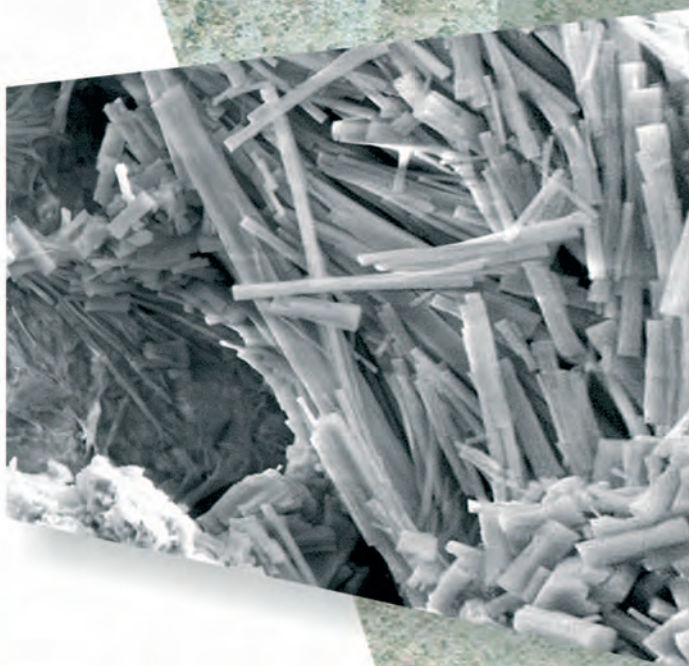


**MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY**

**M108**

**Wojciech Piasta**

**ZEWNĘTRZNA KOROZJA  
SIARCZANOWA BETONU**



**Politechnika Świętokrzyska**

Kielce 2018

**MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY**

**M108**

**Wojciech Piasta**

**ZEWNĘTRZNA KORROZJA  
SIARCZANOWA BETONU**

Kielce 2018

## **MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M108**

**Redaktor Naukowy serii**

**NAUKI TECHNICZNE – BUDOWNICTWO**

prof. dr hab. inż. Jerzy WAWRZEŃCZYK

### **Recenzenci:**

prof. dr hab. inż. Wiesława NOCUŃ-WCZELIK

prof. dr hab. inż. Paweł ŁUKOWSKI

### **Redakcja**

Irena PRZEORSKA-IMIOŁEK

### **Projekt okładki**

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2018

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiuowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-43-0

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej  
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
tel./fax 41 34 24 581  
e-mail: [wydawca@tu.kielce.pl](mailto:wydawca@tu.kielce.pl)  
[www.wydawnictwo.tu.kielce.pl](http://www.wydawnictwo.tu.kielce.pl)

# SPIS TREŚCI

<b>1. WSTĘP</b> .....	7
<b>2. TRWAŁOŚĆ BETONU</b> .....	9
2.1. Zagadnienie trwałości betonu i konstrukcji betonowych .....	9
2.2. Rodzaje agresji na beton .....	12
2.3. Projektowanie trwałości .....	16
2.3.1. Stany graniczne trwałości .....	17
2.3.2. Metody projektowania trwałości konstrukcji betonowych .....	18
2.3.3. Wpływ zarysowania na trwałość .....	21
2.3.4. Oddziaływanie kombinacji środowisk na beton .....	22
2.4. Porowatość kapilarna i właściwości transportowe odpowiedzialne za trwałość betonu .....	23
2.5. Skład roztworu występującego w porach stwardniałego zaczynu cementowego ....	28
Literatura .....	33
<b>3. AGRESJA SIARCZANOWA</b> .....	39
3.1. Warunki agresji siarczanowej .....	39
3.1.1. Ogólna charakterystyka .....	39
3.1.2. Rodzaje agresywnych soli siarczanowych .....	41
3.2. Powstawanie ettringitu podczas zewnętrznej agresji siarczanowej .....	43
3.2.1. Oddziaływanie różnych soli siarczanowych na fazę AFm w zaczynie cementowym .....	45
3.2.2. Reakcje siarczanu wapnia z zaczynem cementowym .....	48
3.3. Rola gipsu w ekspansji siarczanowej zaczynu .....	49
3.3.1. Powstawanie gipsu .....	49
3.3.2. Wpływ powstawania gipsu na ekspansję .....	53
3.4. Odwapnianie faz zaczynu podczas agresji siarczanowej .....	55
3.5. Warstwowe niszczenie i zmiany mikrostruktury zaczynu w wyniku agresji siarczanowej .....	58
3.6. Dawne i aktualne hipotezy dotyczące mechanizmu ekspansji siarczanowej .....	65
3.6.1. Najstarsza hipoteza mechanizmu ekspansji siarczanowej powodowanej przez topochemiczne powstawanie ettringitu .....	65
3.6.2. Hipoteza mechanizmu ekspansji siarczanowej powodowanej przez topochemiczne powstawanie monosiarczanoglinianu wapnia .....	66
3.6.3. Hipoteza mechanizmu ekspansji siarczanowej powodowanej przez powstawanie ettringitu o większej objętości fazy stałej .....	66
3.6.4. Hipoteza mechanizmu ekspansji siarczanowej powodowanej przez ettringit koloidalny absorbujący wodę .....	67

