

# DETERIORATION OF THE QUALITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AS A RESULT OF ALKALI-SILICA REACTION

**Borislav Borisov**

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia,  
Email: bborisov32@yahoo.com*

**ABSTRACT.** The process of concrete quality deterioration due to alkali-silica reaction of aggregates is briefly discussed. The main factors causing the reaction are outlined, along with the prevention measures for newly-built facilities, and the repair and protection of already built ones.

## ВЛОШАВАНЕ НА КАЧЕСТВАТА НА СТОМАНОБЕТОННИТЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕЗУЛТАТ НА АЛКАЛО-СИЛИЦИЕВА РЕАКЦИЯ

**Борислав Борисов**

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Накратко е разгледан процесът по влошаване на качествата на бетона, вследствие на алкало-силициева реакция на добавъчните материали. Очертани са основните фактори, предизвикващи протичането на реакцията, мероприятията по превенция при новоизградени съоръжения, както и поправката и защитата на вече построените такива.

### I. Увод

При проектирането и строителството на устойчиви на корозия сгради и съоръжения следва да се вземат предвид климатичните, хидрогеоложките и инженерно-геоложките характеристики на строителната площадка, условията на експлоатация на конструкциите, свойствата на материалите и типа на конструкциите, свойствата на защитните покрития и тяхната устойчивост и дълготрайност при експлоатационните условия (Защита на строителните конструкции от корозия, норми и правила за проектиране, Утвърдени със заповед № 1940 от 27.VI.1980 г. на МССМ и № 335 от 24.VI.1980 г. на КАБ). Дълготрайността, надеждността и качеството на бетонните и стоманобетонните конструкции, се определят от проектирането, особеностите на експлоатационната среда и правилния избор на строителните материали, технологията и качеството на строителното изпълнение, както и адекватната поддръжка по време на съществуването на съоръжението. Проектирането на експлоатационния живот на стоманобетона е един от основните аспекти на икономическата ефективност и устойчивост при съвременното подземно строителство. Осигуряването на стоманобетонните конструкции за необходим времеви период предотвратява разходите за преждевременни ремонтни дейности, както и свързаните с ремонтите функционални разходи. Освен финансовите щети следва да се отчетат рисковете за живота и здравето на населението, както и намалената производителност на труда и екологичните, инфраструктурни и други рискове, произтичащи от аварии и ремонти на инфраструктурата. (Борисов и Павлов, 2024; Борисов и др. 2023; Борисов 2021).

Някои от най-сериозните проблеми, свързани с дълготрайността, възникващи при експлоатацията на стоманобетонните конструкции, са корозията на вградената армировъчна стомана, увреждане поради цикли на замръзване и размразяване, химически въздействия и алкало-силициева реакция. Предмет на

настоящата публикация е алкало-силициевата реакция, добила публичност още като „рак на бетона“.

### II. Механизъм на алкало - силициевата реакция

#### Общи сведения

Влошаване качеството на бетона е естествен процес, който е необходимо да бъде наблюдаван внимателно по време на експлоатацията на строителните конструкции. Алкало-силициевата реакция е бавен процес на разрушаване, който се развива в продължение на десетилетия. Това е реакция на силиция, съдържащ се в добавъчните материали, с алкални съединения в присъствието на влага и калций. От откриването му преди 80 години, разбирането на процеса е затруднено поради променящите се във времето обуславящи го параметри, които не е лесно да се изолират и изследват. Такива параметри са концентрациите и химическия състав на разтворите в порите на бетона, температурата, наличието на влага и др. както е посочено от Albinski (2021).

Процесът на алкало-силициевата реакция първоначално е формулиран в САЩ от Пиърсн като „изследване на опасни добавъчни материали“ (Diamond, 1992). Впоследствие, през 30-те години на миналия век на територията на САЩ и по света са идентифицирани редица конструкции със сериозна степен на дефекти от напукване. През 1940 г. Stanton публикува проучвания, в които заключава, че причината за тези дефекти е реакцията на алкалите от циментовия камък (Na и K) със силициев диоксид от агрегатите. Неговите публикации се считат за първите, които описват алкало-силициевата реакция. Понастоящем е установено, че бетонни и стоманобетонни конструкции по целия свят са засегнати от този вреден процес, като обичайно се наблюдава увреда по бетона няколко десетилетия след построяването им. Например, според Merz et al. (2006), в Швейцария са засегнати няколкостотин съоръжения и това е основно

притеснение за дълготрайността на отговорни съоръжения като тунели, мостове и язовирни стени.

