

MOŽNOST UTRDITVE BETONA Z ZAKASNELO TVORBO ETRINGITA

POSSIBILITY FOR CONCRETE STRENGTHENING WITH DELAYED ETTRINGITE FORMATION

Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.,

samo.lubej@uni-mb.si

mag. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.,

andrej.ivanic@uni-mb.si

Fakulteta za gradbeništvo, Maribor

Znanstveni članek

UDK: 691.32

Povzetek | Zakasnela tvorba etringita v strjenem betonu navadno povzroči poškodbe betona. Na maltnih preskušancih, ki so bili izdelani z dodatkom elektrofiltrskega pepela, je bilo z načrtovano zakasnelo tvorbo etringita izmerjeno nabrekanje, trdnostne lastnosti in opravljena analiza mikrostrukture. Nastajanje etringita na nukleacijskih mestih, ki jih predstavljajo zračni mehurčki aeranta, je povzročilo utrditev, ki se odraža s povečanjem trdnosti betona.

Summary | The delayed ettringite formation in already hidratized concrete usually causes the degradation of concrete. On the samples of concrete, which were manufactured with the addition of electro-filter ashes, the swelling, and strength characteristics, with the planned delayed formation of ettringite, were measured and the control of microstructure was made. The formation of ettringite on the nucleation places, which are presented by air bubbles of aerant, caused strengthening, which is presented by the improvement of concrete strength.

1 • UVOD

V gradbeni praksi se za proizvodnjo betonov in malt najpogosteje uporabljajo cementi na bazi Portland cementnega klinkerja. V kemijskem procesu hidratacije klinkerskih mineralov nastajajo hidrati in hidroksidi. Ker pa je v mešanici vedno prisotna tudi določena količina sadre, se – kot rezultat reakcije med trikalcijevim aluminatom (C_3A) in sadro ter vodo – tvori tudi mineral etringit ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaOSO_4 \cdot 31H_2O$). Sprememba prostornine pri tej reakciji je pozitivna. Kristali etringita rastejo hitro in tvorijo ovojnice okoli zrn cementa, kar upočasnjuje hidratacijo. Prisotnost minerala etringita v tekočem sistemu mešanice cementa in vode nima bistvenega

vpliva na končne lastnosti betona. Nasprotno pa je nastanek etringita v strjenem betonu nezaželen in nevaren. V cementnem kamnu se lahko mineral etringit pojavi, če je beton izpostavljen vplivu sulfatov. Ker je pri tej reakciji volumen reakcijskega produkta – etringita – večji kot volumen reaktantov, nastanejo v togem cementnem kamnu notranje napetosti, kar ima lahko za posledico razpad betona. Pri ovirani rasti kristalov etringita lahko te napetosti dosežejo vrednost do 8 MPa (Colepardi, 2003). Ta vpliv imenujemo sulfatna korozija betona. Znano je, da so cementi z nizkim odstotkom komponente C_3A obstojnejši proti sulfatni koroziji. Ob količini komponente C_3A

pa na potek sulfatne korozije vpliva tudi oblika te komponente. Kristaliničen C_3A je bolj reaktiven od steklastega (Gerbec, 2005). Pojav povečanja prostornine pri nastanku mineralov etringita v cementnem kamnu, ki je bogat s kalcijevim sulfoaluminatom $C_4A_3\bar{S}$, pa se lahko koristi za kompenzacijo krčenja cementnega kamna zaradi sušenja. Ekspanzijo v cementni pasti, ki nastopi po končanem procesu strjevanja, lahko koristimo pri razvoju kemijskega prednapenjanja v ekspanzijskih cementih (Colepardi, 2003). Manj znano pa je, da bi lahko rast kristalov etringita izkoristili tudi za kontrolirano utrditev betona.

1.1 Zakasnela tvorba etringita

Zakasnela tvorba etringita, znana tudi pod terminom Delayed Ettringite Formation (DEF), je poznana kemijska reakcija, ki je v znanosti

še vedno uvrščena v skupino nerešenih problemov. Intenziteta ekspanzije pri zakasneli tvorbi etringita v strjenem betonu je pogojena s tremi pomembnimi faktorji, ki so: kemijski vplivi (od njih je odvisno, koliko etringita bo pri kemijski reakciji nastalo), mikrostruktura cementne paste (od katere je odvisno, kakšne napetosti bodo nastopile) in mikrostruktura betona (od katere je odvisno, kakšen bo odgovor materiala na te napetosti) (Taylor, 2001).

Kot je poznano, da v procesu hidratacije betona bazični reagenti pospešujejo ta proces, velja to tudi pri zakasneli tvorbi etringita v betonu (Bauer, 2006). Bistveni faktorji, ki povzročajo zakasnelo tvorbo etringita, pa so: visoka temperatura (več kot 70 °C), obstoj mikrorazpok, ki so posledica proizvodnje, nege ali alkalno silikatne reakcije, izpostavljenost cikličnim spremembam – moko/suho, pozno izstopanje sulfatov iz cementnega klinkerja ali iz drugih virov, prehajanje reaktantov – SO_4 , Al in Ca ionov – skozi pore betona, ki so nasičene z vodo ali vodno paro,

ter ostanki etringita znotraj obstoječih razpok in kasnejše odpiranje razpok zaradi rasti kristalov etringita (Bauer, 2006). Za z zakasnelo tvorbo etringita inducirano ekspanzijo je potrebna zadostna količina elektrofiltrskega pepela (Foliard, 2006). Od količine prostega CaO v elektrofiltrskem pepelu in cementu je odvisna intenziteta ekspanzije. Uporaba manjših količin elektrofiltrskega pepela in takšnega, ki vsebuje več kot 25 % prostega CaO, pa lahko tudi zatre ekspanzijo (Foliard, 2006).