3.6.5. Hipoteza mechanizmu ekspansji siarczanowej zaczynu powodowanej przez ciśnienie krystalizacji ettringitu .....	68
3.7. Korozja siarczanowa w obecności innych jonów .....	73
3.7.1. Wpływ stężenia jonów wodorowych .....	73
3.7.2. Jony chlorkowe .....	77
3.8. Wpływ stężenia roztworów siarczanowych na ekspansję kompozytów .....	79
3.9. Stężenie jako parametr stosowany do oceny agresywności roztworów .....	81
Literatura .....	84
<b>4. OCHRONA ZACZYNU CEMENTOWEGO I BETONU PRZED KOROZJĄ SIARCZANOWĄ .....</b>	<b>91</b>
4.1. Wpływ stosunku w/c .....	91
4.2. Wpływ składu cementu na odporność siarczanową kompozytów .....	92
4.3. Wpływ dodatków pucolanowych i hydraulicznych .....	97
4.3.1. Wpływ dodatku żużla wielkopieczowego na siarczanową odporność kompozytów cementowych .....	98
4.3.2. Wpływ dodatku popiołów lotnych na siarczanową odporność kompozytów cementowych .....	105
4.3.3. Wpływ dodatku pyłu krzemionkowego do cementu na odporność siarczanową zapraw i betonów .....	110
4.3.4. Wpływ zawartości mączki wapiennej .....	112
Literatura .....	112
<b>5. WPŁYW NAPONOWIETRZENIA I NISZCZENIA MROZOWEGO NA KOROZJĘ SIARCZANOWĄ ZAPRAW I BETONÓW .....</b>	<b>119</b>
5.1. Zmiany w mikrostrukturze zaczynu powodowane przez napowietrzenie .....	119
5.1.1. Domieszki napowietrzające .....	120
5.1.2. Powstawanie pęcherzyków i morfologia porów powietrznych .....	121
5.1.3. Warstwa przejściowa por powietrzny-zaczyn cementowy .....	124
5.1.4. Praktyczna ocena napowietrzenia betonu .....	126
5.2. Wpływ napowietrzenia kompozytów cementowych na odporność siarczanową ...	127
5.3. Interakcja niszczenia mrozowego i korozji siarczanowej .....	135
Literatura .....	144
<b>6. WPŁYW KARBONATYZACJI NA PRZEBIEG KOROZJI SIARCZANOWEJ BETONU .....</b>	<b>146</b>
6.1. Współwystępowanie agresji węglanowej i siarczanowej w konstrukcjach betonowych .....	146
6.2. Korozja węglanowa betonu .....	146
6.3. Wpływ karbonatyzacji na szczelność betonu .....	156
6.4. Równoczesna agresja siarczanowa i węglanowa na beton .....	157

