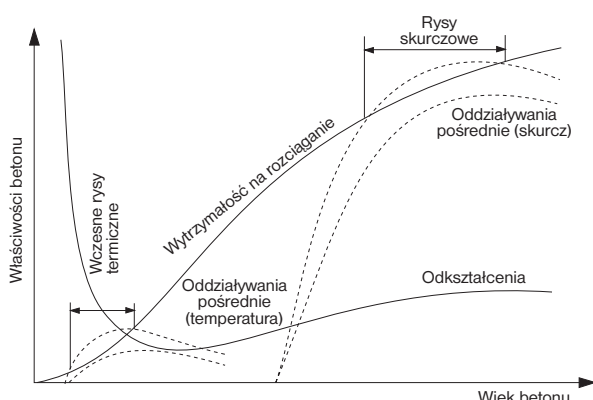


# Uszkodzenia młodego betonu konstrukcji masywnych

Beton konstrukcji masywnych poza wpływami otoczenia narażony jest na oddziaływania wewnętrzne, związane ze wzrostem temperatury generowanej ciepłem hydratacji cementu. Wpływom termicznym towarzyszą naprężenia, które mogą doprowadzić do rys i pęknięć wykonanych fragmentów konstrukcji.

Zarysowania betonu pojawiają się wówczas, gdy naprężenia osiągają wartość wyższą od jego wytrzymałości na rozciąganie. W procesie wiązania i twardnienia betonu niebezpieczeństwo tego, że naprężenia wewnętrzne będą wyższe od uzyskanych już wytrzymałości nie jest tendencją stałą. Ryzyko tworzenia się rys termicznych jest największe w początkowym okresie hydratacji cementu, w którym beton charakteryzują niskie wytrzymałości oraz minimalne odkształcenia graniczne (rys. 1).



Rys. 1. Właściwości mechaniczne twardniejącego betonu i zagrożenie tworzenia się rys

Wpływ wysychania, generującego odkształcenia skurczowe betonu, jest istotny w okresie późniejszym. Wyniki badań i obserwacji w naturze wskazują na zróżnicowany czas tworzenia się uszkodzeń betonu oraz trudności podania jednej przyczyny. Poza znaczeniem ciepła twardnienia cementu oraz zmian wilgotności wewnętrznej materiału, na tworzenie się rys w twardniejącym betonie wywierają m.in. wpływ: na osiadanie świeżej mieszanki betonowej, skurcz plastyczny, zmiany temperatur zewnętrznych, obecność deskowań oraz korozja zbrojenia i reakcje chemiczne. Ogólną charakterystykę spotykanych uwarunkowań tworzenia się rys w wyniku oddziaływań pośrednich i bezpośrednich podano w tabelicy 1.

## Mechanizm wpływów termicznych

Bezpośrednim następstwem egzotermicznego procesu wiązania i twardnienia spoiwa cementowego jest wzrost temperatury betonu wewnątrz konstrukcji. Niejednorodne i niestacjonarne pola temperatury twardniejącego betonu kształtowane są w zależności od:

- ilości i rodzaju stosowanego cementu

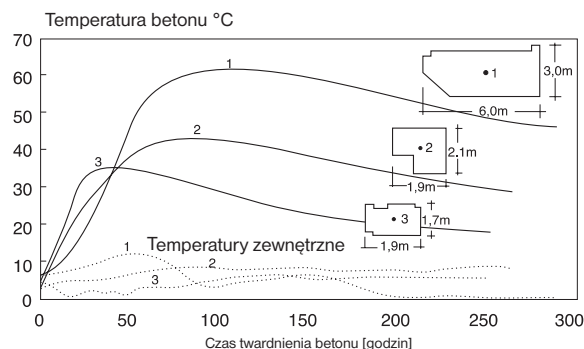
Tablica 1. Ogólna charakterystyka uwarunkowań tworzenia się rys

Faza rozwoju struktury betonu	Przyczyny tworzenia się uszkodzeń	Czas
Świeży beton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• osiadanie mieszanki betonowej</li> <li>• skurcz plastyczny</li> </ul>	1 ÷ 2 h 2 ÷ 4 h
Młody beton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• naprężenia własne wywołane niejednorodnym polem temperatury i wilgotności w konstrukcjach masywnych,</li> <li>• naprężenia wymuszone wywołane quasi-jednorodnym cyklem zmian temperatury konstrukcji średniomasywnych</li> </ul>	12 ÷ 36h
Beton stwardniały	<ul style="list-style-type: none"> <li>• naprężenia wymuszone wywołane quasi-jednorodnym cyklem zmian temperatury konstrukcji masywnych,</li> <li>• naprężenia własne i wymuszone wywołane skurczem,</li> <li>• korozja zbrojenia,</li> <li>• procesy chemiczne – reakcja alkaiczna</li> </ul>	1 <sup>m</sup> ÷ 3 <sup>m</sup> 1 <sup>m</sup> ÷ 12 <sup>m</sup> > 12 <sup>m</sup> 2 ÷ 5 <sup>l</sup>

