

Warunki betonownia w obniżonych temperaturach, na przykładzie Pomorza

Mgr inż. Magdalena Pawelska-Mazur, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój przemysłu budowlanego i związana z tym realizacja coraz nowocześniejszych konstrukcji żelbetowych, wymusza stosowanie coraz bardziej zaawansowanych technologii betonowania. Napięte, krótkie terminy budowy wymuszają na wykonawcach niejednokrotnie prowadzenie robót budowlanych, bez względu na panujące warunki atmosferyczne. Według literatury przedmiotu [1, 2, 7, 15] szczególnie niekorzystne jest prowadzenie robót betonowych w warunkach obniżonych temperatur. Przy wykonywaniu betonów w ujemnych temperaturach istotne znaczenie ma zabezpieczenie świeżej mieszanki betonowej przed zamarznięciem, aby mogły przebiegać reakcje chemiczne między cementem i wodą mające decydujący wpływ na wytrzymałość betonu. Zebrane informacje prezentowane w artykule powinny stanowić cenne wskazówki dla wykonawców podejmujących się realizacji obiektów budowlanych przypadających na okres niskich temperatur.

2. Wpływ niskich temperatur na proces wiązania i narastania wytrzymałości w betonie

Według literatury przedmiotu [4, 6, 11, 15] mechanizm niszczenia mrozowego można opisać jako destrukcję wywołaną przez parcie powiększającej swoją objętość wody na ścianki porów w betonie. Na podstawie informacji [4] woda wraz ze zmianą temperatury osią-

ga maksymalną gęstość w temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$. Z kolei najszybszy spadek jej gęstości obserwuje się po przejściu z fazy ciekłej w stałą, tzn. przy zamarzaniu w temperaturze 0°C .

Podczas zwiększania swojej objętości w kapilarach betonu obserwuje się wzrost ciśnienia, które jeśli przekroczy wytrzymałość na rozciąganie ścianek porów kapilarnych, przyczynia się do zniszczenia struktury. W rzeczywistości pory kapilarne tworzą system naczyń połączonych i jeśli w betonie istnieją pory nie wypełnione wodą, to wskutek powstałego ciśnienia, woda w nich się swobodnie rozszerza, nie powodując szkód.

Liczne obserwacje tężejących mieszanek betonowych [8, 11, 15] wskazują, że w przypadku temperatur poniżej $+10^{\circ}\text{C}$ następuje gwałtowne spowolnienie wiązania betonu, a w temperaturze około 0°C proces hydratacji praktycznie zanika. Stąd wiele państw za temperaturę graniczną uznaje temperaturę $+10^{\circ}\text{C}$, która wymaga od wykonawcy przedsięwzięcia dodatkowych zabezpieczeń i ochrony.

Aby scharakteryzować wpływ obniżonych temperatur na wytrzymałość betonu, wyróżnia się trzy niebezpieczne okresy wczesnego dojrzewania betonu:

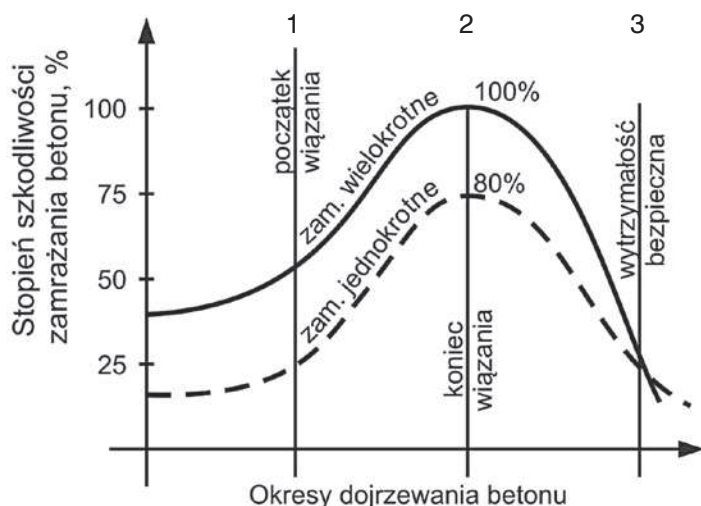
1. Okres przed rozpoczęciem wiązania.
2. Czas pomiędzy początkiem a końcem wiązania.
3. Okres od zakończenia wiązania do uzyskania tzw. wytrzymałości bezpiecznej.