1.2 Opredelitev problema

V članku je prikazana možnost, da z načrtovano zakasnelo tvorbo kristalov etringita v strjenem betonu izboljšamo njegove trdnostne lastnosti. Ciljna mikrostruktura betona je bila dosežena z dodatkom fino razpršenih mehurčkov, ki so nastali z delovanjem dodatka aeranta. Mehurčki so predstavljali nukleacijska mesta za tvorbo kristalov etringita. Tako je bila dosežena krajevno kontrolirana tvorba etringita – utrjevalnih delcev. Etringit, katere-

ga tvorba v strjenem betonu je v splošnem nezaželeno, nastaja na mestih razpok, por ali drugih napak. Ker je prostornina produkta pri tej kemijski reakciji večja od prostornine reaktantov, nastopi sila na steno razpoke ter koncentracija napetosti na njenem ustju. Posledica je rast oziroma širjenje razpoke. Rast kristalov etringita je povzročila napetosti v matrici betona. Nastajanje etringita na nukleacijskih mestih ob razpoki pa ima lahko za posledico tudi njeno zapiranje. Pri raziskavi so bili uporabljeni ena vrsta cementa in en tip aeranta z dodatkom dveh tipov elektrofiltrskega pepela različnih kemijskih sestav. Elektrofiltrski pepel je dodatek, ki ga navadno dodajamo že cementom, saj ima latentne hidravlične ali pucolanske lastnosti. Maksimalno zrno mineralnega agregata je bilo 2 mm. Vodovezivno razmerje, količina dodatkov ter pogoji za potek hidratacije pa so bili določeni na osnovi laboratorijskih preizkusov. Prav tako so bili določeni tudi potrebni klimatski pogoji okolja za načrtovano tvorbo kristalov etringita v strjenem betonu.

2 • EKSPERIMENTALNO DELO

Prvi del preiskav je bil opravljen na cementni pasti standardne konsistence, iz katere so bile izdelane pogačice, ki so bile negovane 24 ur v vlažni komori pri relativni vlažnosti zraka $98 \pm 2\%$ in temperaturi $20 \pm 2\text{ °C}$. Po tem času so bile pogačice tri ure izpostavljene vrenju v vodi. Nato je bila polovica vzorcev negovana v vodi pri temperaturi $20 \pm 2\text{ °C}$, druga polovica pa na zraku pri temperaturi $20 \pm 2\text{ °C}$ ter relativni vlažnosti zraka $65 \pm 2\%$.

Pri izdelavi teh vzorcev je bil uporabljen cement CEM I 42,5 R in elektrofiltrski pepel dveh različnih kemijskih sestav (tip (a) in tip (b)), ki se uporablja kot dodatek za betone in je skladen s standardom SIST EN 450-1. Rezultati laboratorijskih analiz pepelov, ki so nam jih posredovali proizvajalci, so podani v preglednici 1.

Cementni pasti je bil dodan še aerant, ki bazira na vodni raztopini abietinske kisline. Masni deleži posameznih komponent cementne paste, pri kateri je bila dosežena standardna konsistenca po standardu SIST EN 196-3, je podan v preglednici 2.

Komponenta	Vsebnost komponent za EFP tip (a) (% (m/m))	Vsebnost komponent za EFP tip (b) (% (m/m))
Žarilna izguba pri 950 °C	2,63	0,41
Netopni ostanek	10,23	16,67
SiO ₂ v netopnem ostanku	5,77	13,08
SiO ₂ čisti	42,82	47,62
SiO ₂ raztopljen	0,48	0,64
SiO ₂ celokupni	43,30	48,26
SiO ₂ reaktivni	37,53	35,18
CaO reaktivni	8,01	7,56
SO ₃	1,88	1,88
CaO prosti	1,22	2,00

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz elektrofiltrskih pepelov

Oznaka vzorca	C (g)	EPF (g)	V (g)	D (g)
1	413,3	186,7 tip (a)	159,5	18
2	413,3	186,7 tip (b)	154,5	18

Preglednica 2 • Masni deleži komponent cementne paste standardne konsistence za posamezni preskušaneč – pogačico

Oznake v preglednici 2 pomenijo:

- C, masa cementa CEM I, 42,5 R,
- EPF, masa elektrofiltrskega pepela,
- V, masa vode, in
- D, masa dodanega aeranta.

Na preskušancih iz cementnega kamna – pogačicah – je bila v časovnih intervalih 7, 14 in 28 dni opravljena vizualna kontrola površine, analiza mikrostrukture na prelomnih površinah preskušancev pa je bila opravljena z elektronskim vrstičnim mikroskopom Quanta 200 3D oziroma Sirion 400 NC.

