeństwa podwieszonych gipsowych elementów ściennych i sufitowych, stosowanych do zabudowy wewnątrz. Stan bezpieczeństwa tych elementów nie został dotychczas wyczerpująco określony.

20.2. Wnioski szczegółowe

Wyniki badań własnych i studialno-teoretycznych analiz upoważniają do sformułowania następujących wniosków szczegółowych:

- 20.2.1. W literaturze dotyczącej problematyki gipsu i kompozytów gipsowych brak jest wyczerpujących danych dotyczących losowej, statystycznej charakterystyki właściwości fizyko-mechanicznych spoiw, w powiązaniu z zagadnieniami mechaniki gipsu i nośności elementów gipsowych w „dolnych” i „górnym” stanach wytrzymałości.
- 20.2.2. Podana przez autora oryginalna propozycja zunifikowanego nazewnictwa, w normalizacji wytrzymałościowej gipsu, stanowi niezbędne nawiązanie oznaczeń cech fizyko-mechanicznych gipsów, w stosunku do przyjętych aktualnie standardów norm EC i ISO.
- 20.2.3. Na podstawie zbiorów wyników badań kontrolnych w zakładach przemysłu gipsowego [131], ustalono wpływ technologii produkcji spoiw gipsowych na jakość i jednorodność ich składu mineralnego i chemicznego. Stwierdzono niekorzystne przesunięcia faz składu mineralnego anhydrytu III i anhydrytu nierozpuszczalnego w gipsach w technologii pieców obrotowych (PO) opalanych węglem, w porównaniu do bardziej stabilnych termicznie, lepszych technologii: (PK) prażarek kotłowych i nowoczesnej technologii prażenia w piecach obrotowych przeponowych (POP). Rozpoznano, że gipsy budowlane z pieców obrotowych PO mają dużą zawartość anhydrytu III $\bar{X} \pm s = 23 \pm 17,1\%$, gipsy z prażarek kotłowych PK tylko $\bar{X} = 0,39 \pm 1,3\%$, podobnie w gipsach z technologii POP zawartość anhydrytu III charakteryzują statystyczne cechy zbioru: $\bar{X} = 1,6\%$, $X_{\min} = 0,12\%$, $X_{\max} = 3,63\%$. Przesunięcia faz w gipsach z pieców obrotowych PO – w porównaniu do gipsów z prażarek PK – są istotne i wynoszą: o 26,5% mniej fazy $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ i równocześnie o 23% więcej anhydrytu III oraz o 2,5% więcej anhydrytu trudno rozpuszczalnego. Wartości uzyskane w technologii POP są zbliżone do uzyskanych w technologii PK (tab. 5.5). Równocześnie stwierdzono dużą jednorodność zawartości sumy wszystkich dehydratów w produktach prażenia (tab. 5.5) oraz dużą jednorodność składu chemicznego (przykładowo zawartość SO_3 , z charakterystyką zbiorów wieloletnich badań: $\bar{X} \pm s = 48,83 \pm 0,71\%$, $v = 1,45\%$ w technologii PO i $\bar{X} \pm s = 48,73 \pm 0,59\%$, $v = 1,21\%$ w technologii PK, tab. 5.6), co świadczy o dużej jednorodności surowców w analizowanych wieloletnich okresach produkcji.
- 20.2.4. Wykazano statystycznie wpływ technologii prażenia surowców i technologii mielenia na wybrane cechy fizyczne i technologiczne spoiw gipsowych, w tym na wodożądność i uziarnienie. Większa wodożądność technologii spoiw gipsowych z technologii PO – charakteryzowana przez wskaźnik normowej konsystencji W/G, z charakterystyką zbioru $\bar{X} \pm s = 0,70 \pm 0,02$ – jest większa od wodożądności gipsów z technologii PK ($\bar{X} \pm s = 0,66 \pm 0,02$), co ma związek z

wyższą zawartością anhydrytu III. Określono statystycznie istotne różnice czasu początku i końca wiązania w gipsach uzyskanych z różnych technologii prażenia (tab. 5.7) i stwierdzono analitycznie związki z różnicami składu mineralnego tych spoiw.

- 20.2.5. Stwierdzono różnice w parametrach rozkładu wytrzymałości (f_{cm} , s) spoiw gipsowych w technologii PO, PK oraz POP i wykazano, że różnice te wynikają z różnic w składzie mineralnym, a głównie z różnic w zawartości anhydrytu III, jak również z różnic zawartości anhydrytu II i gipsu dwuwodnego.
- 20.2.6. Wykorzystując dane z wieloseryjnych badań wytrzymałości normowej $f_{gc,2h}$ (Klin, Tomasik D., Tomasik M. [130]) opracowano oryginalne podstawy ustalenia klas spoiw gipsowych, w oparciu o wytrzymałości gwarantowane $f_{gc,2h}^G$, dla gipsów budowlanych produkowanych według trzech technologii: PO, PK i POP.
- 20.2.7. Ustalono oryginalne statystyczne związki analityczne między wytrzymałością normową w stanie pierwotnej wilgotności $f_{gc,2h}$ a wytrzymałością f_{gc} w stanie suchym (5.18) – (5.23). Opracowane statystyczne związki pozwalają na praktyczne przeliczanie wzajemne wartości wytrzymałości: $f_{gtb,2h}$, f_{gtb} , $f_{gc,2h}$ i f_{gc} .
- 20.2.8. Na podstawie analiz rozkładów wyników statystycznych badań kontrolnych wytrzymałości spoiw gipsowych, opracowano oryginalny algorytm ustalania wytrzymałości gwarantowanych $f_{gc,2h}^G$ i f_{gc}^G , określony ciągiem zależności (5.25) – (5.37), wraz z nową propozycją klas wytrzymałościowych spoiwa gipsowego $\beta - CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ typu gips budowlany, podanych w tabeli 5.11, wraz z opracowaniem metody analitycznych obliczeń odpowiadających wytrzymałości średnich oraz gwarantowanych na ściskanie i na rozciąganie przy zginaniu. Całość analiz jest możliwa do realizacji dzięki własnym oryginalnym związkom empirycznym, opracowanym na podstawie wieloseryjnych badań własnych.
- 20.2.9. Stwierdzono statystycznie istotny poziom zróżnicowania stopnia hydratacji poszczególnych frakcji gipsu budowlanego oraz określono parcjalne stopnie hydratacji frakcji składowych. Stwierdzono, że mogą być one wykorzystane do analitycznych obliczeń stopnia hydratacji dowolnej mieszaniny frakcji składowych gipsu budowlanego (zależność (6.7)). Ustalono, że materiał nieaktywny i materiał mniej aktywny umiejscowiony jest głównie we frakcjach grubszych spoiwa (rozdz. 6.3).
- 20.2.10. Opracowany sposób szacowania powierzchni właściwej spoiwa gipsowego, na podstawie znajomości zawartości kilku frakcji „dolnych” (zależność (6.4)), może mieć praktyczne znaczenie do przyspieszonych oznaczeń porównawczych poziomów domielenia spoiw gipsowych. Określono oryginalne parcjalne powierzchnie właściwe frakcji składowych rozsianego spoiwa gipsowego i wykazano możliwość ich zastosowania do obliczeń analitycznych powierzchni właściwej gipsu wielofrakcyjnego. Ustalono doświadczalnie i opisano analitycznie oryginalną zależność pomiędzy powierzchnią właściwą A_{gi} poszczególnych frakcji gipsu budowlanego $\beta - CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$, a średnią średnicą ziaren d_i danej

frakcji (rys. 6.2, zależność (6.3)). Określono oryginalnie wpływ rozfrakcjonowania spoiwa gipsowego, z odrzuceniem frakcji grubych, na wzrost wytrzymałości gipsu o 30%.

- 20.2.11. Na podstawie równoległych badań porównawczych uziarnienia: metodą sitową, metodą oznaczeń powierzchni właściwej według Blaine'a oraz za pomocą analizatorów laserowych, dla różnych rodzajów spoiw gipsowych, jak: gips budowlany z technologii PO, PK i POP, gips szpachlowy, gipsy syntetyczne stwierdzono, że reprezentatywną i precyzyjną metodą oznaczeń składu ziarnowego jest technika analizatorów laserowych. Dostępność techniki laserowej powinna spowodować obowiązkową kontrolę uziarnienia tą metodą. Autor wnioskuje, że skład granulometryczny spoiw gipsowych – mający istotny wpływ na: konsystencję, czas wiązania zaczynów świeżych oraz na wytrzymałość gipsów stwardniałych – powinien być cechą kontrolowaną: o wartościach normatywnie wymaganych. Stwierdzono, że analiza sitowa może stanowić metodę pomocniczą, możliwą do wykorzystania jak podano w p. 20.2.10.
- 20.2.12. Ustalono oryginalne funkcyjne zależności empiryczne opisujące czas początku wiązania t_{pw} i końca wiązania t_{kw} gipsu budowlanego z technologii PO w funkcji wskaźnika W/G (8.1), (8.2). Analityczne określenie takich związków funkcyjnych daje możliwość przewidywania czasów wiązania $t_{pw} = f(\omega)$ i $t_{kw} = f(\omega)$ dla zaczynów gipsowych o różnym wskaźniku W/G = ω . Analogiczną zależność określono dla gipsów z nowoczesnej technologii pieców obrotowych przeponowych POP (13.2), (13.3) i rysunek 13.2.
- 20.2.13. Ustalono analityczne związki między konsystencją zaczynów a wodożądnością spoiw gipsowych. Zaproponowano w pracy różne, w tym własne, efektywne metody badań konsystencji zaczynów gipsowych, zróżnicowanych stosownie do różnych poziomów wskaźników W/G (rys. 8.4 – 8.9).
- 20.2.14. W oparciu o wieloseryjne badania statystyczne dokonano w rozdziale 9 oryginalne oszacowania dokładności pomiaru wytrzymałości zaczynów gipsowych na rozciąganie za pomocą trzech metod: rozłupywania walców, zginania beleczek i osiowego rozciągania „ósemek”. Ustalono statystyczne związki parametrów rozkładu wytrzymałości \bar{X} , s , ε – porównawczo dla tych metod (tab. 9.1, 9.2), w oddzielnych ścieżkach badań dla gipsów w stanie suchym i nawilgoconym. Ustalono statystyczne relacje między wartościami oznaczeń wytrzymałości gipsu na rozciąganie różnymi metodami, w powiązaniu z relacjami między wynikami dla stanów suchych i stanów nawilgoconych. Ustalone relacje mogą być pomocne w metodyce badań cementów i innych spoiw mineralnych.
- 20.2.15. Ustalono, że dla szerokiego zakresu zmian wskaźnika W/G, w paśmie 0,4 – 1,5, krzywe rozkładu wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu mają charakter krzywych rozkładu Gaussa (rys. 10.1 – 10.4).
- 20.2.16. Ustalono statystyczne związki między wytrzymałościami na ściskanie, oznaczanymi na próbkach beleczkowych i walcowych (10.3) i (10.4), a także statystyczne relacje między wytrzymałością na ściskanie f_{gc} i wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} dla szerokiego pasma zmian wskaźnika W/G (10.4).

20.2.17. Ustalono statystyczne zależności współczynników zmienności wytrzymałości v_{gc} i v_{gtb} od konsystencji zaczynów gipsowych, w szerokim paśmie badań serii statystycznych $W/G = 0,4 - 0,8$ (rys. 10.6, tab. 10.2), ustalając oryginalnie tym samym przedziały konsystencji, przy których występuje optymalnie największa jednorodność wytrzymałości dojrzałych zaczynów.

20.2.18. W rozdziale 11 określono oryginalnie i statystycznie udokumentowane funkcje analityczne, opisujące wytrzymałości zaczynów w stanie suchym, w funkcji wskaźnika W/G , w różnych stanach naprężeń dla obciążeń doraźnych w zakresie:

- wytrzymałości na ściskanie f_{gc} (11.1) – (11.4);
- wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{gtb} (11.5) – (11.6);
- wytrzymałości na rozciąganie osiowe f_{gt} (11.7) – (11.10).

Ustalono związki między wytrzymałościami f_{gtb} i f_{gt} (11.11) – (11.15), a także związki między wytrzymałościami na rozciąganie f_t i f_{gtb} a wytrzymałością na ściskanie f_{gc} (11.16) – (11.21). Dla „górných” stanów wytrzymałości ustalono statystyczną zależność między porowatością p_o a wytrzymałością gipsu na ściskanie f_{gc} (11.22) – (11.23). W rozdziale 11.5 – na podstawie statystycznych zbiorów wyników z wielu lat badań wytrzymałości próbek gipsowych, wykonanych przez n ośrodków badawczych – dla n losowych dostaw rynkowych gipsu budowlanego z surowców naturalnych GB-N1 – opisano obwiednie górne i dolne oraz krzywą środkową pola rozrzutu wyników funkcyjnych zależności $f_{gtb} = f(\omega)$ i $f_{gc} = f(\omega)$. Ustalono – dla tak reprezentatywnego zbioru – relacje

$$\text{typu } k_{gtb} = \frac{f_{gtb,min}}{f_{gtb,m}} \quad (11.37c) \text{ i } k_{gc} = \frac{f_{gc,min}}{f_{gc,m}} \quad (11.40) \text{ mogą stanowić funkcyjne}$$

związki pomocnicze do ustaleń normatywnych częściowych współczynników bezpieczeństwa, z uwagi na wytrzymałość gipsu, niezbędne do obliczeń nośności elementów z gipsu według metod stanów granicznych SG i EC, gdyż brak jest takich normowych ustaleń.

