

# Ocena skutków przemarzania betonu w stropie – problemy w stosowaniu elektronagrzewu

KAMILA OWCZARSKA\*, ELŻBIETA SZMIGIERA, PIOTR WOYCIECHOWSKI

Politechnika Warszawska, Instytut Inżynierii Budowlanej, Aleja Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, Polska

**Streszczenie:** W Polsce, okres obniżonych temperatur, przypada średnio od 15 listopada do 15 marca, co daje cały kwartał roku. Chcąc nieprzerwanie prowadzić produkcję budowlaną, wymagane i konieczne jest stosowanie zabiegów mających na celu zabezpieczenie betonu przed niekorzystnym działaniem mrozu. Znanych jest wiele metod, ale najczęściej stosuje się ich kombinacje. Jedną z metod może być zastosowanie elektrooporowego grzania betonu, zwanej też elektronagrzewem. Należy jednak pamiętać, iż pielęgnacja betonu metodą elektronagrzewu jest zagadnieniem złożonym i zależy od bardzo wielu parametrów, które mogą być zmienne w czasie. W związku z powyższym cały proces obróbki termicznej powinien być odpowiednio zaprojektowany i przebiegać pod kontrolą kompetentnych osób. Praktyka pokazuje jednak, iż w wielu przypadkach brak jest procedur ustalających standardy, dotyczące projektu instalacji elektronagrzewu oraz przeprowadzania i kontroli samego procesu. Jak ważne jest wdrożenie odpowiedniego systemu kontroli, zostało przedstawione w niniejszym referacie, na przykładzie płyty stropowej konstrukcji budynku mieszkalnego, która uległa przemrożeniu.

**Słowa kluczowe:** przemrożony beton, obróbka cieplna betonu, elektronagrzew, obniżone temperatury, pielęgnacja w warunkach obniżonej temperatury

## 1. Wstęp

Temperatura otoczenia, zapewniająca najlepszy rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu, mieści się w przedziale od  $+15$ – $+20^{\circ}\text{C}$ . W temperaturach niższych, następuje spowolnienie wiązania cementu, co jest szczególnie zauważalne poniżej  $10^{\circ}\text{C}$ . Natomiast gdy temperatura spada poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  proces hydratacji zostaje praktycznie zatrzymany. W związku z powyższym zgodnie z [1] okres, w którym średnia dobowa temperatura otoczenia jest niższa niż  $10^{\circ}\text{C}$ , uznano za okres obniżonych temperatur. W przypadku, gdy utrzymuje się ona poniżej tej wartości przez 3 kolejne doby, należy stosować zasady prowadzenia prac w warunkach obniżonych temperatur. Natomiast gdy średnia dobowa temperatura powietrza wynosi  $5^{\circ}\text{C}$ , należy to traktować jako graniczną wartość, poniżej której mieszankę należy chronić przed utratą ciepła.

---

\*Autor do korespondencji: kamila.owczarska@gmail.com

Analizując roczniki meteorologiczne przyjmuje się, że okres ten przypada w Polsce od 15 listopada do 15 marca. Chcąc nieprzerwanie prowadzić produkcję budowlaną, bez pomijania całego kwartału roku, wymagane i konieczne jest stosowanie zabiegów, mających na celu zabezpieczenie betonu przed niekorzystnym działaniem obniżonych temperatur. Jednym z nich może być zastosowanie metody elektrooporowego nagrzewania betonu, zwanej też elektronagrzewem. Należy jednak pamiętać, iż pielęgnacja betonu metodą elektronagrzewu jest zagadnieniem złożonym, a jej efektywność zależy od bardzo wielu parametrów, które mogą być zmienne w czasie. Są to czynniki związane, zarówno z rodzajem samej konstrukcji, jak i składem mieszanki betonowej oraz zewnętrznych warunków atmosferycznych. W związku z powyższym, cały proces obróbki termicznej powinien być odpowiednio zaprojektowany i przebiegać pod kontrolą kompetentnych osób. Praktyka pokazuje jednak, iż w wielu przypadkach brak jest procedur ustalających standardy dotyczące projektu instalacji elektronagrzewu oraz przeprowadzania i kontroli samego procesu. Jak ważne jest wdrożenie odpowiedniego systemu kontroli, zostało przedstawione w niniejszym referacie, na przykładzie płyty stropowej konstrukcji budynku mieszkalnego, która uległa przemrożeniu w wyniku błędów w procesie pielęgnacji z wykorzystaniem elektronagrzewu.

## **2. Klasyfikacja i charakterystyka metod umożliwiających dojrzewanie betonu w warunkach obniżonej temperatury**

Wykonanie elementów żelbetowych w warunkach obniżonych temperatur wymaga zastosowania specjalnych metod, aby zapewnić odpowiednie warunki umożliwiające prawidłowe dojrzewanie betonu. W wyniku procesu przemiany fazowej ciała stałego z ciekłej do stałej, woda zwiększa swoją objętość o około 9–13%. Zamarzająca woda wywiera ciśnienie na ściany porów zlokalizowanych w tężejącym betonie. W momencie przekroczenia wytrzymałości zaczynu cementowego na rozciąganie, następuje zniszczenie struktury betonu. W celu dokładnego określenia rodzaju zmian, zachodzących w betonie podczas działania obniżonej temperatury, wyróżniono trzy niebezpieczne okresy wczesnego dojrzewania betonu (wg. B. Bukowskiego [2]):

### **Czas przed rozpoczęciem wiązania**

W betonie, który zamarzł przed początkiem wiązania znajduje się zamarznięta woda zarobowa, która zwiększa jego objętość. Wynikiem tego jest brak wody potrzebnej do rozpoczęcia reakcji chemicznych, co powoduje opóźnienie lub zatrzymanie procesu hydratacji. Nie dochodzi więc, do zniszczenia struktury betonu. Po odmrożeniu mieszanki betonowej należy ją bezwzględnie zawibrować, aby usunąć dodatkowe pory powstałe w procesie zamarzania wody. Beton po takim zabiegu charakteryzuje się tylko nieznacznie niższą wytrzymałością, która jest wynikiem słabszej siły wiązania zaczynu cementowego i kruszywa.

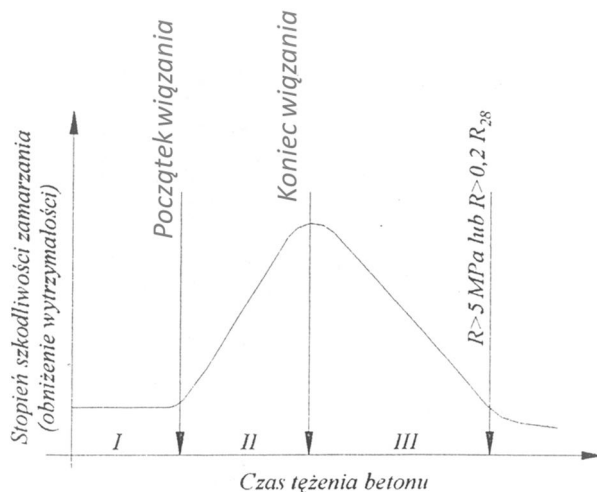
### **Okres pomiędzy początkiem i końcem wiązania**

Jest to najbardziej niebezpieczny etap dla wartości końcowej wytrzymałości betonu. W fazie tej następuje zniszczenie nowych produktów hydratacji cementu. Zjawisko to jest bardzo niekorzystne i im później nastąpi zamarznięcie, tym zniszczenia będą większe.