Beton, który zamarzł przed początkiem wiązania (1) charakteryzuje się

zamarzniętą wodą zarobową, zwiększając tym samym swoją objętość. Konsekwencją tego zjawiska jest brak wody potrzebnej do przebiegu prawidłowych reakcji chemicznych. W efekcie dochodzi do opóźnienia bądź zatrzymania procesu hydratacji. Z uwagi na zahamowany proces wiązania, formujący się lód nie powoduje rozrywania mikrostruktury zaczynu cementowego [6]. Skutkiem tego zjawiska, po odmrożeniu, w mieszance obserwuje się dodatkowe pory.

W celu wyeliminowania niekorzystnych procesów zaleca się wykonawcom, aby w sytuacji zamarznięcia mieszanki przed początkiem wiązania, tuż po odmrożeniu, ponownie zawibrować mieszankę w celu usunięcia powstałych porów. Według literatury przedmiotu [8] po stwardnieniu uzyskany beton charakteryzuje się tylko nieznacznie niższą wytrzymałością spowodowaną słabszą siłą wiązania zaczynu cementowego i kruszywa.

Spadek temperatury pomiędzy początkiem a końcem czasu wiązania (2), przyczynia się do tworzenia kryształków lodu powodując zniszczenie nowych wiązań zaczynu – świeżych produktów hydratacji cementu. Jest to bardzo niekorzystne zjawisko. Przypuszcza się [12], że im później nastąpi zakłócenie wiązania cementu, to szkodliwość lodu będzie większa. Po zakończeniu wiązania (3) w betonie jest jeszcze dużo wolnej wody, która przy zamrożeniu może stanowić przyczynę niszczenia mikrostruktury betonu, powodując tym samym, nieodwracalny spadek wytrzymałości betonu.



Rys. 1. Wpływ zamarznięcia betonu w okresie dojrzewania na końcową wytrzymałość betonu [5]: punkt 1 – czas początku wiązania, punkt 2 – czas końca wiązania, punkt 3 – czas uzyskania przez beton odporności na zamarzenie

Tabela 1. Minimalne zalecane temperatury wbudowania mieszanki betonowej w okresie zimowym wg ACI 306R-88 [1]

Temperatura powietrza	Minimalny wymiar elementu, cm			
	< 30	30 ÷ 90	90 ÷ 180	> 180
< 5°C	13°C	10°C	7°C	5°C

Na podstawie zebranych informacji [8], za niekorzystne zjawisko powodujące największe straty wytrzymałości, uważa się zamarznięcie betonu w dwóch etapach: po rozpoczęcia wiązania betonu, lecz przed osiągnięciem bezpiecznej wytrzymałości, czyli tzw. odporności na zamarzanie. Na rys. 1 przedstawiono wpływ mrozu na wytrzymałość betonu w kolejnych etapach dojrzewania. Linia ciągła obrazuje stopień szkodliwości wielokrotnego, a linia przerywana jednokrotnego zamarzania na wytrzymałość końcową betonu.

Na podstawie danych zawartych na rysunku 1 można przyjąć tezę, że bez większej szkody dla wytrzymałości betonu można dopuścić do jego zamarznięcia dopiero w momencie uzyskania tzw. odporności na zamarzenie, której odpowiada określona wytrzymałość bezpieczna.

Norma PN-EN 13670-1 [13] określa, że temperatura powierzchni betonu nie powinna spadać poniżej 0°C dopóki wytrzymałość betonu nie osiągnie minimalnej wartości 5 MPa, przy której jest odporna na zamarzanie bez uszkodzeń. Zgodnie

z wytycznymi zawartymi w Instrukcji ITB [6] przyjmuje się następujące wytrzymałości bezpieczne dla betonów produkowanych przy wykorzystaniu krajowych cementów:

- 5 MPa dla betonu z cementem portlandzkim czystym przy odporności pełnej,
 - 8 MPa dla betonu z cementem portlandzkim z dodatkami przy odporności pełnej,
 - 10 MPa dla betonu z cementem hutniczym przy odporności pełnej.
- Jest wymagane, aby beton osiągnął odporność pełną przed zamarzeniem, jeśli w okresie dojrzewania, do betonu może się przedostać woda z otoczenia. Po uzyskaniu wymaganej odporności, zamrożony beton prawie nie traci na wytrzymałości końcowej. Uzyskuje jednak wytrzymałość końcową później, ponieważ w okresie zamarzenia jest zahamowany przyrost wytrzymałości.

