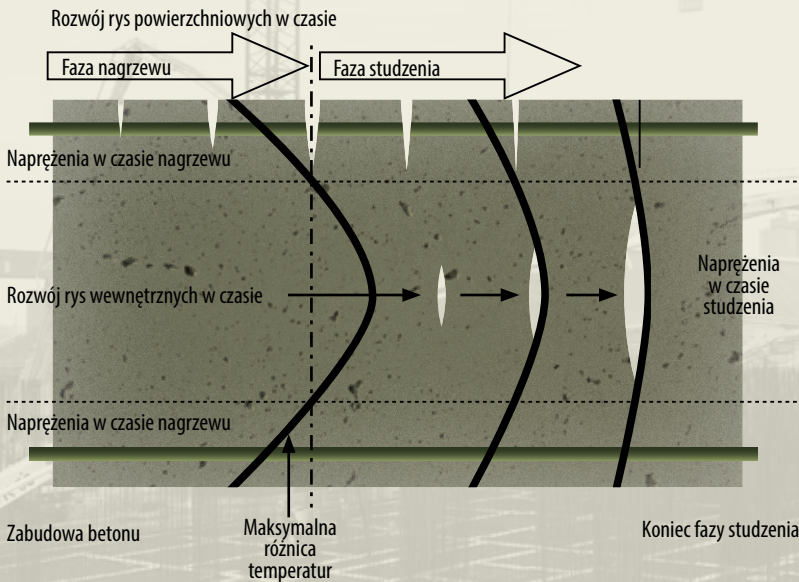
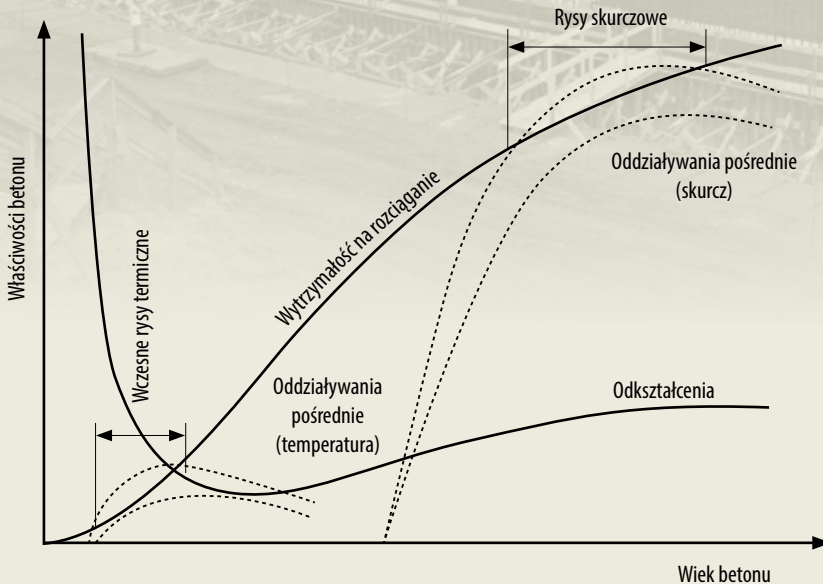


Efekty termiczne związane z hydratacją cementu nabierają szczególnego znaczenia w betonowych konstrukcjach masywnych. Powstająca w wyniku wydzielanego ciepła w procesie hydratacji cementu, różnica temperatur pomiędzy wnętrzem, a stosunkowo szybko chłodzoną powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego, prowadzi do powstania naprężeń termicznych. Może to w ekstremalnych warunkach skutkować powstawaniem rys w całej objętości elementu betonowego (rys. 1), prowadząc do obniżenia jego trwałości i skrócenia okresu użytkowania.



Rys. 1. Mechanizm powstawania rys w betonowym elemencie masywnym bez więzów zewnętrznych



Rys. 2. Właściwości mechaniczne betonu i zagrożenie tworzenia się rys w twardniejącym betonie

Zarysowania pojawiają się wówczas, gdy naprężenia osiągają wartość wyższą od wytrzymałości betonu na rozciąganie w danym stadium rozwoju struktury. 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 najwyższe w początkowym okresie hydratacji cementu, w którym młody beton charakteryzuje się niską wytrzymałością oraz minimalnym poziomem odkształceń granicznych (rys. 2).

