

Wykorzystanie mieszanek betonowych w obniżonych temperaturach

Zwiększające się stale tempo realizacji inwestycji, konieczność skracania cykli produkcyjnych oraz uwarunkowania technologiczne i ekonomiczne zmuszają coraz częściej wykonawców do realizowania betonowych robót budowlanych w warunkach zimowych. Według [1] – za okres obniżonych temperatur (w tym zimowy) dla betonu uznaje czas, w którym średnia dobowa temperatura powietrza jest niższa niż 10°C. Temperatura ta określana jest jako:

$$T_{sr} = \frac{T_7 + T_{13} + 2 \cdot T_{21}}{4} \quad (1)$$

gdzie: T_7 ; T_{13} ; T_{21} – temperatury otoczenia mierzone o godzinach 7⁰⁰; 13⁰⁰; 21⁰⁰.

Okresy obniżonych temperatur należy zróżnicować dodatkowo ze względu na wpływ, jaki wywierają panujące temperatury na procesy wiązania cementu zachodzące w twardniejącym betonie. Doświadczenia autorów oraz dane literaturowe wskazują, że można tu mówić o kilku dodatkowych „podokresach”.

- pierwszy – przy średniej dobowej temperaturze (1) w granicach 1 ÷ 10°C (nie występują dodatkowo okresy temperatur poniżej 0°C). Wiązanie cementu w betonie oraz twardnienie betonu będzie wolniejsze niż przy normalnych warunkach temperaturowych, lecz nie wystąpią szkodliwe wpływy grożące uszkodzeniem betonu w konstrukcji lub obniżające jego jakość. W tym przypadku beton nie uzyska właściwej wytrzymałości na ściskanie w normowym okresie 28 dni, lecz w okresie późniejszym
- drugi – przy średniej dobowej temperaturze (1) poniżej 5°C (występują dodatkowo okresy temperatur poniżej 0°C)
- trzeci – przy średniej dobowej temperaturze (1) poniżej 0°C (nie występują okresy temperatur powyżej 0°C).

Temperatury ujemne dla młodego betonu są w każdym przypadku szkodliwe, choć szkodliwość ta ma różny stopień. Konieczna jest zatem ochrona młodego betonu przed tego typu warunkami atmosferycznymi. Wykonywanie robót betonowych i żelbetonowych w warunkach ujemnych temperatur jest możliwe tylko w przypadku podjęcia przez wykonawcę odpowiednich środków zaradczych, umożliwiających wiązanie i twardnienie mieszanki betonowej, np. zapewnienie ochrony cieplnej, tak aby beton w elemencie nie uległ przemrożeniu. Zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych umożliwiających betonowanie w temperaturach ujemnych i uzyskanie przez beton wymaganych wytrzymałości wczesnych nie zwalnia wykonawcy z odpowiedzialności za ochronę młodego betonu w konstrukcji. Obniżone temperatury powietrza mają ujemny wpływ na przebieg wiązania i twardnienia betonu wtedy, gdy temperatura powierzchni betonu jest równa temperaturze powietrza. Im temperatura otoczenia wykonywanej konstrukcji betonowej jest niższa, tym niższa jest temperatura betonu i tym proces dojrzewania betonu jest powolniejszy. Niszczenie mikrostruktury twardniejącego betonu występuje przy pewnej temperaturze określanej jako temperatura krytyczna, przy której w betonie zamarza około 50% wody. Dla

mieszanek betonowych wykonywanych bez środków wspomagających temperatura krytyczna betonu wynosi od -1 ÷ -5°C. Temperatura ta zależy od ilości rozpuszczonych soli w wodzie zarobowej, w wyniku hydratacji cementu, a więc od stopnia hydratacji w momencie spadku temperatury poniżej 0°C. Szkodliwość zamarzającej w betonie wody przejawia się wielostopniowo. Po pierwsze zamarzająca woda tworzy kryształy, które po stopieniu się pozostawiają w betonie pustki obniżające jego wytrzymałość. Po drugie zamarzająca woda zwiększa objętość o ok. 9%, co może spowodować powstanie naprężeń przekraczających wytrzymałość świeżego betonu, a w konsekwencji doprowadzić do powstania mikrorys i spękań. Po trzecie wreszcie zamarznięta woda nie może brać udziału w hydratacji cementu, co zakłóca jednorodność procesu reakcji chemicznych hydratacji cementu w betonie.