3. Metody umożliwiające dojrzewanie betonu w obniżonych temperaturach

Proces wiązania i dojrzewania betonu jest procesem chemicznym,

w którym niskie temperatury spowalniają reakcje, a wysokie przyspieszają, zatem, aby zapewnić prawidłowy przebieg reakcji należy dostarczać ciepło. Wykonywanie robót betoniarskich w warunkach zimowych jest możliwe, poprzez przedsięwzięcie koniecznych zabezpieczeń, aby beton uzyskał wytrzymałość bezpieczną przed zamarzeniem.

Na podstawie danych literaturowych [1, 15], istotnym parametrem mającym wpływ na wczesne dojrzewanie betonu jest m.in.: temperatura otoczenia, temperatura mieszanki betonowej, jej skład, wielkość i kształt elementu oraz rodzaj deskowania i izolacji cieplnej.

Od temperatury powietrza zależy minimalna temperatura świeżego betonu, która umożliwi prawidłowy przebieg procesu hydratacji cementu. W tabeli 1 podano graniczne warunki zabudowy betonu.

Norma PN-EN 206-1 [12] określa konieczność zapewnienia minimalnej temperatury wbudowywanego betonu na poziomie +5°C. W określeniu minimalnej wymaganej temperatury dla poszczególnych elementów konstrukcji mogą posłużyć wytyczne amerykańskie. W tabeli 1 podano wg ACI 306R-88 [1] minimalne zalecane temperatury wbudowania mieszanki betonowej w okresie zimowym, uzależnione od minimalnego wymiaru elementu.

3.1. Wytyczne związane z projektowaniem mieszanki betonowej odpornej na przemarzanie

W trakcie projektowania składu mieszanki betonowej istotne jest, aby zapewnić po wyznaczonym czasie bezpieczną oraz wymaganą wytrzymałość dla stwardniałego betonu. Dzięki właściwemu doborowi składników, w ten sposób unika się szkód wywołanych przez mróz w młodym betonie.

Zaleca się stosowanie szybkowiązających cementów portlandzkich typu: CEM I 32,5R, CEM I 42,5R oraz CEM I 52,5R. Minimalna zawartość cementu powinna być na poziomie: do 350 kg/m³ i charakteryzować się wysokim ciepłem hydratacji, aby

zapewnić świeżemu betonowi jak najdłużej możliwie wysoką temperaturę.

W przypadku kruszyw stosowanych do betonowań w obniżonych temperaturach, istotną cechą jest jego niska wodozgodność. Do produkcji betonów mrozoodpornych wskazane jest użycie kruszyw odpornych na działanie mrozu. W przypadku betonów odpornych na działanie soli rozmrażających, wykorzystane kruszywo uprzednio należy przebadać pod kątem jego odporności na działanie stosowanych soli. Wskazane jest również dążenie do ograniczenia ilości wody w mieszance, gdzie współczynnik wodnocementowy (w/c) powinien kształtować się na poziomie poniżej 0,5. Według Instrukcji ITB [6] stosunek w/c nie powinien przekroczyć 0,55.

3.2. Domieszki przeciwmrozowe

Stosunkowo popularnym zjawiskiem obniżania temperatur zamrażania wody, wraz z przyspieszaniem procesów wiązania, jest wykorzystywanie dodatków chemicznych określanych mianem domieszek przeciwmrozowych.

W przeszłości popularną i powszechnie stosowaną domieszką przeciwmrozową w technologii betonu był chlorek wapnia (CaCl_2) pełniący rolę substancji przyspieszającej wiązanie i twardnienie betonu. Z uwagi na efektywną korozję stali zbrojeniowej oraz zjawisko korozji chlorkowej w betonie, domieszki zawierające agresywne jony chlorkowe z biegiem czasu zaprzestano używać. W chwili obecnej, wykorzystywane są bezchlorkowe preparaty, do których zalicza się m.in.: węglany i azotyny, których skuteczność jest zdecydowanie mniejsza, z racji ich mniejszej aktywności jonowej.

