

BŁĘDY WYKONAWCZE ZWIĄZANE ZE STOSOWANIEM ELEKTRONAGRZEWU BETONU

KAMILA OW CZARSKA, e-mail: k.owczarska@il.pw.edu.pl

ELŻBIETA SZMIGIERA

ZAKŁAD KONSTRUKCJI BETONOWYCH, Politechnika Warszawska

PIOTR WOYCIECHOWSKI

Zakład Inżynierii Materiałów Budowlanych, Politechnika Warszawska

Streszczenie: Elektronagrzew jest coraz bardziej popularną metodą, stosowaną na placu budowy podczas wznoszenia konstrukcji w warunkach obniżonej temperatury. W referacie przedstawiono wpływ wybranych czynników, zarówno konstrukcyjnych jak i technologicznych, na przebieg procesu elektronagrzewu. Na podstawie własnych doświadczeń oraz badań, przeprowadzonych w warunkach konkretnej budowy z użyciem techniki termowizyjnej, opisano najczęściej popełniane błędy przy projektowaniu i wykonywaniu elektronagrzewu oraz ich wpływ na jakość betonu w konstrukcji. Różnice temperatury pojawiające się w wiążącym i twardniejącym betonie mogą wpływać niekorzystnie na rozkład naprężeń. W wyniku tego może dojść do niekontrolowanego zarysowania konstrukcji bądź wychłodzenia fragmentu konstrukcji, przez co lokalnie beton nie osiągnie wymaganej w projekcie wytrzymałości na ściskanie. W niniejszej pracy przedstawiono badania własne mające na celu zobrazowanie błędów, z którymi autorzy spotkali się podczas stosowania procesu elektronagrzewu.

Słowa kluczowe: elektronagrzew, betonowanie w warunkach obniżonej temperatury, pielęgnacja betonu zimą, termowizja, dojrzewanie betonu

1. Wprowadzenie

Elektronagrzew jest coraz bardziej popularną metodą pielęgnacji betonu w warunkach zimowych. Pozwala ona na prowadzenie prac żelbetowych w temperaturze do -15°C , dzięki czemu oszczędza się nie tylko czas ale i koszty prowadzonej inwestycji.

Pielęgnacja betonu za pomocą elektronagrzewu jest bardzo złożona, ze względu na dużą ilość czynników wpływających na jego skuteczność. Zależy ona zarówno od rodzaju samej konstrukcji jak i składu mieszanki betonowej oraz zewnętrznych warunków atmosferycznych. Podstawowym założeniem procesu elektronagrzewu jest stworzenie odpowiednich warunków dojrzewania betonu, aż do momentu uzyskania przez niego pełnej odporności na zamrożenie. Bardzo ważną czynnością podczas elektronagrzewu jest kontrola temperatury wewnątrz betonu, za pomocą czujników umieszczonych w wykonywanym elemencie. Monitoring ma na celu potwierdzenie uzyskania równomierności rozkładu temperatury oraz co za tym idzie osiągnięcia przez element wymaganej wytrzymałości. Zbyt duże różnice pojawiające się w wiążącym i twardniejącym betonie wpływają niekorzystnie na rozkład naprężeń w twardniejącym betonie. W wyniku nierównomiernego rozkładu temperatury w elemencie może nastąpić wychłodzenie fragmentu konstrukcji, przez co lokalnie beton nie osiągnie wymaganej wytrzymałości. Ponadto, w wyniku zbyt dużej amplitudy temperatury, w elemencie wystąpić mogą niekorzystne naprężenia, których skutkiem bardzo często jest niekontrolowane zarysowanie konstrukcji. W efekcie założenia projektowe dotyczące stanów granicznych konstrukcji nie są spełnione.

W niniejszej pracy autorzy przedstawili po krótkce charakterystykę metody elektronagrzewu z uwzględnieniem czynników wpływających na jego prawidłowy przebieg. Referat zawiera także analizę błędów, z którymi autorzy spotkali się podczas wykonywania konstrukcji w warunkach niskiej temperatury. W celu lepszej interpelacji ich przyczyn i skutków zostały one zobrazowane za pomocą zdjęć z kamery termowizyjnej.

2. Proces elektronagrzewu w warunkach obniżonej temperatury

W [6] zdefiniowano warunki obniżonej temperatury jako okres, w którym średnia dobową temperatura spada poniżej 10°C . Kwestię niekorzystnego wpływu niskiej temperatury na rozwój wytrzymałości betonu przedstawiono w [1]. W związku z tym wymagane jest stosowanie specjalnych zabiegów mających na celu stworzenie optymalnych warunków dojrzewania betonu. Jednym z nich jest metoda elektronagrzewu, która jest coraz częściej stosowana na polskich budowach.

Najkorzystniejsze warunki wiązania odpowiadają przedziałowi od 15 do 20°C . W niższej temperaturze następuje spowolnienie wiązania, co jest szczególnie widoczne w temperaturze poniżej 10°C , a poniżej 0°C wiązanie ustaje.