20.2.19. Stwierdzono, że funkcje wytrzymałości $f_{gc} = f(\omega')$, $f_{gtb} = f(\omega')$ oraz $f_{gt} = f(\omega')$ można opisać równaniami dwóch prostych, podobnie jak to określa wzór Bolomey’a dla zaczynów cementowych lub jedną funkcją potęgową dla całego zakresu zmian parametru $\omega' = G/W = 2,5 - 0,5$. Regularność ta dotyczy zarówno stanów „górných”, jak i stanów „dolnych” (12.1) – (12.13). Stwierdzono oryginalnie, że identyczny sposób zapisu wytrzymałości gipsu można stosować przy ultradźwiękowej ocenie jego wytrzymałości (rozd. 15). Podano w pracy ogólne oryginalne związki $f_{gc} = f(v)$ (15.1) i (15.2), mogące znaleźć zastosowanie przy kontroli wytrzymałości wyrobów z gipsu budowlanego metodą nieniszczącą. Metodą nieniszczącą można oszacować wytrzymałość na podstawie znajomości gęstości pozornej ρ_p . Określone statystycznie równania (11.91) – (11.93), opisujące obwiednie górną i dolną pasma rozrzutu wyników w relacji funkcyjnej $f_{gc} - \rho_p$, dają podstawy do opracowania szczegółowej aplikacji tej metody.

Po raz pierwszy w literaturze określono współczynnik rozmiękania K jako funkcyjnie zależny od wskaźnika W/G , w postaci funkcji typu $K = f(\omega')$:

- dla ściskania $K_{gc} = 0,222\omega'^{0,422}$,
- dla zginania $K_{gtb} = 0,297\omega'^{0,348}$.

20.2.20. Na podstawie porównawczych badań cech fizycznych i mechanicznych gipsów z surowców naturalnych, prażonych w nowoczesnej technologii pieców obrotowych przeponowych POP i rozdrabnianych w sterowanych młynach walcowych z separatorami (rozd. 13) i porównawczo gipsów syntetycznych GS-K i GS-B z różnych wytwórni (rozd. 14), uzyskano bogaty materiał porównawczy, z całością wieloparametrowych charakterystyk i wzorów analitycznych dotyczących opisu: średnicy rozplywu D świeżych zaczynów (rys.13.1 i 14.2), z opisami funkcyjnymi zależności $D = f(\omega)$, relacji wytrzymałościowych $f_g = f(\omega)$ dla różnych stanów naprężeń i wilgotności, dla gipsu GB-N3 (rys.13.3 oraz tab.13.1 i 13.2), dla gipsów syntetycznych z odsiarczania spalin z węgla kamiennego GS-K i z węgla brunatnego GS-B (rys. 14.4, 14.5, 14.6, tab. 14.5, zależności (14.5) – (14.23)), aż do stwierdzenia, że istnieje możliwość ogólnego opisu zależności wytrzymałości gipsu $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, niezależnie od sposobu jego produkcji (14.28) i (14.25).

20.2.21. Dla elementów gipsowych w stanie suchym, z szerokiego zakresu zmian wartości wskaźnika $W/G = 0,4 - 1,5$, stwierdzono, że:

- a) rozkład odkształceń poprzecznych ε w przekrojach elementów zginanych można przyjąć za liniowy, z wartością $\varepsilon = 0$ w osi obojętnej przekroju;
- b) określono oryginalnie sprężysto-plastyczny wskaźnik wytrzymałości na zginanie dla zginanych przekrojów gipsowych, który wynosi:

$$W_f = \frac{W_o}{0,5\gamma} = \beta W_o = 1,7496W_o \quad (16.17), \text{ gdzie } W_o - \text{sprężysty wskaźnik}$$

$$\text{wytrzymałości na zginanie } W_o = \frac{bh^2}{6};$$

- c) określono oryginalnie funkcję momentu rysującego przy zginaniu, którą można opisać zależnością: $M_n = W_f f_{gt}'' = 0,2916bh^2 f_{gt}''$ (16.19), określono także oryginalną zależność nośności przekroju zginanego w funkcji wskaźnika W/G (16.21);
- d) określono analitycznie oryginalną zależność, że wartość naprężeń rozciągających w dolnych włóknach elementów zginanych, czyli wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, można opisać za pomocą wzoru: $f_{gt}'' = \gamma \cdot 0,5f_{gtb} = 0,547f_{gtb} = 0,8\omega'^{1,77}$ (16.20).

20.2.22. Opisane w rozdziale 17 charakterystyki odkształceń i moduły sprężystości w stanie naprężeń: osiowego ściskania (rozd. 17.1), w elementach zginanych i osiowo rozciąganych (17.2) i analityczne opisy modułu sprężystości $E_g = f(f_{gc})$ i odkształceń $\varepsilon_g = f(f_{gc})$, dla stanów suchych i nawilgoconych, a także

graniczne wartości odkształceń jednostkowych $\varepsilon_{g,lim}$, stanowią oryginalny wkład w zakresie problematyki mechaniki gipsu, w postaci finalnych zależności mogących mieć zastosowanie w praktyce.

20.2.23. W bardzo ważnej dla tworzyw gipsowych problematyce relacji: gips dojrzały – woda, ustalono w pracy:

- a. W rozdziale 18 oryginalne zależności zmian objętościowych gipsu w procesie pierwotnego wysychania w zależności od sukcesywnych zmian poziomu wilgotności n_w , dla zaczynów o $W/G = 0,4 - 2,0$ oraz ekspansji objętościowej w procesie wtórnego nawilgacania dla gipsów suchych o $W/G = 0,4 - 2,0$; ustalone wartości odkształceń objętościowych $\pm\varepsilon_s$ powiązane ściśle z wilgotnością wagową n_w , pomnożone przez moduły sprężystości $+E_{gcw}$, dają możliwość bardzo ważnej oceny i obliczeń sił naporu pęczniejącego gipsu, przykładowo na ościeżnice okienne i drzwiowe w wylewanych ścianach monolitycznych. Uzyskane zależności, w funkcji zmian wilgotności, dla szerokiego zakresu zmian W/G , dają pełną charakterystykę zmian objętościowych stwardniałych gipsów w wyniku zmian wilgotności.
- b. Stwierdzono bardzo ciekawą wtórną ekspansję objętościową zaczynów gipsowych o $W/G = 0,4$; wyjątkowo duże ekspansje objętościowe mogą powodować samozniszczenie tworzyw gipsowych o niskim W/G , co potwierdzają doniesienia literaturowe (rozdziale 2). Na rysunku 18.3 podano model samozniszczenia gipsów o niskich W/G , w przejściowej strefie nawilgoceń.
- c. Określono oryginalne zależności opisujące spadki wytrzymałości na ściskanie gipsu dojrzałego w miarę rosnącego nawilgocenia, w postaci funkcji: $f_{gc}^{w_i} = f_{gc}^s e^{-b w_i}$, podane na rysunkach 19.1 i 19.2.
- d. Stwierdzono oraz określono jakościowo i ilościowo destrukcyjny wpływ kolejnych cykli nawilgoceń i wysuszeń na funkcję obniżeń wytrzymałości gipsu (rozdz. 19.2).
- e. Autor wykonał badania przepuszczalności wody przez gips [124, 125], ustalił oryginalne związki między współczynnikami filtracji początkowej k_o a wskaźnikiem $\omega = W/G$ lub pierwotną porowatością p gipsu, w postaci związków: $k_o = 52,3 \cdot 10^{-8} \omega$ (19.3) lub $k_o = 8,214 \cdot 10^{-10} e^{10p}$ (19.4). Rozpoznano funkcje wzrostu współczynnika k w czasie procesu filtracji, jak dla ciała o zmiennej strukturze porowatości, co ma związek z przemieszczaniem masy gipsu $\frac{\partial m}{\partial t}$ i zmian porowatości struktury $\frac{\partial p}{\partial t}$, przez co współczynnik filtracji k jest złożoną funkcją typu: $k = f(t) = f\left(\frac{\partial m}{\partial t}, \frac{\partial p}{\partial t}\right)$.
- f. Stwierdzono, że test przepuszczalności wody przez gips stanowić może metodę oceny średnich wartości promieni umownych kapilar w mikrostrukturze gipsu według zależności (19.14); określone tą metodą średnice kapilar, dla gipsów o różnym W/G , okazały się zbieżne z oznaczeniami wymiarów

- porów w gipsie metodą porozymetrii rtęciowej (tab. 19.1); autor określił oryginalną zależność opisującą średnicę umownej kapilary w funkcji wskaźnika $\omega = W/G$ w postaci zależności (19.17) oraz zależności (19.18).
- g. Wyniki badań uzyskane jak w p. e i f dały podstawę do bardzo ważnych opisów analitycznych szybkości kapilarnego podsiąkania wody przez gips, w oparciu o własne badania doświadczalne (rozdz. 19.5) oraz wysokości kapilarnego podsiąkania wody przez gips (19.32), co ma istotne znaczenie do analitycznego określania wysokości stref nawilgoconych w funkcji czasu podsiąkania.

LITERATURA

- [1] Ajapow U.: Issledowanije struktury i wodostojkosti zatwierdiewszego gipsa. Kandidatskaja dissertacija. Baku 1954, podano za [305], 14.
- [2] Akerman K.: Gips i anhydrit. PWN, Warszawa 1964.
- [3] Akin A., Dokuz E., Sert Y.: Utylization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2004, v. 34, n 4.
- [4] Arilion M., Sobolev K.: The optimization of a gypsum-based composite material. *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, 1725–1728.
- [5] Aszrabow A.B.: Procznost żelazobetonnych konstrukcij mnogoetażnych zdaniij. Taszkient, Uzbekistan, 1980.
- [6] Babcock – BSH. Plant for making plaster partition slabs.
- [7] Bachiorrini A., Negro A., Murat M., Zone de transimition entre l’anhydrite III et l’anhydrite II. Recherches par analyse thermique differentiele et par diffractons de rayons X. *Rev. Mat. Const.*, 1976, nr 703–6, 347–353.
- [8] Badens E., Veesler S., Boistelle R., Chation D.: Relation between Young’s Modulus of set plaster and complete wetting of grain boundaries by water. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, nr 156, 373–379.
- [9] Badens E., Veesler S., Boistalle R.: Crystalization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 198/199, 99–105.
- [10] Badowska H., Osiecka E., Woźniak E., Nowa metoda wytwarzania spoiwa gipsowego z odpadów przemysłu nawozów fosforowych. XXI Konf. Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, T. IV, Materiały Budowlane, Krynica 1975.
- [11] Badowska H.: Charakterystyka odpadów fosfogipsowych z Gdańska i Polic. *Cement Wapno Gips*, 1976, nr 3, 67–73.
- [12] Bagelke H.: Veränderung mechanischer Eigenschaftfen von Gipsbaustoffen nach Durchfeuchtung. *Zement Kalk Gips*, 1979, nr 10, 560–568.
- [13] Boisvert J.P., Domenech M., Foissy A., Persello J., Mutin J.C.: Hydratation of calcium sulphate hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) into gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). The influence of the sodium polyacrylate/surface interaction and molecular weight. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 220, 579–591.
- [14] Beckert J., Einbrodt H.J., Fischer M.: Badania w zakresie oceny aspektów zdrowotnych gipsu naturalnego oraz gipsu REA z elektrowni węglowych, ze względu na ich zastosowanie do produkcji materiałów budowlanych. Ekspertyza na zlecenie: Fundacji Badawczej VSB Essen i Zrzeszenia Federalnego Przemysłu Gipsowego i Gipsowych Płyt Budowlanych Darmstadt. Wydawnictwo Rigips Polska Sp. z o.o., 1996.
- [15] Biezuchow N.J., Teoria sprężystości i plastyczności. PWN, Warszawa 1957.

- [16] Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego – praca zbiorowa: Elementy stropowe i ścienne z gipsu budowlanego. BSiPTBP, Warszawa 1958.
- [17] Błochowiak Z., Jaworek H., Kubica J.: Technologia i Organizacja zakładu produkcji domów jednorodzinnych z tworzywa gipsowego. Czasopismo Techniczne, 1977, nr 7.
- [18] Bolomey J.: Points essentiels du controle du beton sur les chantiers. Buill. Inst. Techn. du Batiment et des Travaux Publics, 1946 (podano za [23]).
- [19] Borowski J. i inni: Efektywność stosowania gipsu w budownictwie. Instytut Budownictwa Mieszkaniowego, Warszawa 1959.
- [20] Borowski J., Brunarski L.: Badania doświadczalnego stropu gipsowo-żelbetowego. Przegląd Budowlany, 1958, nr 2.
- [21] Borowski J.: Spoiwa Gipsowe w budownictwie. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1954.
- [22] Borowski J.: Uodpornienie na działanie wody gipsobetonowych elementów budowlanych. Materiały Budowlane, 1953, nr 6, 156–159.
- [23] Breuchman J., Górski A., Skalski J.: Kabiny sanitarne z tworzyw gipsowych. Przegląd Budowlany, 1977 nr 2.
- [24] British Gypsum. Housing Rehabilitation Handbook. British Gypsum Limited, 1985.
- [25] British Gypsum pocket book. Third edition 1979.
- [26] Brooks J.J., Neville A.M.: A comparison of creep, alasticity and strength of concrete in tension and in compression. Magazine of Concrete Research, vol. 29, September 1977.
- [27] Brückner X., i inni: Der Baustoff Gips. Herstellung und Anwendung von Gipsbauelementen. Verlag f. Bauwesen, Berlin 1978.
- [28] Brunarski L.: Podstawy statystycznej analizy wyników badań. Rozdz. 2. Budownictwo Betonowe. T. VII. Badanie materiałów, elementów i konstrukcji. Arkady, Warszawa 1970.
- [29] Budnikow P.P.: Gips, jego issledowanije i primienienije. Strojizdat. Moskwa 1943 (podano za [46]).
- [30] Budownictwo betonowe T. I – Technologia betonu, cz. 1. Spoiwa, kruszywa, woda. Praca zbiorowa pod redakcją B. Bukowskiego. Arkady, Warszawa 1963.
- [31] Budownictwo betonowe T. I – Technologia betonu, cz. 2. Projektowanie betonów. Praca zbiorowa pod redakcją W. Kuczyńskiego. Arkady, Warszawa 1963.
- [32] Budownictwo betonowe T. II – Teoria betonu i żelbetu. Praca zbiorowa pod redakcją L. Suwalskiego. Arkady, Warszawa 1964.
- [33] Bułyczew G.G.: Smieszannyje gipsy. Gosstrojizdat, Moskwa 1952.
- [34] Chomczyk P.: Maszyny i urządzenia w budownictwie gipsowym. Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa 1961.
- [35] Chomczyk P.: Wielopiętrowe domy z gipsu w Warszawie. Realizacja stanu surowego. Budownictwo Mieszkaniowe, 1959, nr 2.
- [36] Chvatal T.: Systematic experiments on the hydrophobing of gypsum. Zement Kalk Gips, 1975, nr 8, 337–339.