Zadaniem domieszek przeciwmrozowych jest umożliwienie przebiegu reakcji hydratacji cementu w temperaturach ujemnych poprzez: przyspieszenie wiązania (K_2CO_3 , Na_2CO_3) lub obniżenie temperatury zamrażania wody w mieszance betonowej (NaNO_2). Domieszki pozwalają na betonowanie w tem-

peraturze zewnętrznej do -10°C .

Wykorzystywanie tego typu domieszek, zgodnie z zaleceniami producentów chemii budowlanej, nie powinno zwalniać wykonawców z przestrzegania rygorystycznych wymogów dotyczących wykonywania i pielęgnacji betonu w warunkach niskich temperatur.

3.3. Produkcja i transport betonu w okresie obniżonych temperatur

Według zaleceń [16], węzeł betoniarski produkujący mieszankę w okresie zimowym, powinien być wyposażony w instalację do podgrzewania kruszyw i wody. Wykorzystywany cement oraz pozostałe surowce powinny być składowane w ocieplanych silosach lub w ogrzewanych halach. Nie dopuszcza się stosowania przemrożonych kruszyw. Jeśli jest to możliwe kruszywo należy ogrzewać parą lub wodą o temp. do 80°C . Wilgotność kruszyw powinna być kontrolowana i jego ewentualna dodatkowa woda, powinna być uwzględniana w recepturze mieszanki betonowej. Wodę zarobową powinno się podgrzewać do temp. $70 \div 80^\circ\text{C}$.

Nałożony wymóg wbudowania betonu o temperaturze $+5^\circ\text{C}$ lub $+10^\circ\text{C}$ przenosi się na konieczność wyprodukowania betonu o znacznie wyższej temperaturze. Konieczna temperatura wyprodukowanej mieszanki betonowej na węźle betoniarskim rośnie wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy wymaganą temperaturą mieszanki wbudowanej a temperaturą powietrza. Zgodnie z założeniami, temperatura produkowanej mieszanki betonowej nie powinna przekraczać 30°C . W czasie transportu spadek temperatury betonu powinien wynosić ok. 25% różnicy temperatur między mieszanką betonową a otoczeniem. Do wyliczenia wymaganej temperatury betonu w mieszalniku można wykorzystać poniższy wzór (1):

$$T_{bo} = \frac{T_b - 0,25t_a \cdot T_1}{1 - 0,25} \quad (1)$$

gdzie:

T_b – wymagana temperatura mieszanki wbudowanej ($+5^\circ\text{C}$ lub $+10^\circ\text{C}$),

T_1 – temperatura otoczenia,

t_a – czas transportu (w godzinach),

T_{bo} – temperatura betonu w mieszance.

Istotnym sposobem aby ograniczyć utratę ciepła jest optymalizacja czasu transportu betonu. Jednakże, pomimo że przy transporcie do 1,5 godziny istnieje możliwość wyprodukowania betonu spełniającego wymóg temperatury mieszanki wbudowanej na poziomie $+10^\circ\text{C}$ nawet przy temperaturze otoczenia $T_1 = -23^\circ\text{C}$, to w praktyce się tego nie stosuje. Doświadczenia firm wykonawczych oraz producentów chemii budowlanej wskazują, że betonowanie w temperaturach niższych niż -10°C jest nieekonomiczne i trudne technicznie do wykonania z uwagi na prace ludzi i urządzeń technicznych.

3.4. Układanie i pielęgnacja mieszanki betonowej na budowie

Przed betonowaniem zaleca się sprawdzenie stanu deskowań, zbrojenia oraz podkładu, na którym oparte jest deskowanie. Istotne również jest to, aby szalunki i zbrojenie nie były zamrożone ani pokryte śniegiem. W sytuacji, kiedy warunki te nie są spełnione, wskazane jest oczyszczenie i podgrzanie deskowań i zbrojenia, aby układana mieszanka betonowa do nich nie przymarzała. Nie wolno betonować na przemrożony podkład, np. zamrożony grunt lub zamrożona podbudowa z chudego betonu. Uszkodzone przez mróz elementy należy usunąć przed dalszym betonowaniem.