### **Okres od zakończenia wiązania do momentu uzyskania przez beton wytrzymałości bezpiecznej**

Po zakończonym procesie wiązania betonu zamarznięciu ulega woda, która pozostała i nie została wykorzystana do procesu hydratacji. Mróz w tym okresie jest tym mniej szkodliwy dla betonu, im później nastąpiło zamarznięcie. Twardnienie betonu zostaje zahamowane do czasu odmrożenia. Zniszczeniu ulega mikrostruktura betonu, co powoduje spadek jego wytrzymałości końcowej.

Opisane powyżej zjawiska obrazuje również rys. 1.



Rys. 1. Wykres wpływu zamarznięcia betonu na wytrzymałość późniejszą [3].

Z powyższego opisu wynika, iż najbardziej niebezpieczne dla elementu żelbetowego, jest zamarznięcie po rozpoczęciu wiązania, a przed uzyskaniem wartości wytrzymałości, określanej w literaturze pojęciem wytrzymałości bezpiecznej. Nasuwa się więc wniosek, że można dopuścić do zamarznięcia betonu, bez obaw o nadmierne zniszczenie struktury, po uzyskaniu przez niego odporności na zamrożenie, której odpowiada wytrzymałość bezpieczna. W instrukcji [1] podano, że wytrzymałość bezpieczna (nazwana w ostatniej wersji instrukcji wytrzymałością krytyczną) wynosi od 3,5 do 8 MPa, a także że beton przed pierwszym zamrożeniem powinien uzyskać co najmniej 20% swojej projektowej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie, co powoduje w niektórych przypadkach zaostrenie wymagań podanych wcześniej. Co więcej, obecna wersja instrukcji nie podaje bardziej szczegółowych wytycznych odnośnie, np. rodzaju użytego do mieszanki cementu, jak to miało miejsce w starszych wersjach. Ponadto zrezygnowano z podziału na wytrzymałość bezpieczną warunkową i pełną. Podane powyżej wymogi dotyczą konstrukcji zwykłych, a wymagania mogą zostać odpowiednio podwyższone z uwagi na charakter konstrukcji, czy warunki środowiskowe.

W amerykańskich wymaganiach [4], warunki obniżonej temperatury (*cold weather*) mają miejsce, gdy temperatura otoczenia spada poniżej 4°C. Porównując definicje obniżonych temperatur, widać iż polskie wymagania są dużo bardziej restrykcyjne. Co ważne, przewodnik [4] precyzuje również okresy tzw. przejściowe, w których temperatura jest w okolicach temperatury obniżonej, takie jak wiosna czy jesień. Zgodnie z tym, należy zwrócić szczególną uwagę na ochronę betonu ułożonego w deskowaniu przez co najmniej pierwsze 24 godziny lub do osiągnięcia wytrzymałości 3,5 MPa tak, aby uchronić przed niespodziewanym zamrożeniem betonu.

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż odporność bezpieczna nie jest równoznaczna z odpornością betonu na cykliczne zamarzanie i odmrażanie. Oznacza jedynie, że incydentalne zamrożenie nie powinno spowodować uszkodzenia betonu, a zgodnie z [4] doprecyzowano, że można dopuścić tylko do pojedynczego cyklu zamrożenie-odmrożenie. W praktyce oznacza to, iż nie można zakończyć okresu pielęgnacji betonu w momencie osiągnięcia wytrzymałości bezpiecznej i zaniedbać dalszych obserwacji i analiz. Jeżeli istnieje ryzyko narażenia wilgotnego betonu na warunki cyklicznego zamrażania i odmrażania, należy zaprojektować

beton w klasie ekspozycji XF3 z napowietrzeniem minimum 4%. Dojrzewający beton nie może być traktowany jako odporny na cykliczne zamrażanie i odmrażanie przed osiągnięciem wytrzymałości co najmniej odpowiadającej klasie C25/30. Niedozwolone jest stosowanie środków odladzających.

W związku z powyższym, wykonanie elementów żelbetowych w warunkach obniżonych temperatur wymaga zastosowania specjalnych metod, aby zapewnić odpowiednie warunki umożliwiające prawidłowe dojrzewanie betonu.

Jak ważna jest to kwestia, porusza [4] precyzując, iż za proces pielęgnacji betonu, umożliwiający dojrzewanie w warunkach obniżonej temperatury, odpowiedzialni są wszyscy członkowie procesu inwestycyjnego, tj. projektant, generalny wykonawca, inwestor, dostawca betonu i pozostałych materiałów specjalistycznych oraz przedstawiciele laboratorium, kontrolującego jakość betonu wbudowanego w konstrukcję. Co ważne, zanim wystąpią niekorzystne warunki, należy odpowiednio wcześniej ustalić szczegółowy program prac i zabiegów mających na celu zapewnienie warunków pielęgnacji betonu, wraz z ustaleniem odpowiedzialnych za dany obszar.

Na proces dojrzewania betonu wpływ mają, między innymi, następujące czynniki:

- temperatura otoczenia,
- temperatura mieszanki betonowej,
- skład mieszanki betonowej,
- wielkość i kształt wykonywanego elementu.

Oprócz czynnika temperatury, na niekorzystne warunki dojrzewania betonu wpływają także wiatr, deszcz, śnieg oraz woda ze śniegu. Wiatr nie tylko przyspiesza odparowywanie wody z powierzchni elementu, ale także go wychładza. Zgodnie z [5] spadek temperatury betonu jest proporcjonalny do iloczynu  $0,4V$ , gdzie  $V$  jest prędkością wiatru. Ponadto zimą występuje większa częstotliwość wiatrów, a ich prędkość wynosi średnio od 2,5–7 m/s [5].

Wyróżnia się następujące rodzaje działań pozwalających na wykonywanie robót żelbetowych w warunkach niskich temperatur:

- umożliwienie dojrzewania betonu bez dostarczania ciepła z zewnątrz,
- dostarczenie ciepła z zewnątrz,
- kombinacja powyższych wariantów.

Poza powyższymi działaniami, skład mieszanki betonowej musi być odpowiednio zaprojektowany. Najważniejsze zabiegi modyfikacji składu mieszanki betonowej związane są z:

- stosowaniem cementów wyższych klas i o większym cieple hydratacji,
- zwiększaniem ilości cementu,
- zmniejszeniem zawartości pucolanów,
- zmianą rodzaju pucolanów,
- aktywacją cementu przez dodatkowy przemiał,
- stosowaniem mieszanek o mniej ciekłych konsystencjach i w/c obniżonym do wartości nie większych niż 0,5 [1],
- przedłużaniem czasu mieszania składników,
- projektowaniem betonu o wyższej wytrzymałości, zakładając jej możliwy spadek w wyniku obróbki cieplnej, zgodnie z zapisami normy [6],
- stosowaniem rewibracji,
- stosowaniem domieszek chemicznych przyspieszających wiązanie cementu,
- stosowaniem domieszek chemicznych obniżających temperaturę zamarzania wody w betonie.