Beton może być poddany wpływowi ujemnych temperatur, a nawet zamrożeniu pod warunkiem uzyskania tzw. odporności na działanie ujemnych temperatur, tj. uzyskania takiej wytrzymałości, przy której jednokrotne jego zamrożenie i rozmrożenie pozostanie bez wpływu na jego końcową wytrzymałość. Rozróżnia się tutaj dwa rodzaje odporności: odporność warunkową i odporność pełną. Odporność warunkowa charakteryzuje się minimalną wytrzymałością betonu, przy której może on ulec zamrożeniu i pozostanie to bez szkody dla jego cech pod warunkiem, że nie ma do niego dostępu woda z otoczenia, to znaczy element nie jest narażony na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych. Literatura podaje różne wartości wytrzymałości dla uzyskania tzw. odporności warunkowej. Neville [5] mówi o wytrzymałości 3,5 MPa, inni autorzy [4] o wytrzymałościach 2 MPa dla betonów z cementów portlandzkich i 8 MPa dla betonów z innych cementów. Odporność pełną, tj. możliwość jednokrotnego zamrożenia i rozmrożenia przy narażeniu wykonanego elementu na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych, beton uzyskuje wtedy, gdy jego wytrzymałość wynosi wg [1] 5 MPa dla betonów z cementu portlandzkiego czystego, 8 MPa dla cementu portlandzkiego z dodatkami lub 10 MPa dla cementów hutniczych, lub wg [4] 5 MPa dla cementów portlandzkich czystych i 10 MPa dla innych cementów. Norma Europejska – ENV 13670-1:2000 „Wykonywanie konstrukcji betonowych. Część 1: Uwagi ogólne” wymaga, aby temperatura powierzchni betonu nie spadała poniżej 0°C, dopóki powierzchnia betonu nie osiągnie wytrzymałości, przy której jest ona odporna na zamarzanie bez uszkodzeń – zazwyczaj jest to wtedy, gdy $f_c > 5$ MPa.

W tym miejscu należy postawić pytanie, kiedy beton w danych warunkach osiągnie takie wytrzymałości. Pytanie to ważne jest też w innych aspektach, a mianowicie: kiedy można zdjąć szalunki betonowanego elementu, np. stupa, stropu itp. lub w jakim stopniu można obciążyć wykonany element. Wiadomo, że przyrost wytrzymałości betonu w czasie zależy od bardzo wielu czynników, z których głównymi są: temperatura twardniejącego be-

Tablica 1. Wiek betonu, przy którym wystawienie na działanie mrozu nie powoduje zniszczenia, wg [5]

Rodzaj cementu	Stosunek wodno-cementowy	Wiek (godz.) w momencie wystawienia betonu na działanie mrozu, przy wcześniejszej temperaturze pielęgnacji wynoszącej			
		5°C	10°C	15°C	20°C
Portlandzki zwykły	0,4	35	25	15	12
	0,5	50	35	25	17
	0,6	70	45	35	25
Portlandzki szybko twardniejący	0,4	20	15	10	7
	0,5	30	20	15	10
	0,6	40	30	20	15

tonu (związana z gabarytami elementu, temperaturą zabudowywanej mieszanki, sposobem pielęgnacji pod kontem utrzymania, odebrania lub dostarczenia ciepła) i ogólnie mówiąc rodzaju i składu betonu (klasa betonu nierozzerwalnie związana z wartością W/C, rodzaj cementu, stosowane dodatki oraz domieszki – plastyfikujące, napowietrzające, opóźniające, przyspieszające proces wiązania cementu lub przeciwmrozowe).

Często podejmowaną próbą oceny wytrzymałości bieżącej są niszczące badania próbek pobranych w miejscu betonowania i przechowywanych w warunkach pielęgnacji konstrukcji (leżące na konstrukcji, tak samo okryte i pielęgnowane). Pozostawienie próbek obok konstrukcji, np. na zmarzniętej ziemi, spowoduje, iż ze względu na znacznie mniejsze gabaryty niż konstrukcja ulegną one szybszemu wychłodzeniu i nawet zamarznięciu, a wynik ich zgniatania absolutnie nie będzie miarodajny dla konstrukcji. W literaturze podawane są tabele określające minimalny czas niezbędny do uzyskania przez beton tzw. odporności warunkowej. W tablicy 1 i 2 przedstawiono dwie z nich (wg [5] i [4]).