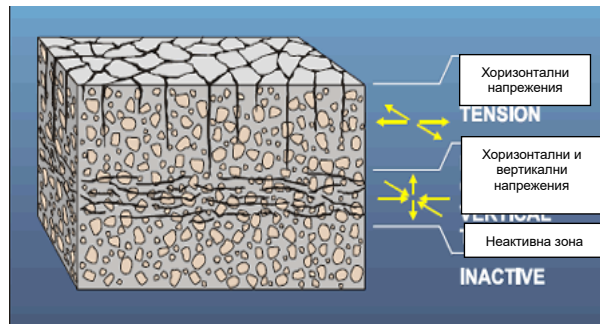
### Алкална реакция на агрегатите

Бетонната смес е сложна многокомпонентна дисперсна система, която се получава непосредствено след добавяне на вода към сместа от цимент и добавъчни материали. Тя се състои от финодисперсни частици на цимент с вода, от зърната на добавъчните материали, от вода и от въвлечения в процеса на приготвянето на сместа въздух. Съгласно Симеонов и др. (1991) в зависимост от количествата на циментното тесто и на добавъчните материали се различават три основни структури на бетонната смес: плаваща, компактна и неплътна структури.

В началния период, наречен период на формиране на структурата, якостта на бетонната смес бавно се увеличава, но в течение на определено време тя все още запазва способността си за значителни пластични деформации. Вследствие на хидратацията на цимента и наличието на достатъчно количество новообразувания, чиито частици се сближават, започва преход от коагулационната структура към кристализационна с рязко нарастване на якостта. В резултат от тези процеси възниква твърдата структура на бетона. Структурата на бетона, образувала се след втвърдяването на бетонната смес е съставена от добавъчните материали и циментния камък, свързал техните зърна, както и от много празнини с различни размери и произход. В бетона се различава макроструктура, представена от структурата едър добавъчен материал, циментно-пясъчен разтвор, едри пори и празнини. Микроструктурата на бетона представлява строежът на компонентите на бетона (циментен камък и добавъчни материали), както и строежът на контактната зона между тях, както е посочено от Симеонов и др. (1991). В резултат на взаимодействието между циментния камък и повърхността на добавъчните материали се формира така наречената контактна зона, която оказва влияние върху свойствата на бетона. Нейната широчина се изменя в границите от 30 до 60  $\mu\text{m}$ . По своя състав и свойства контактната зона се различава от останалия циментен камък.

Порите в бетона са съществен елемент от неговата структура и оказват определено влияние върху свойствата му. Те се образуват поради изпарението на излишната вода, контракцията на циментния камък по време на хидратацията, въвлечането на въздух при изготвянето на бетонната смес, както и в резултат от използването на въздуховъвлечащи добавки. Сравнително по-едри пори и празнини се образуват в бетона също така и поради частично запълване на празнините между зърната на добавъчните материали с циментен камък и недобро уплътнение на циментовата смес. Съществуват и така наречените седиментационни пори, които се образуват поради отделянето на част от направната вода от бетонната смес (Симеонов и др., 1991). Порите съдържат разтвори на йони, резултиращи от хидратационните процеси на цимента. Следователно, химическия състав на разтворите в порите на бетона зависи от състава на цимента. Повърхностите на агрегатите (едрите и дребни добавъчни материали) си взаимодействат като влизат в реакции с химическите съединения, присъстващи в разтворите в порите на контактната зона.

Алкалната реакция на агрегатите (АРА) е химичен процес, при който алкалите, присъстващи в цимента, се комбинират с реакционни съединения, съдържащи се в добавъчните материали при наличие на влага. Тази реакция води до създаване на алкало-силикатен гел, който може да абсорбира вода и да разшири обема си, предизвиквайки напукване и разрушаване на бетона (Sika, 2015).