W celu określenia rodzaju zmian zachodzących w betonie podczas działania niskiej temperatury zewnętrznej wyróżniono trzy okresy o zróżnicowanym stopniu szkodliwości działania mrozu:

Przed rozpoczęciem wiązania

W mieszance betonowej, która uległa zamrożeniu przed rozpoczęciem wiązania znajduje się zamarznięta woda zarobowa, która zwiększa jego objętość. Wynikiem tego jest brak wody potrzebnej do rozpoczęcia reakcji chemicznych, a to skutkuje opóźnieniem lub zatrzymaniem procesu hydratacji. W efekcie, nie dochodzi do zniszczenia struktury betonu. Po odmrożeniu mieszanki betonowej należy jedynie ponownie ją zawibrować, aby usunąć dodatkowe pory powstałe w procesie zamarzania wody. Taki beton charakteryzuje się tylko nieznacznie niższą wytrzymałością, która jest wynikiem słabszej siły wiązania zaczynu cementowego i kruszywa.

Pomiędzy początkiem i końcem wiązania

Dojrzewanie w warunkach niskich temperatur w tym okresie powoduje zniszczenie nowych produktów hydratacji cementu. Zjawisko to jest bardzo niebezpieczne i im później nastąpi zamarznięcie tym zniszczenia struktury będą większe.

Od zakończenia wiązania do momentu uzyskania przez beton pełnej odporności na zamrożenie

W tym okresie zamarznięciu ulega pozostała woda po procesie hydratacji. Destrukcji ulega mikrostruktura betonu, a to powoduje spadek jego wytrzymałości.

W nawiązaniu do wyżej wymienionych punktów, najbardziej niebezpieczne dla elementu żelbetowego jest zamarznięcie po rozpoczęciu wiązania, a przed uzyskaniem przez niego odporności na zamrożenie, której odpowiada tzw. wytrzymałość krytyczna. Zgodnie z normą [7]: „temperatura powierzchni betonu nie powinna spadać poniżej 0°C dopóki wytrzymałość na ściskanie w jego warstwie powierzchniowej nie osiągnie wartości co najmniej 5 MPa ”. W wytycznych [2] podano wartości wytrzymałości krytycznej dla betonów wykonanych z różnych cementów.

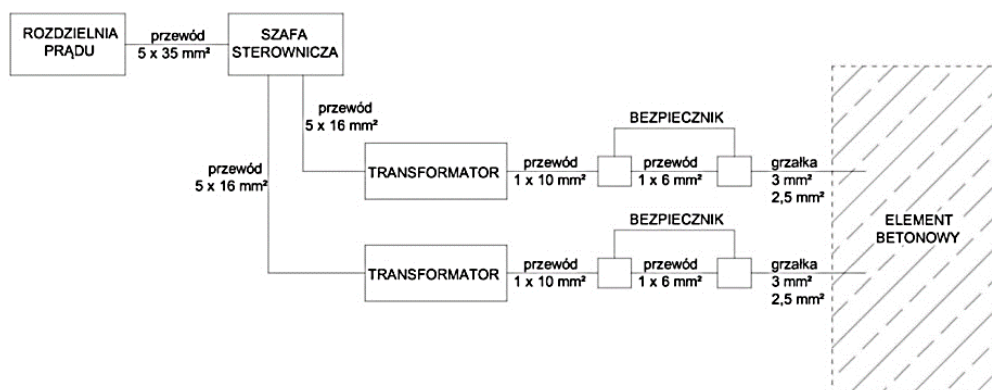
Proces elektronagrzewu stosowany jest w najbardziej niebezpiecznej drugiej fazie. Ma on na celu przyspieszenie wiązania i twardnienia betonu, aby osiągnął on wymaganą odporność na zamrożenie, po przekroczeniu której element może zostać poddany działaniu niskiej temperatury, bez obaw o zniszczenie jego struktury. Po uzyskaniu wymaganej odporności beton praktycznie nie traci na wytrzymałości końcowej, a jedynie uzyskuje ją później, ponieważ w okresie zamrożenia jest zahamowany przyrost wytrzymałości. Wpływ procesu elektronagrzewu na właściwości betonu w konstrukcji przedstawiono w [3].

Technologia procesu elektronagrzewu

Skuteczność pielęgnacji betonu przy zastosowaniu elektronagrzewu wymaga spełnienia szeregu warunków, związanych z użyciem odpowiednich materiałów oraz rozmieszczeniem i zamocowaniem poszczególnych elementów systemu.

System elektronagrzewu składa się z następujących elementów (rys. 1.):

- instalacji elektrycznej do nagrzewania prądem elektrycznym o obniżonym napięciu,
- grzałek oporowych (rdzenie grzewczych),
- sieci przewodów (rozdzielczych, zasilających),
- elementów uzupełniających, np. taśmy izolacyjnej.