W związku z tym, że na rozwój wytrzymałości betonu ma wpływ bardzo wiele czynników, stosowanie ogólnych tabel może powodować znaczne różnice w stosunku do rzeczywistości, wskazane jest bardziej indywidualne podejście do tego zagadnienia. Stanowisko takie prezentuje norma [3]. Zaleca ona, aby rozwój wytrzymałości betonu w strefie przypowierzchniowej oceniać na podstawie wytrzymałości na ściskanie w funkcji stopnia dojrzałości lub na podstawie wydzielania się ciepła w funkcji ciepła całkowitego wydzielanego w warunkach adiabatycznych. Stopień dojrzałości betonu określany jest w stopniogodzinach lub w stopniogodzinach [4] i [5]. Wynika to z faktu, iż wytrzymałość betonu rośnie wraz z postępem hydratacji i przyjęte jest odnosić wytrzymałość betonu do jej wartości określonej na kostkach sześciennych o boku 15 cm w 28. dniu twardnienia przy przechowywaniu ich w temperaturze 18°C w wilgotności względnej >90%. Dojrzałość, do której odnoszone są wczesne dojrzałości betonu, określono na 19.800°C·h wg [5], gdyż temperaturę rozpoczęto naliczać od ustalonej doświadczalnie podstawy wynoszącej między -12°C a -10°C. Wy-

Tablica 2. Najkrótsze czasy, po których beton uzyskuje odporność warunkową na zamrożenie, wg [4]

Rodzaj cementu	Czas pielęgnacji przy temperaturze średniej betonu, w dobach		
	5°C	12°C	20°C
Szybkotwardniejący	1	-	-
Portlandzki 32,5 i 42,5	2	1	1
Hutniczy 32,5	5	3	2

nika to z faktu potwierzonego badaniami, iż dopiero w temperaturze poniżej -12°C beton nie wykazuje wzrostu wytrzymałości z czasem. Stopień dojrzałości S_1 określany w procentach do dojrzałości S_2 określanej np. jako dojrzałość 28-dniowa wyraża wzór [5]:

$$\frac{S_1}{S_2} = A + B \cdot \log(\text{dojrzałość} \cdot 10^{-3})$$

$$\text{dojrzałość} = t \cdot (t_b + 11,464)$$

gdzie:

t – czas dojrzewania w godzinach

t_b – temperatura betonu w czasie dojrzewania

11,464 – tzw. temperatura podstawowa.

Wartości współczynników A i B zależą od wytrzymałości betonu i wynoszą [5]:

Wytrzymałość 28-dniowa [MPa] (dojrzałość 19800°C·h)	Współczynniki	
	B	A
<17	68	10
17-35	61	21
35-52	54	32
52-69	46,5	42

Ta liniowa zależność pomiędzy wytrzymałością i logarytmem dojrzałości jest ważna powyżej pewnego minimum dojrzałości, a na jej przebieg ma wpływ zarówno wartość W/C, rodzaj cementu, a także wczesna temperatura betonu. Podane powyżej współczynniki są w zasadzie poprawne tylko dla cementu portlandzkiego czystego.

Przykład:

Jeżeli: $t = 28 \text{ dni} \cdot 24 \text{ godziny} = 672 \text{ godziny}$

$$t_b = 18^\circ\text{C}$$

to dojrzałość wynosi:

$$672 \cdot (18 + 11,464) = 19800^\circ\text{C} \cdot \text{h}$$

Natomiast stopień dojrzałości betonu: o wytrzymałości $R_{28}=30 \text{ MPa}$; po $t=7$ dniach; w temperaturze pielęgnacji $t_b=20^\circ\text{C}$ będzie wynosić:

$$\frac{S_1}{S_2} = 21 + 61 \cdot \log[7 \cdot 24 \cdot (20 + 11,464) \cdot 10^{-3}] = 65,11\%$$

Stopień dojrzałości tego samego betonu w temperaturze pielęgnacji $t_b = 5^\circ\text{C}$

$$\frac{S_1}{S_2} = 21 + 61 \cdot \log[7 \cdot 24 \cdot (5 + 11,464) \cdot 10^{-3}] = 47,95\%$$

Inne publikacje, jak np. [4], podają uproszczone wzory na określenie stopnia dojrzałości betonu, przyjmując temperaturę podstawową na poziomie -10°C, co potwierdza się praktycznie dla wieku betonu do 28 dni oraz dla temperatur pielęgnacji w przedziale od 0 do 20°C.