Kolejnym bardzo wymagającym etapem jest prawidłowa ochrona po wbudowaniu. Prawidłowo prowadzona pielęgnacja powinna chronić beton przed utratą ciepła, nie dopuścić do zamrożenia powierzchni betonu przed osiągnięciem wymaganej wytrzymałości bezpiecznej oraz zapewnić odpowiedni poziom wilgoci niezbędny do prawidłowego przebiegu procesu hydratacji. Wskazane jest, aby

beton po zabudowaniu utrzymywać w temperaturze +10°C przez kolejne 3 dni, albo do czasu aż osiągnie ok. 40% swojej wytrzymałości końcowej (np. 12 MPa przy projektowanej wytrzymałości po 28 dniach $f_c = 30$ MPa). W celu zapewnienia prawidłowych warunków temperaturowych wykorzystywane są m.in. metody:

1. Podgrzewanie betonu – dostarczanie dodatkowego ciepła do betonu na budowie (nagrzanie ciepłym powietrzem, parą niskoprężną, elektonagrzew, itp.). Do wad tej grupy metod należą przede wszystkim: wysoki koszt, wymagania bardzo skrupulatnego nadzoru oraz ryzyko punktowego przesuszenia elementów.

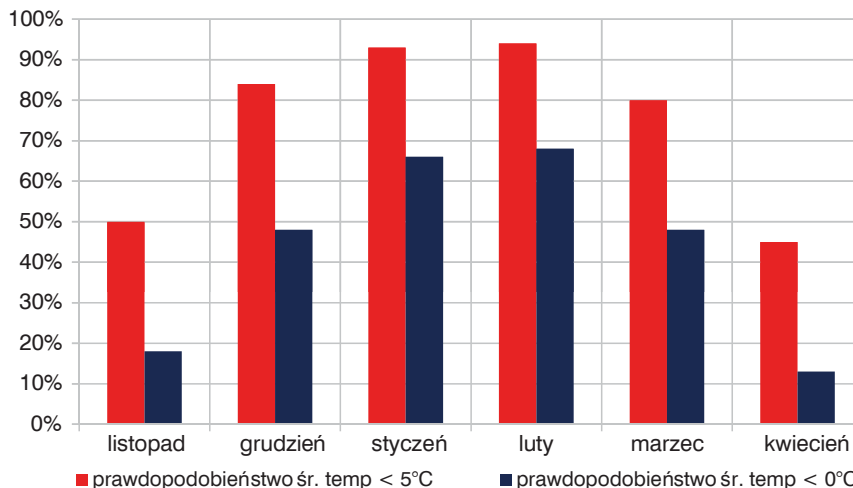
2. Zachowanie ciepła – stosowanie osłon izolacyjnych (folie, styropian, wełna mineralna, itp.) dla poszczególnych elementów konstrukcji. Główną wadą tej metody jest trudność w zachowaniu szczelności osłony przy skomplikowanym kształcie elementów.

3. Stosowanie ciepłaków – osłon całkowicie izolujących front robót od czynników zewnętrznych. Stosowanie tej metody wiąże się z bardzo wysokim kosztem.

4. Warunki klimatyczne na Pomorzu jako zewnętrzny czynnik ryzyka wpływający na prowadzenie robót betonowych

Zgodnie z zaleceniami producentów betonu należy zaniechać robót betoniarskich w temperaturach poniżej +5°C, jeśli nie stosujemy domieszek oraz dodatkowej pielęgnacji betonu. Według charakterystyki klimatu Gdyni [9], zebrane dane przedstawione na rysunku 2 pozwalają określić kilka zasadniczych wniosków dotyczących temperatur dla Pomorza:

1. Zgodnie z rysunkiem 2, średnia temperatura poniżej 5°C występuje w miesiącach od listopada do kwietnia (6 miesięcy) z prawdopodobieństwem ponad 45%, natomiast średnia temperatura poniżej 0°C



Rys. 2. Prawdopodobieństwo występowania temperatury średniej poniżej 5°C oraz 0°C – dane ze stacji klimatologicznej IMiGW w Gdyni [9]

występuje w miesiącach od grudnia do marca (4 miesiące) z prawdopodobieństwem powyżej 48%;

2. Liczba dni mroźnych (o temperaturze maksymalnej $\leq 0^\circ\text{C}$) w Gdyni wynosi średnio 24 w roku, dni te występują w od listopada do lutego;

3. Średnia temperatura przy gruncie jest ujemna od grudnia do marca. Okres przymrozków trwa w Gdyni 187 dni. Pierwsze przymrozki pojawiają się średnio około 16 października, a ostatnie przymrozki występują średnio do 23 maja.