Rys. 1. Schemat instalacji elektronagrzewu (K. Owczarska)

Podstawowym elementem grzewczym są grzałki (rdzenie grzewcze), ułożone w betonowanym elemencie i wykonane z izolowanych drutów oporowych. Podczas przepływu prądu przez drut grzewczy wydzielane jest ciepło, które zostaje przekazane mieszance betonowej. Produkowane są grzałki o różnej oporności, dostarczane na plac budowy w kręgach, takich jak przedstawione na rysunku 2. Drut oporowy jest rozdzielony na pojedyncze grzałki o długości od 24 do 32 m. Do ogrzewania pionowych elementów żelbetowych, stosowane są najczęściej grzałki o przekroju przewodu $2,5 \text{ mm}^2$, natomiast do elementów stropowych – o przekroju 3 mm^2 (rys. 2).

Pojedyncze grzałki łączone są z przewodami, wychodzącymi z transformatora, za pomocą plastikowych złączy. Każda grzałka połączona jest z transformatorem dwoma przewodami (zasilanie i powrót prądu) (rys. 2) w sposób równoległy, zapewniający takie samo napięcie na każdej z nich.

System elektronagrzewu został tak zaprojektowany, aby był bezpieczny dla ludzi. Dlatego też napięcie robocze, wychodzące z transformatora, jest obniżane z wartości 400 V do 42 V.



Rys. 2. Z lewej: grzałki stosowane do elektrooporowego grzania betonu; z prawej: połączenie grzałki przewodem zasilającym i powrotnym z transformatorem za pomocą plastikowych złączek (fot. K. Owczarska)

Na rysunku 2 przedstawiono podłączenie grzałki, przewodem zasilającym i powrotnym, do transformatora (czerwony i czarny przewód) oraz plastikowe pomarańczowe złączki. Połączenie przez złączki musi być zabezpieczone za pomocą taśmy izolacyjnej, przed dostępem do niego wody z betonu. Końce grzałek połączone z przewodami zasilającymi należy umieścić w odległości około 8 cm poniżej górnej powierzchni betonu. W przeciwnym razie, w wyniku braku odpowiedniego otulenia betonem, grzałka może ulec przepaleniu.

Bardzo ważną czynnością podczas przeprowadzania elektronagrzewu, jest kontrola temperatury wewnątrz betonu. Czujniki temperatury (rys. 3) umieszczane są w betonowanym elemencie, w plastikowych rurkach osłonowych i połączone są z miernikami w szafie sterującej. Rurki osłonowe dają możliwość ponownego wykorzystania czujników temperatury. Umieszczenie czujek wewnątrz elementu pozwala uzyskiwać dokładne wyniki rozkładu temperatur w betonie. Odległość stacji sterującej od źródła zasilania powinna być jak najkrótsza i nie przekraczać 50 m.



Rys. 3. Czujnik temperatury (fot. K. Owczarska)

W celu uzyskania rzetelnych danych o jakości procesu elektronagrzewu, istotne jest odpowiednie usytuowanie czujników temperatury w elemencie. Możliwość sprawdzenia równomiernego rozkładu temperatur w betonie uzyskuje się, umieszczając dwa komplety czujników, w tym jeden jak najbliżej, a drugi jak najdalej grzałki.

Każdy komplet składa się z czujników ułożonych w następujący sposób:

- I czujnik w odległości 5–10 cm od góry elementu,
- II czujnik w odległości 5–10 cm od dołu elementu,
- III czujnik w 1/3 wysokości elementu mierzonej od dołu.

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.

Odległości między poszczególnymi grzałkami zależą od grubości elementu oraz od zewnętrznej temperatury, w której wykonywane jest betonowanie. W elementach poziomych o grubości do 40 cm, odstęp między grzałkami wynosi:

- od 20 do 40 cm, przy temperaturze od -5 do $+5^{\circ}\text{C}$,
- od 15 do 20 cm, przy temperaturze od -15 do -5°C .

W elementach poziomych o grubości powyżej 40 cm, należy stosować systemy grzałek umieszczone w dwóch rzędach. Natomiast w elementach pionowych, wymagane jest aby stosować:

- jedną warstwę grzałek w rozstawie do 20 cm przy temperaturze od -5 do $+5^{\circ}\text{C}$,
- dwie warstwy grzałek w rozstawie do 20 cm przy temperaturze od -15 do -5°C .

Przy temperaturze zewnętrznej poniżej -15°C , nie wykonuje się betonowania elementów konstrukcji na wolnym powietrzu.

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.

Do celów projektowych przyjmuje się, że jedna grzałka powinna ogrzewać około 1 m^3 betonu. W elementach pionowych grzałki umieszcza się w odległości około 10 cm od dolnej krawędzi elementu, ponieważ zdarza się, że w celu usunięcia śniegu i lodu stosowane jest opalanie palnikami styku między stropem a betonowym elementem. W kontakcie z płomieniem palnika następuje zniszczenie izolacji, a w konsekwencji przepalenie grzałki. Często stosowaną praktyką, w odniesieniu do elementów pionowych, jest również montowanie grzałek w odległości około 10–15 cm od górnej powierzchni betonu tak, aby nie uległy przepaleniu, na przykład, w przypadku niepełnego wypełnienia betonem.