- [37] Colak A.: Density and strength characteristics of foamed gypsum. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22, 193–200.
- [38] Colak A.: The long-term durability performance of gypsum – Portland cement – natural pozzolan blends. *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, 1033–1038.
- [39] Colussi J., Lapasin R., Papo A.: Shear-dependent behavior of gypsum plasters. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1982, 21.
- [40] Combe E.C., Smith D.C.: The effects of some organic acids and salts on the setting of gypsum plaster. *J. Appl. Cem.*, 1966, 16, 73–77.
- [41] Cooper A.H., Saunders J.M.: Road and bridge construction across gypsum Karst in England. *Engineering Geology*, 2002, vol. 65, no 2/3, 217–223.
- [42] Corneiro F.L., Barcila A.: Resistancia a la traction des betons. C.I.L. 1953.
- [43] Cottin B.: Porowatość i wytrzymałość zaczynów cementowych. *Cement Wapno Gips*, 1976, nr 6, 157–159.
- [44] Czarniecki L.: *Betony żywiczne*, Arkady, Warszawa 1982.
- [45] Czernski Z.: Próba zastosowania generatora impulsów mechanicznych do zagęszczania spoiwa gipsowego. *Cement Wapno Gips*, 1980, nr 11, 315–317.
- [46] Czernski Z.: Pulsacyjne zagęszczanie mieszanek gipsowych. XXV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1979, t. 4, Wrocław 1979, 43–47.
- [47] Czernski Z.: Wytrzymałość betonu gipsowego na tle badań nad mieszanekami gipso-betonowymi. *Zesz. Nauk. Polit. Warszawskiej, Budownictwo*, 1953, nr 4, 53–76.
- [48] Czernski Z.: Zastosowanie zwykłego gipsu do wyrobu wysokowytrzymałych prefabrykatów. *Zesz. Nauk. Polit. Warszawskiej, Nr 29, Budownictwo*, 1957, nr 9, 41–111.
- [49] Daligand D.: *Le platre et ses techniques de production*. Ciments, Betons, Platres, Chaux, 1985, 755–4, 222–225.
- [50] Dąbrowski K., Stachurski W., Zieliński J.L.: *Konstrukcje betonowe*. Arkady. Warszawa 1982.
- [51] De Miechieli P.: Broyage du gypse avec un concasseur a double cylindre. *Ciments Betons Platres Chaux*, 2003, no. 861, 22–26.
- [52] Denkiewicz J., Najzarek Z.: Badania nad doborem opóźniaczy chemicznych dla materiałów typu gips-wypełniacz-polimer. *Zesz. Nauk. Wyższ. Szk. Inż. Opole, Budownictwo* 28, Opole 1987, 55–61.
- [53] Denkiewicz J.: Analiza cech tworzywa gipsowego jako materiału modelu do badań konstrukcji z betonu. *Praca doktorska, Polit. Śląska, Gliwice* 1970.
- [54] Dutkowski J., Chełkowska M.: Zmiany wymiarów liniowych wybranych tworzyw gipsowych. *Cement Wapno Gips*, 1991, nr 3, 70–73.
- [55] Dutkowski J., Makulski W.: Badania pustaków gipsowych. *Biul ITB, Przegląd Budowlany*, 1958, nr 8, 340–342.
- [56] Dutkowski J.: *Budownictwo z gipsu. Spoiwa, ściany z bloczków, posadzki*. Arkady, Warszawa 1960.
- [57] EKO GIPS. Nowy system budownictwa. Ekogips S.A., Warszawa, ul. Barycka 26. Aprobata techniczna, ITB, Warszawa 1994, nr AT-15-2760/97.
- [58] Fagerhund G.: Relationship between porosity and mechanical properties of materials. *National Swedish Building Research*, t. 16, nr 5, 1973.

- [59] Feldman R.F., Beaudoin J.J.: Microstructure and strength of hydrated cement. *Cement and Concrete Research*, 1976, nr 3.
- [60] Feret R.: Bieziehungen Zwischen Druck – und Zugfestigkeit der Mörtel und Beton. *Zement* 1937/ 74 (podano za [31]).
- [61] Ferronska A.W., Korowiak W.F.: Kieramzitobeton na osnowie fosfogipsocementnopuccolanowego wiazuszczego. *Stroit. Mat.*, 1980, nr 9, 30–31.
- [62] Ferronska A.W., Strojewa G.J., Korowiakow W.J., Pietrowa G.N.: Kompleksnyje chimiceskije dobawki dla lechkich betonow na osnowie wodostojkich gipsowych wiazuszczich. *Stroit. Mat.*, 1985, nr 5, 27–28.
- [63] Ferronska A.W.: Dołgowiecznost gipsowych materialow, izdelij i konstrukcji. Moskwa, Strojizdat 1984.
- [64] Ferronska A.W., Baranow J.M.: Deformatiwnyje swojstwa izgibajemych zelezobetonnych elementow iz GCP betona pri kratkowriemennyh i dlitielnych nagruzkach. *Stroit. Mat.*, 1978, nr 2, 31–32.
- [65] Fischer K.W.: Beziehungen zwischen Körnung und Festigkeit bei Halbhydratplaster. *Silikattechnik* 15, 1964, nr 2.
- [66] Flörke O.W.: Kristalographische und röntgenometrische Untersuchungen im System $\text{CaSO}_4 - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Neues Ib. Mineral. Abh.*, 1952, 4, 180–240.
- [67] Förster H.J.: Verwertung von Abfall-gipsen nach dem Guilini-Verfahren. *Chem. Ind.* nr 6, 1972.
- [68] Galos K., Szlugaj J. Wyszomiński P.: Krajowa baza naturalnych i syntetycznych surowców siarczanowych. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 4, 163–166.
- [69] Gantner E.: Modyfikacja właściwości tworzyw fosfogipsowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska 1983, Promotor Prof. E. Szymański.
- [70] Gawlicki M., Małolepszy J., Poszczynialski W.: Właściwości spoiw gipsowych kształtujące ich cechy użytkowe. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5.
- [71] Gay P.: Some crystallographic studies in the system $\text{CaSO}_4 - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Miner. Mag.*, 1965, 35, 347–362.
- [72] Gmouch A., Eve S., Samdi A., Moussa R., Hamel J., Gomina M.: Changes in plaster microstructure by pre-stressing or by adding gypsum grains: microstructural and mechanical investigations. *Material Science and Engineering A352*, 2003, 325–332.
- [73] Gmouch A., Eve S., Samdi A., Moussa R., Tricha L., Aazzab B., Homel J., Gomina M.: Development and validation of a dimensional variation measurement set-application to the plaster setting. *Materials Science and Engineering A372*, 2004, 123–127.
- [74] Godycki-Ćwirko T.: *Mechanika betonu*. Arkady, Warszawa 1982.
- [75] Gorbacewa M., Ignatowa W.I., Riabow G.G.: Kompozicjonnoje wodostojkoje wiazuszczije na osnowie połwodnogo gipsa. *Stroit Mat.*, 1987, nr 5, 26–27.
- [76] Gordaszewskij P.F., Iwanickij W.W.: Wysokoprocnyj gips iz fosfogipsa dla stroitielnych celej. *Stroit. Mat.*, 1971, nr 8.
- [77] Gordaszewskij P.F., Pletniew W.P., Danidov W.J., Laurowa T.A.: Fosfogipsowoje wiazuszczije powyższenoj wodostojkosti i oblasti jego primienienija. *Stroit. Mat.*, 1980, nr 2, 12–13.

- [78] Gottlieb S.: Hydratacja i cement heterogeniczny. Rock Products 1950 (Streszcz. Zement Kalk Gips, 1951, nr 43, 63).
- [79] Gracjanskij W.J., Franko A.M.: Fizykochemiczeskije i technologiczeskije osnovy proizwodstwa oblicowocznych plit iz gipsowego kamnia. Stroit. Mat., 1984, nr 12, 23–25.
- [80] Grzeszczyk S.: Gips z odsiarczania spalin.. Materiały Budowlane, 1992, nr 6, 14–16.
- [81] Grzeszczyk S.: Możliwości utylizacji odpadów z odsiarczania spalin do produkcji materiałów budowlanych. Cement Wapno Gips, 1993, nr 4, 123–127.
- [82] Grzeszczyk S.: Spoiwa z popiołów lotnych i odpadów z odsiarczania spalin metodą półsuchą. Cement Wapno Gips, 1995, nr 1, 8–12.
- [83] Grzymek J.: Teoria wiązania i twardnienia spoiw gipsowych i anhydrytowych według opracowań polskich. PWN, Warszawa 1964.
- [84] Gustaw K., Bienias Z., Iwancew J.: Hydratacja i właściwości spoiw anhydrytowo-klinkierowo-popiołowych. Cement Wapno Gips, 1991, nr 6, 160–162.
- [85] Gustaw K., Łaciak H., Skrzynecki E., Pietoń J.: Wpływ aktywatora cementowego na przebieg hydratacji mączki anhydrytowej. Cement Wapno Gips, 1990, nr 3, 45–50.
- [86] Hamm H.: Die Bewältigung des REA – Gipsproblems eine Aufgabe der europäischen Gipsindustrie. Zement Kalk Gips, 1994, nr 8, 443–451.
- [87] Hanusch H.: Gipskartonplatten. Trockenbau. Montagebau. Ausbau. Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln 1978. Wydanie polskie p.t.: Płyty gipsowe w budownictwie. Arkady, Warszawa 1983.
- [88] Hartwig H., Dobrzyńska R., Badowska H.: Możliwości wykorzystania gipsu półwodnego w świetle badań ITB. Materiały Budowlane, 1954, nr 9.
- [89] Hernandez-Olivares F., Ballati M.R., del Rio M., Parga-Landa B.: Development of cork-gypsum composites for building Applications. Construction and Building Materials, 1999, 13, 179–186.
- [90] Horyl L.: Badania nad zastosowaniem żywic aminowych do uszlachetnienia gipsu. Cement Wapno Gips, 1965, nr 1, 21–24.
- [91] Huber H., Götz G., Entsorgung von Kohlekraftwerken von Reststoff zum Rohstoff. BWK Bd., 1989, 41, nr 5.
- [92] Hurbanic M., Böse H., Raetker F.: Comparative investigations into the sedimentation and rheology of non-formulated multiphase gypsum plasters made natural and FGD gypsum. Zement Kalk Gips, 1994, nr 9, 242–248.
- [93] Impregnowane płyty gipsowe ściennie typu PRO-MONTA. Świadectwo dopuszczenia do stosowania w budownictwie nr 977/93, ITB, Warszawa 1994.
- [94] Instytut Ekonomiki Przemysłu Chemicznego o/Gliwice. Utylizacja gipsu syntetycznego z instalacji odsiarczania spalin. Praca zbiorowa, 1993.
- [95] Instytut Techniki Budowlanej – praca zbiorowa nr 2: Gips budowlany półwodny: jego zastosowanie w budownictwie. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1955.
- [96] Iwanickij W.W., Kłykowa L.J.: Technologie połączenia wysokoproczonego gipsowego wjażuszczonego marok 600 i wyżej. Stroit. Mater., 1979, nr 11.
- [97] Izbicki R.J., Mróz Z.: Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał. PWN, Warszawa – Poznań 1976.

- [98] Irassar E.F., Bonavetti V.L., Gonzales M.: Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, 2003, nr 1, 31–41.
- [99] Jakubowska A.: Struktura i właściwości tworzywa gipsowego z dodatkiem polimeru. *Cement Wapno Gips*, 1987, nr 4–5, 91–92.
- [100] Janicki S., Sikorski J.: Wymiarowanie konstrukcji murowych i zespolonych. Arkady, Warszawa 1974.
- [101] Jarmontowicz A.: Karbonizacja tworzywa gipsowo-cementowo-pucolanowego. *Cement Wapno Gips*, 1977, nr 7.
- [102] Jarmontowicz A.: Zmiany składu fazowego i struktury tworzywa gipsocementowo-pucolanowego w czasie. *Prace ITB*, Warszawa 1978.
- [103] Jermakow Ł.J.: *Stroitelnyje materialy*. Moskwa 1936.
- [104] Jeulin D., Monnaie P., Peronnet F.: Gypsum morphological analysis and modeling. *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23, 299–311.
- [105] Kahl H.: *Zement Chemie*. Band III. Verlag Technik, Berlin 1952.
- [106] Kallath B., Juhasz Z.: Mechanochemical capillary reactions in partly dehydrated gypsum and aluminium hydroxide interground powder mixtures. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, No 12, 1966.
- [107] Kamiński M., Pędziwiatr J., Styś D.: Konstrukcje betonowe. Projektowanie belek, słupów i płyt żelbetowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1999.
- [108] Kamiński M., praca zbiorowa: Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 1996.
- [109] Kamiński M., Szechiński M., Ubysz A.: Teoretyczne i praktyczne podstawy ugięć elementów żelbetowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Naukowe, Wrocław 1998.
- [110] Kamiński M., Wróblewski R.: Wyznaczanie efektów odkształceń reologicznych betonu. Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [111] Karger W.: Einfluss der Feuchtigkeit auf die Eigenschaften von Gipskorpern. *Baustoffind.*, 1968, nr 1, 19–22.
- [112] Karmazsin E., Comel C., Murat M.: Etude des systemes Ca-SO₄-H₂O par calorimetrie isotherme. IV. Etablissement d'un modele cinetique pour la reaction d'hydratation de Ca – SO₄ · 1/2H₂O β pur. *Ciments Betons Platres Chaux*, 1983, nr 740, 47–50.
- [113] Karmazsin E., Murat M., Blanchard J.M.: Etude des systemes CaSO₄-H₂O par calorimetrie isotherme. II. Vitesse d'hydratation de semihydrates on residuaires. *Ciments Betons Platres Chaux*, 1978, nr 715–6, 367–372.
- [114] Karmazsin E., Murat M., Blanchard J.M.: Etude des systemes CaSO₄-H₂O par calorimetrie isotherme. III. Vitesse d'hydratation de semihydrates β obtenus a partir de gypses naturels de diverses origines. *Ciments Betons Platres Chaux*, 1979, nr 718–3, 145–149.
- [115] Karmazsin E., Murat M.: Etude des systemes Ca-SO₄-H₂O par calorimetrie isotherme. I Recherches preliminaires sur quelques facteurs qui influencent la vitesse