Malta za preskušance, namenjene preiskavam trdnosti in ekspanzije, je bila izdelana z

laboratorijskim mešalcem, ki ustreza zahtevam standarda SIST EN 196-1. Preskušanci so bili izdelani iz malt dveh različnih receptur in z vodovezivnim razmerjem, enakim tistemu za standardno konsistenco cementne paste. Sveža malta je bila vgrajena v standardne kalupe 4/4/16 cm s pomočjo vibracijske mize, s časom vibriranja 5 sekund, frekvenco 50 Hz in amplitudo 0,75 mm. Privzeti čas vibriranja je bil določen na 5 sekund zaradi zmanjšanja učinka koalescence in izhajanja zračnih mehurčkov na površino maltnih preskušancev.

Masni deleži komponent maltnih mešanic z oznakama BI in CI so podani v preglednici 3.

Receptura	A (g)	C (g)	EPF (g)	V (g)	D (g)
BI	1350	310	140 tip (a)	218,2	6,8
CI	1350	310	140 tip (b)	218,2	6,8

Preglednica 3 • Masni deleži komponent obravnavanih malt

Oznake v preglednici 3 pomenijo:

- A, masa agregata (standardni pesek) SIST EN–196-1,
- C, masa cementa CEM I, 42,5 R,
- EPF, masa elektrofiltrskega pepela,
- V, masa vode, in
- D, masa dodanega aeranta.



Slika 1 • Merilni komplet za merjenje ekspanzije na preskušancih v klimatski komori

Količina dodanega aeranta je znašala 0,3 % (m/m) glede na skupno maso cementa in elektrofiltrskega pepela. Preskušanci so bili negovani 28 dni v klimatski komori pri temperaturi 20 ± 2 °C in relativni vlažnosti zraka 98 ± 2 %. Na preskušancih iz malt BI in CI sta bili pri starostih 7, 14, 28, 56 in 113 oziroma 122 dni določeni tlačna (f_c) in upogibna trdnost (f_m) po določenih standarda SIST EN 196-1 na po 3 preskušancih. Po 28 dneh pri temperaturi 20 ± 2 °C ter relativni vlagi 98 ± 2 % je bil na dodatnih 12 preskušancih vsake serije, ki so bili izdelani po recepturah BI ter CI, opravljen Dugganov test (Ramadan, 2000). Dugganov test se uporablja za pospešeno oblikovanje etringita, saj z vplivi cikličnega segrevanja in vlaženja izzovemo reakcijo zakasnele tvorbe etringita. Pri Dugganovem testu izpostavimo preskušance naslednjemu zaporedju pogojev okolja:

- 3 dni namakanja vzorcev v demineralizirani vodi pri temperaturi 20 ± 2 °C,
- 1 dan sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi 81 ± 2 °C,
- 1 dan namakanja v demineralizirani vodi pri temperaturi 20 ± 2 °C,
- 1 dan sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi 81 ± 2 °C,
- 1 dan namakanja v vodi pri temperaturi 20 ± 2 °C in
- 3 dni sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi 81 ± 2 °C.

Med posameznimi fazami so bili preskušanci 4 ure kondicionirani v eksikatorju. Po opravljenem Dugganovem testu je bilo treba vzorce še en dan namakati v demineralizirani vodi, da so se kapilare v betonu ponovno napolnile z vodo. Preskušanci iz malt BI in CI so bili nato vstavljeni v napravo za merjenje ekspanzije, ki je bila izdelana po določenih standarda ASTM C490-86. Ti preskušanci so označeni kot BI/DT in CI/DT. Naprava je bila nameščena v klimatski komori s temperaturo 20 ± 2 °C ter relativno vlažnostjo zraka 98 ± 2 %.

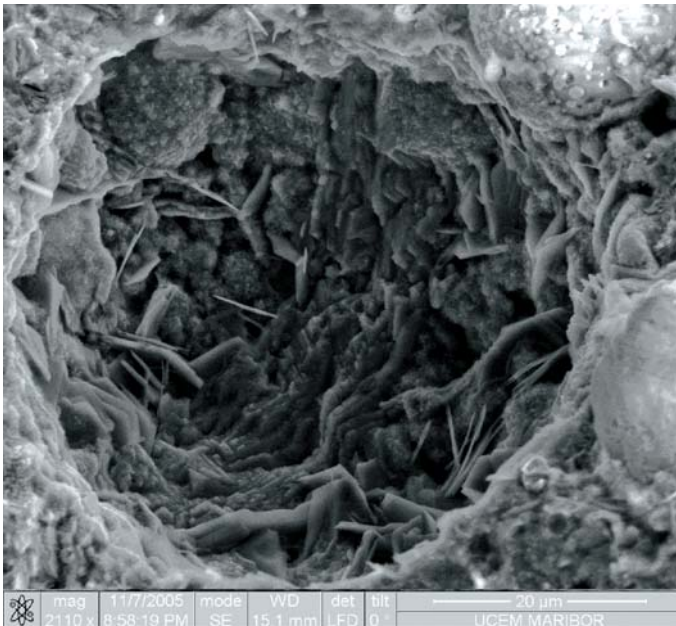
Nabrekanje preskušancev smo spremljali z merjenjem deformacij v smeri daljše osi prizem z digitalnimi mikrometri MarCator 1080/12,5/0,005 mm proizvajalca Mahr, z natančnostjo $\pm 0,005$ mm. Rezultate smo zapisovali s pomočjo programske opreme Comlogger in računalnika. Meritve deformacij so potekale istočasno na dvanajstih preskušancih v 15-minutnih časovnih intervalih. Meritve so bile končane, ko na napravi za merjenje ekspanzije nismo zabeležili bistvenih sprememb. Po tem smo določili gostoto preskušancev ter njihovo tlačno in