Środki zaradcze ograniczające ryzyko zarysowania to przede wszystkim zabiegi technologiczne, mające na celu obniżenie temperatury twardnienia oraz zmniejszenie różnic pomiędzy temperaturą wnętrza i powierzchnią elementu. Wskazane jest, aby gradient temperatur nie przekraczał $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$, a maksymalna temperatura betonu we wnętrzu konstrukcji masywnej nie przekraczała 65°C .

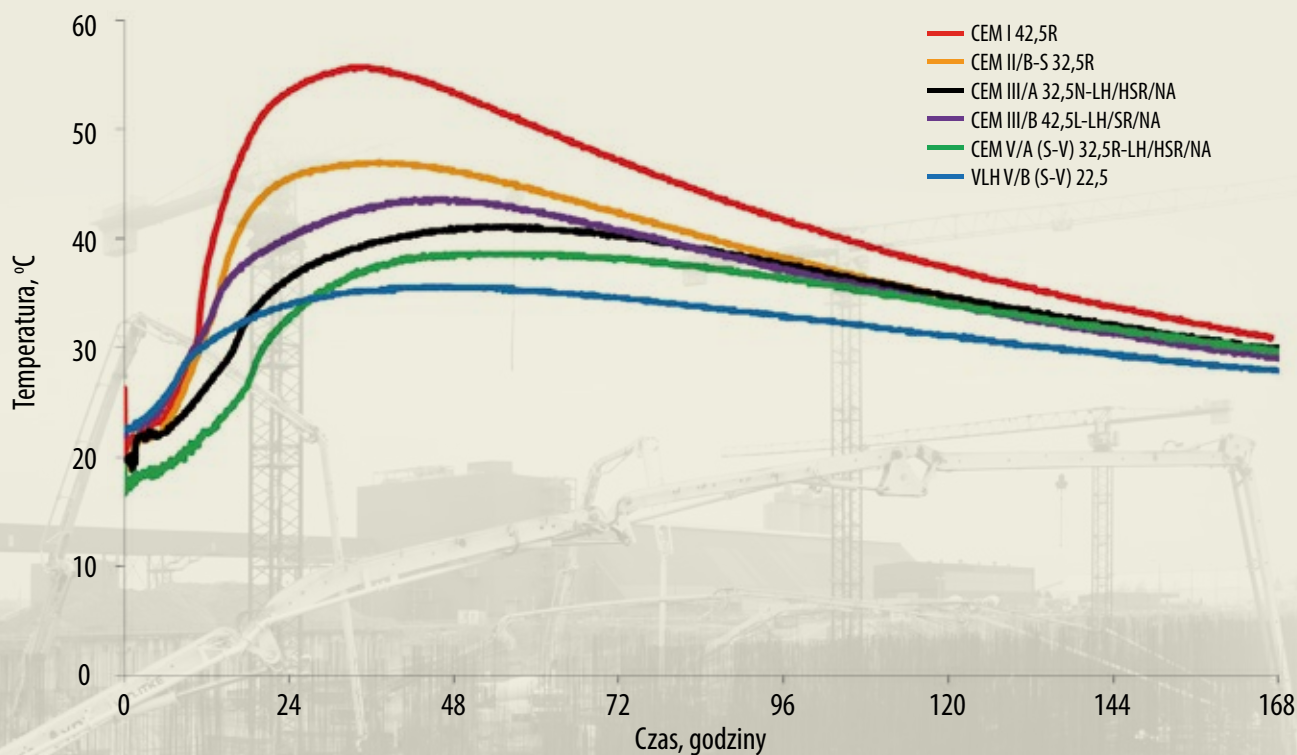
Czynniki wpływające na temperaturę twardnienia i ryzyko powstawania rys w betonowej konstrukcji masywnej przedstawiono w tabeli 1. Czynniki te dzielimy na materiałowe, które związane są odpowiednim doborem składników betonu oraz wykonawcze związane z procesem zabudowy mieszanki betonowej i pielęgnacji betonu.