Zagadnienie wpływu stosowania obróbki za pomocą elektronagrzewu na właściwości betonu w konstrukcji autorzy przedstawili w [7].

W celu określenia skuteczności stosowanej metody ochrony betonu przed wpływem obniżonej temperatury, należy kontrolować zmiany w czasie dwóch czynników wpływających na jej efektywność, tj. temperatury powierzchni betonu oraz wytrzymałości betonu na ściskanie. Zgodnie z polską normą [6]: „temperatura powierzchni betonu, nie może spaść poniżej 0°C, do momentu osiągnięcia wytrzymałości bezpiecznej”. Wytyczne [4] definiują dokładnie, jakie pomiary należy wykonywać i są to:

- kontrola temperatury na powierzchni betonu, przy szczególnym zwróceniu uwagi na miejsca najbardziej wrażliwe na wychłodzenie, tj. narożniki i krawędzie,
- kontrola temperatury wewnątrz betonu,
- kontrola temperatury w momencie dostawy, ułożenia w deskowaniu,
- kontrola warunków zewnętrznych: temperatury, wiatru, wilgotności przy rozpoczęciu pielęgnacji oraz co najmniej dwa razy na dobę,
- zapis temperatury maksymalnej i minimalnej we wszystkich z powyższych przypadkach (powierzchnia betonu, wewnątrz betonu, otoczenia) w każdym z 24-godzinnych cykli.

Monitoring wewnątrz betonu można prowadzić za pomocą termometrów w zatopionych w betonie rurkach lub czujników traconych, takich jak termopary. Czujniki powinny być tak umieszczone, aby pozwalały na otrzymanie jak najbardziej wiarygodnych danych odnośnie równomierności rozkładu temperatur w betonie. Zaplanowanie dokładnego czasu potrzebnego na zabiegi pielęgnacyjne betonu w warunkach obniżonej temperatury, analizowany jest zawsze jednostkowo, na konkretnym przykładzie i w konkretnych warunkach. Czas potrzebny do uzyskania wytrzymałości bezpiecznej można ocenić, w przybliżeniu, posługując się danymi z literatury [3, 4, 5, 8]. Tu, niestety, pojawiają się znaczne rozbieżności odnośnie długości wymaganych, minimalnych czasów pielęgnacji. Bardziej precyzyjną metodą jest kontrola przyrostu wytrzymałości elementu z wykorzystaniem, np. metody krzywej dojrzałości [9].

### 3. Ocena skutków przemrożenia stropu na przykładzie zrealizowanej konstrukcji obiektu mieszkalnego

Prace konstrukcyjne podczas realizacji inwestycji budynku mieszkalnego wielorodzinnego, prowadzono na przełomie 2011 i 2012 roku w Warszawie. Roboty realizowane były w warunkach obniżonych temperatur. W celu zapewnienia odpowiednich warunków dojrzewania betonu, stosowano wiele zabiegów, mających na celu ochronę świeżo wbudowanej mieszanki przed niekorzystnym działaniem mrozu. Do wykonywania elementów konstrukcji używano mieszanki betonowej C30/37 S3 wykonanej z tzw. „receptury zimowej”, zgodnej z normą [19]. Optymalnym zabiegiem, z uwagi na technologię i koszt, było zastosowanie metody elektrooporowego nagrzewania betonu (elektronagrzewu), w połączeniu z okrywaniem powierzchni betonu za pomocą takich materiałów, jak folia bąbelkowa (rys. 2).

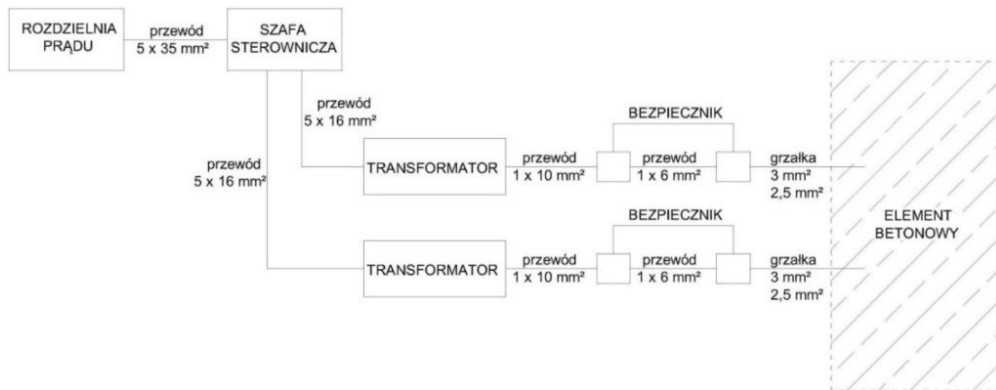


Rys. 2. Osłonięcie powierzchni wykonanego elementu za pomocą folii bąbelkowej, (fot. K. Owczarska).

Elektronagrzew, jakkolwiek trudny w realizacji z uwagi na mnogość czynników, które trzeba uwzględnić przy projektowaniu i wykonywaniu tego procesu, jest jednak najczęściej stosowaną na budowach metodą pielęgnacji cieplnej betonu w warunkach robót zimowych.

System elektronagrzewu składał się z (rys. 3):

- instalacji elektrycznej do nagrzewania prądem elektrycznym o napięciu obniżonym do wartości bezpiecznej dla człowieka tj. 42V,
- grzałek oporowych (rdzeni grzewczych) o przekroju  $3 \text{ mm}^2$ ,
- sieci przewodów (rozdzielczych, zasilających),
- transformatorów oraz szaf sterowniczych,
- czujników temperatury,
- elementów uzupełniających, np. taśmy izolacyjnej.



Rys. 3. Schemat instalacji elektronagrzewu.

Czujniki temperatury (rys. 4) umieszczone były w plastikowych rurkach zatopionych w betonie. Czujniki powinny być tak umieszczone, aby pozwalały na otrzymanie jak najbardziej wiarygodnych danych odnośnie równomiernego rozkładu temperatur w betonie. W elementach poziomych należy stosować co najmniej dwa czujniki, umieszczone w połowie grubości elementu, jak najbliżej i jak najdalej grzałek. Mierniki podłączone były do szaf sterowniczych (rys. 5), w których termostat regulował dopływ prądu do układu.



Rys. 4. Czujnik temperatury



Rys. 5. Szafa sterownicza, (fot. K. Owczarska).



Rys. 6. Widok budynku wielorodzinnego w trakcie realizacji, z zaznaczeniem omawianej sekcji, (fot. K. Owczarska).