Фиг. 1. Схематично представяне на напукване на бетон вследствие на АРА (Sika, 2015)

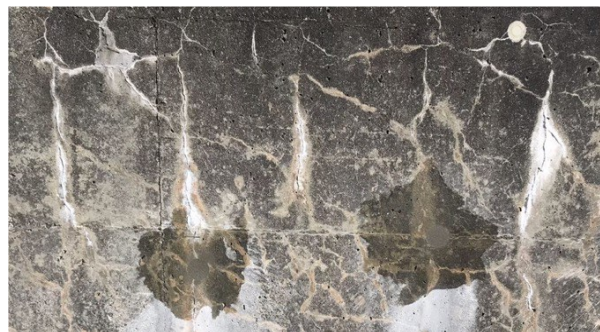
Някои добавъчни материали притежават реакционна способност спрямо алкални окиси ( $R_2O$ ). Симеонов и др. (1991) пишат, че при взаимодействието на  $Na_2O$  и  $K_2O$  с реакционноспособните модификации на  $SiO_2$  (опал, халцедон, тридимит, кристобалит и др., съдържащи се в риолити, риолитови туфи, андезити, андезитови туфи, силициеви шисти, силициеви варовици и др.) се образува гелообразно вещество –  $R_2O \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ , при което новообразуваните вещества са с по-голям обем от изходните, тъй като гелът, поглъщайки вода, увеличава обема си. Това нарушава сцеплението между циментовия камък и добавъчните материали, появяват се напуквания, вследствие на което бетонът се разрушава.

### Алкало - силициева реакция

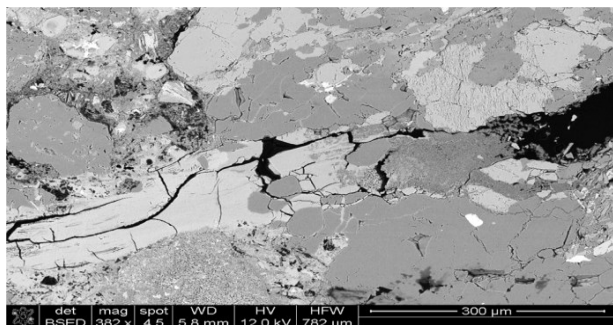
Алкалната реакция на агрегатите може да приеме три форми:

- алкало - силициева реакция;
- алкало - силикатна реакция;
- алкало - карбонатна реакция.

По-голямата част от установените случаи на алкалната реакция на агрегатите е под формата на алкало-силициева реакция (АСР). АСР е преобладаващият механизъм на разрушение и представлява най-съществен интерес за изследователска работа и за строителната практика.



Фиг. 2. Пукнатини по подпорна стена в гр. Берн (Brunig area), вследствие АСР (макроскопско изображение) (Albinski, 2021).



Фиг. 3. Пукнатини и кристализиран гел по подпорна стена в гр. Берн (Brunig area), вследствие АСР (микроскопско изображение) (Albinski, 2021).

За протичане на алкало-силициева реакция, както и за да се прояви разрушително разширяване на получения гел във втвърден бетон, е необходимо да са налице следните четири фактора (Sika, 2015).

- достатъчно концентриран на алкали разтвор в порите на бетона – източници на алкали могат да бъдат: циментът, активните минерални добавки, добавъчните материали и химически добавки;
- наличие на достатъчно калций – източници от цимента и активните минерални добавки;
- наличие на разтворим в алкална среда силициев диоксид или силикат в инертните материали;
- достатъчно влага в бетона (поне 75 % относителна влажност) – влагата в бетона, както и проникващата от околната среда.

Механизмът на АСР най-общо е следният:

- проникване на алкални метални йони в агрегатите;
- нарушаване на връзките Si = O и вместване на алкали в иначе стабилните и инертни силициеви тетраедри;
- поглъщане на вода, водещо до разширение на продукта от реакцията;
- напукване на бетона, поради вътрешни напрежения, породени от разширението.

Алкало-силициевата реакция е бавна, неравномерна и протича в рамките на десетилетия. Могат да се отделят следните по-основни етапи на АСР:

- първоначален период на взаимодействие между алкалите и разтворимо силициево вещество, съдържащо се в агрегатите и като резултат – образуване на изходния продукт от реакцията;
- бавно разширение на гелообразният продукт, резултиращо във фини пукнатини в агрегатите и по контактната зона;
- процес на по-бързо и значително разширение на гела, причиняващо по-сериозни пукнатини в агрегатите по контактната зона и по циментовият камък до изчерпване на реакционния потенциал на бетона.



