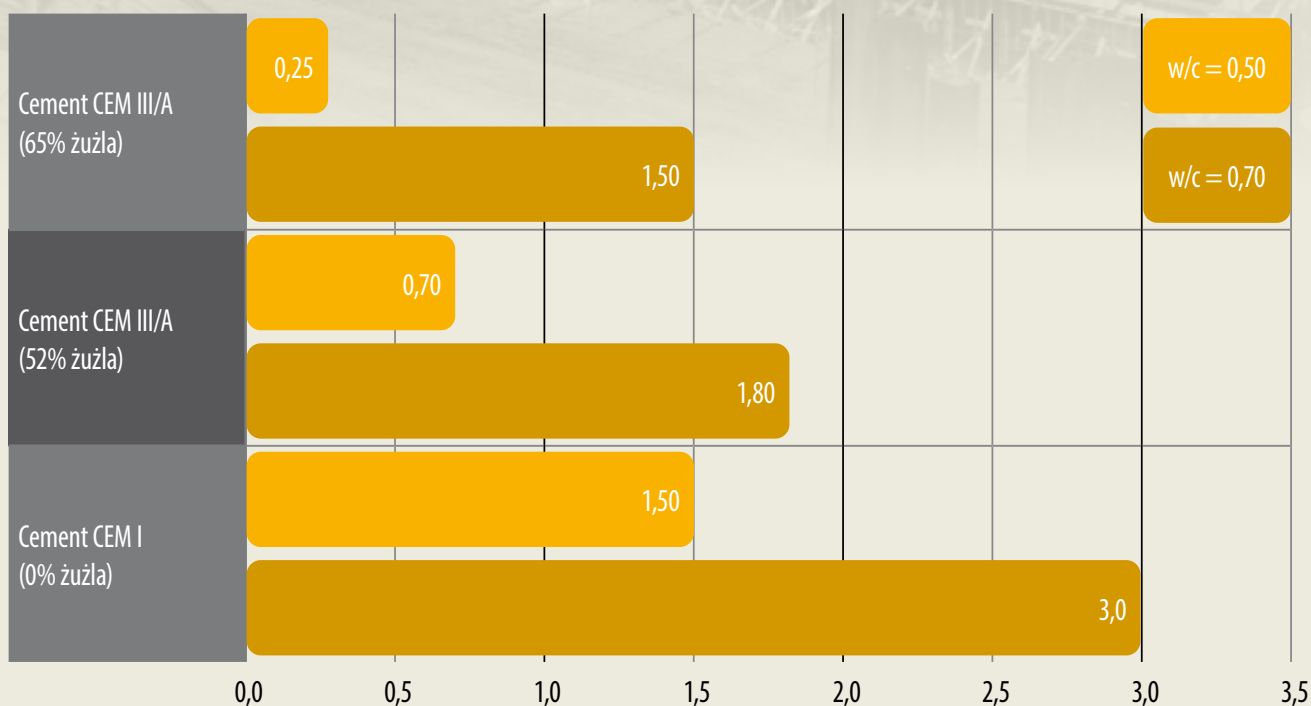


Beton w konstrukcji musi charakteryzować się **TRWAŁOŚCIĄ**, czyli zachowaniem właściwości w założonych warunkach środowiska, przy minimalnych nakładach na konserwację, przez zaprojektowany okres eksploatacji. Zgodnie z normą PN-EN 206:2014 warunki środowiska określa się za pomocą tzw. klas ekspozycji, a założony okres trwałości betonu wynosi 50 lat. W okresie użytkowania konstrukcje betonowe narażone są na działanie wielu czynników środowiskowych powodujących degradację betonu. Proces niszczenia betonu w wyniku oddziaływania środowiska definiuje się jako korozję. Wyróżnia się dwa rodzaje korozji betonu: wewnętrzną i zewnętrzną. Przyczyną korozji wewnętrznej mogą być składniki, z których wykonano beton (głównie alkalia obecne w cemencie lub domieszkach, a także zbyt duża zawartość gipsu CaSO_4). Korozja zewnętrzna zachodzi pod działaniem niekorzystnych czynników zewnętrznych.