- d'hydratation de $\text{Ca}-\text{So}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ en milieu pur. Rev. Mater. Constr., 1977, nr 707, 219–226.
- [116] Karui J., Karui E.: Gypsum in construction: origin and properties. Materials and Structures, 1995, 28, 92–100.
- [117] Karyś J., Zachara M.: Ocena cementów stosowanych w budownictwie oraz potrzeby nowoczesnego budownictwa w zakresie nowych marek cementów. XXV Kon. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1979, t. 6, Wrocław 1979, 81–88.
- [118] Klin S., Zachara M.: Gips i tworzywa gipsowe zbrojone włóknem szklanym – osiągnięcia badawcze i perspektywy zastosowań. XV Sesja Nauk.-Techn. „Budownictwo mieszkaniowe miast i wsi”. Cz. I. Białystok 1978, s.116–125.
- [119] Klin S., Zachara M.: Ultradźwiękowa ocena wytrzymałości na ściskanie zaczynów z gipsu budowlanego. III Kraj. Symp. „Badania nieniszczące w budownictwie”, ITB Warszawa-Jadwisin, 1979, 75–80.
- [120] Klin S.: Losowy rozkład wytrzymałości i wytrzymałość gwarantowana zaczynów z gipsu budowlanego. XXVI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1980, t. IV, 111–117.
- [121] Klin S.: Badania wytrzymałości gipsu zbrojonego włóknem szklanym. XXXIX Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1983, t. IV, 78–84.
- [122] Klin S.: Badania wytrzymałości gipsu budowlanego na rozciąganie różnymi metodami. XXXI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1985, t. IV, 135–140.
- [123] Klin S.: Oznaczanie wytrzymałości gipsu na rozciąganie różnymi metodami. Cz. I. Metody oznaczania, Oznaczenie wytrzymałości gipsu w stanie suchym. Cement Wapno Gips, 1987, nr 12, 261–267.
- [124] Klin S.: Oznaczanie wytrzymałości gipsu na rozciąganie różnymi metodami. Cz. II. Oznaczenie wytrzymałości gipsu w stanie nasycenia wodą. Cement Wapno Gips, 1988, nr 1, 1–7.
- [125] Klin S.: Badania przepuszczalności wody przez gips.. Cz. I., Wodoprzepuszczalność gipsu i filtracja wody przez gips. Cement Wapno Gips, 1989, nr 4, 57–61.
- [126] Klin S.: Badania przepuszczalności wody przez gips. Cz. II. Wyniki i analiza badań. Cement Wapno Gips, 1989, nr 6, 109–114.
- [127] Klin S.: Rozkład odkształceń i naprężeń w przekrojach normalnych zginanych belek gipsowych. XXXV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, t. 4, Krynica 1989, 101–106.
- [128] Klin S.: Relacje między wybranymi cechami wytrzymałościowymi stwardniałych zaczynów gipsowych. Zesz. Nauk. Inst. Bud. Polit. Wr., 1991, nr 64, 67–71.
- [129] Klin S.: Badania wybranych właściwości fizycznych poszczególnych frakcji gipsu budowlanego i jednorodności uziarnienia spoiwa gipsowego. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melioracja XXXIX, 1991, nr 209, 189–205.
- [130] Klin S., Tomasiak D., Tomasiak M.: Statystyczna ocena jakości gipsu budowlanego produkcji zakładów gipsowych w Gackach. Cement Wapno Gips, 1991, nr 2, 39–44.
- [131] Klin S.: Nazewnictwo w klasyfikacji spoiw i wyrobów gipsowych w oparciu o ich wytrzymałość. Cement Wapno Gips, 1991, nr 9, 247–251.

- [132] Klin S.: Wytrzymałość stwardniałych zaczynów z gipsu budowlanego w stanie wilgotnym. XXXVIII Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1992, t. 4, 37–42.
- [133] Klin S., Wesołowski A.: Strop i sposób wznoszenia tego stropu. Zgłoszenie patentowe P 295 920 1994 r.
- [134] Klin S.: Budownictwo z gipsu w Polsce. Materiały Budowlane, 1998, nr 10, s. 42–47.
- [135] Kornbak-Lange D., Karihaloo B.L.: Tension softening of fibre-reinforced cementitious composites. Cement and concrete composites, vol. 19, 1977, nr 4, 315–328.
- [136] Knauf A., Krönert W., Haubert P.: Die Rasterelektronenmikroskopie, eine ergänzende Methode zur Untersuchung von Gipsen. Zement Kalk Gips, 1972 nr 11, 546–552.
- [137] Knauf A.N.: The problem of flue gas gypsum. Zement Kalk Gips, 1983, nr 5.
- [138] Knauf System für Decke, Wände und Boden. Gebr. Knauf Deutsche Gipswerke. Iphofen, 1990.
- [139] Komarnicki E.: Badania nad stałymi materiałowymi gipsobetonów żuźlowych stosowanych do ścian zewnętrznych. Cement Wapno Gips, 1960, nr 9, 249–259.
- [140] Komarnicki E.: Badanie technicznych właściwości gipsobetonów żuźlowych. Cement Wapno Gips, nr 8–9, 1961 oraz Cement Wapno Gips, nr 10, 1961.
- [141] Komarnicki E.: Wpływ zawilgocenia na wytrzymałość gipsobetonów z żuźla granulowanego. Cement Wapno Gips, 1959, nr 9.
- [142] Komarnicki E.: Zastosowanie bloków żuźlogipsowych do konstrukcji murowych w świetle badań laboratoryjnych. Cement Wapno Gips.
- [143] Kopyelanski G.D.: Proizwiewniennye faktory procznosti stroitel'nogo gipsa. Biuro Techn. Inf. Ministerstwa Prom. Stroit. Mat. Moskwa. 1948.
- [144] Kopyelanski G.D.: Stojkost gipsowych wiazuszczich protiv wlaźnostnyh wlijanij pri normalnych i ponizennyh temperaturach. Sb. Trudow Rosgipro gipsa, wyp. 4 BTI, Moskwa 1967.
- [145] Kosłowski T., Ludwig U.: Zum Einfluss von Zusätzen bee der Herstellung und Anwendung von Baugipsen. Zement Kalk Gips International, 1999, nr 5, 274–286.
- [146] Kossatz G.: Die Nutzung der Gipsquellung zum Herstellen mehrschichtiger Bauelemente. Zement Kalk Gips, 1967, nr 3, 115–118.
- [147] Kozina W.L.: Gipsocementnopuccolanowyj beton powyszennoj treszczinostojkosti. Stroit. Mat., 1980, nr 6, 29–30.
- [148] Kovler K.: Setting and hardening of gypsum- portland cement – silica fume blends, part 1: temperature and setting expansion. Cement and Concrete Research, 1998, vol. 28, 523–531.
- [149] Kollath B., Juhasz A.Z.: Mechanical capillary reactions in partly dehydrated gypsum and aluminium hydroxide interground powder mixtures. Cement and Concrete Research v. 26, 1966, nr 12, 1843–1857.
- [150] Kramer G., Koschany R.: Bauphysikalische Eigenschaften von Gipsbauelementen. Baustoff-Industrie, Ausg. B. 18, 1975.
- [151] Kriuczkw O.-N.: Powyszenije kaczestwa gipsokarbonatnyh izdelij. Stroit Mat., 1987, nr 2.

- [152] Kronert W., Hubert P.: Etudes du mecanisme de la prise de demi-hydrates „alpha et beta”. *Rev. Mater. Constr.*, 1970, nr 700, 176–182.
- [153] Kubiak J., Mizera J., Najzarek Z.: O rozmiękanii gipsu. *Archiwum Inżynierii Łądowej T. XXXVI*, z. 3, 1990, 283.
- [154] Kucharska L., Moczko M.: Materiały z dwuwodnego siarczanu wapnia formowane techniką prasowania. *Cement Wapno Gips*, 1986, nr 11, 234–247.
- [155] Kucharska L., Moczko M.: Wpływ dodatku siarki i polietylenu na właściwości materiałów gipsowych prasowanych na gorąco. *Materiały Budowlane*, 1987, nr 1, 16–17.
- [156] Kucharska L., Moczko M.: Wpływ polifosforanu sodu na wiązanie i właściwości fizyczne zaczynów gipsowych. *XXX Konf. Nauk. KILiW PAN*, t. 4, Krynica 1984, 77–82.
- [157] Kuczyński J.: Wodoszczelność zbiorników betonowych w teorii i praktyce. *Prace Naukowe Inst. Inż. Łąd. Polit. Wrocławskiej, Monografie 4*, Wrocław 1976.
- [158] Knight K.S., Stretton J.C., Schafield P.F.: Temperature evolution between 50K 320K of the thermal expansion tensor of gypsum derived from neutron powder diffraction data. *Phys. Chem. Minerals*, 1999, 26, 477–483.
- [159] Kuhlmann J., Ludwig V.: Raumbeständigkeit von Baugipsen. *Zement Kalk Gips*, 1977, nr 5, 214–218.
- [160] Kurdowski W., Blach S.: Własności cementów polskich w porównaniu z cementami światowymi na tle wymagań normowych. *Cement Wapno Gips*, 1978, nr 6, 72.
- [161] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. PWN, Warszawa 1991.
- [162] Kurdowski W.: *Chemia materiałów budowlanych*. Uczelniane Wydawnictwo Nauk.-Dydakt. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2003.
- [163] Kurdowski W.: Fizykochemiczne podstawy reakcji w układzie CaO – SO₂ w odniesieniu do procesów odsiarczania spalin. *Cement Wapno Beton*, nr 1, 1998, 21–25.
- [164] Kurdowski W., Peukert J., Mróz H.: Wpływ stopnia rozdrobnienia cementu oraz zawartości gipsu na wytrzymałość zapraw poddawanych obróbce cieplnej. *XXI Konf. Nauk. KILiW PAN I KN PZITB*, t.4, Krynica 1975, 4–18.
- [165] Kurdowski W.: Fazy siarczanu wapniowego. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5, 206–210.
- [166] Kurdowski W., Pałka E.: Kilka uwag na temat pieców do prażenia gipsu. *Materiały Budowlane* nr, 2004 10, s.3–4.
- [167] Kuzel J., Hauner M.: Chemische und kristallographische Eigenschaften von Calciumsulfat – Halbhydrat und Anhydrit II. *Zement Kalk Gips*, 1987, nr 12, 628–632.
- [168] Lafarge conceils et etudes. Prospect.
- [169] Lehman H., Mathiak H., Kurpiers P.: Ein Beitrag zur Klärung masstechnischer Probleme an Rohstoffen und Dehydratationsprodukten der Gipsindustrie. *Tonind Ztg.*, 1970, nr, 94–1, 1–6.
- [170] Lehman H., Mathiak H., Kurpiers P.: Über den Einfluss der Mahlung und Klassierung nach dem Brennprozess auf die technischen Eigenschaften von Stuckigipsen. *Tonind. Ztg.*, 1970, nr 94–3, 100–109.

- [171] Lehman H., Mathiak H., Kurpiers P.: Zur Probenahme und Probenvorbereitung in der Gipsindustrie. *Tonind. Ztg.*, 1970, nr 94–1, 16–18.
- [172] Lehmann H., Mathiak H., Kurpiers P.: Über die Messung der Verarbeitbarkeit von Gipsmörteln. *Tonind. Ztg.*, 1970, 94, nr 1.
- [173] Leroux A., Orsetti S., Les reactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansion de mineraux secondaires sulfates. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussees*, 2000, No 225, 41–50.
- [174] Leslie J., An investigation of the Ultimate Load Properties of Concrete and Prestressing Wire, and of Bond Stress in Grunt, Surrounding Wires in Post-tensioned Beams. B. Sc. (Hons) Thesis, University of Aberdeen, 1959.
- [175] Lewandowski W.: Ściany zewnętrzne i wewnętrzne w systemie SOVA SYSTEM z pustaków gipsowych. Świadectwo ITB nr 901/92. *Materiały Budowlane*, 1990, nr 4.
- [176] Lewicki B., Sieczkowski J.: Norma projektowania konstrukcji murowych PN-B-03002: 1999 po 3-letnim stosowaniu. *Inżynieria i Budownictwo*, 2003, nr 5.
- [177] Lewicki B.: Oznaczenia literowe i ich stosowanie w projektowaniu i obliczaniu konstrukcji budowlanych. *Inżynieria i Budownictwo*, 1990, nr 10.
- [178] Lewowicki S.: Lekkie elementy ściennie z masy gipsowo-cementowej. *Przegląd Budowlany*, 1981 nr 2, 12–13.
- [179] Li G., Li J., Gnan R., Sni S., Liu H.: Forschungen zur Wasserfestigkeit von Gipsmaterial. *Zement Kalk Gips International*, 2003, vol. 55, no 8/9, 87–93.
- [180] Liaszkiewicz J.M.: *Effektywnyje stroitielnyje meteryaly na osnovie gipsa i fosfogipsa*. Wyższa Szkoła, Mińsk 1989.
- [181] Leśniewska M., Pogorzelski J.A.: Badania ruchu kapilarnego w niektórych materiałach budowlanych. *Archiwum Inżynierii Łądowej*, t. XXII, 1976.
- [182] Lewry A.J.: The setting of gypsum plaster. Part I The hydration of calcium sulphate hemihydrate. Part II The development of microstructure and strength. The effect of additives and impurities. *Journal of Material Science*, 1994, 29.
- [183] Łapko A.: *Projektowanie konstrukcji żelbetowych*. Arkady, Warszawa 1999.
- [184] Maerter M.: Über Erfahrungen der Aufbereitung von Cemiegips in Deutschland. *Tonind. Ztg.*, 1971, nr 1.
- [185] Magnan R., Cottin B., Gardet J.: Mechanizm hydratacji odmiany β gipsu półwodnego. *Cement Wapno Gips*, 1976, nr 3, 61–64.
- [186] Mahmoud M.H.H., Rashad M.M., Ibrahi J.A., Abdel-Aal E.A.: Crystal modification of calcium sulfate dihydrate in the presence of some surface – active agents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 270, 99–105.
- [187] Malinin N.N., Rżysko J.: *Mechanika materiałów*. PWN, Warszawa 1981.
- [188] Mallon T.: REA-GIPS – Technische und wirtschaftliche Aspekte eines Sekundärrohstoffs, Teil 2. *Zement Kalk Gips International*, 1998, nr 5, 272–278.
- [189] Małolepszy J., Hynowski M.: Badania procesu hydratacji spoiw gipsowych metodą konduktometryczną. III Międzynarodowa Konf. Nauk. „Energia i środowisko w technologii materiałów budowlanych”. Instytut Miner. Mat. Budowlanych w opolu, Szczyrk 2004. Referaty, 204–216.
- [190] Małolepszy J., Hynowski M.: Wpływ dodatków mineralnych na mikrostrukturę stwardniałych zaczynów gipsowych. *Ceramika/Ceramics*, 2003, vol. 80, 631–636.