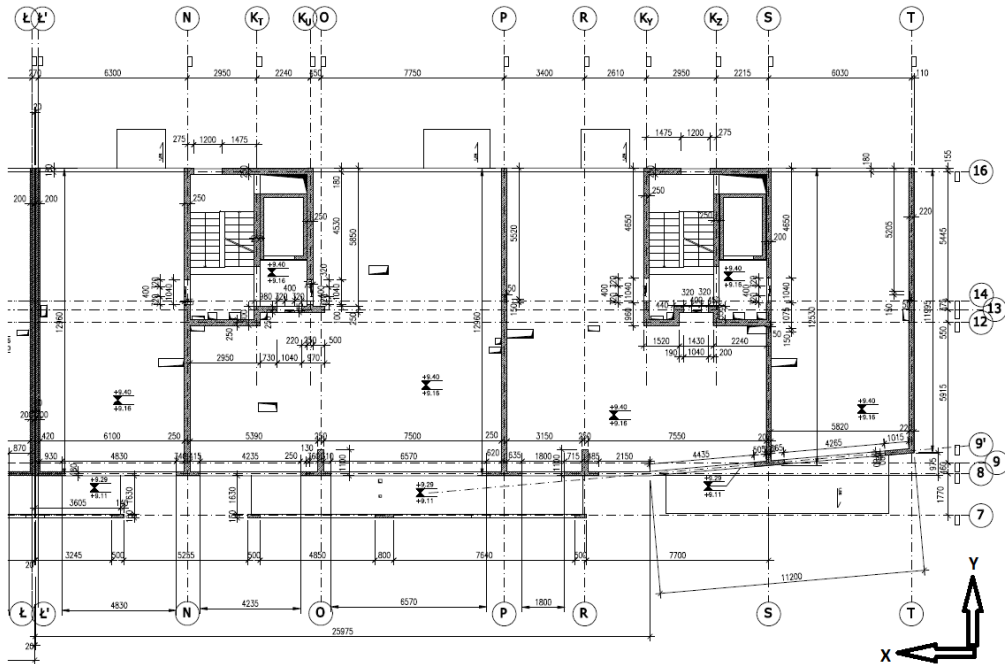
Konstrukcja budynku zaprojektowana była jako szkieletowa, żelbetowa, wykonywana w technologii monolitycznej, w układzie płytowo-słupowo-ściennym. Usztywnieniem całego ustroju były trzony szybów windowych, klatek schodowych oraz ścian spełniających rolę tarcz. Opisany w referacie element konstrukcji, to sekcja robocza płyty stropowej kondygnacji powtarzalnej +4 (rys. 6, 7) wraz z belkami i płytami balkonowymi. Sekcja płyty oddzielona była od pozostałego stropu za pomocą dylatacji konstrukcyjnej (oś Ł, Ł'). Kształt sekcji, która zawierała dwie klatki schodowe, była w przybliżeniu prostokątem o wymiarach około 12,5 na 37,2 m. Pozostałe parametry stropu były następujące:

- powierzchnia stropu: 435,24 m<sup>2</sup>,
- powierzchnia balkonów: 62,16 m<sup>2</sup>,
- grubość stropu: 24 cm,
- grubość balkonów, zmienna z uwagi na spadki: 16–18 cm, przyjęto średnio 17 cm,
- objętość mieszanki betonowej stropu wraz balkonami i belkami  $\approx$  130 m<sup>3</sup>.

W założeniu jedna grzałka może ogrzewać około 1 m<sup>3</sup> stropu, więc system powinien składać się z około 130 grzałek, umieszczonych na dolnej siatce zbrojeniowej oraz 10 transformatorów i 5 szaf sterowniczych. Odległość stacji sterującej od źródła zasilania powinna być jak najkrótsza i nie przekraczać 50 m. Stosując elektronagrzew, szczególnej uwagi wymaga betonowanie elementów zawierających otwory technologiczne. Mieszanka betonowa musi być dokładnie zawibrowana na obwodzie zaszalowanego otworu tak, aby całość grzałki znajdowała się w betonie, w przeciwnym razie może ona ulec przepaleniu. Z uwagi na wymiary stropu, zastosowano grzałki długości około 25–27 mb o przekroju 3,0 mm<sup>2</sup>. Na prawidłowy przebieg elektronagrzewu bardzo duży wpływ ma rozmieszczenie grzałek w betonowanym elemencie. Są one mocowane do zbrojenia za pomocą drutu wiązałkowego lub plastikowych pasków. Należy zapewnić odpowiedni sposób mocowania grzałek, zabezpieczający je przed możliwością przesuwania się w betonowanym elemencie. Grzałki powinny być tak rozmieszczone, by rozkład temperatury w betonie był możliwie równomierny. O tym, jak istotna jest to kwestia, autorzy pisali w [12]. Grzałki ze stropu zostały przedłużone w płyty balkonowe. Z uwagi na brak formalnych wytycznych, bazując na

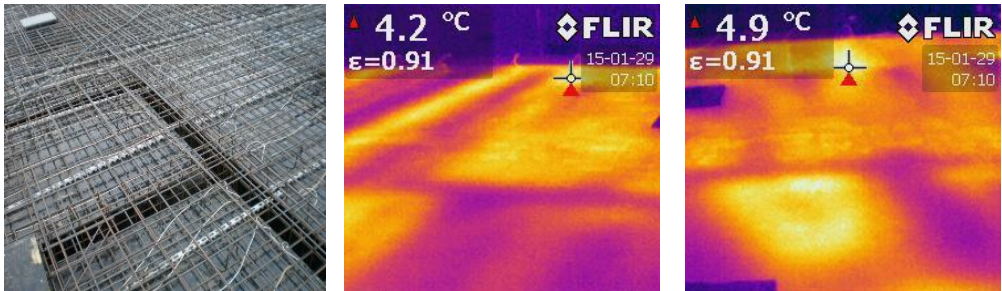


wieloletnim doświadczeniu podczas realizacji procesu elektronagrzewu [12], przyjęto jedną warstwę grzałek, ponieważ grubość elementu nie przekraczała 400 mm. Minimalna zakładana temperatura betonowania wynosiła  $-15^{\circ}\text{C}$ , wobec czego grzałki rozstawione były co 20 cm.



Rys. 7. Rzut stropu kondygnacji powtarzalnej opisywanego budynku wielorodzinnego.

W omawianym przypadku grzałki stropu zostały wpuszczone w belkę, wobec czego nie użyto dodatkowych grzałek do ogrzewania elementów belkowych. Elementy te mają większą grubość niż strop i są dodatkowo wychładzane z trzech stron (od spodu szalunku). O potrzebie zwrócenia szczególnej uwagi na te fragmenty świadczą zdjęcia z kamery termowizyjnej z innej inwestycji (rys. 8), gdzie widać pola o obniżonej temperaturze, odpowiadające położeniu belek stropowych [12].



Rys. 8. Brak instalacji elektronagrzewu w belkach stropowych. Na zdjęciach termowizyjnych widać obszary o niższej temperaturze, odpowiadające położeniu belek stropowych, (fot. K. Owczarska).

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono zdjęcia ułożonych grzałek w betonowanym elemencie stropowym. Należy dodać, że grzałki umieszcza się na dolnej siatce, ponieważ strumień ciepła unosi się ku górze.





