

*Joanna Hydzik\*, Piotr Czaja\**

## BETONY LEKKIE JAKO ELEMENTY OBUDOWY WSTĘPNEJ SZYBÓW DRAŻONYCH W SZTUCZNIE ZAMROŻONYM GÓROTWORZE\*\*

---

### 1. Wprowadzenie

Zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 betony lekkie są to betony wykonywane z zastosowaniem wyłącznie lub częściowo kruszywa lekkiego i charakteryzujące się gęstością objętościową w stanie suchym od 800 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. Ogólna dostępność kruszyw lekkich oraz możliwość wykonywania z nich betonów o wyższych wytrzymałościach sprawia, że są one stosowane coraz częściej, szczególnie w budownictwie mostowym, do budowy platform wiertniczych czy też wieżowców. W budowlach tych wykorzystywane jest w głównej mierze obniżenie ciężaru własnego konstrukcji, co pozwala na wykonanie cieńszych i co za tym idzie lżejszych elementów przy zachowaniu odpowiednio wysokiej wytrzymałości. W zależności od rodzaju użytego kruszywa, w porównaniu z betonem zwykłym można obniżyć ciężar konstrukcji do: 20% dla kruszywa cegran, 25% dla lytagu, 35% dla haydite i nawet do 45% dla keramzytu i innych spiekanych kruszyw z glin pęczniejących [2].

W budownictwie podziemnym istnieją duże obawy przed stosowaniem betonów lekkich, przede wszystkim z uwagi na ich nasiąkliwość i niskie parametry wytrzymałościowe. W artykule przedstawiono jedną z możliwości zastosowania tych betonów do obudowy szybu drażonego metodą zamrażania oraz wskazuje na istotne cechy, które z powodzeniem mogą zostać wykorzystane w budownictwie podziemnym.

### 2. Podstawowe cechy betonów lekkich kruszywowych jako materiału konstrukcyjno-izolacyjnego

W zależności od zastosowania betony lekkie dzieli się na konstrukcyjne, konstrukcyjno-izolacyjne oraz izolacyjne. Beton o szerokim zakresie stosowania i wytrzymałości na

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Artykuł powstał w ramach projektu badawczego 4 T12 013 29

ściskanie powyżej 14 MPa jest betonem konstrukcyjnym. Beton konstrukcyjno-izolacyjny charakteryzuje się wytrzymałością powyżej 3 MPa i współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda$  nie wyższym niż 0,7 W/(m·K). Natomiast beton izolacyjny jest to beton, którego główną cechą jest niski współczynnik przewodzenia ciepła, zwykle nie przekraczający 0,35 W/(m·K) i o wytrzymałości na ściskanie nie przekraczającej 3 MPa [5, 11].

Norma PN-EN 206-1: 2003, klasyfikując betony lekkie pod względem wytrzymałości na ściskanie, podaje klasy wytrzymałości od LC 8/9 do LC 80/88. W związku z tym możliwa jest do wykonania szeroka paleta betonów lekkich zróżnicowanych pod względem ich własności wytrzymałościowych. Własności wytrzymałościowe ujawniają się przy doborze stosu okruszowego, zwiększenie wytrzymałości osiągnąć można przez zmniejszenie wymiaru ziaren kruszywa. Wpływ wytrzymałości samego kruszywa ujawniania się dopiero przy wyższych wytrzymałościach betonu i jest tym mocniejszy, im mniejszy jest stosunek wytrzymałości kruszywa do wytrzymałości matrycy. Wartość wytrzymałości betonów lekkich w czasie pierwszych 7 dni dojrzewania w warunkach normalnych dochodzi do około 70÷90% wytrzymałości 28-dniowej [1, 2]. Współczynnik wodno-cementowy, ustalony w oparciu o całą ilość wody, nie ma wielkiego wpływu na wielkość wytrzymałości na ściskanie, ponieważ woda zaabsorbowana przez kruszywo nie wpływa bezpośrednio na proces hydratacji cementu. Zdecydowany wpływ ma natomiast ilość cementu, na przykład beton o wytrzymałości 70 MPa może zawierać go nawet 630 kg [7]. Mimo możliwości uzyskania wysokich wytrzymałości w obecności nadmiernej wilgotności wartość wytrzymałości ulega obniżeniu. Tłumaczone jest to częściowym rozpuszczeniem połączeń między kryształami sieci strukturalnej oraz rozrywaniem struktury betonu pod działaniem wody znajdującej się w mikrorysach. Różnice w wartości wytrzymałości w zależności od zawartości wilgoci wynosić mogą do 20% [1, 2]. Moduł sprężystości kształtuje się zwykle na dużo niższym poziomie niż dla betonów zwykłych o podobnej wytrzymałości. Stanowi na ogół około 50 do 75% wartości modułu betonów zwykłych. Z przeprowadzonych badań [1, 2, 3] wynika, że moduł sprężystości zależy w większym stopniu od gęstości objętościowej niż od wytrzymałości na ściskanie i wynosi średnio dla betonów lekkich na kruszywie pollytag o wytrzymałości na ściskanie rzędu 30÷40 MPa — 13,66÷19,68 GPa.