Czas trwania elektronagrzewu, przy temperaturze do -5°C , wynosi 12 h. W przypadku niższych temperatur zewnętrznych, czas ulega odpowiedniemu wydłużeniu. Temperatura, jaką grzałki ogrzewają mieszankę betonową wynosi od 35 – 40°C . Na rysunku 4 przedstawiono rozmieszczenie grzałek w różnych elementach konstrukcyjnych.



Rys. 4. Rozmieszczenie grzałek: z lewej – w płycie stropowej, z prawej – w ścianie (fot. K. Owczarska)

Wymagania dotyczące mieszanki betonowej poddanej elektronagrzewowi

Stosowanie elektronagrzewu wymaga, by użyta w konstrukcji mieszanka betonowa gwarantowała uzyskanie klasy wytrzymałości betonu C20/25 i wyższej. Wskazane jest użycie cementów portlandzkich (CEM I) i portlandzkich wieloskładnikowych (CEM II) o klasie wytrzymałości minimum 32,5. Stosując cement klasy 32,5 należy zadbać, aby charakteryzował się wysoką wczesną wytrzymałością (cement oznaczony literą R). Cementy wieloskładnikowe (CEM II) klasy 32,5 powinny zawierać do 20% dodatku mineralnego. W przypadku tych cementów należy również ograniczyć udział popiołu lotnego do 10%. Korzystne jest również, aby zastosowany cement charakteryzował się wysokim ciepłem hydratacji, zapewniającym mieszance betonowej wysoką temperaturę przez możliwie długi czas.

Podstawowym wymaganiem w stosunku do kruszyw, stosowanych do betonu narażonego na działanie niskich temperatur, jest ich niska wodoządnosć. Dodatkowo, do produkcji betonów mrozoodpornych, wskazane jest użycie kruszyw odpornych na działanie mrozu.

W przypadku stosowania elektronagrzewu, dąży się także do ograniczenia ilości wody w mieszance betonowej. Zalecane jest, aby wartość wskaźnika wodno-cementowego nie była większa niż 0,5. Obowiązkowe jest też stosowanie domieszek przeciwmrozowych (według zaleceń producenta). Zgodnie z polską normą PN-EN 206-1, należy zapewnić temperaturę wbudowanego betonu nie niższą niż +5°C. Wymóg ten nakłada na producentów obowiązek wykonania mieszanki betonowej o podwyższonej temperaturze, uwzględniającej możliwy spadek temperatury podczas transportu. Temperatura układanej mieszanki betonowej powinna być wyższa i uwzględniać możliwe jej obniżenie w kontakcie z zimnym szalunkiem, który nie został wcześniej podgrzany. W tym przypadku ważna jest również wielkość powierzchni, w kontakcie z którą beton ulega wychłodzeniu. W celu określenia minimalnej temperatury wbudowania mieszanki betonowej w zależności od wielkości danego elementu posłużyć się można wytycznymi normy [9].

Zabiegi na placu budowy

Przed przystąpieniem do układania mieszanki betonowej, należy sprawdzić stan techniczny szalunków oraz zbrojenia. Wymagane jest także usunięcie śniegu, lodu lub wody, zalegających na tych szalunkach i zbrojeniu. Zabronione jest układanie betonu na przemarznięte powierzchnie szalunków, gruntu lub podkładu z betonu. Ponadto zaleca się, aby temperatura powierzchni złączy technologicznych w czasie betonowania była wyższa niż 0°C. Przy temperaturze powietrza poniżej -8°C rozładunek mieszanki betonowej należy tak przeprowadzić, aby czas postoju na placu budowy ograniczyć do minimum. Układanie mieszanki betonowej powinno być wykonywane możliwie szybko, aby nie dopuścić do nadmiernego obniżenia jej temperatury. Zagęszczanie mieszanki betonowej powinno przebiegać w sposób ciągły. Należy unikać nadmiernej vibracji, mogącej spowodować segregację składników lub powstanie słabej warstwy powierzchniowej.

Kolejnym bardzo ważnym aspektem jest pielęgnacja wbudowanego betonu. Jej celem jest ochrona świeżego betonu przed utratą ciepła i niedopuszczenie do jego zamrożenia, aż do momentu osiągnięcia wymaganej, bezpiecznej wytrzymałości. Wskazane jest również zachowanie odpowiedniego poziomu wilgotności, niezbędnego do prawidłowego przebiegu hydratacji. Ochrona przed niekorzystnym działaniem warunków atmosferycznych, takich jak mróz, wiatr i śnieg, może być realizowana przez osłonięcie powierzchni betonu.