Według specjalistów zajmujących się problematyką betonowania, na przebieg jej robót, oprócz temperatury, mają wpływ także inne warunki meteorologiczne takie jak: wiatr, opady deszczu i śniegu. W przypadku wiatru, jego wpływ przyspiesza parowanie wody w wyniku czego następuje oziębienie ciepłych mieszanek betonowych. Deszcz i woda ze śniegu powodują nasycenie betonu lub rozmycie świeżo ułożonej mieszanki, co prowadzi do destrukcji betonu. Natomiast śnieg – topniejąc – odbiera z otoczenia energię cieplną powodując dodatkowe oziębienie warstwy wierzchniej betonu.

Powyższa analiza warunków klimatycznych dla Wybrzeża Gdańskiego dowodzi konieczności uwzględnienia dodatkowych środków i zaplanowania rozwiązań

technologicznych w przypadku budów, dla których harmonogram prac przewiduje roboty betonowe w okresie od listopada do kwietnia.

5. Elektonagrzew – metoda zabezpieczająca dojrzewanie betonu w niskich temperaturach zastosowana na budowie „Galerii Bałtyckiej” w Gdańsku

W maju 2006 r. rozpoczęto budowę największego centrum handlowego na Pomorzu, tzw. „Galerii Bałtyckiej” w Gdańsku. Obiekt o powierzchni 125 000 m² i kubaturze 452 000 m³ został zaprojektowany jako konstrukcja żelbetowa. Wrzesień 2007 r. został zapisany w kontrakcie jako nieprzekraczalny termin przekazania budynku do użytkowania. Przestrzeganie terminów odbioru, narzuciło tym samym konieczność wybudowania obiektu „pod klucz” w ciągu 16-stu miesięcy. Zgodnie z harmonogramem robót wykonanie stanu surowego budynku przypadało na okres zimy (rys. 3). Zapisy kontraktowe nie dopuszczały wydłużenia czasu robót wywołanych niesprzyjającymi warunkami atmosferycznymi.

Z uwagi na napięte terminy realizacji centrum handlowego „Galeria Bałtycka” w Gdańsku, aby móc kontynuować roboty betonowe nawet przy ujemnych temperaturach, zdecydowano się na zastosowa-



Rys. 3. Widok placu budowy w okresie zimowym w Gdańsku

nie metody elektronagrzewu – jako dodatkowego zabezpieczenia prawidłowego wiązania, twardnienia i dojrzewania betonu. W tym celu użyto grzałek, mocowanych do zbrojenia w pionie i poziomie za pomocą drutu wiązałkowego lub plastikowych pasków. Odległość pomiędzy grzałkami wynosiła 20 ÷ 35 cm w układzie zarówno pionowym jak i poziomym. Ściany o grubości do 35 cm grzano jednostronnie, zaś grubsze dwustronnie. Jedna grzałka o długości 25 m wystarczała do ogrzania 1 m³ betonu. Końce grzałki połączono z przewodami zasilającymi poprzez plastikowe złączki, które następnie izolowano, aby woda z betonu nie dostała się do połączeń. Złączki zlokalizowano w odległości około 10 cm od wierzchu betonu. Aby zabezpieczyć położenie grzałek podczas betonowania grzałki pionowe mocowano pod przewodami poziomymi. Szczególną uwagę zwracano na miejsca otworów technologicznych, pilnując, aby grzałki nie przechodziły przez otwory. W przeciwnym razie grzałka nieotulona betonem uległaby natychmiastowemu przepaleniu. Przewody zasilające grzałki (po 12 par) były podłączone do transformatora. Napięcie w grzałkach nie przekraczało 40 V, a każdy obwód był kontrolowany ciągami mierniczymi.