- [191] Małolepszy J., Hynowski M., Wpływ dodatków mineralnych na hydratację i właściwości spoiw gipsowych. IV Konferencja Naukowo-Techniczna Matbud 2003, Kraków 2003, 297–305.
- [192] Mańczak T., Tomkowiak K.: Określenie wytrzymałości betonu na czyste rozciąganie metodą klejenia. Zesz. Nauk. Polít. Poznań., Budownictwo, 1968, nr 13, 13–24.
- [193] Matyszewski T., Górnicki J., Piasecki J.: Nowa metoda utylizacji odpadów fosfogipsowych na spoiwo gipsowe. XXI Konf. Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, T. IV, Materiały Budowlane, Krynica 1975.
- [194] Matyszewski T., Zmysłowska L., Ambrożewicz G.: Wpływ zawilgocenia na niektóre właściwości gipsobetonu keramzytowego. Mat. Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, T.4, Krynica 1969, 189–195.
- [195] Mazur S.: Eksperymentalny domek gipsowy we Wrocławiu. Przegl. Bud., 1959, nr 1, 7–10.
- [196] Mazur S.: Uszczelnianie wyrobów gipsowych żywicą montanową. Mat. Bud., 1955, nr 2.
- [197] Mazur S.: Zastosowanie gipsu do budowy prefabrykowanych domów jednorodzinnych. Przegl. Bud., 1958, nr 2.
- [198] Mehta P.K.: Hardened Cement paste – microstructure and its relationship to properties. 8-th JCCC, Rio de Janeiro, 1986 vol. 1, 1–9.
- [199] Meille S., Saadaoni M., Reynaud P., Fantozzi G.: Mechanisms of crack propagation in dry plaster. Journal of the European Ceramic Society, 2003, vol. 23, no. 16.
- [200] Meuś W., Rzepecki R.: Elementy i konstrukcje z tworzyw gipsowych i gipsobetonów. Arkady, Warszawa 1963.
- [201] Meuś W.: Konstrukcje gipsowe lite. Budownictwo Wiejskie, 1964, nr 7.
- [202] Meuś W.: Zaczyny, zaprawy, tworzywa gipsowe i gipsobetony. Budownictwo Wiejskie., 1964, nr 3, 7–8.
- [203] Michalska Z.: Zastosowanie aparatu Blaine'a do pomiaru powierzchni właściwej gipsów. Cement Wapno Gips, 1964, nr 5, 117 – 125.
- [204] Mikoś J.: Budujemy z gipsu. Informator. Wydawnictwo Instytutu Ekonomiki Przemysłu Chemicznego o/Gliwice. Konsultant AG Sp. z o.o., Gliwice, listopad 2004.
- [205] Mikoś J.: Gips syntetyczny materiałem ekologicznym. Mat. Budowlane, 1996, nr 10, 4–6.
- [206] Mikoś J.: PRAS-GIPS – uprzemysłowiony system budownictwa jednorodzinnego. Przegląd Budowlany, nr 7, 1980.
- [207] Mikoś J.: Realizing of wanted strength of concrete by Pras-Bet method. Polish-American Symp „Concrete today and tomorrow in housing”, Warszawa 1973.
- [208] Mirimanow G.J., Sidorow A.Z.: Effekt primienienija prokladok pri opridienii procznosti bietona na rastraženije roskaliwaniem cylindrow. Izw. Tibl. Naucz. Inst. Sooruzenii i Hidroenierg., t. 16, 1966.
- [209] Mitzel A.: Reologia betonu. Arkady, Warszawa 1972.
- [210] Mizera J., Denkiewicz J.: Właściwości techniczne trocinogipsowych materiałów budowlanych. Zesz. Nauk. Wyższ. Szk. Inż. Opole, Budown. 28, Opole 1987, 25–32.

- [211] Mizera J.: Mechanizm rozmiękania tworzyw gipsowych pod wpływem wody oraz działanie dodatku polimerów na przebieg tego procesu. Wydawnictwo WSI Opole, Studia i Monografie z. 56, Opole 1992.
- [212] Mizera J.: Własności kompozytowych materiałów z gipsu z odsiarczenia spalin, Cement Wapno Beton, 2000, nr 2, 62–67.
- [213] Mizera J.: Właściwości techniczne gipsobetonów z różnymi wypełniaczami mineralnymi. Zesz. Nauk. Wyższ. Szk. Inż. Opole, Budown. 28, Opole 1987, 5–24.
- [214] Moissej J.M.: Modificateurs de prise des plâtres. Ciments Betons Plâtres Chaux, 1985, 765–5.
- [215] Muraszew W.J.: Trieszczinostoiczivost i procznost żelezobietona. Maszstroizdat, Moskwa 1950.
- [216] Murat M., Barriac P., Application des analyses thermique differentielle et dilatometrique a la determination quantitative des phases hydrates des systemes $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$. Rev. Mat. Constr., 1968, 631.
- [217] Murat M., Jeandot G.: Apport de la microscopie electronique a balayage pour l'etude des plâtres durcis; Etude de l'influence de quelques modificateurs de prise. Rev. Mat. Constr., 1973, nr 32–6, 129–135.
- [218] Murat M.: Methodes de mesures et interpretation des effets termiques associes a l'hydratation des sulfates de calcium et des plâtres industriels. Rev. Mater., 1973, 680, 14–23.
- [219] Murat M.: Structure, chriallochemie et reactivite des sulfates de calcium. Colloques Internationaux de la R.I.L.E.M. Saint Remy – Le Chevreuse, France, 1977, 59–172.
- [220] Negro A., Bachiarrini A.: The reinforced gypsum plasters for verstärkte Gips. Ciment Betons Plasters Chaux, 1979, nr 79–1, 49–52.
- [221] Neville A.M.: Właściwości betonu. Arkady, Warszawa 1977.
- [222] Neville A.M.: Właściwości betonu. Wydawnictwo „Polski Cement” Sp. z o.o., Kraków 2000.
- [223] Norton G.A., Peters R.E., Jacobson R.A.: Technical note feasibility of lesing x-ray diffraction for on-line analysys of gypsum during wall board manufacturing. Materials Engineering, 1995, vol. 8, No 9, 1069–1071.
- [224] Nowak H.A.: Zależność wytrzymałości zaczynów gipsowych od średniego promienia porów ich mikrostruktury. Prac. dokt., Polit. Śląska, Gliwice 1978, 165–170.
- [225] Nowak H.A.: Zależność wytrzymałości zaczynów gipsowych od porowatości całkowitej. XXV Konf. Nauk KILiM PAN i KN PZITB, t. 4, Krynica 1978, 145–151.
- [226] Nowak H.A.: Zależność wytrzymałości zaczynów gipsowych od średniego promienia porów. XXXIII Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1987, t. 4, Gliwice 1987.
- [227] Nowak J.: Historia i przyszłość tynków gipsowych z „Doliny Nidy”. Cement Wapno Beton, nr 5, 2002.
- [228] Nowak J.: Przetwórstwo kamienia gipsowego. Nowe technologie w Dolinie. Atlas Budowlany nr 59, www.atlas.com.pl/atlas/miesiecznik, listopad 2002.

- [229] Nowakowski N., Achmad M.: Wpływ żywicy melaminowo-formaldehydowej na wybrane właściwości porowatego tworzywa gipsowego. *Cement Wapno Gips*, 1993, nr 5, 163–165.
- [230] Nowakowski N., Ahmod S.M.: Gips piankowy z odsiarczania spalin. *Cement Wapno Gips*, 1993, nr 6.
- [231] Nulman O., Gavrilenko O., Rudenko V., Vykhriy O.: Comparative Researches of Natural Gypsum, FGD Gypsum and Phosphogypsum as Raw Materials for Manufacture of Gypsum Plasters. IBAUSIL, 13. Internationale Baustofftagung, Weimar. Tagungsbericht – Band 1. Universität Weimar, 24–26 September 1997.
- [232] Objawiński R.: Pustaki gipsowe typu RC. Świadectwo ITB nr 536/85, ITB, Warszawa 1985.
- [233] Odler J., Rössler M.: Zusammenhänge zwischen Porenfüge und Festigkeit abgebundener Gipspasten. Teil I. Einfluss des Wasser-Gips-Verhältnisses und der Temperatur. *Zement Kalk Gips*, 1989, nr 42–2, 96–100, Teil II. Einfluss chemischer Zusätze, 1989. nr 42–8, 419–424.
- [234] Olejarsz J., Pabis J.: Bilans surowców siarczanowych pochodzenia naturalnego i przemysłowego w Polsce. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5, 193–200.
- [235] Olejarsz J., Pietroń J.: Gips syntetyczny z odsiarczania spalin, *Mat. Budowlane*, 1995, nr 12, 4–6.
- [236] Olszak W., Kajfasz S., Pietrzykowski J.: O nowej metodzie pomiaru wytrzymałości na rozciąganie betonu i innych materiałów kruchych. *Inż. i Bud.*, 1954, nr 9, 271–277.
- [237] Oluokun F.A.: Prediction of concrete tensile strength from compressive strength: evaluation of existing realations for normal weight concrete. *ACI Materials Journal*, 1991, nr 3.
- [238] Osiecka E., Metody wytwarzania spoiw i elementów budowlanych z odpadów fosfogipsowych. *Cement Wapno Gips*, 1976, nr 5, 145–152.
- [239] Osiecka E., Nicewicz S.: Możliwości bezpośredniego wykorzystania gipsu z odsiarczania spalin do produkcji materiałów budowlanych. *Materiały Budowlane*, 1996, nr 10, 7–8.
- [240] Osiecka E.: Fosfogips – spoiwa i elementy budowlane. Arkady, Warszawa 1980.
- [241] Osiecka E.: Odporność na działanie wody tworzyw z syntetycznego gipsu dwuwodnego, cementu i pucolan. *Cement Wapno Beton*, 2001, nr 5, 192–195.
- [242] Osiecka E.: Materiał nie całkiem zapomniany. *Warstwy*, 1996, nr 2, 56–59.
- [243] Osiecka E.: Materiały gipsowe w budownictwie – dawniej i obecnie. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5.
- [244] Ostrowski C.: Badania zmian liniowych i objętościowych gipsu półwodnego. *Cement Wapno Gips*, 1982, nr 4–6, 48–50.
- [245] Ostrowski C.: Kierunki utylizacji fosfogipsu. *Cement Wapno Gips*, 1987 nr 4–5.
- [246] Ostrowski C.: Metody pomiaru konsystencji zaczynów gipsowych. *Cement Wapno Gips*, 1982, nr 1–2.
- [247] Ostrowski C.: Metody uodparniania tworzyw gipsowych na działanie wody i ich ocena. *Cement Wapno Gips*, 1983, nr 2, 46–49.
- [248] Ostrowski C.: Opóźniacze dla gipsu półwodnego. *Biuletyn Inf. Budownictwa*, 1983, nr 7–8.