upogibno trdnost. Primerjalno so bile v istem časovnem obdobju določene tudi tlačne in upogibne trdnosti na serijah 6 preskušancev,

ki niso bili izpostavljeni Dugganovemu testu. Na vseh preskušancih je bila opravljena še kontrola mikrostrukture z optičnim stereo-

mikroskopom Olympus SZX ter elektronskim vrstičnim mikroskopom QUANTA 200 3D, SIRION 400 NC in JEOL JSM 5610.

3 • REZULTATI IN DISKUSIJA



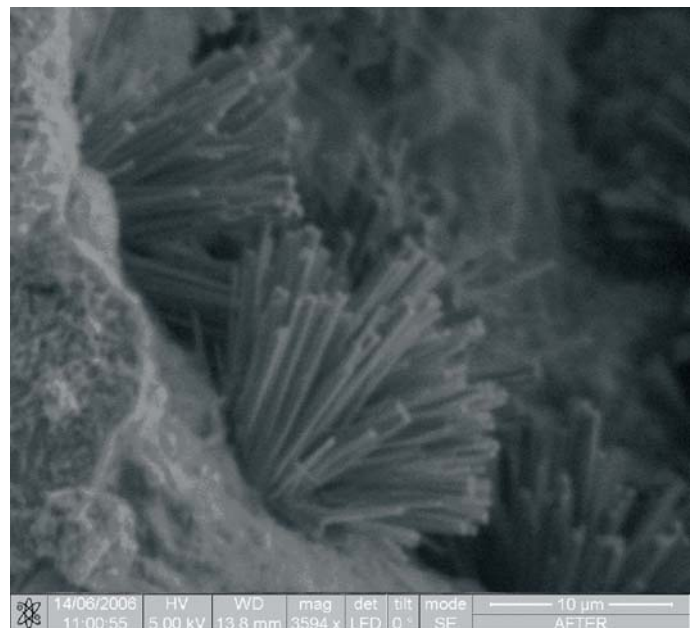
Slika 2 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (a), povečana 2110-krat



Slika 3 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (a), povečana 4000-krat

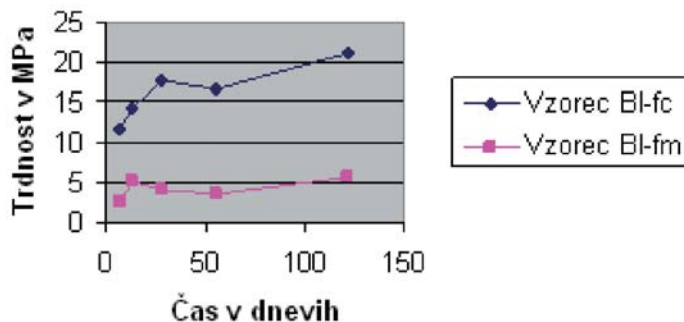


Slika 4 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (b), povečana 996-krat



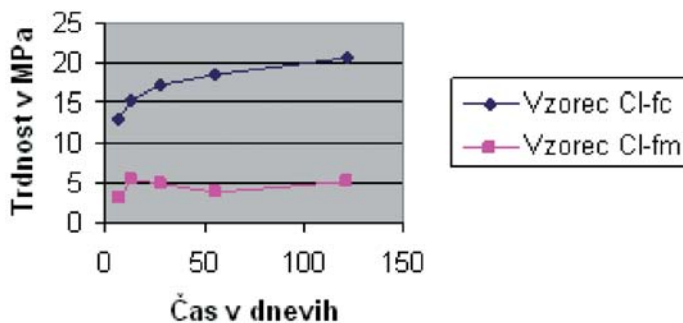
Slika 5 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (b), povečava 3594-krat

ČASOVNI RAZVOJ TRDNOSTI ZA VZORCE IZDELANE PO RECEPTURI BI



Slika 6 • Tlačna in upogibna trdnost maltnih prizem BI

ČASOVNI RAZVOJ TRDNOSTI ZA VZORCE IZDELANE PO RECEPTURI CI



Slika 7 • Tlačna in upogibna trdnost maltnih prizem CI

3.1 Analiza mikrostrukture na pogačicah iz cementne paste standardne konsistence

Znano je, da se etringit v strjenem betonu lahko pojavlja v različnih oblikah, zelo pogosto v skupkih igličastih kristalov različnih velikosti. Kristale etringita navadno ločimo po dveh tipičnih oblikah, ki pa se razlikujeta od pogojev nastanka. Ločimo kristale tipa I, ki so lahko dolgi od 10 do 100 μm in debeline nekaj μm , ter kristale, ki so dolgi od 1 do 2 μm , z debelino od 0,1 do 0,2 μm (tip II). Oblika kristalov etringita tipa I naj bi bila manj ekspanzivna od oblike II (Mehta, 1983).