W trakcie eksploatacji elektronagrzewu kontrolowano temperaturę grzania w betonie. W tym celu w trakcie betonowania wstawiano rurkę plastikową w połowie rozpiętości elementu i po zabetonowaniu w rurce umieszczano czujnik pomiaru temperatury. Czujnik pomiaru temperatury był połączony z szafą sterowniczą, gdzie znajdował się licznik temperatury grzania betonu. Temperatura grzania wynosiła + 40°C, a czas grzania 12 godzin przy temperaturze otoczenia – 5°C. Przy niższych temperaturach czas pracy odpowiednio ulegał wydłużeniu. Szczególnie przestrzegano był właściwy termin demontażu szalunków po zakończeniu grzania, po stopniowym ostudzeniu elementu. W przeciwnym razie, gdy rozszalowanie nastąpiłoby bezpośrednio po wyłączeniu grzania, raptowne wychłodzenie elementu spowodowałoby wzrost naprężeń w betonie, co dalej skutkowałoby obniżeniem jego wytrzymałości.

6. Podsumowanie

Pomimo wielu negatywnych doświadczeń związanych ze skutkami błędów i zaniedbań przy prowadzeniu robót betonowych w warunkach obniżonych temperatur, nadal niewielu wykonawców jest wystarczająco wcześnie i dobrze przygotowanych do nadejścia okresu zimowego. Mit łagodnych zim na Pomorzu nie ma potwierdzenia w opracowaniach danych klimatycznych dla tego regionu Polski. Każdego roku „zima zaskakuje” wykonawców prac budowlanych. Brak podejmowania działań prewencyjnych przed nadejściem mrozów jest spowodowany wciąż niską świadomością skutków takich zaniedbań mogących doprowadzić nawet do stanu katastrofy budowlanej.

Opisane powyżej zalecenia dotyczące prowadzenia prac betonarskich winny być rygorystycznie przestrzegane przez wykonawców. Nadzór budowy ponosi pełną odpowiedzialność za wykonywanie obiektów zgodnie z wymaganiami

projektowymi oraz sztuką budowlaną. Zimowe betonowanie wiąże się zawsze z dodatkowymi kosztami. Zatem wcześniejsze zaplanowanie metod działania oraz prognoza ich kosztu pozwala na umieszczenie w kosztorysie budowy odpowiedniej rezerwy na zabezpieczenie robót prowadzonych zimą, a tym samym pozwoli uniknąć zaniedbań w technologii betonowania w warunkach obniżonych temperatur.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI 306R-88: Cold Weather Concreting. American Concrete Institute, 2002
- [2] Bajorek G., Betonowanie zimą. Budownictwo, Technologie, Architektura. Polski Cement. 40, 2007
- [3] BS8110-1: Structural use of concrete. Code of practice for design and construction. British Standards Institution. 1997
- [4] Conciatori D., Brühwiler E., Water adsorption in concrete at low temperature. 2nd International RILEM, Quebec City, Canada, September 11–15, vol. CD, 2006
- [5] Edmeades R. M., Day R. I., New guidelines for cold weather concreting. Magazine of Concrete Research, vol. 45, issue 165, 1993
- [6] Instrukcja ITB nr 282. Wytyczne wykonywania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonych temperatur. ITB, Warszawa 1988 (przedruk bez zmian w 1999)
- [7] Jamroży Z., Beton i jego technologie. PWN, Warszawa – Kraków 2000
- [8] Jasiczak J., Technologie budowlane II. Politechnika Poznańska. Poznań 2003
- [9] Owczarek M., Charakterystyka elementów klimatu Gdyni w latach 1951–1997. Wiadomości IMiGW, tom XXIII, z. 1, 2000
- [10] Metin H., Serhat G., The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete. Construction and Building Materials 19, 2005
- [11] Neville A. M., Właściwości Betonu. Polski Cement. Kraków 2000
- [12] Norma PN-EN 206-1. Beton Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [13] Norma PN-EN 13670-1. Wykonywanie konstrukcji betonowych – Część 1: Zasady podstawowe
- [14] Reynolds C. E., Steedman J. C., Threlfall A. J., Reynold's reinforced concrete designer's handbook. Taylor & Francis, 2008
- [15] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement. Kraków 2002, ss.182
- [16] Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce: Beton przyjazny środowisku. SPBT. Kraków 2008
- [17] Warunki techniczne wykonywania robót budowlano-montażowych. Budownictwo ogólne. Tom I, część I. Arkady. Warszawa 1989
- [18] Woyciechowski P., Chudan A., Metody i środki pielęgnacji betonu w formach i „in situ”. XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 2002