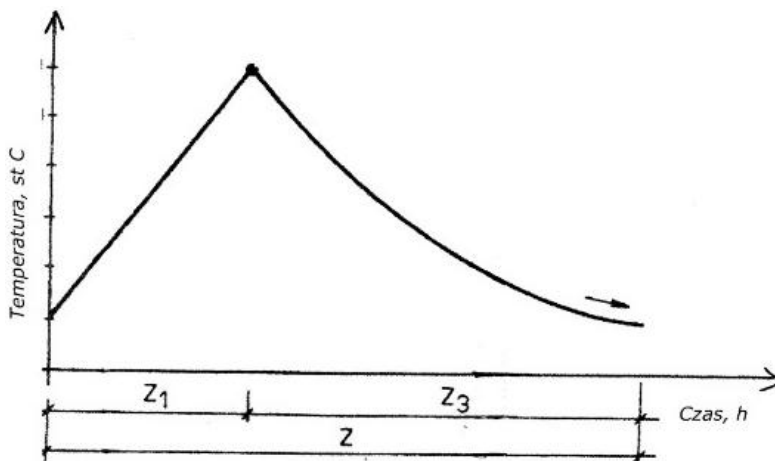
Rys. 9 i 10. Instalacja elektonagrzewu dla omawianego stropu kondygnacji +4, (fot. K. Owczarska).

W celu określenia schematu przebiegu procesu elektonagrzewu obliczono moduł powierzchniowy według wzoru (1):

$$M = \frac{F}{V} = \frac{435,24}{130,00} = 3,35 \frac{1}{m} < 6 \frac{1}{m} \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – powierzchnia strat ciepła elementu [ $m^2$ ],  $V$  – objętość masy betonowej elementu [ $m^3$ ].

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w [11], poniżej wartości równej 6 modułu powierzchniowego (1), proces elektonagrzewu powinien przebiegać według krzywej na rysunku 11.



Rys. 11. Cykl cieplny dla projektowanej instalacji elektonagrzewu stropu o module powierzchniowym  $M < 6 m^{-1}$  ( $Z_1$  – podnoszenie temperatury,  $Z_3$  – studzenie), [11]

Betonowanie elementu rozpoczęto około godziny 10.00. Tego dnia temperatura powietrza wynosiła  $-9^{\circ}C$  (tab. 1). Prognozy nie przewidywały spadku temperatury poniżej  $-15^{\circ}C$ . W celu analizy temperatury zewnętrznej w najbardziej newralgicznym okresie dla betonu, w tablicy 1 przedstawiono rejestr pomiarów dla pierwszych 24 godzin od momentu rozpoczęcia betonowania, z częstotliwością co godzinę.

Z uwagi na niską temperaturę, przed rozpoczęciem betonowania dodatkowo podgrzano deskowanie za pomocą koksowników ustawionych pod stropem oraz oczyszczono je z zalegającej wody, śniegu i innych zanieczyszczeń. Mieszanka dostarczona na budowę była zgodna

z recepturą zimową, a składniki mieszanki zostały dodatkowo podgrzane na węźle betoniar-skim. Temperatura dostarczonej mieszanki wynosiła od 9 do 12°C. Podczas betonowania panowały bardzo trudne warunki atmosferyczne, z uwagi na duże i intensywne opady śniegu. Dodatkowo odnotowano brak ciągłości dostaw betonu. W związku z powyższymi utrudnieniami, betonowanie trwało do późnych godzin nocnych i zakończyło się około 24.00, przy temperaturze powietrza -12,9°C. Niekorzystane działanie mrozu potęgowane było wiatrem na odsłoniętej, wyniesionej przestrzeni oraz opadami śniegu. Po zakończeniu betonowania przystąpiono do procesu elektronagrzewu. Należy podkreślić, że betonowanie trwało około 14 godzin i przez cały ten czas świeżo ułożony beton nie był chroniony przed wpływem obniżonych temperatur. Jest to, w ocenie autorów, jeden z bardzo niekorzystnych aspektów stosowania systemu elektronagrzewu. Jednocześnie problem ten nie jest szeroko poruszany, również w literaturze. System elektronagrzewu jest tak zaprojektowany, że dopiero po całkowitym wypełnieniu betonem elementu, można uruchomić cały proces. Dzieje się tak z uwagi na dwa aspekty. Pierwszy to zasada działania systemu. Każda grzałka połączona jest z transformatorem dwoma przewodami (zasilanie i powrót prądu) w sposób równoległy, zapewniający takie samo napięcie na każdej z nich. Drugi to konieczność całkowitego zanurzenia grzałki w betonie, w przeciwnym przypadku, opór grzałki staje się na tyle duży, iż dochodzi do jej przepalenia. Przepalona grzałka o relatywnie dużej długości, wyłącza z procesu obróbki cieplnej znaczący fragment elementu.

Tablica 1. Dane meteorologiczne od momentu rozpoczęcia betonowania oraz przez kolejne 24 godziny z częstotliwością co godzinę [źródło: <https://meteomodel.pl>]

Termin pomiaru		Temperatura	Wilgotność	Prędkość wiatru
Dzień	Godzina	[°C]	[%]	m/s
27.01.2012	10:00	-9.0	70	6
	11:00	-8.5	67	6
	12:00	-8.1	64	6
	13:00	-8.2	63	6
	14:00	-8.8	66	6
	15:00	-9.6	68	5
	16:00	-10.2	72	4
	17:00	-10.6	74	5
	18:00	-11.2	77	5
	19:00	-11.6	79	5
	20:00	-12.5	83	3
	21:00	-12.5	85	4
	22:00	-12.6	83	3
23:00	-12.7	85	3	
28.01.2012	00:00	-12.9	86	3
	01:00	-12.8	86	3
	02:00	-12.7	86	4
	03:00	-12.9	86	4
	04:00	-12.8	87	4
	05:00	-12.8	87	4
	06:00	-12.6	87	4
	07:00	-12.2	85	5
	08:00	-11.3	81	6
	09:00	-10.2	76	6
10:00	-9.2	71	6	

Ponadto nagrzewanie betonu też nie jest natychmiastowe, z uwagi na bezwładność całego układu, a także dopuszczalne wartości temperatury maksymalnej i gradientu temperatur. Według [1], początek obróbki cieplnej powinien nastąpić nie później niż po 2–3 godzinach od zarobienia mieszanki na węźle betoniarskim. Wydaje się to być bardzo trudne wykonawczo, z uwagi na czas transportu, układania oraz przytoczony powyżej fakt możliwości rozpoczęcia elektronagrzewu dopiero po zakończeniu betonowania elementu.

Podczas prób uruchomienia systemu okazało się, że wiele grzałek uległo przepaleniu i w efekcie system w ogóle nie zadziałał. Skutkiem tego był fakt, iż świeżo ułożony beton pozostawał bez żadnego dodatkowego środka ochrony, narażony na warunki obniżonej temperatury. Temperatura zewnętrzna podczas kolejnych dni była coraz niższa, aż siódmego dnia osiągnęła wartość ekstremalną -18,7°C (tab. 3).