Chropowata tekstura powierzchni ziaren kruszywa oraz wnikanie świeżego zaczynu w pory kruszywa grubego determinuje bardzo dobrą przyczepność matrycy cementowej do stosu kruszywowego. Ponadto woda zaabsorbowana przez ziarna kruszywa podczas mieszania z upływem czasu staje się dostępna dla niewodnionych jeszcze ziaren cementu. W rezultacie dochodzi do wzmocnienia i doszczelnienia kruszywa oraz wzrostu wytrzymałości warstwy kontaktowej kruszywo — zaczyn cementowy wskutek obniżenia stosunku  $W/C$ . Wobec tego strefa kontaktowa w lekkich betonach kruszywowych jest nie tylko najbardziej wytrzymałym elementem ich struktury, ale często okazuje się być mocniejsza od tej w betonach wykonanych z użyciem kruszyw zwykłych. Dodatkowo niewielka różnica pomiędzy modułami sprężystości kruszywa i stwardniałego zaczynu cementowego sprzyja dobrej współpracy pomiędzy tymi składnikami. W konsekwencji nie powstaje różnica naprężeń, zarówno w przypadku przyłożonych obciążeń, jak i zmian termicznych lub wilgotnościowych. Zapobiega to w głównej mierze, powstawaniu mikrospeków [7].

Wysokowartościowe betony lekkie mimo porowatego kruszywa wykazują niską nasiąkliwość oraz wysoką wodoszczelność i mrozoodporność. Przeprowadzone badania [6] potwierdziły wysoką trwałość również betonów wysokowartościowych na kruszywie pollytag. Przy użyciu ogólnie dostępnych cementów i domieszek uzyskano beton o wytrzymałości na ściskanie rzędu 45 MPa i 52 MPa i gęstości poniżej 1900 kg/m<sup>3</sup>. Nasiąkliwość tych betonów nie przekroczyła 8%, wodoszczelność uplasowała się na poziomie co najmniej W8 z maksymalną penetracją wody wynoszącą około 1/5 wysokości próbki, natomiast stopień mrozoodporności wyniósł F300.

Właściwości termoizolacyjne charakteryzowane są głównie przez współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ . W przybliżeniu można przyjąć, że współczynnik  $\lambda$  jest proporcjonalny do gęstości objętościowej betonu oraz wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności. Wartość współczynnika przewodzenia w zależności od gęstości i rodzaju kruszywa kształtuje się na poziomie: od 0,35 W/(m·K) dla klasy gęstości D1,0 do 0,8 W/(m·K) dla klasy D1,8 [5]. Drugim parametrem właściwości cieplnych jest współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej. Betony lekkie kruszywowe mają na ogół niższą rozszerzalność cieplną w porównaniu z betonami zwykłymi i w zależności od rodzaju użytego kruszywa zawiera się ona w granicach od  $3,8 \cdot 10^{-6}$  do  $11,2 \cdot 10^{-6}$  1/°C [7]. Niska rozszerzalność wraz z niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła i modułem sprężystości sprawia, że beton lekki jest bardziej odporny na naprężenia związane z lokalnymi zmianami temperatur.