Innym sposobem określenia dojrzałości betonu w konstrukcji i jego wytrzymałości jest monitoring temperatury betonu w konstrukcji [8, 9] przy pomocy specjalnych rejestratorów i traconych czujników, zatopionych w betonie w ściśle określonych miejscach konstrukcji. Monitoring temperatury pozwala na określenie za pomocą specjalnych programów obliczeniowych, zarówno naprężeń termicznych wewnątrz konstrukcji, jak również określenie bieżącej wytrzymałości betonu na podstawie jego dojrzałości. Wymagane są jednak w tym przypadku wstępne badania polegające na wyznaczeniu całkowitego ciepła hydratacji przewidzianej do wbudowania mieszanki betonowej, badania dynamiki narastania wytrzymałości na ściskanie w warunkach laboratoryjnych (temp.=20°C) oraz dane materiałowe.

Warunki prowadzenia robót betonowych w okresie obniżonych temperatur

W trakcie prowadzenia robót betonowych w okresie obniżonych temperatur muszą zostać spełnione dwa podstawowe warunki technologiczne:

- beton musi uzyskać właściwą odporność, zanim ulegnie zamrożeniu
- beton musi uzyskać wymaganą wytrzymałość w określonym czasie.

Jest rzeczą oczywistą, że betonowanie w obniżonych i ujemnych temperaturach musi wiązać się z pewnym koniecznym kompromisem. Polega on na przykład na rezygnacji z osiągnięcia przez beton nominalnych właściwości po standardowym okresie 28 dni, lecz w późniejszym okresie. Zazwyczaj termin uzyskania tych właściwości jest przedłużony do około 90 dni, co wynika ze spowolnienia reakcji hydratacji cementu.

Przy wykonywaniu robót betonowych w okresach chłodnych najczęściej stosuje się następujące metody postępowania:

Modyfikacja mieszanki betonowej:

- zamówienie betonu o niższym W/C niż standardowe (tzw. receptury zimowe), czyli zmiana klasy betonu na wyższą od wymaganej w dokumentacji projektowej
- stosowanie cementów o wysokim cieple hydratacji lub wyższych klas
- ograniczenie ilości dodatków mineralnych stosowanych w betonie, np. w postaci popiołu lotnego, o ile opóźniają one twardnienie betonu
- zamówienie mieszanki betonowej z odpowiednimi domieszkami chemicznymi o działaniu upłynniającym (w celu obniżenia W/C), obniżającymi temperaturę zamarzania wody lub przyspieszającymi wiązanie cementu i twardnienie betonu
- stosowanie niższych konsystencji zabudowywanych mieszanek betonowych
- zamówienie tzw. ciepłego betonu.

Metoda zachowania ciepła betonu w elemencie konstrukcji:

— osłonięcie konstrukcji lub betonowanego elementu materiałami ciepłochronnymi zabezpieczającymi beton przed utratą ciepła własnego i ciepła hydratacji do czasu uzyskania pełnej mrozoodporności.

Metoda podgrzewania betonu w elemencie konstrukcji:

- podgrzewanie ciepłym powietrzem, parą pod odpowiednio skonstruowanymi osłonami
- podgrzewanie matami grzewczymi
- podgrzewanie prądem elektrycznym (elektronagrzew), podłączonym do izolowanego rdzenia grzewczego lub drutów grzewczych zatopionych w betonie, które przymocowuje się do zbrojenia
- podgrzewanie promiennikami podczerwieni lub nagrzewanie w polu elektromagnetycznym.

Metoda ciepłaków:

- wykonywanie konstrukcji w tunelach stałych, przesuwanych lub dmuchanych namiotach z zapewnieniem w nich odpowiednio wysokiej temperatury i wilgotności.

Przedstawione powyżej metody mogą być stosowane samodzielnie lub łącznie w zależności od potrzeb.