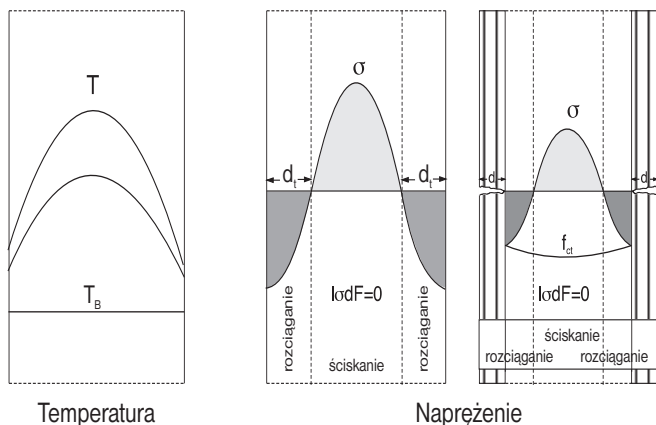
- przewodności i pojemności cieplnej betonu
- intensywności wymiany ciepła z otoczeniem
- temperatury początkowej mieszanki betonowej i temperatury otoczenia
- wymiarów i proporcji geometrycznych realizowanego fragmentu konstrukcji
- wpływów sąsiednich bloków betonowych.

Obserwacje w naturze wskazują, że w jądrze konstrukcji masywnej 3,0 m grubości warunki twardnienia betonu zbliżone są do adyabatycznych, a jego temperatury osiągają wartość 50 ÷ 70°C. Przykładowe wyniki badań temperatur średnich betonu płyt górnych fundamentów pod turbozespoły elektrowni konwencjonalnych, o zróżnicowanych przekrojach rygli podano na rys. 2. Jednocześnie jednak już w ścianie betonowej 0,4 m grubości, do wykonania której użyto szybkotwardniejącego cementu wysokiej klasy, przy niekorzystnych warunkach zewnętrznych oraz szybkiej rotacji deskowań, mogą ujawnić się wczesne zarysowania i pęknięcia generowane wpływem naprężeń wymuszonych. Stąd też ściśle określenie „prugu czułości” konstrukcji betonowej na wpływy termiczne jest zadaniem trudnym (rys. 2).

Lokalne wyętnienie twardniejącego betonu zależne jest zarówno od jego składu, wymiarów geometrycznych bloku oraz warunków zewnętrznych, jak i warunków brzegowych określających możliwość swobody odkształcenia wykonanego fragmentu konstrukcji. Stąd też zazwyczaj mechanizm wpływów termicz-



Rys. 2. Temperatury twardnienia betonu w ryglach płyt górnych fundamentów TG 55÷500 MW



Rys. 3. Kwalitatywny rozkład temperatury i naprężeń w swobodnej ścianie betonowej w fazie wzrostu temperatury

nych omawiany jest w odniesieniu do wyidealizowanych przypadków „bloku swobodnego” oraz „pozbawionego swobody odkształcenia”.

### Uszkodzenia bloków swobodnych

Naprężenia własne są wynikiem dystorsji, czyli odkształceń niezależnych od naprężeń. Z uwagi na to, że naprężenia własne przy braku sił objętościowych i obciążeń zewnętrznych muszą spełniać równania równowagi i warunki brzegowe, nazywane są również naprężeniami „samorównoważącymi się”. Rysy na powierzchni bloku tworzą się z reguły w początkowym okresie twardnienia betonu, gdy charakteryzują go małe odkształcenia graniczne, a intensywność wydzielania ciepła hydratacji osiąga maksimum. Jakościowy rozkład naprężeń w przekroju swobodnej płyty betonowej w fazie wzrostu temperatury przedstawia rys. 3.

Niejednorodny wzrost temperatury w przekroju bloku wywołuje zarysowania powierzchni betonu. Z uwagi na zróżnicowaną wartość modułu sprężystości w przekroju twardniejącego betonu rozkład naprężeń nie jest ściśle podobny do rozkładu temperatury. Głębokość zarysowania –  $d_z$ , obejmuje część przypowierzchniowej strefy rozciąganego betonu –  $d_t$ . W okresie późniejszym naturalnego studzenia, w następstwie procesów reologicznych oraz zróżnicowanych warunków twardnienia betonu w poszczególnych strefach konstrukcji, bryła naprężeń ulega inwersji. Powierzchnie bloku ulegają wówczas ścisaniu, podczas gdy beton w części wewnętrznej jest rozciągany. Z przeprowadzonych analiz wynika jednak, że w fazie studzenia naprężenia rozciągające w strefie środkowej bloku nie przekraczają wartości odpowiadających wytrzymałości betonu na rozciąganie. Rozwój utworzonych pierwotnie rys powierzchniowych, do pęknięć obejmujących cały przekrój bloku, jest więc mało prawdopodobny.