### 3. Zastosowanie betonów lekkich w budownictwie szybowym

Jedną z metod wznoszenia obudowy szybu drażonego w zamrożonym górotworze jest zastosowanie obudowy panelowo-betonowej. Konstrukcję tę wznosi się w ten sposób, że po urobieniu kolejnego zabioru w przodku szybowym przystępuje się do wznoszenia obudowy wstępnej z prefabrykowanych segmentów betonowych, a następnie pomiędzy obudową wstępną a górotworem układa się warstwę kontaktową. Elementy obudowy wstępnej w metodzie klasycznej wykonywane były z betonu zwykłego żwirowego, charakteryzującego się bardzo wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła, rzędu  $\lambda = 2,0$  W/(m·K), co dla grubości do 0,7 m daje wartość oporu cieplnego na poziomie  $R = 0,35$  (m<sup>2</sup>·K)/W. Przegroda taka staje się zatem dobrym przewodnikiem ciepła i powoduje znaczne oziębienie wnętrza szybu i utrudnia wykonanie obudowy ostatecznej. W przeciwnym wypadku nadmierne podgrzanie wnętrza szybu, np. w wyniku ciepła hydratacji pochodzącego od dojrzewającej obudowy ostatecznej, może spowodować lokalne rozmrożenia górotworu i utratę stateczności ociosu, a także wdarcie się wód do przodka szybowego [4].

Efekt zapobieżenia intensywnej wymianie ciepła oraz stworzenie dogodnych warunków dla dojrzewania warstwy obudowy ostatecznej można uzyskać za pomocą stosunkowo prostych zabiegów technologicznych, takich jak:

- zastąpienie używanych dotychczas paneli z betonu zwykłego segmentami prefabrykowanymi z lekkiego betonu o wysokiej wytrzymałości i stosunkowo niskiej gęstości oraz współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda < 1,0$  W/(m·K);

- wykonanie warstwy wypełniającej za obudową również z betonu o wysokiej izolacyjności, ze współczynnikiem przewodzenia ciepła z zakresu  $\lambda = 0,3\div 0,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Dla tak skonstruowanej obudowy wstępnej możliwe jest uzyskanie oporności termicznej na poziomie  $R = 1,5\div 2,0 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ . W takim rozwiązaniu konstrukcji obudowy szybowej, o ile wykonanie segmentów prefabrykowanych nie nastreczy większych problemów, najwięcej trudności może sprawić wykonanie lekkiej, termoizolacyjnej warstwy spajającej obudowę panelową z zamrożonym górotworem.

#### 4. Beton lekki wysokiej wytrzymałości

W celu sprawdzenia możliwości uzyskania betonów o podwyższonej wytrzymałości na kruszywie lekkim wykonano dwie mieszanki na kruszywie lekkim ze spiekanych popiołów lotnych-pollytag. Skład mieszanek oraz wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

**Betony lekkie o podwyższonej wytrzymałości — skład mieszane oraz wyniki badań**

Lp.	Składnik	Jednostka	Ilości PI	Ilości PII
1	Cement CEM I 52,5 R	kg	497	420
2	Pollytag	kg		
	6/12		375	385
	4/8		192	193
3	Piasek	kg	633	736
4	Mikrokrzemionka	kg	49,7	42,0
5	Superplastyfikator	% masy cementu	2,7	3,3
6	Woda	l	227	226
7	W/C (W/(C+MK))		0,46 (0,42)	0,54 (0,49)
Oznaczenia			PI	PII
Gęstość objętościowa		kg/m <sup>3</sup>	1911	1874
Wytrzymałość na ściskanie		MPa	50,6	41,3

Źródło: opracowanie własne

Analizując podane w przedstawionej tabeli wyniki można zauważyć, iż o wytrzymałości na ściskanie w głównej mierze decyduje ilość cementu. W związku z tym zwiększając masę cementu z powodzeniem można otrzymać wyższe wytrzymałości na ściskanie.