Najefektywniejszą metodą ograniczenia temperatury twardnienia betonowego elementu masywnego jest „wprowadzenie” z zastosowanym spoiwem jak najmniejszej ilości ciepła z procesu hydratacji. Osiąga się to poprzez zastosowanie w składzie betonu:

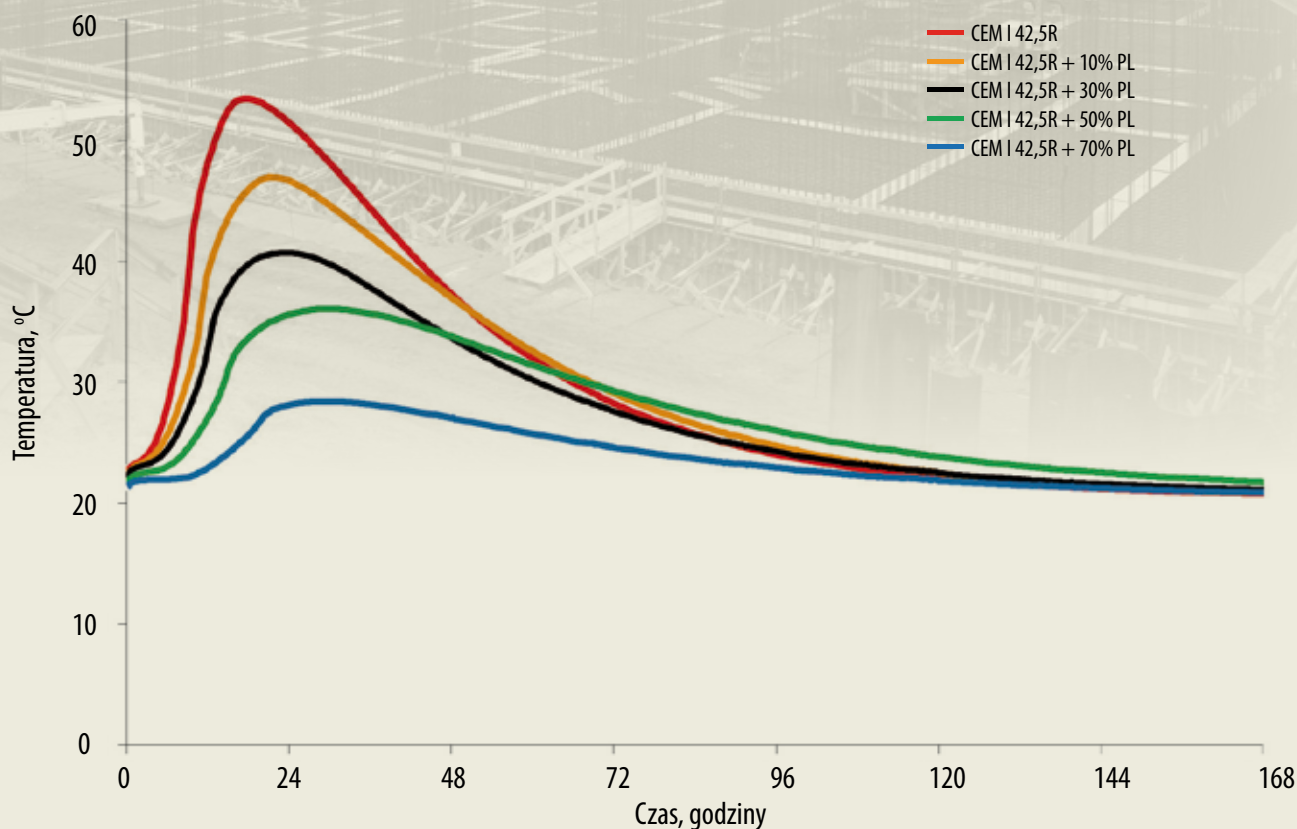
- cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi - CEM II ÷ CEM V, w tym także cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji VLH III ÷ VLH V (rys. 3),
- ograniczonej ilości cementu - zmniejszenie ilości cementu o $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ w składzie betonu obniża jego temperaturę o około 12°C , niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu,
- popiołu lotnego krzemionkowego jako częściowego zamiennika cementu (rys. 4).