### Uszkodzenia bloków pozbawionych swobody odkształceń

Naprężenia wymuszone powstają w następstwie zmian objętościowych materiału występujących w warunkach statycznej niewyznaczalności ustroju lub innych, powodujących ograniczenie swobody odkształceń elementów konstrukcji. W praktyce wyróżnić można możliwość ograniczenia swobody odkształcenia wykonanego elementu na skutek oporu punktowego (element prętowy), liniowego (ściana oporowa) i powierzchniowego (element płytowy). Siły powierzchniowe o charakterze reakcji występujące w miejscach „oporów” spełniają warunki brzegowe dla naprężeń. Stąd też w odróżnieniu od naprężeń własnych naprężenia wymuszone nie są naprężeniami „samorównoważącymi się” (rys. 4).

W przypadku masywnych elementów betonowych pozbawio-

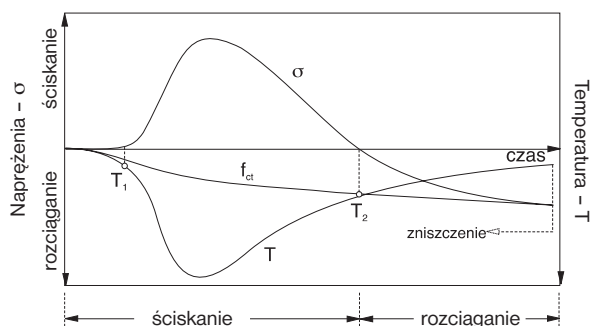
nych swobody odkształcenia mechanizm procesu zniszczenia obejmuje dwa zasadnicze okresy: samoociepnięcia betonu, czemu towarzyszy wzrost naprężeń ściskających, oraz studzenia elementu do temperatury otoczenia i rozwoju naprężeń rozciągających – rys. 4.

W krótkim okresie po ułożeniu mieszanki betonowej w deskowaniu w następstwie zachodzących w niej procesów fizyko-chemicznych obserwuje się pewien nieznaczny wzrost temperatury betonu, który do chwili początku wiązania nie wywołuje wzrostu naprężeń. Począwszy od pewnej temperatury  $T_1$  w młodym betonie następuje rozwój naprężeń ściskających, które rosną w miarę wzrostu temperatury betonu. Odkształcenia reologiczne betonu w okresie wzrostu temperatury obniżają wartość maksymalnych naprężeń ściskających, wpływając na ich przebieg w fazie studzenia betonu. W okresie tym następuje nieproporcjonalnie duży spadek naprężeń w stosunku do szybkości chłodzenia betonu. Związane jest to z wpływem procesów reologicznych oraz wyższą, w porównaniu z okresem wzrostu temperatury, wartością modułu sprężystości już stwardniałego betonu. W chwili uzyskania przez beton temperatury  $T_2$ , wyższej od temperatury początkowej mieszanki  $T_p$ , w konstrukcji następuje spadek naprężeń ściskających do zera. Dalsze schładzanie betonu do temperatury otoczenia wywołuje w niej rozwój naprężeń rozciągających. Przy dostatecznie dużej różnicy temperatur  $T_2 - T_p$  osiągają one wartość graniczną, doprowadzając do tworzenia się pęknięć.

### Metody ograniczania naprężeń termicznych

Zasadniczy wpływ na ograniczenie wyężenia betonu konstrukcji masywnych ma właściwy dobór składu mieszanki betonowej, przede wszystkim cementu. Należy stosować cementy o niskim cieple twardnienia, dążąc jednocześnie do zmniejszenia ich zawartości w jednostce objętości mieszanki. Wzrost temperatury wnętrza konstrukcji powinien być możliwie niski, przy jednoczesnym zachowaniu małych różnic pomiędzy temperaturami w poszczególnych punktach przekroju masywu. Porównywalny – z rodzajem użytego cementu – wpływ na wyężenie twardniejącego betonu ma zabieg wstępnego schłodzenia mieszanki poniżej temperatury otoczenia oraz obniżone temperatury prowadzenia robót. Właściwie kształtowane dylatacje oraz przerwy robocze w betonowaniu ograniczają wpływ oporów zewnętrznych, umożliwiając swobodę odkształceń termicznych wykonanego fragmentu konstrukcji. Odpowiednio dobrane zbrojenie masywnych elementów betonowych w stanie krytycznym tworzenia się rys może jedynie ograniczyć szerokość ich rozwarcia. Zasadniczy wpływ na obniżenie zagrożenia tworzenia się rys i pęknięć w twardniejącym betonie wywierają czynniki technologiczno-materiałowe, w tym również ochrona termiczna powierzchni betonu oraz jego pielęgnacja wilgotnościowa.

prof. Włodzimierz Kiernożycki  
Politechnika Szczecińska



Rys. 4. Temperatury i naprężenia termiczne w elemencie betonowym pozbawionym swobody odkształcenia