## 5. Beton lekki na warstwę wypełniającą

Na warstwę wypełniającą (kontaktową) zaproponowano zastosowanie betonu lekkiego o niewielkiej wytrzymałości i odpowiednio obniżonym względem betonu zwykłego współczynnikiem przewodzenia ciepła. W związku z tym, iż dojrzewanie tej warstwy przebiegać będzie w warunkach bezpośredniego kontaktu z zamrożonym górotworem, mieszanki wykonano przy użyciu cementów CEM I o przyspieszonym narastaniu wytrzymałości wczesnej oraz w celu osiągnięcia zamierzonej gęstości objętościowej i niskiego poziomu współczynnika przewodzenia ciepła użyto kruszywa keramzytowego. W tabeli 2 przedstawiono wybrane receptury dla różnych klas wytrzymałości cementu.

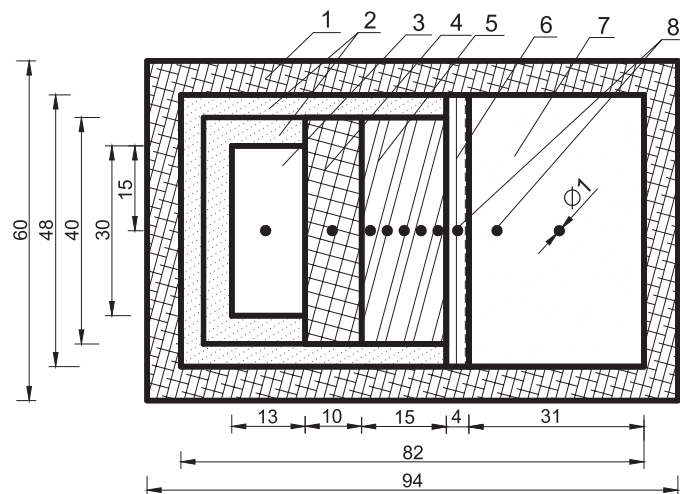
TABELA 2

**Recepty robocze dla wybranych betonów lekkich przeznaczonych na warstwę wypełniającą**

Składniki	Jednostka	AII	BIII	CIII
		CEM I 52,5R	CEM I 42,5R	CEM I 32,5R
Cement	kg	393	393	393
Woda	l	259	263	263
Keramzyt				
0/4	kg	140	140	140
4/10		335	335	335
Piasek	kg	282	282	282
Przyspieszacz wiązania SCHNELLERHÄRTER BE 42	% masy cementu	1,0	1,0	–
W/C	–	0,66	0,67	0,67

Źródło: opracowanie własne

Na betonach tych badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym dla betonów dojrzewających w warunkach laboratoryjnych (próbki wzorcowe) wykonano oznaczenie wytrzymałości na ściskanie, gęstości oraz współczynnika przewodzenia ciepła. W drugiej części przeprowadzone zostały badania modelowe dojrzewania tego betonu w bezpośrednim kontakcie z zamrożonym górotworem (próbki modelowe) oraz na próbkach wyciętych z badanego bloku, przeprowadzono taką samą serię badań jak dla betonu dojrzewającego w warunkach laboratoryjnych. Widok ogólny modelu przedstawiono na rysunku 1. Obserwacje prowadzone były dla różnych temperatur początkowych warstwy zamrożonego piasku modelującego zamrożony górotwór, zawierających się w granicach od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $-11^{\circ}\text{C}$ .