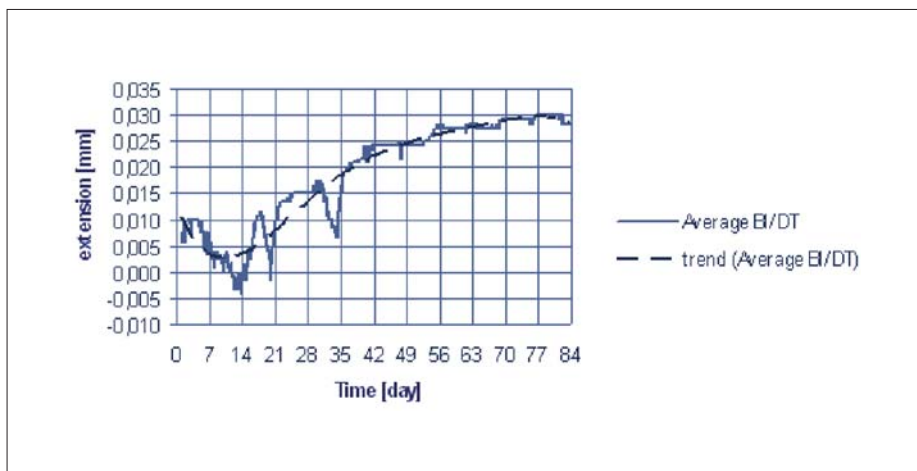
Na slikah 2 in 3 je prikazana mikrostruktura prelomne površine cementnega kamna – pogačice, izdelane s pepelom tipa (a), po 28 dneh nege v vodi. Posnetek SEM pri 2110-kratni povečavi (slika 2) kaže steno mehurčka zraka, kjer na porozni površini stene nastajajo kristali CSH in drobni igličasti kristali etringita. Posnetek SEM pri 4000-kratni povečavi (slika 3) pa kaže, da prevladujejo kristali dolžine do 10 μm in debeline manj kot 1 μm , igličaste oblike. Oblika kristalov je pri zakasneli tvorbi etringita pogojena tudi s pogoji kristalizacije. Če ni prostorskih ovir, etringit kristalizira v tipično igličasti obliki (Stark, 2000).

Na slikah 4 in 5 je prikazana mikrostruktura prelomne površine cementnega kamna – pogačice, izdelane s pepelom tipa (b), prav tako po 28 dneh nege v vodi. Drobni igličasti kristali etringita nastajajo prav tako med kristali CSH v skupkih. Posnetek SEM na sliki 4 prikazuje kristale na steni zračnega mehurčka v cementnem kamnu pri 996-kratni povečavi, posnetek SEM na sliki 5 pa skupek kristalov pri 3594-kratni povečavi.

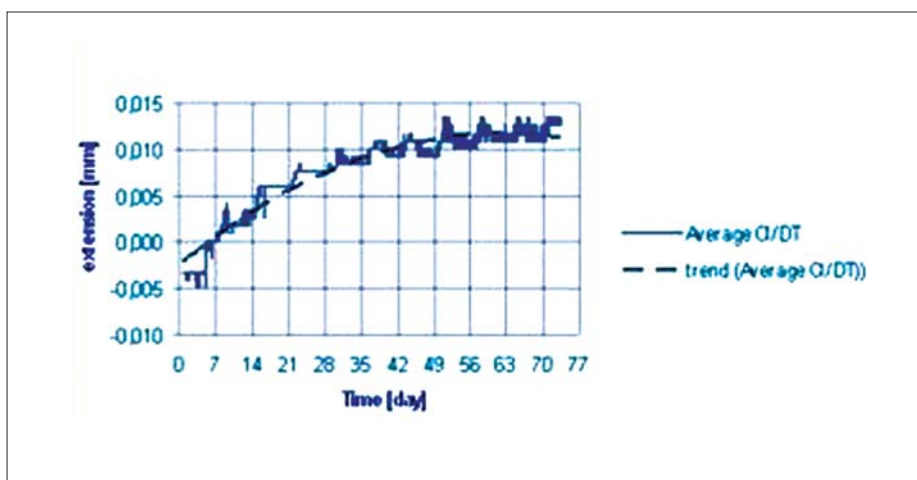
Pri analizi mikrostrukture preskušancev, ki so bili negovani v vodi ali v klimatski komori, niso bile ugotovljene bistvene razlike v mikrostrukturi.