NAJCZĘŚCIEJ WYSTĘPUJĄCYMI RODZAJAMI KOROZJI BETONU SĄ:

- ▶ KARBONATYZACJA,
- ▶ KOROZJA CHLORKOWA,
- ▶ KOROZJA SIARCZANOWA,
- ▶ KOROZJA SPOWODOWANA REAKCJĄ ALKALIA-KRUSZYWO.

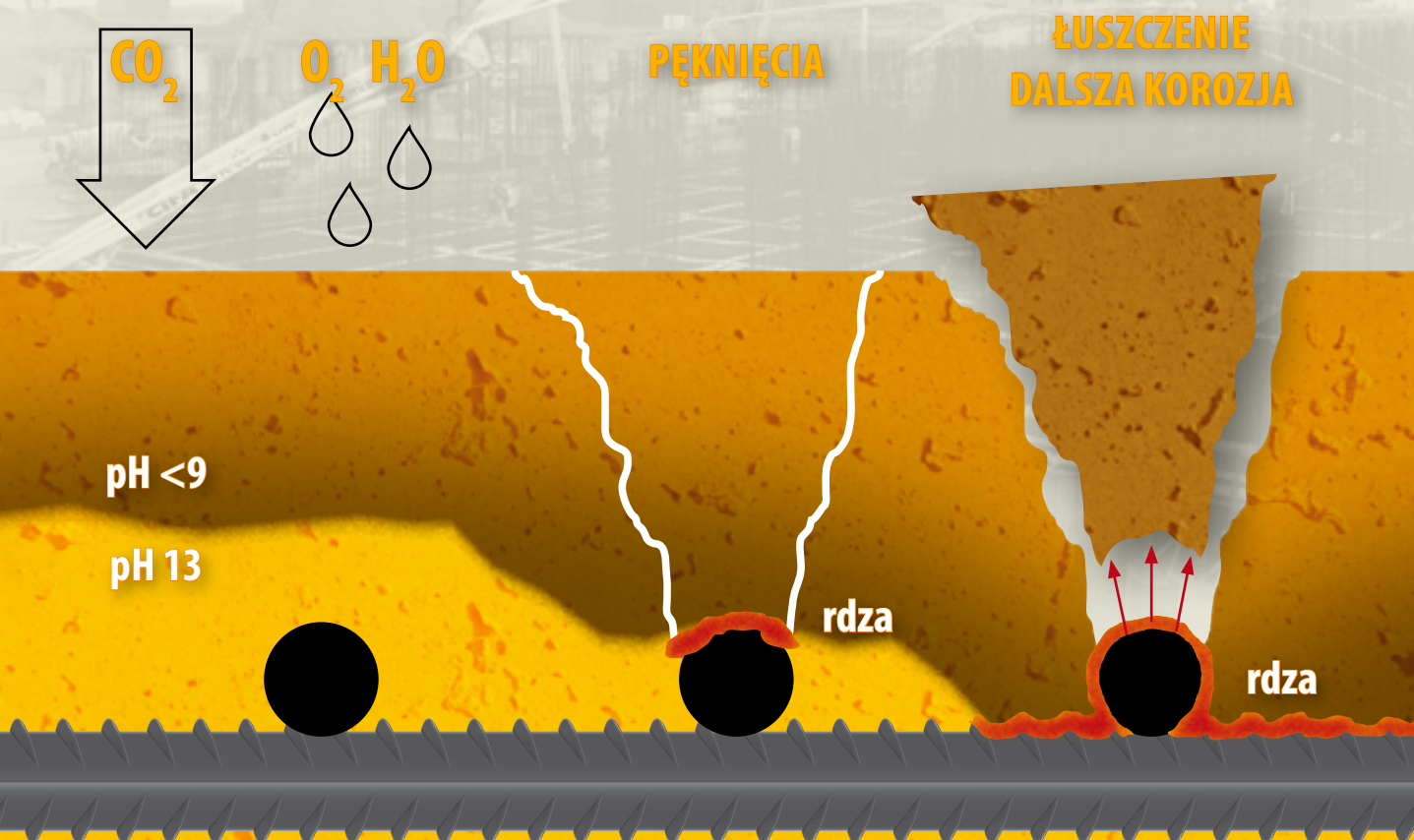
Dla zapewnienia odpowiedniej trwałości betonu w założonym środowisku, należy odpowiednio zaprojektować skład betonu (rodzaj i ilość cementu, wielkość współczynnika w/c, jakość kruszywa, rodzaj domieszek, rodzaj i ilość dodatków do betonu) tak, aby beton charakteryzował się szczelną matrycą. Kształtowanie szczelności betonu, np. poprzez ograniczenie ilości wody w mieszance betonowej lub zastosowanie cementu z dodatkami mineralnymi skutkuje, przede wszystkim ograniczeniem porowatości kapilarnej zaczynu cementowego (rys. 1). W skali „makro” wpływa to bezpośrednio na głębokość penetracji mediów agresywnych i wielkość podciągania kapilarnego, natomiast w skali „mikro” skutkuje utrudnieniem dyfuzji jonów agresywnych do wnętrza matrycy cementowej. Należy mieć na uwadze, że wysoka wytrzymałość nie gwarantuje trwałości betonu w konstrukcji.