Фиг. 4. Основни етапи на протичане на АСР (Marwa et al, 2016)

Добавъчните материали заемат до 80 – 85 % от обема на бетона и оказват определено влияние върху неговите физико-механични свойства, дълготрайност и себестойност. Твърдият скелет от добавъчни материали повишава якостта и намалява деформируемостта на бетона. Степента на реакционна способност на добавъчните материали е функция предимно от коефициента им на дифузия [Kd], концентрацията на алкали [C], времето [t] и радиуса на зърната [R]. Способността за реакция и на едрия (чакъл и трошен камък), и на дребния (естествени и изкуствени пясъци) добавъчни материали за бетон оказва влияние и следва да се оцени и вземе предвид при определянето на бетоновите състави. Потенциалната алкалореакционност на добавъчния материал се изследва чрез минералопетрографски анализ, ускорени химически тестове, обследване чрез измерване на деформациите и изпитване за относително линейно удължение на призматични пробни тела съгласно БДС 14851:2015. Обследванията се извършват по утвърдени методики съгласно редица стандарти, като например: БДС 14851:2015, AASHTO T299, ASTM C227, C289, C586, C1260, C1567, RILEM AAR-3, AAR-4, AAR-8 AAR-13 и т. н.

Реакционният потенциал на бетона и респективно степента на разширение са функция от следните компоненти:

- количество на алкали, вкл. съдържанието им в цимента и общото количество цимент на m<sup>3</sup>;
- присъствие на разтворимо в алкална среда силициево вещество;
- повърхността на зърната на реакционно способните агрегати – зърнометричен състав;
- наличие на алкалореакционни скалообразуващи минерали в изходните материали за агрегатите;
- наличие на влага;
- условия на околната среда (температура и влажност).

#### Негативни въздействия вследствие АСР

Авторите на изследване, публикувано в Construction and Building Materials, Volume 95, (2015) информират, че причиненото от АСР напукване има следните негативни въздействия върху качеството на бетона:

- разширение - поведението на гелообразният продукт на АСР способства за разширението и дезинтегрирането на бетона;
- якост на натиск – при по-голямо разширение АСР може да окаже съществено влияние върху якостта на натиск;
- якост на опън при огъване - напукването може значително да намали якостта на опън при огъване на бетона;
- модул на еластичност - ефектът на АСР върху еластичните свойства на бетона и скоростта на ултразвуковия импулс (UPV) е много подобен на този върху якостта на опън при огъване;
- умора на бетона - АСР намалява устойчивостта на бетона против умора;
- якост на срязване - АСР намалява якостта на срязване на бетона;

- повишени опънни усилия в армировката и нарушено сцепление с бетона поради ефект подобен на своеобразно химическо предварително напъгане;

- водоплътност - намалена водоплътност на бетона;
- дълготрайност - напукването, намалените водоплътност, якостни характеристики и носеща способност довеждат до компрометиране на корозионната устойчивост, функционалност и дълготрайност на конструкциите и съоръженията;
- визуално-естетически дефекти по повърхността на бетоните.

### III. Методи за превенция на алкало - силициева реакция. Защита и поправки на съществуващи конструкции

#### Превенция на АСР

Рискът от АСР се управлява чрез елиминирането на един или повече от изброените по-горе фактори, които я предизвикват. Конкретни препоръки за избягване на АСР са дадени в Concrete Society Технически Доклад TR30 „Алкало- силициева реакция – минимизиране на риска от повреда на бетона“, ASTM C294, ASTM STP 169, Building Research Establishment Digest 330, СД CEN/TR 16349:2012, Определяне на мерки за избягване на вредна алкало-силициева реакция (АСР) в бетон и др.

Неизползването на потенциални реакционно способни добавъчни материали е най-безопасният подход, тъй като влагата и алкалите могат да проникнат в бетона и да бъдат привнесени и от външен източник. За намаляване на риска от неблагоприятно въздействие следва да се избягват добавъчни материали реакционно способни с алкалните оксиди, съдържащи разтворим в алкална среда  $\text{SiO}_2$  като напр. опал, халцедон (като включвания в основната маса на скалата или като отделни зърна в добавъчния материал), пясъчници с опал-халцедонова или халцедон-кварцова спойка и туфогенни седиментни скали, вулканични скали: риолити, андезити, трахити, дацити, базалти, диабази и преходни скали като андезито-базалти, трахиандзити, риодацити и др., както и техните туфи и туфити; глинести слюдени шисти, аргилити, филити, кристобалит, тридимит, зеолити съгласно БДС 14851:2015. Порести, напукани, изветрени или натрошени агрегати като цяло са по-реактивни от тези с по-плътна структура и заоблени повърхности, както е посочено в публикация на фирма Sika (2015). Трудността при избягването на реакционни добавъчни материали е, че някои агрегати показват признаци на АСР години след отливането на бетона. Поради това оценката на добавъчните материали за алкалореакционност е обичайна практика, особено при отговорни съоръжения, като изискванията за контрол на качеството са включени в спецификацията за бетона. Изпълняват се стандартни тестове за реакционна способност, минерало-петрографско изследване и се проучват данните за предишно използване на съответния източник на инертни материали заедно с предложени цимент. Често, поради логистични затруднения и икономически съображения, е нецелесъобразно да бъде избегнато напълно използването на чувствителни инертни материали.