Oznaka vzorca	7 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³	14 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³	28 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³	56 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³	113 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³	122 dni f_c/ρ MPa/kg/m ³
BI	11,60/1801	14,30/1807	17,70/1803	16,70/1817	–	21,00/1818
BI/DT	–	–	–	–	–	22,45/1810
CI	13,00/1819	15,30/1822	17,30/1804	18,50/1823	20,50/1799	–
CI/DT	–	–	–	–	21,90/1781	–

Preglednica 4 • Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti in gostot preskušancev z opravljenim Dugganovim testom (oznake BI/DT in CI/DT) ter brez opravljenega Dugganovega testa (oznake BI in CI)



Slika 8 • Ekspanzija preskušancev z oznako BI/DT po opravljenem Dugganovem testu



Slika 9 • Ekspanzija preskušancev z oznako CI/DT po opravljenem Dugganovem testu

3.2 Rezultati tlačnega in upogibnega preskusa maltnih prizem

Rezultati tlačnega in upogibnega preskusa maltnih prizem, izdelanih iz malt BI in CI, pri starosti malt 7, 14, 28, 56 ali 113 oziroma 122 dni, so prikazani na slikah 6 in 7.

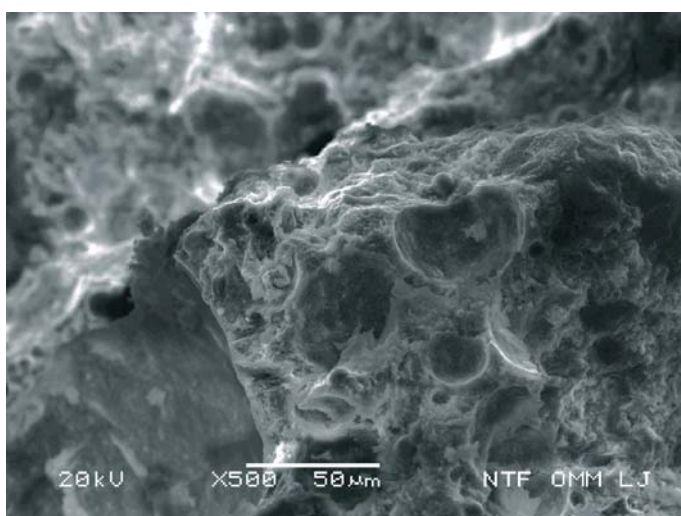
Časovni razvoj trdnosti malt je za preskušance obeh receptur najintenzivnejši do starosti 28 dni, nadaljnji razvoj trdnosti do 56 dni je počasnejši. Tlačne trdnosti in upogibne trdnosti se za preskušance obeh receptur v opazovanem obdobju bistveno ne razlikujejo. Prav tako ni bistvenih razlik pri izmerjenih gostotah strjenih malt.

Tlačne trdnosti ter gostote preskušancev, na katerih je bil predhodno opravljen Dugganov test, so podane v preglednici 4 skupaj z vrednostmi teh karakteristik na preskušancih, pri katerih ta test ni bil opravljen. V preglednici 4 niso podane upogibne trdnosti, ker med njimi ni bistvenih razlik, kar je razvidno iz diagramov na slikah 6 in 7.

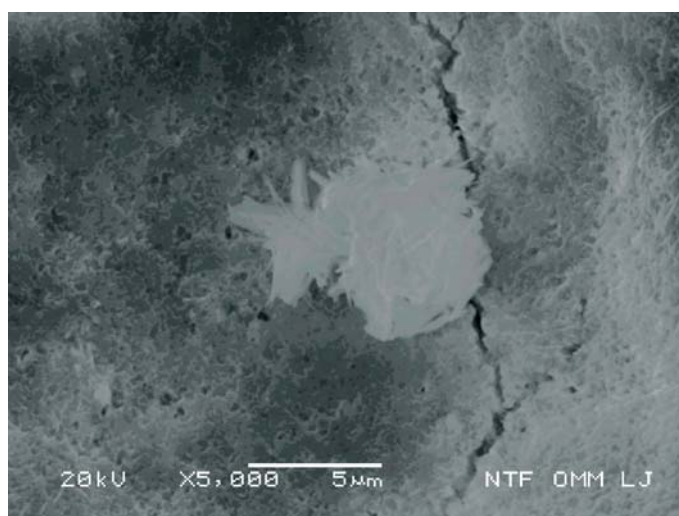
Iz rezultatov v preglednici 4 je razvidno, da imajo preskušanci BI/DT po končanih meritvah ekspanzije 6,9 % večjo tlačno trdnost kot primerjalni preskušanci BI, preskušanci CI/DT pa 6,8 % večjo tlačno trdnost od primerjalnih preskušancev z oznako CI. Za obe primerjavi velja, da so imeli analizirani vzorci zelo podobno gostoto.

3.3 Rezultati meritve ekspanzije preskušancev po Dugganovem testu

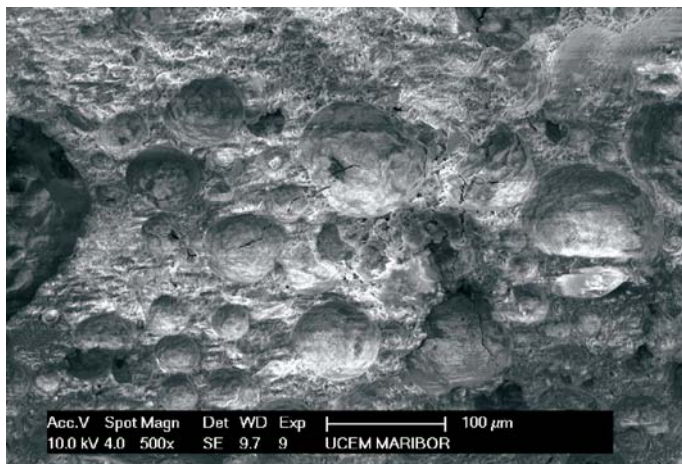
Ekspanzijo preskušancev smo spremljali do trenutka, ko na napravi za merjenje deformacij tri dni zapored na več kot polovici preskušancev