**Rys. 1.** Widok ogólny modelu do badania warstwy betonu w bezpośrednim kontakcie z zamrożonym górotworem: 1 — obudowa skrzyni zamrażarki, 2 — warstwa izolująca ze styropianu, 3 — przestrzeń powietrzna, 4 — przegroda z betonu komórkowego, 5 — blok dojrzewającego betonu, 6 — płyta kamienna, 7 — wilgotny piasek, 8 — punkty pomiarowe temperatury

Źródło: opracowanie własne

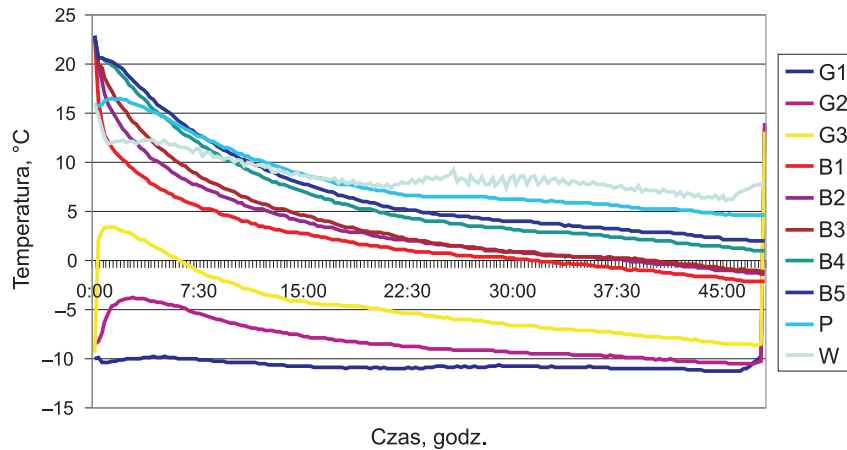
W czasie dojrzewania betonu prowadzona była ciągła rejestracja zmian temperatur poszczególnych warstw modelu. Wyniki badań właściwości poszczególnych mieszanek zamieszczone zostały w tabeli 3, natomiast przykładowy rozkład temperatury dojrzewania betonu na cemencie CEM I 32,5R w postaci wykresu na rysunku 2.

TABELA 3

**Wyniki poszczególnych badań betonów lekkich z cementu**

Oznaczenia	Jednostka	AII		BIII		CIII	
		Wzór	Model	Wzór	Model	Model	Model
Gęstość objętościowa po 2 dniach	kg/m <sup>3</sup>	–	–	1400	1478	1397	1491
po 28 dniach		1384	1351	1392	1392	1389	1391
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	MPa	–	–	13,0	5,5	9,7	4,1
po 28 dniach		18,8	16,3	18,0	19,6	12,9	13,1
Współczynnik przewodności cieplnej	W/(m·K)	0,41		–		–	

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 2.** Rozkład temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych dla betonu CIII (temperatura ociosu w chwili rozpoczęcia układania mieszanki betonowej  $-9,3^{\circ}\text{C}$ , temperatura początkowa mieszanki betonowej  $23^{\circ}\text{C}$ ): G1–G3 — zamrożony piasek; B1–B5 — dojrzewający beton lekki; P — panel; W — przestrzeń powietrzna

Źródło: opracowanie własne

## 6. Podsumowanie

Przebieg krzywych temperatur, rejestrowanych dla wszystkich przebadanych modeli, podczas wiązania i twardnienia zasadniczo nie różnił się między sobą. W modelach wykonanych na cementach CEM I 52,5R początkowo obserwowany był kilkustopniowy wzrost temperatury w całej grubości modelu, jednak po chwili już łagodnie opadał aż do uzyskania, po około 45÷50 godzinach, na bezpośrednim kontakcie  $0^{\circ}\text{C}$ . W żadnym modelu nie zaobserwowano przemarznięcia więcej niż kilku centymetrów w przyociosowej powierzchni, podobnie jak tylko kilkucentymetrowa warstwa zamrożonego piasku ulegała rozmrożeniu. Maksymalna temperatura, jaką osiągał piasek, wynosiła około  $5^{\circ}\text{C}$ , natomiast rozmrożenie zwykle nie trwało dłużej niż 7÷9 godzin.