Wszystkie nowoczesne wytwórnie betonu przystosowane są do wydawania ciepłych mieszanek betonowych. Uzyskiwanie ciepłej mieszanki betonowej realizowa-

ne jest za pomocą podgrzewania jej składników. Podgrzewane jest kruszywo oraz woda zarobowa. Kruszywo podgrzewa się w pryzmie na placu składowym za pomocą umieszczonych w kruszywie węzownic z medium grzewczym, za pomocą przepływu przez kruszywo przegrzanej pary lub gorącego powietrza albo za pomocą grzania kruszyw w zasobnikach maszyny. Woda do produkcji betonu podgrzewana jest najczęściej za pomocą grzałek elektrycznych lub węzownic w piecach opalanych olejem. Temperatura mieszanki betonowej w momencie dostarczenia nie powinna być niższa niż 5°C [3] oraz nie powinna przekraczać 30-35°C [1, 5]. Zalecenia odnośnie maksymalnych temperatur podgrzewanych składników, wg danych literaturowych, są następujące [5]: woda nie powinna przekroczyć 60-80°C i zaleca się, aby nie miała ona wtedy bezpośredniego styku z cementem, lecz była podawana na kruszywo, natomiast kruszywo nie powinno być podgrzewane powyżej 52°C. Cementu i popiołów nie wolno podgrzewać, choć nie ma przeciwwskazań do stosowania gorących cementów o maksymalnej temperaturze do 75°C. Uwarunkowania temperaturowe dla cementu i wody wynikają z faktu, iż ich wzajemny kontakt przy takich temperaturach może doprowadzić do bardzo szybkiego wiązania i powstania stwardniałych grudek, co wpływa niekorzystnie na końcową wytrzymałość i trwałość betonu.

Temperaturę produkowanej mieszanki można zawsze zmierzyć, lecz wskazane jest oszacowanie wcześniej, jaką temperaturę mieszanki możemy uzyskać znając temperatury poszczególnych jej składników. Pomocnym w tym będzie wzór zamieszczony poniżej [6]:

$$t_b = \frac{c \cdot (z \cdot t_z + f \cdot t_f + g \cdot t_g) + c_w \cdot w \cdot t_w}{c \cdot (z + f + g) + c_w \cdot w} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

gdzie:

t_b, t_z, t_f, t_g, t_w – temperatura w °C świeżego betonu, cementu, popiołu, kruszywa i wody

z, f, g, w – ilość w kg w 1 m³ mieszanki betonowej cementu, popiołów, kruszywa i wody

c_w – ciepło właściwe wody (4,19 kJ/kg·K)

c – ciepło właściwe cementu, popiołu i kruszywa (0,84 kJ/kg·K) – dla praktycznego zastosowania wystarczy taka dokładność.

Biorąc pod uwagę fakt, że: $c_w:c = 4,19:0,84 = 4,988 \approx 5$ oraz to, że produkcja betonu odbywa się przy pewnej, założonej wilgotności kruszyw – co pociąga za sobą konieczność skorygowania ilości dozowanych kruszyw oraz wody w stosunku do recepty projektowanej dla suchych składników w postaci:

$$w_g = w - h_g$$

gdzie: h_g oznacza ilość wody w wilgotnym kruszywie w 1 m³ mieszanki

$$h_g = g_1 \cdot w_1 + g_2 \cdot w_2 + \dots + g_n \cdot w_n$$

gdzie:

g_1, g_2, \dots, g_n – ilości kruszyw stanowiących stos okruchowy określany na sucho w 1 m³ mieszanki

w_1, w_2, \dots, w_n – wilgotności stosowanych kruszyw w setnych.

Uwzględniając powyższe zależności wzór na obliczenie temperatury mieszanki betonowej przyjmie postać, przy założeniu, że temperatura wody zawartej w kruszywie jest równa temperaturze kruszywa [6]:

$$t_b = \frac{z \cdot t_z + f \cdot t_f + g \cdot t_g + 5 \cdot h_g \cdot t_g + 5 \cdot w_g \cdot t_w}{z + f + g + 5 \cdot (h_g + w_g)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

Wzór ten, poprzez jego odpowiednie przekształcenia, pozwala na określenie np. jaka musi być temperatura wody czystej dodawanej do betonu w celu uzyskania założonej temperatury mieszanki betonowej (przy znanym składzie recepty i znanych temperaturach pozostałych składników mieszanki). Temperatura mieszanki betonowej dowiezio-nej na budowę, przed zabudowaniem i zagęszczeniem, może różnić się od temperatury betonu wyprodukowanego w wytwórni. Na różnicę wpływać będzie schłodzenie mieszanki betonowej w momencie styku z zimnym pojemnikiem betonomieszarki oraz chłodzenie w trakcie transportu. Możliwy jest również wzrost temperatury w wyniku reakcji hydratacji cementu oraz na skutek tarcia wewnętrznego mieszanki betonowej w trakcie obracania się bębna betonomieszarki.