Kontrola i monitoring procesu elektronagrzewu

Proces obróbki cieplnej betonu za pomocą elektronagrzewu wymaga odpowiedniego systemu kontroli oraz monitoringu. Wszyscy pracownicy, wykonujący elektronagrzew, muszą zostać odpowiednio przeszkoleni. Szkolenie obejmuje, zarówno montaż i obsługę urządzeń, jak i zasady zachowania bezpieczeństwa i higieny pracy, z uwzględnieniem ochrony przeciwpożarowej, związanej z pracą stosowanych pod napięciem urządzeń.

Podczas całego procesu obróbki cieplnej betonu należy stale monitorować temperaturę betonu. Do tego celu służą czujniki temperatury, umieszczone zgodnie z podanymi powyżej wytycznymi. Monitoring ma na celu sprawdzenie poprawności przebiegu procesu oraz potwierdzenie uzyskania równomierności rozkładu temperatury. Odczytów temperatury należy dokonywać nie rzadziej niż co 6 godzin. W przypadku, gdy w czasie 12 godzin, beton nie osiągnie wymaganej wytrzymałości bezpiecznej, proces należy wydłużyć o kolejne 6 godzin. Wyniki pomiarów temperatury są zapisywane w karcie obróbki cieplnej betonu.

3. Badania własne autorów

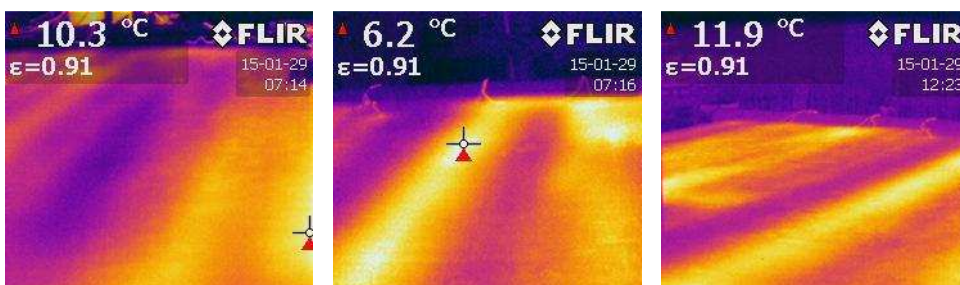
Badania prowadzono na placu budowy, podczas wznoszenia konstrukcji budynku mieszkalnego w Warszawie. Realizowane były w miesiącach styczeń i luty 2015 r. Elektronagrzew zastosowano jako podstawową metodę pielęgnacji betonu w warunkach zimowych. Poza tym procesem i użyciem mieszanki betonowej „zimowej” inne zabiegi nie były wykonywane. W tym okresie średnie dobowe temperatury spełniały definicję obniżonej temperatury (przedział temperatury od -5 do $+2^{\circ}\text{C}$). Receptura mieszanki betonowej zakładała użycie cementu klasy pierwszej (CEM I). Do wykonywania elementów żelbetowych stosowano systemowe deskowanie, które w przypadku stropów zostało wypełnione materiałem ze sklejki. Podczas badań, po umieszczeniu instalacji w elemencie konstrukcyjnym, wykonano zdjęcia rozkładu grzałek. Następnie po zabetonowaniu, w trakcie procesu elektronagrzewu, wykonano zdjęcia techniką termowizyjną. Użycie kamery termowizyjnej pozwoliło na zaobserwowanie rozkładu temperatury panującej w betonie. Za pomocą zdjęć cyfrowych udokumentowano stan powierzchni betonu po zakończonym procesie elektronagrzewu. Analizie poddano elementy konstrukcji żelbetowej, takie jak słupy, ściany i płyty stropowe.

Przeprowadzone badania pozwoliły na zaobserwowanie wielu nieprawidłowości w procesie wykonawczym, prowadzących do zmniejszenia efektywności elektronagrzewu, a w konsekwencji do obniżenia jakości betonu w konstrukcji.

Nieodpowiednio zaprojektowany rozkład grzałek

Zbyt duży rozstaw grzałek.

Umieszczone poniżej zdjęcia z kamery termowizyjnej (rys. 5) przedstawiają sytuację, w której rozstaw grzałek jest nieodpowiednio dobrany. Praktycznie można na nich zauważyć położenie grzałek, w obszarach tych beton ma odpowiednio wyższą temperaturę. Efektem takiego rozmieszczenia grzałek są duże powierzchnie, gdzie uzyskano temperaturę -5°C . Ponadto otrzymano różnicę temperatury od 10 do 15°C na odcinkach dużo mniejszych niż 1 mb elementu. Prowadzi to do zróżnicowania stopnia dojrzewania betonu. Widoczne jest to na zdjęciach cyfrowych powierzchni betonu po zakończonym elektronagrzewie. W miejscach, gdzie panowała mniejsza temperatura, barwa betonu jest wyraźnie ciemniejsza (rys. 6).