Tablica 3. Dane meteorologiczne od daty betonowania do daty wykonania odwiertów [źródło: <https://meteomodel.pl>]

Termin pomiaru	Temperatura	Wilgotność	Prędkość wiatru	Opad śniegu	
	[ °C]	[%]	m/s	[cm]	
<b>Okres betonowania</b> 13 dni	<b>27.01.2012</b>	<b>-10.2</b>	<b>76.8</b>	<b>4,80</b>	<b>2</b>
	28.01.2012	-10.4	75.6	4,80	2
	29.01.2012	-10.8	64.8	4,50	2
	30.01.2012	-12.2	73.8	4,80	2
	31.01.2012	-12.8	72.6	3,40	2
	01.02.2012	-15.0	76.9	3,40	2
	02.02.2012	-17.8	76.3	2,00	2
	03.02.2012	<b>-18.4</b>	76.6	1,80	2
	04.02.2012	-17.7	71.6	1,90	2
	05.02.2012	-16.7	70.3	3,30	2
	06.02.2012	-15.8	72.5	2,60	2
	07.02.2012	-10.6	77.0	3,90	2
08.02.2012	-8.7	66.0	1,50	2	
<b>Pobranie odwiertów</b>	<b>09.02.2012</b>	<b>-10.6</b>	<b>70.0</b>	<b>4,00</b>	<b>2</b>

Czas trwania elektronagrzewu przy temperaturze otoczenia do -5°C, wynosi około 12 h. W przypadku niższej temperatury zewnętrznej, czas ulega odpowiedniemu wydłużeniu. Temperatura, jaką grzałki ogrzewają mieszankę betonową wynosi 35–40°C.

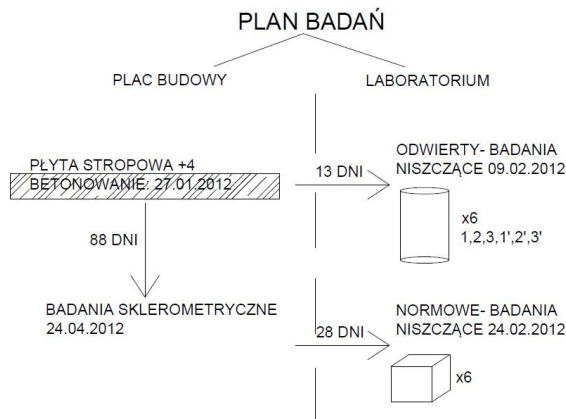
W celu określenia dopuszczalnej temperatury maksymalnej dojrzewającego betonu, można posłużyć się wytycznymi normy [6]. Dopuszczalna maksymalna temperatura wewnątrz elementu narażonego na ekspozycję warunków wilgotnych lub cyklicznego zwilżania, nie powinna przekraczać 70°C. Uzasadnieniem tego zalecenia jest zapis, że w przypadku narażenia betonu na działanie temperatury ponad graniczną, przez dłuższy czas, w jego początkowym okresie dojrzewania, można doprowadzić do powstania wtórnego etryngitu. Zagadnienie temperatury maksymalnej jest trudne do precyzyjnego określenia, ponieważ dodatkowo pojawia się w normie zapis o dopuszczeniu przekroczenia powyższej granicy, pod warunkiem wykazania, że nie wpłynie to w sposób szkodliwy na właściwości betonu. Ekspozycja na zbyt wysokie temperatury może powodować spadek wytrzymałości końcowej (projektowej) betonu, z uwagi dwa mechanizmy zniszczenia. Pierwszy, to uszkodzenie mikrostruktury betonu spowodowane rozszerzalnością termiczną – mikro zarysowania wewnętrzne, a drugi – zmniejszenie stopnia hydratacji cementu w późniejszych okresie

dojrzewania [11]. Ponadto, zgodnie z [1], nagrzewanie betonu powyżej temperatury 50°C możliwe jest pod warunkiem zapewnienia swobody odkształceń dojrzewającego betonu. Jak wskazano, brak zapewnienia tej swobody może doprowadzić do zniszczenia elementu.

Kwestia gradientu temperatury poruszana jest w literaturze głównie w aspekcie konstrukcji masywnych. Pojawiające się w elemencie różnice temperatur mogą powodować zarysowania, a nawet w stanie krytycznym – pęknięcia konstrukcji. W celu określenia stopnia ryzyka uszkodzenia konstrukcji można posłużyć się tabelą z [11]. Projektując obróbkę cieplną należy wziąć pod uwagę możliwe różnice pomiędzy powierzchnią elementu, stykającą się z niskimi temperaturami, a wnętrzem elementu. Korzystny wpływ na zmniejszenie wartości gradientu mają wszelkiego rodzaju osłony powierzchni, chroniące nie tylko przed utratą wilgoci, niską temperaturą, ale także wychładzaniem od wiatru [11].

Z racji problemów, jakie pojawiły się na tej budowie oraz z uwagi na pogarszające się warunki atmosferyczne, kierownictwo budowy zdecydowało o przerwaniu wykonywania jakichkolwiek elementów konstrukcji. Przerwa trwała około dwóch tygodni. W tym czasie zlecono analizę jakości betonu w betonowanej płycie stropowej.

Plan badań (rys. 12) zakładał wykonanie sześciu odwiertów o średnicy 100 mm, w uzgodnionych z projektantem konstrukcji miejscach. Odwierty wykonano po 13 dniach od betonowania. W tym czasie element, poza osłonięciem powierzchni, nie był poddany żadnym innym zabiegom, polegającym na ochronie przed wpływem obniżonych temperatur.

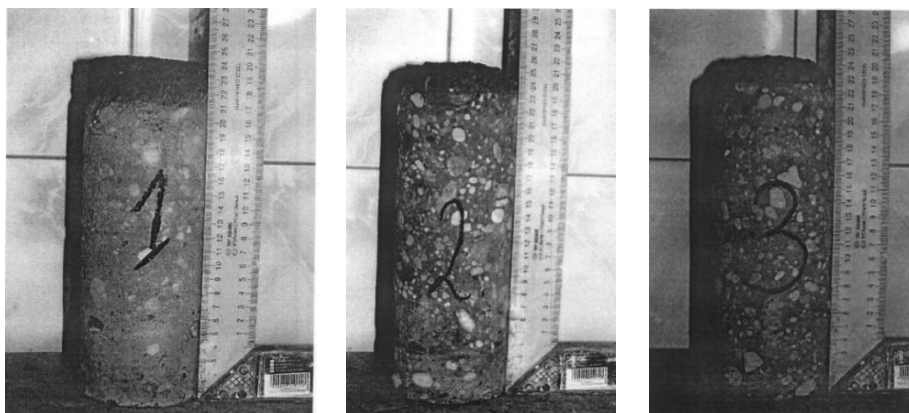


Rys. 12. Plan badań przemrożonego elementu stropowego konstrukcji.

Z uwagi na tolerancje wykonawcze, pobrane rdzenie miały wysokość w przedziale 24–25 cm. Po oględzinach odwiertów (rys. 13) stwierdzono występowanie przemrożonej górnej warstwy betonu, grubości od 1,5 do 2 cm, ale co ważne, pręty zbrojenia górnego znajdowały się poniżej przemrożonej strefy. W wyniku kontroli wizualnej odwiertów stwierdzono, że w ich górnej strefie występują mikrodefekty (mikrorysy, schropowacenie powierzchni) będące skutkiem zniszczeń mrozowych. Takich defektów nie stwierdzono w dolnej części rdzeni, co potwierdza tezę o braku przemrożenia betonu od dolnej powierzchni stropu. Przed ułożeniem mieszanki w deskowaniu zostało ono dodatkowo podgrzane od dołu przez około 4 godziny przed rozpoczęciem betonowania, w celu usunięcia zalegającego śniegu oraz utrzymania temperatury szalunku powyżej 0°C. Ograniczyło to efekt gradientu temperatury na styku mieszanki betonowej i deskowania, co przyczyniło się do braku przemrożenia dolnej, rozciąganej powierzchni stropu oraz redukcji niekorzystnych naprężeń termicznych. Po rozdeskowaniu stropu i kontroli wizualnej stropu, nie stwierdzono objawów przemrożenia dolnej powierzchni betonu, zwykle możliwych do zidentyfikowania nieuzbrojonym okiem.