W warunkach klimatycznych Polski, najbardziej uzasadnione ekonomicznie efekty uzyskuje się wykonując roboty betonowe w warunkach obniżonych temperatur metodą zachowania ciepła mieszanki betonowej i twardniejącego betonu. Przeciwmrozowe domieszki chemiczne są w tym przypadku czynnikami jedynie wspomagającymi. Metoda ta polega między innymi na zachowaniu przez dostatecznie długi czas ciepła ułożonej mieszanki wraz z ciepłem wydzielanym w czasie twardnienia betonu do chwili uzyskania przez beton pełnej odporności na działanie mrozu. Aby to uzyskać, należy betonowany element osłaniać odpowiednio dobranymi materiałami ciepłochronnymi. Założeniem metody jest tak dobrany rodzaj ochrony przed utratą ciepła, aby w momencie ostygnięcia betonu do temperatury 0°C uzyskał on już taką wytrzymałość, przy której zamarznięcie nie będzie dla niego szkodliwe. Często oczekuje się od tej metody znacznie więcej. Doprowadzenie do tego, aby beton mógł osiągnąć wytrzymałość, przy której możliwe jest dalsze prowadzenie robót lub nawet usunięcie szalunków. Postępowanie obliczeniowe polega w tym przypadku na analizie bilansu cieplnego dla przyjętego sposobu zabezpieczenia elementu przed utratą ciepła. Przedstawiony w [4] wzór bilansu cieplnego ma postać, w której lewa strona określa ilość ciepła w mieszance betonowej, a prawa straty ciepła:

$$\rho_b \cdot c_b \cdot t_{bp} + C \cdot Q = t \cdot k \cdot M_p \cdot (t_{bs} - t_z)$$

między wartościami t_{bp} i t_{bs} istnieją zależności zdefiniowane poniżej:

$$t_{bs} = \frac{t_{bp}}{1,03 + 0,181 \cdot M_p + 0,0006 \cdot t_{bp}}$$

gdzie:

ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki betonowej [kg/m³]

c_b – ciepło właściwe betonu ok. 1 kJ/kg·K

t_{bp} – temperatura początkowa mieszanki betonowej w deskowaniu po zagęszczeniu w [°C]

C – ilość cementu w 1 m³ betonu w [kg]

Q – ilość wydzielonego ciepła przez 1 kg cementu w okresie ostygnięcia do 0°C [kJ]

t – czas ostygnięcia do 0°C w godzinach

k – współczynnik przenikania ciepła przez osłonę betonu lub szalunek [kJ/h°C m²]

M_p – moduł powierzchniowy elementu [m⁻¹]

t_{bs} – temperatura średnia w okresie ostygnięcia do 0°C [°C]

t_z – temperatura zewnętrzna wokół elementu [°C].

Wartości współczynnika k dla różnych rodzajów zabezpieczeń konstrukcji podawane są w tabelach, np. w [4]. Ze wzoru tego oblicza się zazwyczaj albo

czas stygnięcia t , albo średnią temperaturę w okresie ostygnięcia t_{bs} , co w powiązaniu z czasem stygnięcia pozwala na określenie spodziewanej wytrzymałości betonu lub też wartość koniecznego współczynnika k , na podstawie którego można określić konieczny sposób docieplenia konstrukcji.

Inną metodą, również powszechnie stosowaną przy wykonywaniu konstrukcji z betonu i żelbetu w warunkach obniżonych temperatur, jest ogrzewanie za- betonowanych elementów parą lub ciepłym powietrzem pod odpowiednimi osłonami. Dostarczenie ciepła wiążącemu i twardniejącemu betonowi przyspiesza jego dojrzewanie, co skraca czas potrzebny do uzyskania pełnej mrozoodporności betonu. Przy wydłużonym czasie ogrzewania elementu można uzyskać odpowiednią wytrzymałość betonu zezwalającą na rozdeskowanie konstrukcji lub obciążenie jej w krótszym czasie niż zezwalają na to zewnętrzne warunki pogodowe. Należy zadbać w tym przypadku o jak najbardziej równomierne dostarczanie ciepła do całego elementu oraz o to, aby nie dopuścić do przesuszenia betonu. Miejscowe przegrzania są bardzo szkodliwe dla betonu, gdyż powodują nierównomierne wiązanie cementu oraz twardnienie betonu, powstawanie naprężeń wewnętrznych, a nawet uszkodzenie jego mikrostruktury.