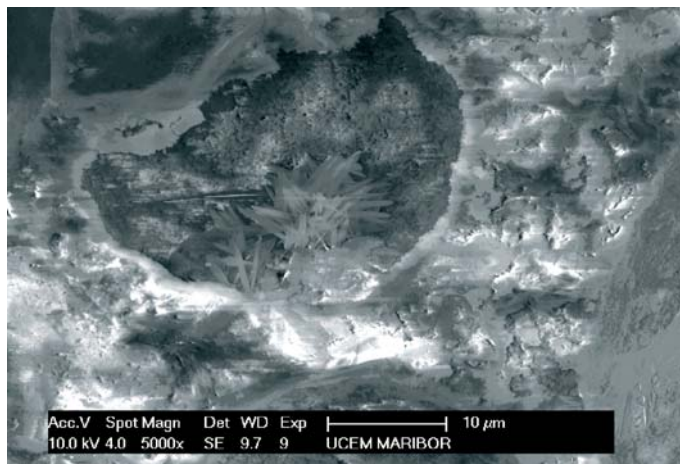
Slika 10 • Mikrostruktura preskušancev – maltnih prizem, na katerih je bil opravljen Dugganov test (500-kratna povečava preskušanca CI/DT)



Slika 11 • 5000-kratna povečava mehurčka z razpokano steno



Slika 12 • Mikrostruktura preskušancev BI/DT po 121 dneh, povečana 500-krat



Slika 13 • Mikrostruktura preskušancev BI/DT po 121 dneh, povečana 5000-krat

nismo izmerili nobenih sprememb. V primeru preskušancev z oznako BI/DT se je to dogodilo po 122 dneh, pri preskušancih z oznako CI/DT pa po 113 dneh.

Na preskušancih z oznako BI/DT je bilo izmerjeno povprečno 0,018 % ekspanzije, na preskušancih z oznako CI/DT pa 0,011 %.

Rezultati meritev so v obliki diagramov prikazani na slikah 8 in 9. Podana je srednja vrednost zabeleženih meritev na vseh 12 preskušancih ter regresijska krivulja v obliki polinoma, ki je bila generirana s programsko opremo Excel.

Nabrekanje strjene malte je posledica nabrekanja hidratacijskih produktov zaradi učinka

sulfatnih ionov. Sulfatna agresija v strjenem betonu lahko nastopi le, če je beton dovolj porozen. Uporaba aeranta povzroči nastanek zaprtih zračnih mehurčkov v cementni matrici. Pri analizi mikrostrukture preskušancev, ki so bili izpostavljeni Dugganovemu testu, pa smo ugotovili, da so na stenah zračnih mehurčkov nastale razpoke. Iz teh razpok pa v notranjost mehurčka rastejo kristali etringita – glej slike 10 in 11.

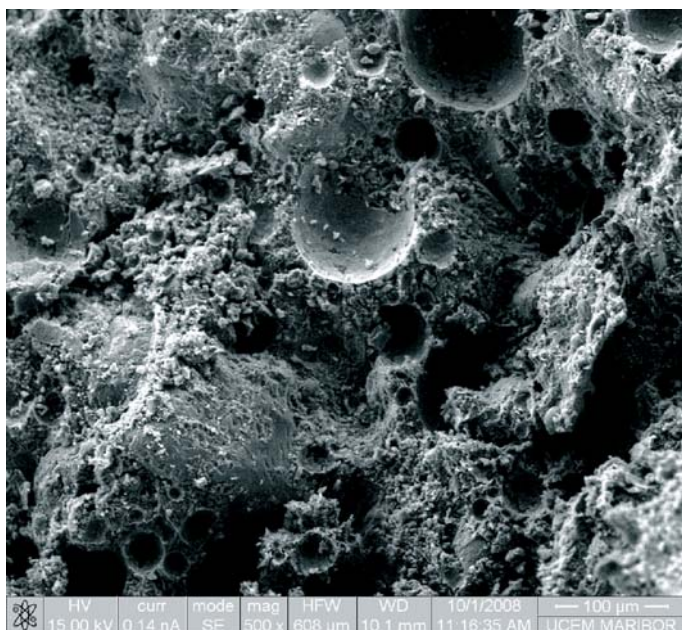
Iz diagramov, podanih na slikah 8 in 9, je razvidno, da linearno večanje ekspanzije pri obeh skupinah preskušancev nastopi po 56 dnevih meritve. Znano je, da visoka ekspanzija zanesljivo poslabša tudi mehanske lastnosti

betona. Povečanje ekspanzije, ki pa mora biti manjše od 0,2 %, pa tlačne trdnosti betona ne znižuje (Brunetaud et al., 2008).