Z operatów geodezyjnych oraz pomierzonej wysokości rdzeni wynikało, że wykonawcy zachowali projektową grubość stropu, z miejscowymi pogrubieniami. Ostatecznie wykonany strop charakteryzował się grubością nie mniejszą niż 24 cm, co okazało się znaczące w aspekcie projektowanej otuliny zbrojenia. W projekcie wykonawczym zaprojektowano otulinę zbrojenia stropów kondygnacji powtarzalnych, wynoszącą 2,5 cm dla pierwszego kierunku (X) i 3,5 cm dla drugiego kierunku (Y) (rys. 7).

Z pobranych rdzeni usunięto przez odcięcie górną, przemarznąjącą część i poddano badaniom niszczącym. Próbki oznaczone 1,2,3 wykonane zostały z górnej części rdzeni, a próbki 1',2',3' (tab. 4) – z dolnej części. Powierzchnia próbek została także wyrównana warstwą zaprawy szybkowiążącej o grubości 2–3 mm. Elementy rdzeniowe pobrano z konstrukcji w terminie 13 dni od momentu zabetonowania konstrukcji. Badania niszczące przeprowadzono, gdy wiek próbek wynosił 16 dni, z czego 3 dni znajdowały się one w warunkach atmosferycznych zewnętrznych, ale poza konstrukcją. Badania przeprowadzono zgodnie z normą [13] oraz [15], a wyniki badania przedstawiono w tablicy 3. Normy, na które powołano się w referacie były aktualne w czasie wykonywania konstrukcji oraz przeprowadzania badań i analiz. Normy te zostały zastąpione innymi, ale co do zasady, podstawowe założenia i wymagania nie zmieniły się w sposób znaczący, który powodowałby potrzebę korekty otrzymanych wyników badań.



Rys. 13. Odwierty rdzeniowe pobrane z konstrukcji.

Tablica 4. Wyniki badań niszczących rdzeni pobranych z konstrukcji

Lp.	Oznaczenie próbek	Maksymalne obciążenie przy zniszczeniu [kN]	Wysokość próbek [mm]	$f_c$ [MPa]	$f_{cSR}$ [MPa]
1	1	193	92	28,4	28,5
2	2	197	92	29,0	
3	3	218	92	32,1	
4	1'	184	88	27,1	
5	2'	189	89	27,8	
6	3'	180	93	26,5	

Realizując standardową procedurę kontroli jakości betonu podczas wykonywania prac żelbetowych, w trakcie betonowania elementu na placu budowy, pobrano także próbki do badań niszczących. Wykonano sześć próbek sześciennych o wymiarach 150' 150' 150 mm. Zostały pobrane i przechowywane w warunkach laboratoryjnych, zgodnie z normami [17] oraz [16]. Po 28 dniach wykonano badania niszczące zgodnie z normą [15], a ich wyniki

przedstawiono w tabelicy 5. Porównanie otrzymanych wyników, w odniesieniu do wymagań normowych, przedstawiono w tabelicy 6.

Tablica 5. Wyniki badań niszczących normowych elementów kostkowych przechowywanych w warunkach laboratoryjnych

Lp.	Data badania	Maksymalne obciążenia niszczące [kN]	$f_c$ [MPa]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Opad stożka [mm]	Temp. Mieszanki [°C]
1	24.02.2012	960	42,7	2300	150	9
2		909	40,4	2300	150	9
3		923	41,0	2300	150	9
4		900	40,0	2290	130	12
5		943	41,9	2290	130	12
6		973	43,2	2290	130	12

Tablica 6. Wyniki badań niszczących rdzeni pobranych z konstrukcji w porównaniu do wymagań normowych

Wartości obliczone na podstawie danych uzyskanych z badania niszczącego (tab. 4)	Wymagania zgodnie z normą [19] dla projektowanej klasy C30/37
$f_{cm} = 41,9$ MPa	$f_{cm} \geq 41,0$ MPa
$f_{ci,min} = 40$ MPa	$f_{ci,min} \geq 33$ MPa

Na podstawie laboratoryjnych badań niszczących dla próbek przechowywanych w warunkach normowych, stwierdzić można, iż zastosowana mieszanka spełnia wymóg stawiany projektowej klasie C30/37. Badania odwiertów z konstrukcji wskazują, iż beton w konstrukcji w wieku 16 dni osiągnął wytrzymałość odpowiadającą klasie C20/25. Podana wartość odnosi się do betonu bez warstwy przemrożonej, która została usunięta. W celu uzupełnienia powyższych wyników wykonano badania konstrukcji na placu budowy metodą nieniszczącą sklerometryczną. Użyto do tego młotka Schmidta typu N. Od czasu betonowania upłynęło wtedy 88 dni. Badaniom poddano górną, przemrożoną warstwę płyty stropowej w celu sprawdzenia jaką osiągnęła ona wytrzymałość na ściskanie. Badania prowadzono w oparciu o normę [14] oraz instrukcję [18], a wyniki przedstawiono w tabeli 7.

Tablica 7. Wyniki badań nieniszczących metodą sklerometryczną przemrożonej płyty stropowej

Lp.	Odczyt $L_i$									$L_i$	$\pm\Delta L$	średni sprow. $L_i$	$(L_i - L')$	$(L_i - L')^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
1	26	22	25	24	27	26	25	25	25	25,0	3,1	28,1	-0,2	0,0400
2	23	26	27	26	25	27	27	28	25	26,0	3,0	29,0	0,7	0,4900
3	23	25	25	24	27	25	25	25	25	24,9	3,1	28,0	-0,3	0,0900
4	23	25	25	24	24	26	25	25	27	24,9	3,1	28,0	-0,3	0,0900
5	25	25	27	27	25	26	26	25	25	25,7	3,0	28,7	0,4	0,1600
6	25	24	25	25	25	26	26	26	24	25,1	3,0	28,1	-0,2	0,0400
Wiek betonu = 88 dni										$\Sigma =$		169,9	0,1	0,9100

W uzupełnieniu do powyższej tabeli: kąt  $\alpha = -90$ ,  $L_i$  = odczyt średni,  $\pm\Delta L$  – poprawka kątowna.

Ostatecznie w wyniku obliczeń uzyskano następujące wartości:

–  $L' = 28,3$ ,  $s_L = 0,43$ ,  $v_L = 1,51\%$ ,  $k_{fc} = 0,95$ ,  $\sigma_{(SR)} = 0,77$  MPa,  $v_{fc} = 3,22\%$ ,

–  $f_{cm} = 23,8$  MPa,  $f_{ck,min} = 22,7$  MPa.