Odmianą metod dostarczenia ciepła wiążącemu betonowi jest wykorzystanie do tych celów energii elektrycznej. Najczęściej wykorzystuje się maty grzewcze lub izolowane druty grzewcze zatopione w betonie. Stosowanie drutów grzewczych wymaga ponadto zabezpieczenia powierzchni betonu przed utratą wilgoci. Stosowanie tej metody wymaga dużej ostrożności, odpowiedzialności i kultury technicznej. Druty grzewcze muszą być odpowiednio rozmieszczone przed betonowaniem i przymocowane do zbrojenia. Prąd podawany do grzałek musi być odpowiednio kontrolowany, aby nie nastąpiło zbyt szybkie i nierównomierne podgrzanie elementu, gdyż może to spowodować powstanie rys w betonie. Zarówno czas grzania, jak i uzyskiwane temperatury betonu powinny być ściśle określone w zależności od warunków atmosferycznych i kształtu elementu. Podobne zasady obowiązują przy studzeniu elementu, zdjęciu osłon termicznych i szalunków. Nie wolno dopuścić do powstania szoku termicznego w betonie, bo prowadzi to zazwyczaj do spękania konstrukcji.



Stosowanie przeciwmrozowych lub też przyspieszających wiązanie domieszek chemicznych polega w głównej mierze na spowodowaniu przyspieszenia wiązania cementu w betonie w początkowej fazie twardnienia, tj. uzyskania w krótkim czasie jego pełnej mrozoodporności i w zasadzie w znaczący sposób nie wpływa na przebieg twardnienia betonu w jego dalszym procesie. Natomiast stosowanie środków obniżających temperaturę zamarzania wody umożliwia przebieg hydratacji cementu w niskich temperaturach i przyrost wytrzymałości.

Przygotowanie do robót betonowych w warunkach obniżonych temperatur

Warunki meteorologiczne

Przy wykonywaniu robót betonowych należy ze szczególną uwagą śledzić bieżące zmiany pogody, co pozwala na podjęcie odpowiednio wcześniej niezbędnych decyzji w zakresie dostosowania ochrony betonowanych konstrukcji do zmiennych warunków pogodowych, przygotowania odpowiednich zabezpieczeń konstrukcji bądź przygotowania odpowiednich urządzeń do podgrzewania betonu.

Dokumentacja techniczna

Dokumentacja techniczna obiektu wykonywanego w warunkach obniżonych temperatur powinna przewidywać odpowiednie zabezpieczenia niezbędne do zapewnienia właściwej jakości wykonywanej konstrukcji. Projekt organizacji robót lub też program zapewnienia jakości winien uwzględniać lokalne warunki budowy oraz odpowiednie środki zabezpieczające będące w dyspozycji przedsiębiorstwa wykonawczego. Powinien przewidywać niezbędne środki zapewniające prawidłowe wykonanie konstrukcji w warunkach obniżonych temperatur w przypadku wykonywania elementów w granicach temperatur: powyżej +5°C, od +5°C do -3°C, poniżej -3°C do -10°C oraz poniżej -10°C do -15°C. Betonowanie konstrukcji na wolnym powietrzu w temperaturze poniżej -15°C nie powinno być wykonywane. W dokumentacji technicznej powinny być wskazane odpowiednie ekonomicznie i technicznie uzasadnione metody zabezpieczeń pozwalające na uzyskanie przez beton odpowiedniej wytrzymałości, a wcześniej pełnej mrozoodporności.