Rys. 1. Udział porów kapilarnych w 12-letnim betonie o różnym współczynniku w/c i wykonanym z cementu o różnej zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego

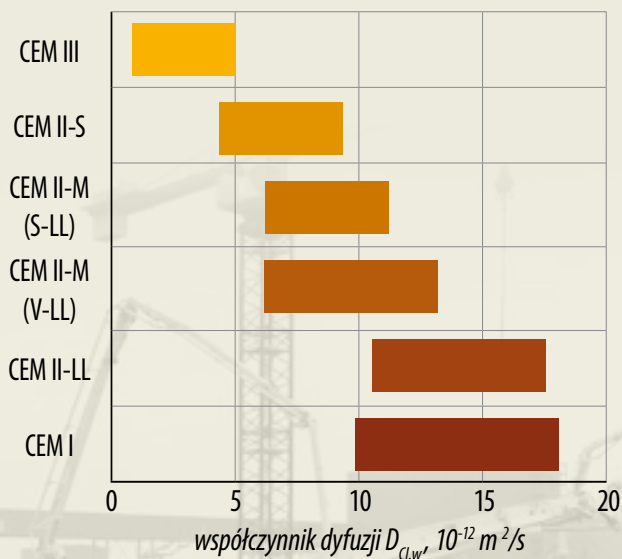
KARBONATYZACJA jest procesem korozyjnym, zachodzącym stopniowo od zewnętrznej strony konstrukcji betonowej wystawionej na działanie dwutlenku węgla. CO_2 z powietrza reagując z produktami hydratacji faz klinkierowych, tworzy się węglan wapnia CaCO_3 . Obecność CaCO_3 nie powoduje zniszczenia betonu, ale prowadzi do obniżenia pH betonu z poziomu ok. 13 do wartości poniżej 9. Wskutek obniżania pH stopniowo zanika cienka warstwa ochronna (pasywacyjna) na powierzchni stali zbrojeniowej. Karbonatyzacja przebiega najszybciej w warunkach przemiennie wilgotno–suchych. Gdy front karbonatyzacji (obszar betonu o $\text{pH} < 9$) osiągnie poziom prętów zbrojeniowych, przy jednocześnie wysokiej wilgotności betonu, następuje szybka korozja stali zbrojeniowej (rys. 2). Powstająca rdza ma większą objętością niż stal, co skutkuje powstaniem naprężeń rozciągających, a w efekcie prowadzi do zarysowania betonu. Wraz z postępem karbonatyzacji może dojść do złuszczenia betonowej otuliny i całkowitego odsłonięcia prętów zbrojeniowych. Dodatkowo, gdy beton narażony jest na działanie jonów chlorkowych, korozja stali znacznie przyspiesza.