---

6.5. Rola alkaliczności zaczynu w korozji siarczanowej i węglanowej .....	158
6.6. Wpływ żużla wielkopieczowego na korozję węglanową i siarczanową betonu .....	159
6.7. Wpływ dodatków pucolanowych na korozję węglanową i siarczanową betonu .....	160
6.8. Równoczesna korozja siarczanowa i węglanowa wieloletnich elementów betonowych .....	161
6.9. Thaumasytowa korozja siarczanowa betonu .....	165
6.10. Powstawanie thaumasytu .....	167
6.11. Wyniki badań thaumasytowej korozji siarczanowej betonu w wieloletniej konstrukcji żelbetowej .....	172
Literatura .....	176
<b>7. WPŁYW OBCIĄŻENIA NA PRZEBIEG KOROZJI SIARCZANOWEJ BETONU .....</b>	<b>179</b>
7.1. Zachowanie się betonu pod obciążeniem stałym .....	179
7.2. Obciążenie długotrwałe w warunkach korozji chemicznej .....	181
7.3. Wpływ poziomego naprężenia rozciągającego na intensywność korozji chemicznej betonu .....	187
7.4. Wpływ poziomego naprężenia ściskającego na przebieg korozji chemicznej betonu .....	191
Literatura .....	197
<b>8. PODSUMOWANIE ZAGADNIĘŃ OMAWIANYCH W MONOGRAFII .....</b>	<b>199</b>
Streszczenie .....	205
Summary .....	207

## Streszczenie

### ZEWNĘTRZNA KOROZJA SIARCZANOWA BETONU

Zagadnienia omawiane w monografii, dotyczą syntezy produktów korozji siarczanowej, najnowszego wyjaśnienia mechanizmu ekspansji siarczanowej powodowanej przez ciśnienie krystalizacji ettringitu oraz przebiegu niszczenia mikrostruktury zaczynu. W celu wyjaśnienia wpływu krystalizacji ettringitu, gipsu i thau-masytu na ekspansję zaczynu podczas oddziaływania zewnętrznej agresji siarczanowej uwzględniono warunki syntezy i właściwości tych produktów. Uwagę zwrócono na wpływ wartości pH fazy ciekłej na postępowanie i charakter destrukcji zaczynu w roztworach siarczanów. Przedmiotem rozważań był także mechanizm zredukowanej ekspansji zaczynu z cementu hutniczego.

Głównymi tematami przedstawionymi w monografii jest korozja siarczanowa zachodząca przy równoczesnym lub naprzemiennym oddziaływaniu drugiego czynnika szkodliwego, którym są: karbonatyzacja, niszczenie betonu przez zamrażanie i rozmrażanie i długotrwałe obciążenie zginające i ściskające. Do wyjaśnienia szkodliwych interakcji wykorzystano własne wyniki badań oraz wyniki publikowane.

W przypadku wspólnej agresji jonów siarczanowych i wodorowęglanowych niszczenie zaczynu (betonu) będzie miało charakter ekspansywno-ługujący. Największym zagrożeniem dla zaczynu (betonu) podczas agresji siarczanowo-węglanowej nie jest zwykle ekspansja. Mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia niszczącej zaczyn ekspansji wynika ze stopniowego zmniejszania się pH i trwałego wiązanie jonów wapnia w bardzo słabo rozpuszczalny węglan wapnia. Powoduje to zmniejszenie ilości w fazie ciekłej zaczynu jonów wapniowych i jonów hydroksylo-wych koniecznych do przesycenia roztworu w stosunku do ettringitu. Dużo groźniejsza może być redukcja pH, która powoduje przyspieszającą utratę stabilności wszystkich faz zaczynu cementowego. W następnej kolejności łączne działanie jonów wodorowęglanowych i siarczanowych powoduje wylugowanie wapnia z fazy zaczynu, w tym z fazy C-S-H.

Podsumowując wyniki badań wpływu napowietrzenia na przebieg korozji zapraw i betonów w roztworze siarczanu sodu, należy podkreślić powtarzający się pozytywny efekt poprawy odporności siarczanowej przez napowietrzenie. Korzystne oddziaływanie wprowadzonych porów powietrznych na odporność dotyczy kompozytów z cementów portlandzkich i cementów z dodatkami. Wyniki badań sugerują, że optymalna zawartość powietrza ze względu na odporność siarczanową w betonach i zaprawach jest podobna do najkorzystniejszej zawartości porów powietrznych poprawiających odporność mrozową kompozytów. Jest to pozytywne rokowanie dobrej odporności mrozowo-siarczanowej, którą należy koniecznie badać.