W przypadku, gdy betonowanie konstrukcji jest dokonywane w umiarkowanych temperaturach ujemnych i gdy w deskowaniu układana jest mieszanka o W/C > 0,55, świeży beton należy chronić przed dopływem wilgoci z zewnątrz szczelnymi osłonami aż do czasu uzyskania pełnej mrozoodporności. Jeżeli spadek temperatury poniżej -3°C jest spodziewany w okresie późniejszym niż 3 dni, lecz krótszym niż 10 dni od chwili zakończenia betonowania, to należy dodatkowo chronić beton przed napływem wilgoci z zewnątrz przez stosowanie odpowiednich materiałów ciepłochronnych: folia ciepłochronna, papa, brezent, styropian, maty słomiane, wełny mineralne itp.

Jeżeli spadek temperatury poniżej -3°C spodziewany jest przed upływem 3 dni, licząc od chwili zakończenia betonowania, bądź nastąpił w trakcie układania mieszanki w deskowaniu, to należy niezwłocznie ochronić zabetonowany fragment przed stratami ciepła. W przypadku wykonywania konstrukcji cienkościennych lub innych smukłych o małym przekroju zaleca się stosować przyspieszone dojrzewanie przez betonowanie w cieplakach lub podgrzewanie

betonu. Pozwala to na uzyskanie w krótkim czasie wymaganej wytrzymałości na ściskanie oraz zapewnienie stateczności konstrukcji po rozdeskowaniu.

Przygotowanie do betonowania

Deskowanie i zbrojenie przygotowane do betonowania winno być wolne od lodu i śniegu, czyste, odpowiednio zabezpieczone przed działaniem mrozu na świeżą mieszankę betonową. Należy zadbać, aby temperatura deskowania i zbrojenia nie była niższa niż +5°C. Nie zaleca się oczyszczania zbrojenia i deskowania z lodu i śniegu otwartym płomieniem oraz ciepłym powietrzem zmieszonym ze spalinami.

Układanie mieszanki betonowej

Układanie mieszanki betonowej różni się w zasadzie od układania mieszanki w warunkach normalnych, z tym że ze względu na stosowanie mieszanek o niskim stosunku C/W oraz niższych konsystencjach należy zwrócić szczególną uwagę na dobre zagęszczenie mieszanki poprzez wibrowanie. Prace betonarskie należy ponadto prowadzić sprawnie i szybko, bez zbędnych przestojów betonowozów na budowie, aby nie dopuścić do nadmiernego obniżenia temperatury mieszanki, tzn. zbyt jej nie przechłodzić. Po zakończeniu betonowania należy niezwłocznie zabezpieczyć betonowany element przed stratą ciepła.

Pielęgnacja betonu

Pielęgnacja betonu w warunkach obniżonych temperatur polega w zasadzie na zapewnieniu w betonie odpowiedniej ilości ciepła niezbędnego do procesu wiązania cementu i twardnienia betonu. Uzyskuje się to metodami opisanymi powyżej w zależności od potrzeb i możliwości przedsiębiorstwa wykonawczego.

Rozdeskowanie konstrukcji

Każdorazowo przed przystąpieniem do rozdeskowania konstrukcji należy określić wytrzymałość betonu w konstrukcji (in situ). Badania na próbkach pobranych w miejscu zabudowania mieszanki i przechowywanych w takich samych warunkach, w jakich dojrzewał beton w konstrukcji, nie odzwierciedlają faktycznej wytrzymałości betonu w konstrukcji.

dr inż. Zbigniew Kołacz

mgr inż. Rafał Gajewski

RMC Polska

Literatura:

- 1 „Wytyczne wykonania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonych temperatur”, Instrukcja nr 282, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1988
- 2 PN-EN 206-1:2000 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 3 Prenorma Europejska ENV 13670-1:2000. Wykonywanie konstrukcji betonowych. Część 1: Uwagi ogólne
- 4 Z. Jamróży, *Beton i jego technologie*. PWN 2000
- 5 A. M. Neville, *Właściwości betonu*, wydanie czwarte, Kraków 2000
- 6 *Betontechnische Daten. Readymix Baustoffgruppe*, Ratingen 2000
- 7 P. Woyciechowski, A. Chudan, *Metody i środki pielęgnacji betonu w formach „in situ” XVII, Ogólnopolska Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”, Ustroń 2002*
- 8 Claus V. Nielsen „Numerical Early-Age Temperature and Stress Calculations on Hardening Concrete”, *Proceedings of 7th International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environment, October 2003*, pp. 461-475
- 9 *Instrukcje: 4C-Temp&Stress; 4C-Heat; Guardian. DTI – Claus V. Nielsen, Jens O. Frederiksen*