Rys. 2. Mechanizm niszczenia betonu w wyniku karbonatyzacji



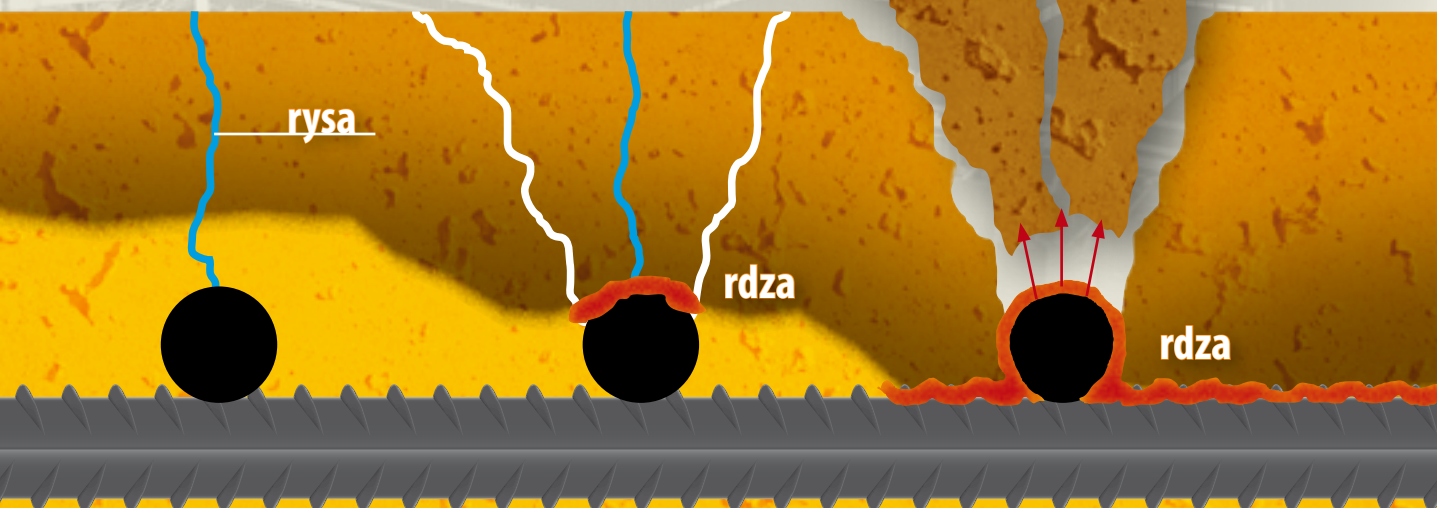
CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE KARBONATYZACJĘ:

- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH KARBONATYZACJI XC1÷XC4 WG NORMY PN-EN 206:2014 (MINIMALNA ILOŚCI CEMENTU, MAKSYMALNY WSPÓŁCZYNNIK W/C),
- ▶ WŁAŚCIWY DOBÓR GRUBOŚCI OTULINY ZBROJENIA,
- ▶ ODPOWIEDNIO DOBRANA I PROWADZONA PIELĘGNACJA BETONU W KONSTRUKCJI.



Rys. 3. Współczynniki dyfuzji betonów wykonanych z różnych cementów

Rys. 4. Mechanizm niszczenia betonu w wyniku korozji chlorkowej



CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE AGRESJĘ CHLORKOWĄ:

- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH AGRESJI SPOWODOWANEJ CHLORKAMI NIEPOCHODZĄCYMI Z WODY MORSKIEJ XD1, XD2, XD3 I/LUB AGRESJI SPOWODOWANEJ CHLORKAMI Z WODY MORSKIEJ XS1, XS2, XS3 WG NORMY PN-EN 206:2014,
- ▶ PRZESTRZEGANIE KLAS ZAWARTOŚCI CHLORKÓW W BETONIE W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU KONSTRUKCJI BETONOWEJ (SPRĘŻANE, ZBROJONE, NIEZBROJONE),
- ▶ OGRANICZENIE WSPÓŁCZYNNIKA W/C W CELU ZMNIJSZENIA PRZEPUSZCZALNOŚCI BETONU,
- ▶ ZASTOSOWANIE CEMENTÓW Z DODATKAMI MINERALNYMI, NP.: CEMENTÓW HUTNICZYCH CEM III LUB CEMENTÓW WIELOSKŁADNIKOWYCH CEM V,
- ▶ ODPOWIEDNI DOBÓR GRUBOŚCI OTULINY ZBROJENIA.