Ze stosunkowo dużej odporności zapraw i betonu na niszczenie mrozowo-siarczanowe wynika praktyczny wniosek, że poprawne napowietrzenie powinno być stosowane przy każdej przewidywanej nawet delikatnej agresji mrozowo-siarczanowej.

Z osiągniętych wyników badań korozji siarczanowej betonu pod obciążeniem wypływa najważniejszy wniosek, że poziom i rodzaj długotrwałego naprężenia jest istotny nie tylko dla bezpieczeństwa i użytkowania konstrukcji, ale także dla trwałości betonu i obciążonych elementów. W przypadku długotrwałego rozciągania, w tym również zginania, podstawowa przyczyna przyspieszenia niszczenia jest związana z propagacją mikrozarysowania, które zwiększa wodoprzepuszczalność. Charakter wpływu na trwałość betonu korozji siarczanowej i równoczesnego długotrwałego osiowego naprężenia ściskającego w wyraźny sposób zależy od poziomu naprężenia. Przy poziomie naprężenia mniejszego niż granica pełzania liniowego szybkość korozji może być zmniejszona. Niemniej przy poziomie naprężenia większym niż granica pełzania liniowego następuje propagacja mikrozarysowania i przyspieszenie korozji. Redukcja wytrzymałości i modułu sprężystości przez oddziaływanie korozji spowoduje pełzanie nieliniowe progresywne prowadzące do zniszczenia betonu.



## Summary

### EXTERNAL SULPHATE ATTACK ON CONCRETE

This monograph addresses issues surrounding the synthesis of sulphate attack products, the current understanding of the mechanism of sulphate expansion by ettringite crystallization pressure and the progress of cement paste microstructure degradation. The effects of ettringite, gypsum and thaumasite crystallization on the paste expansion under external sulphate attack were explained having regard to synthesis conditions and the products properties. Attention was paid to the influence of liquid phase pH value on the progress and nature of paste degradation in sulphate solutions. The mechanism of reduced expansion of blast furnace cement paste was also considered.

The focus is on the sulphate attack that occurs along with a simultaneous or alternate action of another harmful factor, such as carbonation, concrete deterioration due to freezing and thawing, and long-term bending and compressive loads. These harmful interactions were explained based on the results of the author's own studies and those published by other researchers.

A combined attack of sulphate and bicarbonate ions will produce expansive and leaching character of paste (concrete) deterioration. Expansion is not the greatest threat to the paste (concrete) during sulphate-carbonate attack. A gradual lowering of pH and permanent binding of calcium ions forming very slightly soluble calcium carbonate reduce the probability of disruptive paste expansion. This leads to a reduction in the amount of calcium ions and hydroxyl ions in the liquid phase of the paste, necessary for the supersaturation of the solution with respect to ettringite. The pH reduction may be much more dangerous as it is a major factor in accelerated loss of stability of all cement paste phases. Subsequently, the combined action of bicarbonate and sulphate ions causes leaching of calcium from the paste phases, including the C-S-H phase.

Results of the studies devoted to the influence of air-entrainment on the deterioration of mortars and concretes in the sodium sulphate solution point to a repeatable effect of sulphate resistance improvement by air-entrainment. The beneficial effect of the introduced air pores is observed in composites from Portland cements and cements with additions. The study results suggest that the optimum air content for sulphate resistance in concrete and mortars is similar to the optimum amount of air pores needed to improve the frost resistance of composites. It is a positive prognosis of good frost and sulphate resistance which must be further investigated.

The relatively high resistance of mortars and concrete to frost-sulphate damage indicates clearly that proper air-entrainment should be applied in any case of expected, even mild, frost-sulphate attack.

The most important conclusion from the research on sulphate attack in concrete under load is that the level and type of long-term stress is essential not only for the safety and use of the structure, but also for the durability of the concrete and elements under load. In the case of long-term tension and bending, the basic cause of damage acceleration is associated with microcrack propagation increasing water permeability. The character of this effect on the durability of concrete exposed to sulphate attack and simultaneous long-term axial compressive stress is explicitly defined by the stress level. At a stress level less than the linear creep threshold, the attack rate can be lower. However, the stress greater than the threshold initiates microcrack propagation and accelerates deterioration. The strength loss and modulus of elasticity reduction due to sulphate attack will cause non-linear progressive creep leading to concrete failure.