- [249] Ostrowski C.: Próby półtechniczne produkcji spoiwa anhydrytowego i gipsowego z fosfogipsu apatytowego. *Cement Wapno Gips*, 1991, nr 7, 169–181.
- [250] Ostrowski C.: Spoiwo gipsowo anhydrytowe. *Cement Wapno Gips*, 1980, nr 10, 279–282.
- [251] Ostrowski C.: Wpływ składu chemicznego, rozdrobnienia i dodatków aktywatorów na właściwości gipsu wysokotemperaturowego. *Cement Wapno Gips*, 1979, nr 1.
- [252] Ostrowski C.: Wpływ karbonizacji na właściwości spoiw gipsowo-cementowych. *Cement Wapno Gips*, 1985, nr 6.
- [253] Ostrowski C.: Wpływ karbonizacji na właściwości tworzyw gipsowo-cementowych. *Cement Wapno Gips*. Cz. I, 1983, nr 7–8, 197–201, Cz. II, 1985, nr 6, 158–173.
- [254] Ostrowski C.: Wpływ zanieczyszczeń w gipsie tynkarskim na powstawanie odprysków na tynkach. *Cement Wapno Gips*, nr 6.
- [255] Ostrowski C.: Wykorzystanie fosfogipsów do produkcji spoiw gipsowych. *Cement Wapno Gips*, 1984, nr 3, 37–40.
- [256] Ostrowski W.: Oznaczanie powierzchni właściwej gipsu półwodnego β . *Cement Wapno Gips*, 1970 nr 7–8, 214–212.
- [257] Paniutyn A.G.: *Stroitelnyj gips w stienowych konstrukcijach małoetażnych zdaniij*. Moskwa, Gosstrojizdat 1959.
- [258] Parzonka W.: *Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych*. Skrypty Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 159, 1977.
- [259] Perederij J.A.: *Die plastischen Formänderungen von Gipskörpern*. *Zement Kalk Gips*, 1956, nr 9, 496–500.
- [260] Peukert S.: *Cementy powszechnego użytku i specjalne*. Polski cement Sp. z o.o., Kraków 2000.
- [261] Pichniarczyk P.: Hydrofobizacja lekkich poryzowanych zaczynów z gipsu syntetycznego otrzymywanego w procesie odsiarczania spalin. *Cement Wapno Beton*, 2000, nr 4, 154–161.
- [262] Pichniarczyk P.: Hydrofobizacja tworzywa z gipsu syntetycznego. *Materiały Budowlane*, 1998, nr 10.
- [263] Pichniarczyk P.: Lekkie izolacyjne tworzywa i posadzki gipsowe. *Materiały Budowlane*, 1998, nr 10.
- [264] Pichniarczyk P.: Rynek gipsowy w Polsce. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5, 193–200.
- [265] Pichniarczyk P.: Zanieczyszczenia surowców gipsowych. *Materiały Budowlane*, 2003, nr 10, 3–4.
- [266] Pichniarczyk P., Malata G.: Wpływ morfologii kryształów na parametry syntetycznego gipsu budowlanego. *Materiały budowlane*, 2002, nr 10, 5–7.
- [267] Pickat Ph.: *Utilisation du platre dans des fondations a Paris au XVII siecle, son actualite*. *Ciments Betons Platres Chaux*, 1982, 773, nr 4, 236–237.
- [268] Pietroń J., Olejarz J., Wdowiak M., Cwaliński A., Tomasik D.: Gips syntetyczny z pierwszej w Polsce instalacji odsiarczania spalin elektrowni Bełchatów, *Cement Wapno Gips*, 1995, nr 3, 82–89.
- [269] Pietroń J.: *Gips – praktyczne wskazówki dla użytkowników*. Wydawnictwo Centralnego Ośrodka Informacji Budownictwa, Warszawa 1990.

- [270] Pietroń J.: Spoiwa gips-estrich-wapno. Cement Wapno Gips, 1978, nr 3, 73–80.
- [271] Planeta N.: Uodpornienie gipsu na działanie wody. Cement Wapno Gips, 1957, nr 6, 127–128.
- [272] Polskie Stowarzyszenie Gipsu. Serwis Internetowy www.polski.gips.pl.
- [273] Pompowski T., Ruczyński W.: Nowa metoda neutralizacji zanieczyszczeń wstępnych w fosfogipsie. Cement Wapno Gips, nr 3, 1980.
- [274] Probst E., Humel A., Zement, 1927, 778.
- [275] Przyłuski S., Suwalski L.: Budownictwo betonowe, t. 2, rozdz. 2. Arkady, Warszawa 1964.
- [276] Przysłupska-Kłosak D., Kłosak A.: Architektoniczne założenia systemu otwartego uprzemysłowionego jednorodzinne go na bazie tworzywa gipsowego. Czasopismo Techniczne, 1976, nr 3.
- [277] Quant B., Krop M., Sułek Z.: Kompozyt fosfogipsowy – nowy materiał w budownictwie. Cement Wapno Gips, 1989, nr 3, 36–38.
- [278] Ranganatham B.V., Subba Rao K.S., Hendry A.W.: Plaster mortar for small scale tests. ACI Journal, 1967, nr 8, 594–601.
- [279] Ratinov V.B., Ivanickij V.V., Krykova L.J.: Technologiceskije osobiennosti počuczenija wysokoprocznego gipsa iz miagkich gipsowych porod. Stroit. Mat., 1979, nr 1, 28–30.
- [280] Ratinov V.B., Ivanickij V.V., Stiekanov D.J.: Fizikochimiceskije osnovy počuczenija wysokoprocznego uskustwiennogo gipsowego kamnja. Stroit. Mat., 1984, nr 11, 22–23.
- [281] Rosental N.K., Ferronskaja A.W., Korolkowa G.A.: Zaszczita stalnoj armatury ot koroziji w betonie na gipso-cemento-pucolanowom wiazuszczem. Stroit. Mat. 1981, 28–32.
- [282] Rendell F., Jauberthie R.: The deterioration of mortar in sulphate environments. Construction and Building Materials, 1999, vol. 13, 321–327.
- [283] Reyman W.: Kryteria wytrzymałościowe dotyczące gipsowych elementów ścianek działowych. Biul. Inf., NT ITB nr 16, Arkady 1964.
- [284] Rigips – Alba – Lentolit. Gipsunion AG S.A., 1990.
- [285] Rolek L., Krajewski J.: Sposób wykorzystania monolitycznej konstrukcji żelbetowej budowli w deskowaniach traconych z gipsu lub tworzywa gipsowego, łącznie ze wznoszeniem wypełniających ścian osłonowych. Patent P 290 394, 1998 r.
- [286] Rolek L.: System R. Materiały Budowlane, 1998, nr 10.
- [287] Rozienberg T.I., Kuczajewa G.D., Smirnowa I.A., Ratinow W.B.: Issledowanija mechanizma twierdenija gipsociementopucolanowych wiazuszczich. Sb. Trudow WNII Żelezbeta, wyp. 9, Strojizdat, 1968.
- [288] Rüşch H., Jungwirth D.: Skurcz i pękanie w konstrukcjach betonowych. Arkady, Warszawa 1979.
- [289] Rusiecki A.: Badania normowe gipsów budowlanych. Biul. Inf. Nauk. Tech. ITB, 1963, nr 14.
- [290] Rusiecki A.: Optymalny skład spoiwa anhydrytowego. Cement Wapno Gips, 1981, nr 9–10, 236–239.
- [291] Russel J.J.: Einfluss des Feuchtigkeitgehaltes auf die Druckfestigkeit kleiner Gipswurfel. Zement Kalk Gips, 1980, 13, nr 8, 345–351.

- [292] Ryżyński A.: Obliczanie momentu powodującego zarysowanie elementu żelbetowego w oparciu o teorię Muraszewa, polską normę i projekt normy RWPG. Inżynieria i Budownictwo, 1966, nr 10.
- [293] Samcow W.P., Liaszkewicz J.M., Ratinow W.B.: Okusowanije fosfogipsa termopressowanijem. Stroit. Mat., 1984 nr 9.
- [294] Sattler H., Bruckner H.P.: Volumen- und Dichteänderungen bei der Hydratation von Gipsbindemitteln in Abhängigkeit von Wasserangebot. Zement Kalk Gips, 2002, v. 54, n. 9.
- [295] Schiller K.K.: Porosity and strength of brittle materials. Nature nr 4591, Oct. 1957, 26, vol. 180.
- [296] Schiller K.K.: Porosity and strength of brittle solids with particular reference to gypsum. Mechanical Properties of Nonmetallic Brittle Materials, 35–45. Butterworth, London 1958.
- [297] Schicht R., Dolingand D.: Le plâtre. Objectifs de recherche et de développement. Ciments Betons Plâtres Choux, 1980, nr 724–3, 145–150.
- [298] Scholze H., Hurbanic M., Ruf H.: Vergleichende Betrachtungen zum Verhalten von Naturgips und Raugasgips. Zement Kalk Gips, 1985, nr 8, 431–436.
- [299] Siewert K., Heming O.: Chemische Zusätze mit wasserretendierenden Eigenschaften für Gipsbinder. Zement Kalk Gips, 1988, nr 4, 173–174.
- [300] Singh M., Garg M.: Relationship between mechanical properties and porosity of water resistant gypsum binder. Cement and Concrete Research, 1996, vol. 26, No 3.
- [301] Singh M., Garg M., Rehsi S.S.: Durability of phosphogypsum based water-resistant anhydrite binder. Cement and Concrete Research, 1990, vol. 20, 271–276.
- [302] Skalmowski W., Szymański E.: Nowe materiały wiążące z gipsu i możliwości ich wykorzystania w technice budowlanej. Cement Wapno Gips, 1961, nr 7.
- [303] Skalmowski W., Szymański E.: Spoiwa i tworzywa budowlane z gipsu surowego z wapnem. Cement Wapno Gips, 1962, nr 5.
- [304] Skalmowski W.: Chemia materiałów budowlanych. Arkady, Warszawa 1971.
- [305] Skalmowski W.: Gipsy i anhydryty w Polsce. Możliwości i kierunki ich zastosowań w budownictwie. PWN, Warszawa 1959.
- [306] Skalmowski W.: Wykorzystanie spoiw i tworzyw gipsowych w budownictwie ze szczególnym uwzględnieniem budownictwa wiejskiego. Ministerstwo Szkolnictwa Wyższego, Materiały i Studia, PWN, Warszawa 1964.
- [307] Skramtajew B.G., Polov H.A., Gerlivanov N.A., Mudrov G.G.: Stroitilenyje materiały. Gos. Izd. Lit. po Stroit. Mater., Moskva, 1952, 343–344.
- [308] Skrzypek J.: Badania nad określeniem kryteriów jakościowych gipsów syntetycznych z odsiarczania spalin w Elektrowni Bełchatów. Prace ITB. Kwartalnik, 1995, nr 1 (93).
- [309] Skrzypek J.: Gips syntetyczny z instalacji odsiarczania spalin jako aktywny wypełniacz. Przegląd Budowlany, 1997, nr 11, 12–15.
- [310] Skrzypek J.: Trwałość gipsowych elementów ścian zewnętrznych. Materiały Budowlane, 2000, nr 5.
- [311] Skvara F., Vancurova M.: The effect of particle size distribution on apparent viscosity of a dispersion system. Silikaty 17, 1973.

- [312] Smith R.G., Orangun C.O.: Gypsum Plaster Models of Unbonded Prestressed Concrete Beams. *Civil Engineering of Public Works Review*, Part 1, 1961, nr 660–7, 906–909, Part 2, nr 661–8, 1061–1063.
- [313] Smith R.G.: Determination of the Compressive Stress/Strain Properties of Concrete in Flexure. *Mag. of Concr. Resch.*, Nov 1960.
- [314] Sobala M.: Naturalne i chemiczne surowce gipsowe. *Materiały budowlane* 2002, nr 10, 2–3.
- [315] Soroka J., Sereda P.J.: Interrelation of hardness, modules of elasticity and porosity in various gypsum systems. *Journal of the American Society*, June 1968, Vol. 51, No. 6, 335–340.
- [316] Stark P.: Produkcja i zastosowanie gipsu REA. *Mat. Budowlane*, 1997, nr 11, 20–21.
- [317] Stupnicki W.: Dalsze możliwości badania wytrzymałości betonu na rozciąganie na walcach normowych. *XV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB Krynica* 1969, 207–216.
- [318] Strydom C.A., Hudson-Lamb D.L., Potgieter J.H., Dagg E.: The thermal dehydration of synthetic gypsum. *Thermochimica Acta*, 1995, 269/270, 631–638.
- [319] Strydom C.A., Potgieter J.H.: Dehydration behaviour of a natural gypsum and a phosphogypsum during milling. *Thermochimica Acta*, 1999 332, 89–96.
- [320] Sufitowe płyty gipsowe dźwiękochłonne, dekoracyjne i wentylacyjne. Świadcstwo dopuszczenia do stosowania w budownictwie nr 978/93. ITB Warszawa, 1994.
- [321] Suzuki K., Koto K.: *Sekko to Sekai*, 1981, nr 174, 205.
- [322] Szlemminger A.: Belastungsversuche an Gipswänden. *Bauzeitung*, 1961, nr 19, 523–526.
- [323] Szul E., Szul R.: Prefabrykowane budownictwo mieszkaniowe z gipsu. Wybrane zagadnienia studialne, badawcze i projektowe. Praca dypl. Instytut Budownictwa Rolniczego AR Wrocław pod kierunkiem dr inż. S. Klina, Wrocław 1984.
- [324] Szymański E.: Gips budowlany. *Przeł. Bud.*, 1964, nr 9.
- [325] Szymański E.: Wpływ wody na cechy techniczne tworzywa gipsowego. *Cement Wapno Gips*, 1962, 7–8, 213–216.
- [326] Szymański J.M.: Wpływ parametrów fizykomechanicznych gipsu na właściwości mechaniczne i powierzchniowe gipsowych form roboczych w przemyśle ceramicznym., Praca dokt., ITB, Warszawa 1973.
- [327] Świadcstwo Og-225/91. Ścienne pustaki anhydrytowe typu Alfa. ITB, Warszawa, 1991.
- [328] Świadcstwo Og-226/91. Ścienne bloczki anhydrytowe. ITB, Warszawa, 1991.
- [329] Terechov V.A., Kybajev E.A.: Połączenie anhidritowego wiążuszczonego iz właznych dispersnych gipsosodierżajuszczich otchodow promyszlennosti. *Stroit. Mat.*, 1984, nr 5, 5–6.
- [330] Thole V.: Festigkeit und Haften von Polymer modifiziertem Gipsstein. *Zement Kalk Gips International*, 1999, nr 7, 400–409.
- [331] Tomasik D.: Rola estrów celulozy w spoiwach gipsowych. *Cement Wapno Gips*, 1989, nr 6, 105–109.