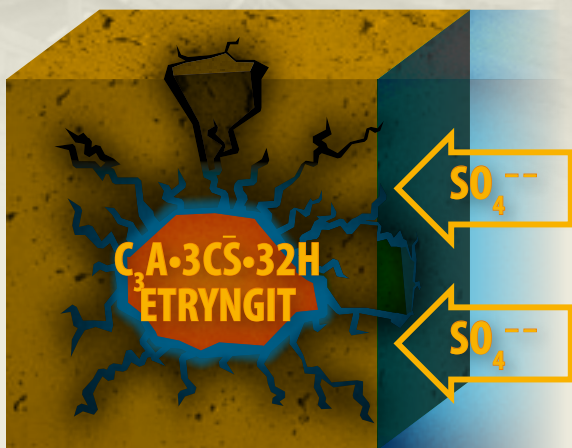
KOROZJA CHLORKOWA - spośród wszystkich jonów, jony chlorkowe najszybciej wnikają w głąb matrycy cementowej, z tego względu korozja betonu poddanego działaniu roztworu chlorków postępuje z dużą szybkością. Agresja chlorkowa prowadzi do obniżenia pH betonu oraz powstawania ekspansywnych związków, które mogą powodować spękanie betonu. Równie groźnym skutkiem oddziaływania jonów chlorkowych jest korozja stali zbrojeniowej. Przebieg korozji jest bardzo zbliżony do niszczenia betonu w wyniku procesu karbonatyzacji (rys. 4). Korozja chlorkowa może być spowodowana działaniem m.in. wód kopalnianych lub wody morskiej, jednak najpowszechniejsza jest korozja wywołana środkami odladzającymi. Czynniki wpływającymi na wnikanie chlorków są: cykliczne nasycanie i wysychanie oraz działanie mrozu, co może prowadzić do złuszczenia powierzchniowej warstwy betonu. Betony z dodatkami wykazują wyższą odporność na korozyjne działanie chlorków. Na rys. 3 przedstawiono współczynniki dyfuzji jonów chlorkowych w betonach wykonanych z użyciem różnych cementów po 28 dniach twardnienia ($w/c=0,5$, zawartość cementu 320 kg/m^3 , dojrzewanie w wodzie).

KOROZJA SIARCZANOWA

jest jedną z najgroźniejszych korozji występujących w trakcie cyklu życia konstrukcji betonowej. Korozja siarczanowa występuje najczęściej w konstrukcjach narażonych na działanie wód gruntowych, ścieków lub wody morskiej. Siarczany w wodzie gruntowej są zazwyczaj pochodzenia naturalnego, ale ich źródłem mogą być również nawozy sztuczne i ścieki przemysłowe. W wodzie morskiej jonom siarczanowym towarzyszą duże ilości jonów chlorkowych, sodowych i magnezowych, co potęguje jej niszczące oddziaływanie na beton.

Wyróżnia się dwa rodzaje agresji siarczanowej: wewnętrzną (ISA) i zewnętrzną (ESA) - rys. 5. Wewnętrzna zachodzi w betonach, w których zastosowano cement o wysokiej zawartości gipsu (regulatora czasu wiązania), w związku z czym wprowadzono nadmierną ilość jonów siarczanowych. Do korozji o charakterze wewnętrznym może dojść w przypadku betonów poddawanych obróbce termicznej w temperaturze wyższej niż 60°C. Do korozji o charakterze zewnętrznym dochodzi, gdy beton poddawany jest działaniu roztworów siarczanowych. Jony siarczanowe z otoczenia reagują z matrycą cementową, tworząc gips i/lub ettringit (rys. 6). W czasie powstawania obu związków dochodzi do zwiększenia objętości, w przypadku ettringitu aż o 168%!

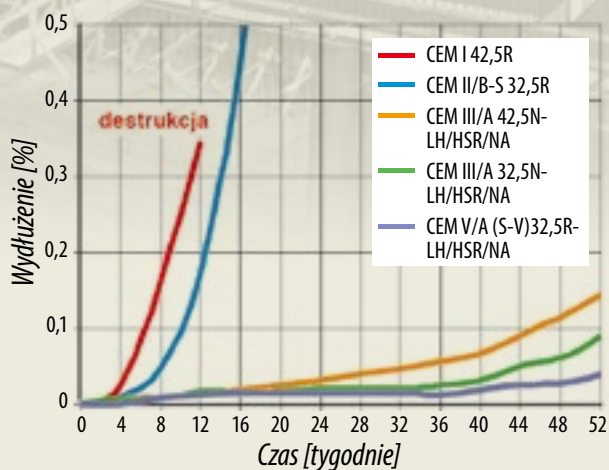
Doskutków fizycznych agresji siarczanowej należy zaliczyć ekspansję, spękania, łuszczenie czy spadek wytrzymałości, a w przypadku silnej korozji może dojść nawet do całkowitej destrukcji betonu w konstrukcji.