Tabela 1. Czynniki wpływające na temperaturę twardnienia i ryzyko zarysowania betonu

Czynnik	Wpływ		Komentarz
	Negatywny	Pozytywny	
Czynniki materiałowe			
Moduł sprężystości kruszywa	Wysoka wartość	Niska wartość	Zwiększenie odkształcalności betonu i stosunku f_{ctm}/E_{cm}
Rodzaj kruszywa	Wysoki współczynnik rozszerzalności cieplnej	Niski współczynnik rozszerzalności cieplnej	Kruszywa o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej, m.in.: marmur, kamień wapienny, granit, bazalt
Maksymalny rozmiar ziaren kruszywa	Mały	Duży	Duży maksymalny rozmiar kruszywa umożliwia zmniejszenie ilości zaczynu cementowego w mieszance betonowej (przy dobrze zaprojektowanej krzywej uziarnienia)
Rodzaj cementu	CEM I	CEM II CEM III CEM IV CEM V	Zastosowanie cementów CEM II ÷ CEM V i/lub dodatków mineralnych w składzie betonu zmniejsza ilość wydzielanego ciepła i szybkość jego wydzielania w czasie
Stosowanie dodatków do betonu	Brak	Popiół lotny	
Domieszki chemiczne	Brak	Plastyfikatory Superplastyfikatory	Zmniejszenie zawartości cementu i/lub obniżenie współczynnika w/c
Temperatura mieszanki	Wysoka	Niska	Obniżenie poprzez schłodzenie kruszywa np. zimną wodą, lodem lub ciekłym azotem
Czynniki wykonawcze			
Temperatura otoczenia	Wysoka	Niska	Prowadzenie betonowania w nocy lub w przypadku dużych elementów wykonanie ich w okresach o stosunkowo niskich temperaturach
Deskowanie dla elementów grubości <500 mm	Poszycie z izolowanej sklejki	Poszycie stalowe, z tworzyw sztucznych zbrojonych włóknem szklanym	Umożliwia szybkie schłodzenie elementu
Deskowanie dla elementów grubości >500 mm	Poszycie stalowe, z tworzyw sztucznych zbrojonych włóknem szklanym	Poszycie z izolowanej sklejki	Izolacja pozwala ograniczyć gradient temperatur oraz kontrolować szybkość odprowadzanie ciepła
Stosowanie izolacji	Brak	Płyty styropianowe, folia, brezent itp.	Ograniczenie zewnętrznych wpływów termicznych
Kolejność betonowania	Betonowanie blokami (naprzemiennie)	Betonowanie sekcjami w kolejności	Nieistotne jeżeli połączenia mają pełną swobodę odkształceń lub gdy betonowanie odbywa się w sposób ciągły
Przerwy pomiędzy kolejnymi etapami betonowania	Długie	Krótkie	Ogranicza gradienty temperatur na styku sąsiednich warstw/bloków i zapewnia lepszą przyczepność pomiędzy warstwami
Rozkład zbrojenia	Pręty o dużej średnicy rozstawione daleko od siebie	Pręty o małej średnicy blisko rozstawione od siebie	Zwiększenie rozwinięcia powierzchni stali zbrojeniowej – poprawa szybkości odprowadzania ciepła z wnętrza betonu



Rys. 3. Przebieg temperatury twardnienia betonu w czasie (zawartość cementu 300 kg/m^3 , $w/c=0,5$)



Rys. 4. Przebieg temperatury twardnienia zaprawy normowej z różną zawartością popiołu lotnego w czasie (PL – popiół lotny krzemionkowy)