Rys. 5. Rozkład temperatury w betonie podczas procesu elektronagrzewu, jaśniejsze pola to miejsca usytuowania rdzeni grzewczych, ciemniejsze – obszar pomiędzy nimi. Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze -5°C , natomiast jasnożółte pola od 6 do 10°C (fot. K. Owczarska)



Rys. 6. Widok powierzchni betonu po zakończonym procesie elektronagrzewu. Ciemniejsze pola przedstawiają powierzchnię, gdzie panowała niższa temperatura (fot. K. Owczarska)

Nadmierna koncentracja grzałek

Zaobserwowano również bardzo niekorzystną sytuację, w której element uległ zjawisku szoku termicznego, spowodowanego zbyt dużym gradientem temperatury.

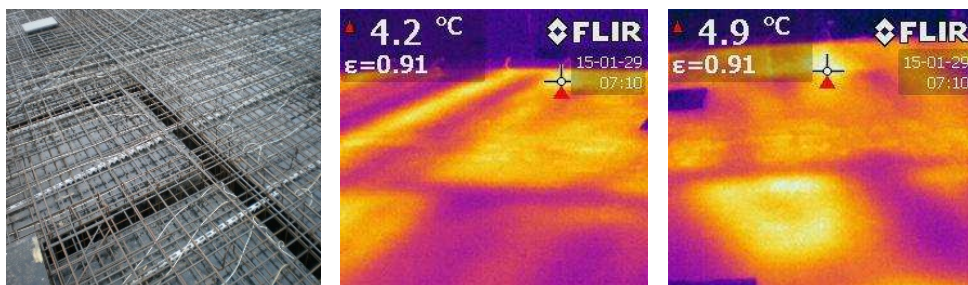


Rys. 7. Usytuowanie grzałek w narożniku konstrukcji. Na zdjęciach termowizyjnych widoczne są obszary, gdzie panowała wysoka temperatura, związana z koncentracją rozmieszczenia grzałek (fot. K. Owczarska)

W narożniku klatki schodowej skoncentrowane zostały instalacje z przyległych ścian. W efekcie wystąpiła tam temperatura nawet do 75°C , przy zewnętrznej równej -5°C (rys. 7). Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze w przedziale od -2 do -3°C , natomiast jasnożółte pola od 72 do 74°C .

Brak instalacji grzewczej belek stropowych.

Kolejnym bardzo niekorzystnym zjawiskiem było nieumieszczenie rdzeni grzewczych w belkach stropowych (rys. 8). 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 (rys. 8), gdzie widać pola o obniżonej temperaturze odzwierciedlające przebieg elementów belkowych. W tym przypadku między belkami widać pola, gdzie udało się uzyskać równomierną temperaturę.

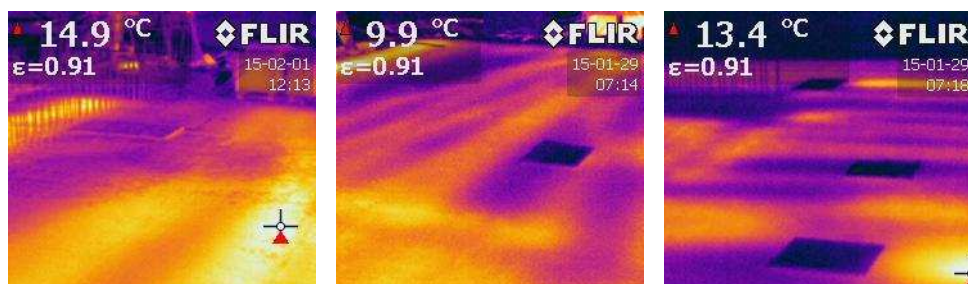


Rys. 8. Brak instalacji elektronagrzewu w belkach stropowych. Na zdjęciach termowizyjnych widać obszary o niższej temperaturze, odpowiadające położeniu belek stropowych. Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze w przedziale od -5 do -6°C, natomiast jasnożółte pola od 4 do 5°C (fot. K. Owczarska)

Zbyt duże odległości rdzeni grzewczych od otworów technologicznych.

Fragmenty stropu, gdzie znajdują się otwory technologiczne wymagają szczególnej uwagi osób wykonujących instalację elektronagrzewu. W miejscach tych następuje dodatkowe wychłodzenie mieszanki betonowej poprzez zwiększoną powierzchnię kontaktu z zimnym szalunkiem.

Doświadczenia autorów pokazują, iż w wielu przypadkach rdzenie grzewcze są bardzo odsunięte od krawędzi otworów (rys. 10). Wynika to z obawy wykonawców o ryzyko niedokładnego wypełnienia mieszanką betonową okolicy otworów, co spowodować może spalenie się całej grzałki już na początku procesu, a w efekcie wyłączenie fragmentu stropu z elektronagrzewu. Zdjęcia termowizyjne obrazują, że takie działania wpływają bardzo niekorzystnie na rozkład temperatury w betonie, wyraźnie widoczne są obszary wokół otworów, gdzie temperatura jest znacząco niższa (rys. 9). Różnice w warunkach dojrzewania betonu widoczne są na zdjęciu powierzchni betonu, po zakończonym procesie. Beton wokół otworu ma wyraźnie ciemniejszą barwę (rys. 10).