- [332] Tomkowiak W.: Wytrzymałość betonu jako funkcja intensywności wibracji, stosunku cementowo-wodnego i punktu piaskowego. Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 30, Poznań 1968.
- [333] Triollier M., Soustelle M., Guilbot B.: Influence du mode de cuisson d'un plâtre sur son hydratation. *Ciments Betons Plâtres Chaux*, 1978, nr 3, 161–162.
- [334] United State Gypsum: Drywall Construction. Handbook. Chicago 1971.
- [335] Urban L.: Gips jako czynnik uprzemysłowienia robót wykończeniowych. *Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB*, t. 4, Krynica 1966, 217–221.
- [336] Urban L.: Hydrofobowe gipsowe prefabrykaty ścienne typu K. *Materiały Budowlane*, 1990, nr 10, 17–20.
- [337] Urban L.: Spoiwo gipsowe produkowane w Polsce. *Mat. Bud.*, 1990, nr 8, 19–20.
- [338] Urban L.: Stosowanie gipsu w budownictwie w kraju i za granicą. *Centr. Ośr. Inf. Budownictwa*, Warszawa 1975.
- [339] Uszerow-Marszak A.W.: Kinetyka ciepłowydalenijskiej przy hydratacji poliwodnego gipsa. *Stroit. Mat.*, 1979, nr 10.
- [340] Volkart K.H.: Bauen mit Gips. Darmstadt – Bundesverband der Gips- Gipsbauplattenindustrie e.V. (Hrsg.) 1976
- [341] Wala D., Rosiek G.: Odporność mieszanek gipsowo-cementowych na działanie wilgoci. *Cement Wapno Beton*, 2001, nr 1, 30–32.
- [342] Walczak A.: Apetyt na gips. *Cement Wapno Beton*, 2002, nr 5, 187–188.
- [343] Warachim H.: Związki pomiędzy niektórymi własnościami zaczynu a porowatością gipsu. *Cement Wapno Gips*, 1978, nr 8–9, 260–264.
- [344] Weiler C.J., Eclatement des grains de plâtre au contact de l'eau. *Ciments Betons Plâtres Chaux*, 1988, nr 775–5, 364–368.
- [345] Wianecki J.: Propriétés mécaniques du plâtre de Paris en vue de son utilisation comme matériau pour modèles réduits. *Bull. RILEM*, 1963 nr 20, 103–112.
- [346] Wichter J.J.: Proizvodstvo gipsowych wiazuszczich wieszczestw. *Wysszaja Szkoła*, Moskwa 1974.
- [347] Wirsching F., Hüller R., Olejnik R.: Gypsum from flue gas desulphurisation plants. *Zement Kalk Gips*, 1994, nr 2, 65–69.
- [348] Wirsching F.: Die Anwendung neuerer Analysenverfahren zur Charakterisierung von Gipsen. *Zement Kalk Gips*, 1987, 40, nr 4.
- [349] Wirsching F.: Die Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Zement Kalk Gips*, 1996, nr 19, 487–492.
- [350] Wirsching F.: Le gypse synthétique comme produit de base pour la fabrication des plâtres de construction de qualité. *Rev. Mat. de Constr.*, 1971 nr 671–2.
- [351] Wirsching F.: Utilisation de nouveaux procédés pour la caractérisation de plâtres. *Ciments Betons Plâtres Chaux*, 1988, nr 755–6, 397–401.
- [352] Wołzeńskij A.W., Ferronska A.W.: Gipsowyje wiazuszczije i izdelija. *Strojizdat*, Moskwa 1973.
- [353] Wołzeńskij A.W.: O perspektiwach proizvodstwa i primienienija gipsowych materialow w stroitelstwie *Stroit. Mat.*, 1985, nr 10, 17–18.
- [354] Wołzeńskij A.W., Stambułko W.J., Ferronska A.W.: Spoiwa, betony i wyroby gipsowo-cementowo-pucolanowe. *Arkady*, Warszawa 1977.
- [355] Worowiew H.C: Gipsowyje wiazuszczije i izdelija. *Strojizdat*, Moskwa 1983.

- [356] Worowiew H.C., Nestor L.J.: Wlijanije chloridnych solej na wiazuszczije swojstwa gipsa. *Stroit. Mat.*, 1981, nr 11, 20–21.
- [357] Wyżga S.: Wielkowymiarowe ściany gipsowe. *Przegląd Budowlany*, 1979, nr 1.
- [358] Yamada T., Suzuki K., Sato K.: Influences of additives specialy Na-citrate upon the strength of set gypsum. *Gypsum and Lime*, 1976, nr 144, 2–9.
- [359] Yilimaz J., Sendir H.: Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strenght and Young’s moduls in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, 2002, vol. 66, 211–219.
- [360] Zachara M., Kondratowicz W., Kapelko A.: Jednorodność – nowoczesne i praktyczne kryterium oceny jakości materiałów budowlanych. *Problemy Jakości*, 1974, nr 1.
- [361] Zamorowski W.: O metodzie badań wytrzymałości i odkształcalności betonu osiowo rozciąganego. *Inż. i Bud.*, 1987, nr 6, 187–191.
- [362] Zisselmar R.: Zur Pressagglomeration von Rauchgasgips mit Walzenpressen. *Zement-Kalk-Gips*, 1985, nr 5, 243–246.
- [363] ZPG „Dolina Nidy”. Impregnowane płyty gipsowe ścienne typu PRO-MONTA. Świadectwo dopuszczenia do stosowania w budownictwie nr 977/93. ITB, Warszawa, 1994.
- [364] ZPG „Dolina Nidy”. Sufitowe płyty gipsowe dźwiękochłonne, dekoracyjne i wentylacyjne. Świadectwo dopuszczenia do stosowania w budownictwie nr 978/93. ITB, Warszawa, 1994.

Normy związane

- [365] PN-67/B-01301. Spoiwa gipsowe. Klasyfikacja.
- [366] PN-80/6733-10. Spoiwa gipsowe.
- [367] PN-65/B-04360. Gips budowlany i modelowy. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
- [368] PN-80/B-04360. Spoiwa gipsowe. Metody badań. Oznaczenia cech fizycznych.
- [369] PN-86/B-04360. Spoiwa gipsowe. Metody badań. Oznaczenia cech fizycznych.
- [370] BN-89/6733-12. Gips budowlany.
- [371] BN-80/6743-09. Spoiwa gipsowe specjalne.
- [372] BN-87/6732-04. Gips ceramiczny.
- [373] BN-88/6733-11. Gips autoklawizowany.
- [374] BN-89/6732-13. Gips górniczy.
- [375] BN-80/6733-09. Gips tynkarski.
- [376] BN-80/6733-09. Gips szpachlowy.
- [377] BN-65/6732-07. Gips chirurgiczny.
- [378] Zn-85/KGK-18. Gips modelowy.
- [379] PN-78/B-04361. Kamień gipsowy, anhydryt i spoiwa gipsowe. Analiza chemiczna.
- [380] PN-75/B-14505. Zaprawy budowlane gipsowe i gipsowo-wapienne.
- [381] BN-87/6735-01. Gipsobeton. Wymagania i badania.
- [382] PN-55/B-14550. Gipsobeton. BN-86/6743-02. Płyty gipsowo-kartonowe.
- [383] BN-81/6743-11. Płyty gipsowe dekoracyjne.

- [384] ZN-82/KGK-16. Elementy sztukaterii gipsowej.
- [385] GOST 125-79. Wiezuscije gipsowyje.
- [386] NF B 12-401. Plâtres. Technique des essais.
- [387] NF B-12-300. Plâtres. Generalites clauses et conditions generales.
- [388] NF B 12-303. Plâtres fins de construction pour enduits de tres haute durete (T.H.D.)
- [389] FD. Bn 12-402. Plâtres. Temps d'emploi et fin de prise.
- [390] BS 1191: Part 1: 1973. Gypsum building plasters. Part 1. Excluding premixed lightweight plasters.
- [391] BS 1191: Part 2: 1973. Gypsum building plasters. Part 2. Premixed lightweight plasters.
- [392] BS 4022: 1970. Prefabricated gypsum wallboard panels.
- [393] DIN 1168. Baugipse. Anforderungen, Prüfung, Überwachung.
- [394] DIN 1168. Teil 1. Baugipse. Begriff. Sorten und Verwendung, Liferzung und Kennzeichnung.
- [395] DIN 51020. Bestimmung des Wasser-Gips-Mischungs-Verhältnisses bei Normkonsistenz.
- [396] DIN 18180. Gipskartonplatten. Arten, Anforderungen, Prüfung.
- [397] DIN 18184. Gipskarton – Verbundplatten mif Polistyrol – oder Polyuretan – Hart-schaum als Dämmstoff.
- [398] TGL 26718/01. Gipskartonplatten. Sortiment. Bezeichnung.
- [399] ISO 3050. Gypsum plasters – Determination of physical properties of pure paste.
- [400] ISO 3051. Gypsum plasters – Determination of mechanical properties.
- [401] ISO 3052. Gypsum plasters – Determination of water of crystallization content.
- [402] ISO 3048. Gypsum plasters – General tests conditions.
- [403] ISO 3049. Gypsum plasters – Determination of physical properties of powder.
- [404] ASTM C 28-80. Gypsum plasters.
- [405] ASTM C 59-83. Gypsum casting and molding plaster.
- [406] ASTM C 427-84. Physical testing of gypsum plasters and gypsum concrete.
- [407] ASTM C 840-84a. Application and finishing of gypsum board.
- [408] ASTM C 557-73. Adhesives for fastening gypsum wallboard to wood framing.
- [409] ASTM C 471-76. Chemical analysis of gypsum and gypsum products.
- [410] ASTM C 473-86a. Physical testing of gypsum board products and gypsum lath.
- [411] ASTM C 349-82. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars.
- [412] ASTM C 348-86. Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars.
- [413] ASTM C 56-76. Inorganic aggregates for use in gypsum plaster.
- [414] UNI 6010 Nr 3. Stampo, copristampo e cusinetto per la preparazione provini di malta battuta per prove di resistenza a compressione.
- [415] ASTM C 190-85. Standard test method for tensile strength of hydraulic cement mortars.
- [416] UNI 6011. Stamp, copristampo e cusinetto la preparazione provini di malta battuta per prove di resistenza a trazione.
- [417] Indian Standard IS: 2547. Specyfication for gypsu, building plasters.

- [418] IS: 2542 Methods of test for gypsum plaster, concrete and products.
- [419] Jugoslovenski Standard JUS B.C8.030. Gradevinski gips. Uzimanje uzoraka i ispitivanje fizikalno-mehaničkih svojstava.
- [420] PN-85/B-04500. Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
- [421] PN-88/B-06250. Beton zwykły.
- [422] PN-84/B-03264. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [423] PN-91/B-01010. Oznaczenia literowe w budownictwie. Zasady ogólne. Oznaczenia podstawowych wielkości.
- [424] PN-75/B-06250. Beton zwykły.
- [425] PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [426] PN-71/B-04500. Zaprawy budowlane. Badanie cech fizycznych i wytrzymałościowych.
- [427] EUROCODE 2. Design of Concrete Structures. Part 1: Final Draft, December 1988.
- [428] PN-B-19701:1997. Cement. Cement powszechnego użytku. Skład, wymagania i ocena zgodności.
- [429] PN-B-30041:1997. Spoiwa gipsowe. Gips budowlany.
- [430] PN-B-30042:1997. Spoiwa gipsowe. Gips szpachlowy, gips tynkarski I klej gipsowy.
- [431] PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [432] PN-B-03002:1987. Konstrukcje murowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [433] PN-B-03002:1999. Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
- [434] GOST 23789-79. Wiażuszczizje gipsowyje. Metody ispytania. (Gypsum binders. Test methods.).
- [435] GOST 4013-82. Kamień gipsowyj i gipsoanhydritowyj. Techniczeskije usłowija. (Gypsum and gypsum-anhydrite rock. Specyfication.).
- [436] GOST 26871-86. Materiały Wiażuszczizje gipsowyje. Prawiła prijomki. (Alabaster binding materials. Acceptance rules.).
- [437] GOST 6266-89. Listy gipsokartonnyje. Techniczeskije usłowija. (Gypsumplaster boards. Specyfication.).
- [438] GOST 9574-90. Paneli gipsobetonnyje dla pierogorodki. Techniczeskije usłowija. (Gypsum concrete panels for partitions. Specyfication.).
- [439] PN-B-19401:1996. Płyty gipsowe dźwiękochłonne, dekoracyjne i wentylacyjne.
- [440] PN-EN 12859:2002. Płyty gipsowe. Definicje, wymagania i metody badań.
- [441] CENT/TC 241:10-2003 (PR EN 520). Gypsum plasterboards. Definitions, requirements and test methods.
- [442] PN-B-30000:1980. Cement Portlandzki.
- [443] PN-EN 12860:2002. Kleje gipsowe do płyt gipsowych. Definicje, wymagania i metody badań.
- [444] PN-EN 13813:2003. Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykańczania.
- [445] prEN 13279-1:2004. Gypsum binders and gypsum plasters – Part 1. Definitions and requirements.

- [446] EN-13279-2:2004. Gypsum binders and gypsum plasters – Part 2: Test methods.
- [447] EN 13454-1:2004. Binders, composite binders and factory made for floor screeds based on calcium sulfate – Part 1: Definitions and requirements.
- [448] EN 12859:2002. Gypsum blocks – Definitions, requirements and test methods.
- [449] DSTY B W.2.7-82-99. Stroitelnyje materialy. Wiazuszczije gipsowyje. Techničeskije usłowija. Kijew 1999.
- [450] EN 13813. PN EN 13813. Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonywania. Materiały, właściwości i wymagania.