Rys. 6. Niszczenie betonu spowodowane powstaniem ekspansywnego ettringitu



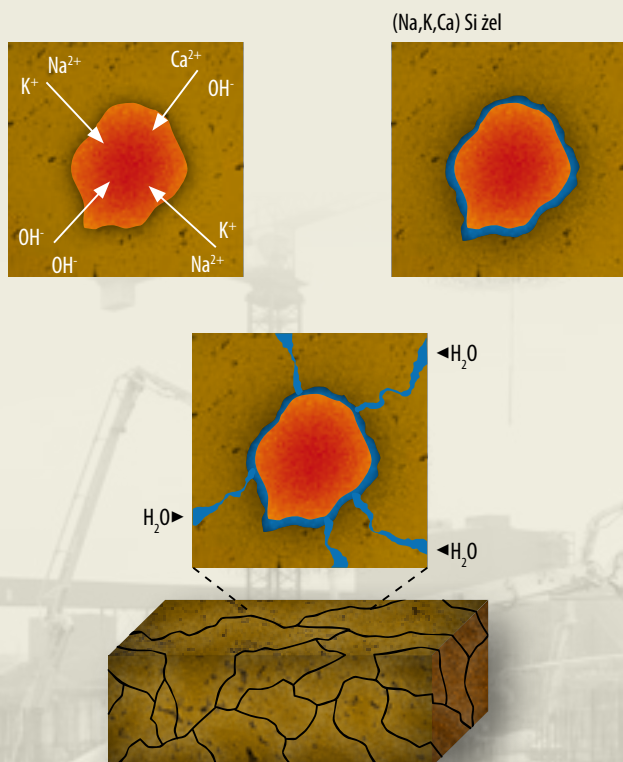
Rys. 5. Rodzaje i przyczyny korozji siarczanowej



Rys. 7. Odporność na korozję siarczanową

CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE AGRESJĘ SIARCZANOWĄ:

- ▶ STOSOWANIE CEMENTU ODPORNEGO NA SIARCZANY SR WG PN-EN 197-1:2012 LUB HSR WG PN-B-19707:2013 (RYS. 7),
- ▶ ZAPEWNIENIE WYSOKIEJ SZCZELNOŚCI BETONU (NISKIE W/C, STOSOWANIE DODATKÓW TYPU II),
- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH AGRESJI CHEMICZNEJ XA1, XA2 I XA3 WG NORMY PN-EN 206:2014.



Rys. 8. Mechanizm reakcji alkalia – reaktywna krzemionka

Rys. 9. Skutki reakcji alkalia-kruszywo



KOROZJA SPOWODOWANA REAKCJĄ ALKALIA-KRUSZYWA

W praktyce dwa rodzaje kruszyw najczęściej reagują z alkaliami pochodzącymi z cementu, kruszywa, wody zarobowej i/lub domieszek chemicznych:

- kruszywa bogate w reaktywną krzemionkę (opal, chalcedon, trydymit) – reakcja alkalia-krzemionka ASR,
- kruszywa węglanowe (zdolomityzowane wapnienie) – reakcja alkalia-węglany ACR.

Tylko w obecności wody kruszywa te mogą reagować z alkaliami obecnymi w porach betonu. W wyniku tej reakcji powstaje żel alkaliczny (rys. 8), który chłonec wodę pęcznieje praktycznie bez ograniczeń i lokuje się w porach betonu. Wokół aktywnych ziaren powstają żelowe otoczki o grubości nawet 2 mm. Ponieważ żel ograniczony jest stwardniałym zaczynem cementowym, powstają naprężenia wewnętrzne, które powodują spękanie i rozpad betonu, w skrajnych przypadkach prowadząc do całkowitego zniszczenia konstrukcji betonowej (rys. 9).

CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE NEGATYWNE SKUTKI SPOWODOWANE REAKCJĄ KRUSZYWA Z ALKALIAMI:

- ▶ STOSOWANIE CEMENTÓW O NISKIEJ ZAWARTOŚCI ALKALIÓW (NA) ZGODNYCH Z NORMĄ PN-B-19707:2013,
- ▶ STOSOWANIE KRUSZYW NIEREAKTYWNYCH,
- ▶ STOSOWANIE CEMENTÓW ZAWIERAJĄCYCH NIEKLINKIEROWE SKŁADNIKI GŁÓWNE (GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY, POPIOŁY LOTNE).