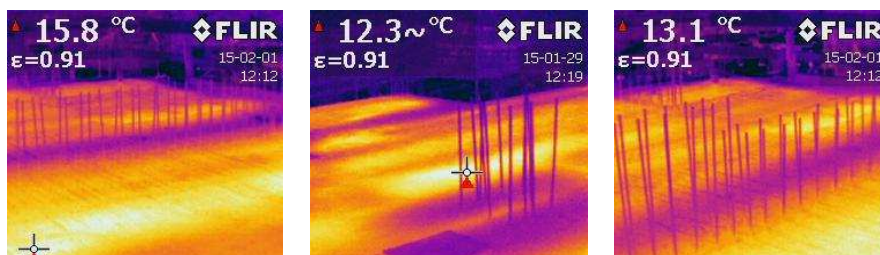
Rys. 9. Zdjęcia termowizyjne rozkładu temperatury podczas procesu elektronagrzewu. Widoczne pola o mniejszej temperaturze wokół otworów stropowych. Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze w przedziale od -4 do -5°C, natomiast jasnożółte pola od 10 do 14°C (fot. K. Owczarska)



Rys. 10. Z lewej – rozmieszczenie grzałek w okolicy otworów stropowych. Widoczny obszar bez elementów grzewczych. Z prawej – zdjęcie powierzchni stropu po zakończonym procesie elektronagrzewu (fot. K. Owczarska)

Brak instalacji elektronagrzewu w miejscach styku z wcześniej wykonaną konstrukcją.

Analiza miejsc połączeń betonowanych elementów z fragmentami konstrukcji wykonanych wcześniej pokazuje, iż są to obszary, na które należy zwrócić szczególną uwagę projektując proces elektronagrzewu. W trakcie badań autorzy zauważyli, iż wykonawcy nie umieszczali w tych miejscach specjalnej instalacji, grzałki rozmieszczone były w takim samym rozstawie jak w całym elemencie. Wykonana wcześniej konstrukcja poprzez ekspozycję na warunki niskiej temperatury, ma temperaturę porównywalną z temperaturą otoczenia. Ułożona mieszanka betonowa stykająca się z zimnym elementem, również jest intensywnie wychładzana. Dotyczy to obszarów takich jak: połączenie stropu z wykonywanymi ścianami i słupami, styku w miejscu przerw roboczych stropów i ścian. W pierwszym przypadku na zdjęciach termowizyjnych widoczne są ciemniejsze pola, świadczące o niższej temperaturze betonu (rys. 11). Efektem tego, iż beton nie uzyskał temperatury jaką zakładał proces elektronagrzewu, są widoczne fragmenty o ciemniejszej barwie na powierzchni betonu (rys. 12).



Rys. 11. Zdjęcia termowizyjne stropu podczas elektronagrzewu. Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze w przedziale od -4 do -6°C , natomiast jasnożółte pola od 11 do 15°C (fot. K. Owczarska)



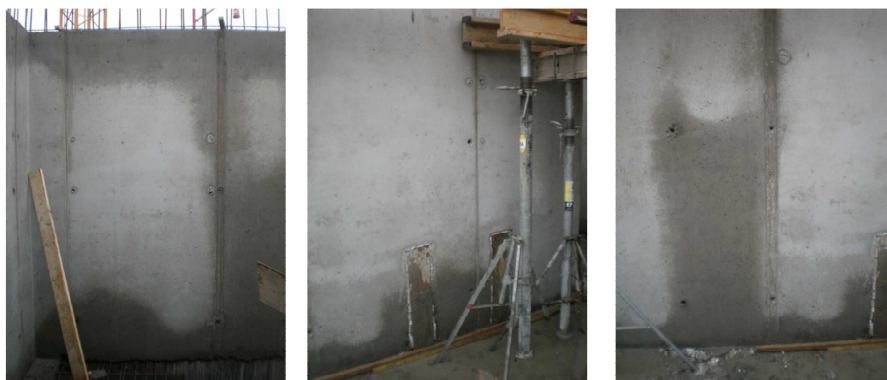
Rys. 12. Zdjęcia powierzchni stropu. Miejsca wychłodzenia betonu mają ciemniejszą barwę (fot. K. Owczarska)

Niekorzystną sytuację zauważono również w miejscu przerwy roboczej stropu. Zdjęcie termowizyjne przedstawia obszar o znacznie niższej temperaturze (rys. 13). W efekcie na powierzchni płyty stropowej otrzymano dokładne odzwierciedlenie dojrzewania elementu w różnych warunkach (rys. 13).