Podsumowując analizę sklerometryczną otrzymano wyniki jak poniżej:

- wytrzymałość charakterystyczna:  $f_{ck} = 22,7$  MPa,
- wytrzymałość doraźna betonu wynosi: 23,8 MPa,
- klasa wytrzymałości betonu: C20/25.

Zaprojektowana grubość stropu równa 24 cm, wynikała głównie z wymogów architektonicznych oraz zgodnie z informacją od inwestora, zachowania odpowiedniej akustyki, a nie z obliczeń na podstawie stanów granicznych. Na podstawie analizy, przeprowadzonej przez konstruktora obiektu (z obliczeń projektowych i niskich wskaźników wyężenia elementu) wynikało, iż przy rzeczywistej klasie C20/25 jest ona wystarczająca dla spełnienia stanów granicznych stropu. Dodatkowo stwierdzono, że powierzchnia dolna elementu nie uległa przemrożeniu, w wyniku prawdopodobnie podgrzania deskowania. Okazało się to znaczące, ponieważ w zginanym elemencie konstrukcji, w dolnym przekroju występuje rozciąganie. W rezultacie nie zastosowano więc żadnych dodatkowych napraw i zabezpieczeń, poza skutkiem przemrożonej warstwy na połączeniu z wykonywanymi elementami pionowymi.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Podczas prowadzenia prac w warunkach obniżonych temperatur niezbędne jest podjęcie zabiegów, mających na celu ochronę świeżego betonu. Do dyspozycji jest wiele metod, ale w praktyce najczęściej stosuje się ich kombinację. W opisywanym w referacie przypadku stosowano, jak w wielu podobnych sytuacjach, elektronagrzew w połączeniu z okrywaniem powierzchni elementu. Niezależnie od niepodważalnej skuteczności tej metody, w opisywanym przypadku z uwagi na kumulację szeregu niekorzystnych okoliczności, nie osiągnięto w pełni efektów ochrony betonu przed zamarznięciem. Czynniki te, związane z przebiegiem betonowania oraz niedostateczna kontrola instalacji elektronagrzewu sprawiły, że pielęgnacja cieplna okazała się nieskuteczna. Pomimo to, nie były konieczne żadne naprawy i zabezpieczenia, ze względu na wykazany obliczeniowo zapas nośności, wynikający z grubości stropu, przyjętej głównie z uwagi na wymagania architektoniczne.

Od opisanego przypadku minęło 10 lat. Z kolejnych doświadczeń autorów wynika, że w obecnie projektowanych konstrukcjach taki przypadek byłby mało realny, ponieważ o grubości płyty stropowej nie decydują aktualnie względy inne niż konstrukcyjne. Przedstawiony w referacie przykład pokazuje, jak ważne jest odpowiednie zaplanowanie i przygotowanie do prowadzenia prac w warunkach obniżonych temperatur. Praktyka pokazuje jednak, iż często brak jest procedur ustalających standardy dotyczące projektu instalacji elektronagrzewu oraz przeprowadzania i kontroli samego procesu. Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń i systemów do ciągłej rejestracji temperatury wraz z oprogramowaniem do wyznaczania przyrostu wytrzymałości betonu, np. z wykorzystaniem metody krzywej dojrzałości [9]. Takie systemy oferują zazwyczaj firmy specjalizujące się w usługach kontroli temperatury wewnątrz betonu, głównie w konstrukcjach masywnych oraz kontroli narastania wytrzymałości. W praktyce, w przypadku wielu inwestycji, skomplikowane pomiary, prowadzone przez specjalistyczne firmy, mogą nie sprawdzić się w warunkach placu budowy, a także generuje to zwiększone koszty. Tym istotniejsza staje się więc kwestia opracowania prostych standardów obróbki termicznej na placu budowy, z których mógłby korzystać każdy pracownik nadzoru budowy. Przedstawiony przykład pokazuje także, jak spiętrzenie niekorzystnych zdarzeń, z których każde pojedynczo nie byłoby zagrożeniem, w działaniu synergicznym prowadzi do poważnych problemów wykonawczych.

#### Literatura

1. Wykonywanie robót budowlanych w okresie obniżonej temperatury, Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej, nr 282/2020,
2. Bukowski B., „Technologia betonu. Budownictwo betonowe – tom I, część 1, Spoiwo, kruszywa, woda”, Arkady, Warszawa 1963 r,



3. Woyciechowski P., Jackiewicz-Rek W., Pielęgnacja betonu. Metody i zasady, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji / Jasiński R. (red.), PZITB, Szczyrk 2018, t. 3 s. 141–200,
4. ACI 306R-16, „Guide to cold weather concreting”,
5. Jamróży Z., „Beton i jego technologie”, Warszawa 2005 r,
6. PN-EN 13670:2011 „Wykonywanie konstrukcji z betonu”,
7. Owczarska K., Szmigiera E. „Wpływ elektronagrzewu na właściwości betonu w konstrukcji, Dni Betonu 2014, str. 1107–1116,
8. Wrochna S., „Materiały budowlane i technologia betonów, część III: Technologia betonów i zapraw”, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1984 r,
9. A. Mariak, K. Wilde, Wyznaczanie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11,
10. Roboty budowlane w warunkach zimowych, Budownictwo i Architektura, Warszawa 1955 r,
11. Bajorek. G., „Pielęgnacja betonu w okresie dojrzewania”, Stowarzyszenie producentów Cementu, Kraków 2017,
12. K. Owczarska, E. Szmigiera, P. Woyciechowski "Błędy wykonawcze związane ze stosowaniem elektronagrzewu betonu", Monografia Awaryjne Budowlane 2017, s. 923–934,
13. PN-EN 12504-1:2009, „Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Odwierty rdzeniowe – Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie”,
14. PN-EN 12504-2: 2002, „Badania betonu w konstrukcjach – Część 2: Badanie nieniszczące – Oznaczanie liczby odbicia”,
15. PN-EN 12390-3:2009, „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”,
16. PN-EN 12390-2:2011, „Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”,
17. PN-EN 12350-1:2011, „Badania mieszanki betonowej – Część 1: Pobieranie próbek”,
18. Instrukcja ITB nr 210 (1977): Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji. Warszawa, ITB,
19. PN-EN 206-1:2003, „Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.

### **Evaluation of the effects of frozen concrete in the slab – problems of electroheating**

**Abstract:** In Poland, the period of lower temperatures occurs on average from November 15 to March 15, which makes for the entire quarter of the year. In order to continuously carry out construction production, it is required and necessary to apply measures aimed at protecting concrete against the adverse effects of frost. Many methods are known, but their combinations are the most common. One of the methods can be the use of electrofusion heating of concrete, also known as electroheating. However, it should be remembered that the care of concrete using the electron-heating method is a complex issue and depends on many parameters that may change over time. Therefore, the entire heat treatment process should be properly designed and carried out under the control of competent persons. Practice shows, however, that in many cases there are no procedures setting standards for the design of the electroheating installation and the conduct and control of the process itself. How important it is to implement an appropriate control system has been presented in this paper, on the example of a floor slab of a residential building structure that has been frozen.

**Key words:** frozen concrete, concrete heat treatment, electrofusion, lowered temperatures, maintenance in low temperature conditions