Gęstość objętościowa przygotowanych betonów po 2 dniach dojrzewania, oznaczana na próbkach wyciętych z modelu, a więc częściowo przemrożonych i o wysokiej wilgotności, wynosiła około  $1500\text{ kg/m}^3$ , natomiast te same betony, ale dojrzewające w warunkach powietrzno-suchych i temperaturze otoczenia  $20^{\circ}\text{C}$ , osiągały gęstość objętościową o  $100\text{ kg/m}^3$  niższą. Próby po 28 dniach dojrzewania w zasadzie nie wykazywały różnic w wartościach gęstości objętościowej dla próbek wycinanych z modelu i wzorcowych i kształtowały się na poziomie  $1250\text{ kg/m}^3$  dla betonów tylko na kruszywie lekkim do  $1390\text{ kg/m}^3$  dla wykonanych z użyciem piasku.

Średni współczynnik przewodzenia ciepła dla betonu lekkiego o gęstości  $1350\text{ kg/m}^3$  wyniósł  $0,410\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , wyniki ten jest zgodny z wartościami literaturowymi [5].

Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach kształtuje się we wszystkich przypadkach bardzo podobnie, a mianowicie próbki wzorcowe osiągały dwukrotnie wyższą wytrzymałość od wyciętych z modelu. Po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych różnica pomiędzy wartościami była niezauważalna. Wytrzymałość na ściskanie ukształtowała się na poziomie: dla mieszanek **A** — 14,2÷18,8 MPa, dla **B** — 13,7÷19,6 MPa, natomiast dla **C** — 12,9÷16,8 MPa.

Podsumowując ogólnie dojrzewanie betonów lekkich w bezpośrednim kontakcie z zamrożonym górotworem, można wysnuć wniosek, że możliwe jest utrzymanie temperatur dodatnich w dojrzewającym betonie przynajmniej przez pierwsze kilkadziesiąt godzin, co w zupełności powinno wystarczać na uzyskanie przez beton zadowalającej wytrzymałości na ściskanie. Ponadto, podając za [8–10, 12], beton, który uzyskał już wstępną minimalną wytrzymałość, mimo że zamarza i proces hydratacji zostaje zatrzymany, po rozmrożeniu proces ten przebiega dalej i beton w dłuższym czasie uzyska założoną wytrzymałość.

#### LITERATURA

- [1] Domagala L.: Model wytrzymałościowy betonu lekkiego z kruszyw ze spiekanych popiołów lotnych. Cement — Wapno — Beton, 2, 2003
- [2] Domagala L.: Właściwości betonów lekkich z kruszyw ze spiekanych popiołów lotnych. Inżynieria i Budownictwo, 12, 2003
- [3] Domagala L.: Problemy projektowania i wykonawstwa betonów lekkich z kruszyw spiekanych. Przegląd budowlany, 12, 2005
- [4] Czaja P., Hydzik J.: Betony lekkie a budownictwo podziemne. Seminarium: Beton i spoiwa mineralno-cementowe w budownictwie górniczym. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa — Koło Zakładowe KWK „Borynia”. Jastrzębie Zdrój 2007
- [5] Jamroży Z.: Beton i jego technologie. Warszawa, PWN 2003
- [6] Kon E.: Wysokowartościowy beton lekki z kruszywem pollytag. Cement — Wapno — Beton, 3, 1998
- [7] Neville A.: Właściwości betonu. Kraków, Polski Cement 2000
- [8] Rulka K.: Zastosowanie betonów szczelnych o wysokiej wytrzymałości do obudowy szybów głębinowych metodą zamrażania skał. Budownictwo Górnicze, 42, 4, 1966
- [9] Rulka K., Godziek J.: Problemy obudowy betonowej w szybach mroźniowych. Rudy i Metale Nieżelazne, 14, 4, 1969
- [10] Rulka K., Mietliński W.: Zastosowanie prefabrykowanej siatkobetonowej obudowy wstępnej przy głębinowaniu szybów metodą zamrażania skał. Budownictwo Górnicze, 65, 1, 1973
- [11] Zapotoczna-Sytek G.: Betony lekkie. XVII Ogólnopolska Konferencja. Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Ustroń 2002
- [12] Zajbert M.: Dojrzewanie betonu w niskich temperaturach w warunkach bezpośredniego kontaktu z mrożonym gruntem. Prace Instytutu Organizacji i Mechanizacji Budownictwa. Warszawa, Arkady 1963