Rys. 13. Z lewej zdjęcie termowizyjne styku w miejscu przerwy roboczej stropu. Po prawej obraz powierzchni stropu. Pola o kolorze granatowym pokazują obszary o temperaturze -3°C , natomiast jasnożółte pola 7°C (fot. K. Owczarska)

Podczas analizy pionowych elementów konstrukcyjnych, autorzy zwrócili uwagę, iż wykonawcy nie układali grzałek w miejscach bruzd instalacyjnych. Ponadto zostały one odsunięte od krawędzi stropu, aby zapęłnić im otulenie betonem i uniknąć przepalenia podczas czyszczenia styku płyta-ściana np. za pomocą palnika. Na powierzchni betonu zauważyć można obszary o znacznie ciemniejszej barwie (rys. 14), świadczące o różnym stopniu dojrzłości elementu.



Rys. 14. Powierzchnia betonu po procesie elektronagrzewu. Beton ma ciemniejszą barwę w miejscu styku wykonywanego elementu z już istniejącym (fot. K. Owczarska)

4. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie doświadczeń autorów i badań własnych można sformułować następujące wnioski dotyczące problemów związanych z prawidłową realizacją elektronagrzewu:

- obszary narażone na wychłodzenie takie jak belki stropowe, otwory technologiczne oraz połączenia z wykonaną wcześniej konstrukcją nie mogą być pomijane w projekcie rozmieszczenia grzałek,
- zarówno nadmierne zagęszczenie jak i za rzadkie rozmieszczenie grzałek prowadzi do obniżenia jakości betonu; w pierwszym przypadku spowodowanej szokiem termicznym lub przegrzaniem betonu, w drugim – niedostateczną dojrzłością,

– nieodpowiednia pielęgnacja powierzchniowa betonu w trakcie elektronagrzewu może intensyfikować negatywne skutki powyższych błędów.

Należy podkreślić, że opisane błędy nie dotyczą tylko analizowanego przypadku, są popełniane bardzo często na wielu budowach. Autorzy zwracają uwagę, iż łatwe jest wyeliminowanie wymienionych w referacie błędów wykonawczych. W tym celu wymagana jest większa świadomość i znajomość zagadnienia u wszystkich osób przeprowadzających i nadzorujących proces elektronagrzewu. Praktyka pokazuje jednak, iż w wielu przypadkach brak jest procedur ustalających standardy dotyczące projektu instalacji elektronagrzewu oraz przeprowadzania i kontroli samego procesu. Postępowanie opiera się na wiedzy empirycznej i doświadczeniu zdobywanemu podczas kolejnych realizacji. Złożoność procesu wymaga wiedzy i doświadczenia nie tylko od wykonawców, ale także od wytwórni betonu oraz projektanta konstrukcji, zakłada również konieczność współpracy pomiędzy nimi. W wielu przypadkach osoby te nie zdają sobie sprawy z mnogości czynników wpływających na odpowiednie dojrzewanie betonu podczas stosowania elektronagrzewu.

Literatura

1. Sok Sambath Heng: Wpływ obniżonej temperatury na rozwój wytrzymałości betonu, Konferencja Dni Betonu 2010.
2. Instrukcja ITB nr 282: Wykonywanie robót budowlanych w okresie obniżonej temperatury, ITB, Warszawa 2011.
3. Owczarska K., Szmigiera E.: Wpływ elektronagrzewu na właściwości betonu w konstrukcji, Konferencja Dni Betonu 2014, s. 1107–1116.
4. Owczarska K., Szmigiera E.: Elektronagrzew jako metoda pielęgnacji betonu, Materiały Budowlane 01/2015, s. 60–61.
5. Szmigiera E., Owczarska K. Wpływ stosowania elektronagrzewu w warunkach niskich temperatur na właściwości betonu w konstrukcji, rozdz. VI, Monografia: „Beton i konstrukcje z betonu – badania”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015, s. 65–80.
6. PN-88/B-06250: Beton zwykły.
7. PN-EN 13670: Wykonywanie konstrukcji z betonu.
8. PN-EN 206:2014: Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
9. ACI 306R-16: Guide to Cold weather concreting.

THE RISK ANALYSIS OF EXECUTIVE ERRORS RELATED TO THE USE OF ELECTROFUSION HEATING PROCESS

Abstract: Electrofusion concrete heating is a popular method used at the construction site during works related to the monolithic reinforced concrete structures at low temperatures. The paper presents the influence of selected factors, both structural and technological. Based on own experience and research, carried out on the specific construction site with the use of thermography, authors describe the most common mistakes in designing and implementing electrofusion heating process and their impact on the quality of concrete in construction. Temperature differences appearing in a binding and hardening concrete can adversely affect the distribution of stresses. It may result in uncontrolled cracking of elements or hypothermia of the portion of structure, which locally may cause that concrete does not reach the required project compressive strength. This paper presents the effect of the research and study related to the executive errors with which the authors met during the application of electrofusion concrete heating process.

Keywords: electrofusion heating, concreting at low temperatures, curing concrete in winter, thermography, maturation of concrete