TABLICE

Tablica Z-1
Table Z-1

Cechy techniczne spoiw gipsowych. Wymagania według norm budowlanych BN-6733
Technical properties of gypsum binders. Requirements in accordance with standard BN-6733

Lp. No.	Jed- nostka Unit	Gips budowlany PN- 80/6733-10 [366] Building gypsum PN- 80/6733-10 [366]	Gips budowlany szybko wiązący PN- 80/6733-10 [366] Fast- setting building plaster PN- 80/6733-10 [366]	Gips modelowy PN- 80/6733-10 [366] Plaster of Paris PN- 80/6733-10 [366]	Gips szpa- chłowy BN- 80/6733-09 [376] Finishing gypsum BN- 80/6733-09 [376]	Gips tyn- karski BN- 80/6733-09 [367] Plaster BN- 80/6733-09 [367]	Gips tyn- karski STAN- DARD BN- 80/6733-09 [376] STAN- DARD plaster BN- 80/6733-09 [376]	Gips tyn- karski maszynowy BN- 80/6733-09 [376] Machine plaster BN- 80/6733-09 [376]	Gips górnicy BN- 80/6733-10 [366] Mine gyp- sum BN- 80/6733-10 [366]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Wymagania Requirements									
	Wytrzymałość na ściskanie nie mniej niż Compressive strength no less than	MPa	3-4 4,0 9,0	4,0 9,0	3,0 4,0 10,0	5,0	5,0 9,0	5,0	3,5	2,0
	- $f_{gc,2h}$ po 2 h $f_{gc,2h}$ after 2 h									
	- f_{gc} po 24 h f_{gc} after 24 h									
	- f_{gc} po wysuszeniu f_{gc} after drying									

Tablica Z-1 cd.
Table Z-1 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2.	Wytrzymałość na zginanie nie mniej niż Bending strength no less than – f_{gb} po 24 h f_{gb} after 24 h – f_{gb} po wysuszeniu f_{gb} after drying	MPa	1,8 4,0	1,8 4,0	2,0 4,0	2,0	2,0				
3.	– pozostałość na sicie 3,0 mm \leq residue on sieve 3,0 mm \leq – pozostałość na sicie 1,0 mm \leq residue on sieve 1,0 mm \leq – pozostałość na sicie 0,2 mm \leq residue on sieve 0,2 mm \leq	%	0,5 15	0,5 20	0 2	0 2	5 25	0 30	0 30		
4.	Czas wiązania Setting time – początek wiązania $t_{pw} \geq$ setting start $t_{pw} \geq$ – koniec wiązania $t_{kw} \leq$ setting end $t_{kw} \leq$	min	5 10–40	5 10–30	6 30	30–60 –	90–160 240	60 180	120 200	30 60	

Cechy techniczne spoiwa gipsowego autoklawizowanego odmiany α .
Wymagania według BN-88/6733-11 [373]
Technical properties of autoclaved gypsum binder of α type.
Requirements in accordance with BN-88/6733-11 [373]

Lp. No.	Wymagania Requirements	Jednostka Unit	Marki gipsu autoklawizowanego Brand of autoclaved gypsum		
			GA-30 4	GA-35 5	GA-40 6
1.	Wytrzymałość na ściskanie nie mniej niż Compressive strength no less than – $f_{gc,2h}$ po 2 h $f_{gc,2h}$ after 2 h – f_{gc} po wysuszeniu f_{gc} after drying	MPa	10 30	12 35	14 40
2.	Wytrzymałość na zginanie nie mniej niż Bending strength no less than – $f_{gtb,2h}$ po 2 h $f_{gtb,2h}$ after 2 h – f_{gtb} po wysuszeniu f_{gtb} after drying	MPa	5 10	6 12	7 14
3.	Pozostałość na sicie oczka kwadratowego, nie więcej niż Remainder on square sieve, not bigger than	0,5 mm 0,2 mm %	0 0,2	0 0,2	0 0,2
4.	Czas wiązania Setting time – początek wiązania $t_{pw} \geq$ setting start $t_{pw} \geq$ – koniec wiązania $t_{kw} \leq$ setting end $t_{kw} \leq$	min	8 15–30	8 15–30	8 15–30
5.	Wielkość zmian liniowych, nie więcej niż Linear dimension change, not bigger than	%	0,3	0,3	0,3
6.	Współczynnik W/G dla konsystencji normowej \leq W/G index for standard consistency \leq		0,5	0,5	0,4

Tablica Z-3
Table Z-3

Cechy techniczne spoiw gipsowych. Wymagania według norm branżowych BN-89/6733-12 [370], BN-87/6732-04 [372]
Technical properties of gypsum binders. Requirements in accordance with branch standards BN-89/6733-12 [370], BN-87/6732-04 [372]

Lp. No.	Wymagania Requirements	Jed- nostka Unit	Gips budowlany wg BN-89/6733-12 [370] Marka gipsu Building plaster in accordance with BN-89/6733-12 [370] Gypsum brand										Gips budowlany wg BN-89/6732-13 [374] Marka gipsu Building plaster in accordance with BN-89/6732-13 [374] Gypsum brand							
			GB- 3* 4*		GBD- 3** 4**		GC-4 I/II/III		GC-5 II/III		GC-6 II/III		GC-7 II/III		GC-8 II/III		GC-10 II/III		GG-3 GG-4	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15						
1.	Wytrzymałość na ściskanie nie mniej niż Compressive strength no less than - $f_{gc,2h}$ po 2 h \geq $f_{gc,2h}$ after 2 h \geq - f_{gc} po wysuszeniu \geq f_{gc} after drying \geq	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	3	4				
2.	Wytrzymałość na zginanie nie mniej niż Bending strength no less than - $f_{gb,2h}$ po 2 h \geq $f_{gb,2h}$ after 2 h \geq - f_{gb} po wysuszeniu \geq f_{gb} after drying \geq	MPa	1,8	2,4	1,8	2	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0	30	30		

Tablica Z-3 cd.
Table Z-3 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3.	Uziarnienie: odsiew na sicie o boku oczka kwadratowego, \leq Graining: mesh fraction on sieve with square mesh side \leq	1,0 mm 0,75 mm 0,50 mm 0,2 mm	%	0,5 15	0,5 15	0 2	0 2	0 -/+0 1,0,5/0,1	0 -/+0 0,7/1	0 -/+0 0,7/1	0 -/+0 0,7/1	0 -/+0 0,7/1	0 -/+0 0,7/1	0,5 15	0,5 15
4.	Czas wiązania Setting time - początek wiązania $t_{pw} \geq$ setting start $t_{pw} \geq$ - koniec wiązania $t_{kw} \leq$ setting end $t_{kw} \leq$		min	3 30	3 30	6 30	6 30	8 15-30	8 15-30	8 15-30	8 15-30	8 15-30	8 15-30		
5.	Wielkość zmian liniowych \leq Value of linear changes \leq		%	0,4	0,4	0,4	0,4								
6.	Główny składnik spowia $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, odmiana Main binder constituent $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, varieties			β	β	β	β	β	β	β	$\beta+\alpha$	$\beta+\alpha$	$\beta+\alpha$	β	β

Cechy techniczne gipsu budowlanego. Wymagania według normy PN-B-30041:1997. [429]
 Building plaster technical properties. Requirements in accordance with standard
 PN-B-30041:1997. [429]

Lp. No	Wymagania Requirements	Jednostka Unit	Marki gipsu budowlanego Building plaster brands				
			GB-G6	GB-G8	GB-D6	GB-D8	
1	2	3	4	5	6	7	
1.	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength – $f_{gc,2h}$ po 2 h, nie mniej niż $f_{gc,2h}$ after 2 h, no less than – f_{gc} po wysuszeniu, nie mniej niż f_{gc} after drying, no less than	MPa	3,0 6,0	4,0 8,0	3,0 6,0	4,0 8,0	
2.	Wytrzymałość na zginanie Bending strength – $f_{gtb,2h}$ po 2 h, nie mniej niż $f_{gtb,2h}$ after 2 h, no less than – f_{gtb} po wysuszeniu, nie mniej niż f_{gtb} after drying, no less than	MPa	1,8 4,0	2,0 5,0	1,8 4,0	2,0 5,0	
3.	Uziarnienie, odsiew na sicie o boku oczka kwadratowe- go, nie więcej niż Graining, mesh fraction on sieve with square mesh side, not bigger than	1,0 mm 0,75 mm 0,2 mm	%	0,5 15,0	0,5 15,0	0 2,0	0 2,0
4.	Czas wiązania Setting time – początek wiązania $t_{pw} \geq$ setting start $t_{pw} \geq$ – koniec wiązania $t_{kw} \leq$ setting end $t_{kw} \leq$	min	3 30	3 30	6 30	6 30	

Tabela Z-5

Table Z-5

Cechy techniczne gipsu szpachlowego, gipsu tynkarskiego oraz kleju gipsowego. Wymagania według normy PN-B-30042: 1997 [430]

Technical properties of finishing gypsum, plaster and gypsum-based adhesives. Requirements in accordance with standard PN-B-30042: 1997 [430]

Lp. No.	Wymagania Requirements	Jedn. Unit	Gips szpachlowy Spatula gypsum			Gips tynkar- ski Plaster		Klej gipsowy Gypsum glue	
			G	B	T	GTM	GTR	P	T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Wytrzymałość na ściskanie, nie mniej niż Compressive strength, no less than	MPa	3,0	2,5	3,0	2,5	2,5	3,0	60
2.	Wytrzymałość na zginanie, nie mniej niż Bending strength, no less than	MPa	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	2,5
3.	Przyczepność do podłoża, nie mniej niż Base adherence, no less than	MPa	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3
4.	Uziarnienie, odsiew na sicie o boku oczka kwadratowego, nie więcej niż Graining, mesh fraction on sieve with square mesh side, not bigger than	3,0 mm 1,0 mm 0,2 mm %	0 0 2	0 0 2	0 0 2	0 0 0	0 0 0	0 5 0	0 0 0
5.	Czas wiązania: początek wiązania t_{pw} , nie mniej niż Setting time: beginning of setting t_{pw} , no less than	min	60	60	30	90	60	60	25
6.	Ilość odciągniętej wody z zaczynu, nie więcej niż Volume of water drawn off from paste, no more than	%	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	1,5

Tablica Z-6
Table Z-6

Spojwa i tynki gipsowe. Definicje i wymagania według prEN 13270-1:2004
Gypsum binders and gypsum plasters. Definitions and requirements according to prEN 13270-1:2004

Oznaczenie Notation	Spojwa i tynki gipsowe Gypsum plaster	Zawartość spoiwa gipsowego Gypsum binder content %	Czas początku wiązania Initial setting time		Wytrzyma- łość na ści- skanie Com- pressive strength MPa	Twardość powierz- chniowa Surface hardness MPa	Wytrzy- małość na odrywanie Adhesive strength MPa	
			4 ręcznie nakła- dane spoiwo manual gyp- sum plaster	5 narzutowo nakładane spoiwo gipsowe projection gypsum plaster				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
B1	Gips budowlany Gypsum building plaster	> 50						
B2	Tynk na bazie gipsu budowlanego Gypsum based building plaster	< 50						
B3	Tynk gipsowo-wapienny Gypsum-lime building plaster	a	> 20	> 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	≥ 0,1
B4	Lekki gips budowlany Lightweight gypsum building plaster	> 50						
B5	Lekki tynk na bazie gipsu budowlanego Lightweight gypsum based building plaster	< 50						
B6	Lekki tynk gipsowo-wapienny Lightweight gypsum-lime building plaster	a	> 20	> 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	≥ 0,1
B7	Gips do robót tynkarskich o zwiększonej twardości powierzchniowej Gypsum plaster for plasterwork with enhanced surface hardness	> 50	> 20	> 50	≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 2,5	≥ 0,1

a – zgodnie z p. 3.3, 3.4, 3.5 i 3.6 [445]

a – according to 3.3, 3.4, 3.5 and 3.6 [445]

ANALYSIS OF THE VARIATION OF STRENGTH AND DEFORMABILITY OF GYPSUM IN VARIOUS STATES OF STRESS AND HUMIDITY

S u m m a r y

The thesis includes results of statistic series of laboratory tests and theoretical study analyses regarding the problems of gypsum mechanics in an interdisciplinary scope ranging from problems of the influence of physical and chemical gypsum plaster properties and of the process technology of their preparation on the final product properties, through tests of properties of fresh and set gypsum materials, and reaching the problems of hardened gypsum strength and temporary durability under the influence of short-lasting loads in different stress and humidity states.

Within the problems concerning gypsum plaster, the following have been determined: statistic parameters of the influence of gypsum plaster production technology on the quality and homogeneity of its mineral and chemical composition properties on statistical basis, as well as on selected physical and technological gypsum plaster properties, e.g. water demand, granulometry and strength distribution parameters. The basis of gypsum plaster class qualification has been elaborated, basing on standard guaranteed strength. The original statistic relations between standard strength $f_{gc,2h}$ in primary humidity state and strength f_{gc} in dry state have been defined. The algorithms of guaranteed strength $f_{gc,2h}^G$ and f_{gc}^G determination have been determined, including a new suggestion of building gypsum plaster strength classes. The properties of particular constituent fractions $f_1 - f_8$ of fractioned building plaster have been described, and partial degrees of hydration and specific surfaces for constituent fractions have been defined.

Within the problems regarding the fresh gypsum paste properties, the analytical relations concerning the description of time of the start t_{pw} and end of setting t_{kw} in the function of water-gypsum index $\omega = W/G$ have been defined. The analytical relations between gypsum paste consistency and gypsum plaster water demand for different levels of W/G indexes have been determined. Some effective methods of gypsum paste consistency determination for successive levels of W/G indexes have been suggested.

Within the problems regarding hardened gypsum, the parameters of statistic tensile strength distributions and of compressive strength have been defined. Statistic analytical relations between particular hardened gypsum strength have been established, as well as analytical functions describing strength of gypsum paste in dry and humid state in the function of W/G index, analytical relations describing the indexes of hardened gypsum strength variability in different stress states, softening coefficients K in the form of function $K = f(\omega)$. For bent elements of dry gypsum, the following has been determined: functions of strain distribution ε in normal sections, elastic-plastic strength index, function of the cracking moment. The strain characteristics and elasticity modules E_g of hardened gypsum have been described, in different stress and humidity states, in function of W/G index.

Within the key problems concerning the water-gypsum relation, the following has been determined: the relations of volumetric gypsum changes in the process of primary drying and secondary humidifying, in the function of W/G index; the relation of the hardened gypsum f_{gc} strength decrease in the function of increasing humidity w_i ; the influence of particular cycles of humidifying and drying. The processes accompanying water filtration through gypsum have been also recognised, and the relations between initial filtration coefficient k_o and index $\omega = W/G$ have been provided, in the form of relation $k_o = 52,3 \cdot 10^{-8} \omega$. The description of analytical capillary diameters in the function of W/G index has been presented, confirming the results of pore sizes measurement by means of mercury porosimetry method. An algorithm of the description of analytical functions of capillary water rise through gypsum has been determined, important for practical applications.