Ekspanzija pri preskušancih iz malte BI/DT, ki je bila izdelana s pepelom tipa (a), je nekoliko večja kot pri preskušancih s pepelom tipa (b). Menimo, da je vzrok za razliko v dejstvu, da imajo pepeli z nižjo vsebnostjo prostega CaO večjo nagnjenost k nabrekanju (Foliard K. J. et. al., 2006).

3.4 Analiza mikrostrukture na maltah

Mikrostrukturo malt smo analizirali na prelomnih površinah maltnih prizem po opravljenem preskusu trdnosti.



Slika 14 • Mikrostruktura preskušancev CI/DT po 121 dneh, povečana 500-krat



Slika 15 • Mikrostruktura preskušancev CI/DT po 121 dneh, povečana 5000-krat

Na mestih nastanka etringita – nukleacijskih mestih, ki jih tvorijo vneseni zračni mehurčki, je bila ugotovljena zelo podobna mikrostruktura kot na pogačicah, ki so bile izdelane iz cementne paste standardne konsistence.

Iz slik 12 in 13, ki prikazujeta posnetek SEM prelomne površine preskušanca BI/DT pri

500- in 5000-kratni povečavi, je razvidno, da so kristali etringita tanki in manjši od 10 μm . Ti kristali so nastali na mestu porozne strukture stene zračnega mehurčka v malti.

Iz slik 14 in 15, ki prikazujeta posnetek SEM prelomne površine preskušanca CI/DT pri 500 in 5000-kratni povečavi, je razvidno, da

so kristali etringita še manjši. Tudi ti skupki kristalov zelo majhne rasti nastajajo na mestih porozne strukture stene zračnega mehurčka. Oblika teh kristalov nakazuje, da njihova rast verjetno še ni končana in se bo nadaljevala v primeru optimalnih pogojev, kot sta prisotnost vode in povišana temperatura.

4 • SKLEP

Z vizualnim pregledom preskušancev po opravljenem Dugganovem testu in preiskavah v klimatski komori na preskušancih niso bile ugotovljene nobene poškodbe oziroma razpoke, ki bi lahko bile posledica vpliva zakasnele tvorbe etringita. Z analizo mikrostrukture prelomnih površin preskušancev je bilo ugotovljeno, da so na mestih zračnih mehurčkov, ki so nastali kot posledica delovanja aeranta, zrasli drobni in tanki kristali etringita, za katere je znano, da lahko povzročajo

nabrekanje. Lokalna koncentracija napetosti na teh nukleacijskih mestih, kjer je prišlo do rasti kristalov etringita, ni povzročila lokalnih razširitev mikrorazpok, kar bi lahko povzročilo znižanje tlačnih trdnosti. Rast kristalov etringita na poroznih stenah zračnih mehurčkov je povzročila spremembo mikrostrukture betona. Ta sprememba predstavlja transformacijo obstoječe porozne mikrostrukture v fino, z drobnimi kristali etringita zgoščeno mikrostrukturo. Zaradi spremembe strukture

malt na teh mestih se je cementna matrica utrdila. Posledica je povečanje tlačne trdnosti preskušancev z oznako BI/DT za 6,9 % v primerjavi s preskušanci BI in preskušancev z oznako CI/DT za 6,8 % v primerjavi s preskušanci CI.

Za potrditev prikazanega mehanizma otrditve betona z načrtovano zakasnelo tvorbo etringita bo treba opraviti še analizo mikrostrukture ter meritve mehanskih lastnosti:

- maltnih preskušancev obravnavane sestave brez Dugganovega testa in
- maltnih preskušancev brez dodanega aeranta oziroma brez opravljenega Dugganovega testa.

5 • LITERATURA

- Bauer, S., Cornell, B., Figurski, D., Ley, T., Miralles, J., Folliard, K., AlkaliSilica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: Literature Review, Center for Transportation Research and Technology, Austin, februar 2006.
- Brunetaud, X., Divet, L., Damidot, D., Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation – induced expansion on concrete mechanical properties, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 11, str. 1343–1348, november 2008.
- Colepardi, M., A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issues 4–5, str. 401–407, maj–julij 2003.
- Folliard, K. J., Barborak, R., Drimalas, T., Du, L., Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Thomas, M. D. A., Fournier, B., Preventing Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in New Concrete, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Project Summary Report 0-4085-S, marec 2006.
- Gerbec, B., Proučevanje in dokazovanje korozijske odpornosti betona v čistilni napravi Zalog, GI ZRMK, 2005.
- Stark, J., Bollmann, K., Delayed Ettringite Formation in Concrete, Bauhaus University Weimar/Germany, <http://www.itn.is/ncr/publications/doc-23-2.pdf>, 2000.
- Mehta, P. K., Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete – Another Look, Cement and Concrete Research 13, str. 401–406, 1983.
- Ramadan, E., Experimental and Theoretical Study of Delayed Ettringite Damage in Concrete, Dissertation submitted to the faculty of the Graduate School of the University of Maryland, USA, 2000.
- Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L., Delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 5, str. 683–693, maj 2001.
- Taylor, H., Cement chemistry, 2nd edition, Thomas Telford, London, 1997.