Циментовият клинкер допринася в най-голяма степен за алкалната среда в повечето бетони. Смесените цименти допринасят за редуциране на алкалното съдържание. Пуцоланови добавки като летяща пепел, гранулирана доменна шлака или микросилициев прах реагират и консумират наличните хидроксилни (алкални) йони по време на процеса на хидратация. При установена реакционна способност на добавъчния материал може да се използва ситно смляна минерална добавка от активен  $\text{SiO}_2$ , която реагира с  $\text{R}_2\text{O}$  в ранния период, когато циментният камък е все още пластичен, а и образуванията са с по-малки размери и не предизвикват напукване. Плътният и непроницаем бетон забавя разпространението на свободните алкали и миграцията на вода в бетонната структура. При използването на активни минерални добавки трябва да се вземе предвид химическия им състав и най-вече съдържанието им на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Намаляването на количеството на алкалите в бетона може да се постигне и посредством използването на цименти с ограничено съдържание на алкални оксиди или редуциране на количеството на цимента, като с помощта на пластифициращи и суперпластифициращи добавки се запазят водоциментното отношение и обработваемостта. Добавянето на добавки на основа  $\text{LiNO}_3$  в бетоновата смес също допринася за нейната устойчивост на АСР. Може да се използват и въздуховъвличащи добавки, които да създадат определено количество празнини в бетона, които да поемат разширението от АСР. Където е оправдано се прилага хидроизолиране на новопостроените съоръжения, което ги защитава от влага от околната среда.

#### Методи за поправка и защита на изградени съоръжения

Алкало-силициевата реакция е необратима. При вече изградени съоръжения, показващи признаци на АСР на първо място е уместно да се обследва конструкцията с цел да се оцени т. нар. остатъчен потенциал за разширение. За целта се вземат проби (изваждат се ядки) от бетона за лабораторни химически и механични тестове. В допълнение се прави оглед, измервания и обследване (ултразвук, склерометър и др.) на конструкцията, за да се установи нейното състояние и да се подберат най-подходящите мероприятия за поправка и защита.

Поправките се състоят главно от дейности по инжектиране на образувалите се пукнатини и прорязване на fugи с цел освобождаване на вътрешните напрежения в бетона или осигуряване срещу последващо разширяване.

Защитата на изградените съоръжения включва осушаване на бетона чрез изграждане или подобряване на системата за дренiranje и отводняване и изпълнение на хидроизолация на конструкцията.

### IV. Заключение

Накратко бе разгледан процесът по влошаване на качествата на бетона, вследствие на алкало-силициева реакция на добавъчните материали.

Алкало-силициевата реакция е един от важните механизми на корозирание и компрометиране на бетонните и стоманобетонните конструкции. Способността за алкало-

силициева реакция е включена в националните изисквания за деклариране на експлоатационни показатели на бетон, изготвен в заводски условия, както и на добавъчни и скални материали и други строителни продукти с подобно предназначение.

АСР обикновено присъства в експертизи за оценка на състоянието и при обосновка на остатъчния ресурс на отговорни съоръжения. Редовните огледи, обследвания и мониторинг на изградените бетонни и стоманобетонни съоръжения са от съществено значение за откриване и предотвратяване на негативните последици от алкало-силициевата реакция. Тези мерки спомагат да се гарантира дълготрайността и конструктивната надеждност на съоръженията и техните елементи.

## Литература

- Борисов, Б (2012) „Експлоатационен срок на подземни стоманобетонни елементи и облицовки“, - списание „Минно дело и геология“, бр. 8-9, стр. 61-68;
- Борисов Б., Балев В., Павлов П., (2023) „Принципни положения при съвременния подход за осигуряване експлоатационния срок на подземни стоманобетонни съоръжения“, Сборник с доклади от Научно-техническа конференция с международно участие, посветена на 25-та годишнина на Софийското метро „Иновативни архитектурни, конструктивни и технически решения при строителството на метрополитени“ 26-27 януари 2023 г. гр. София, ISSN 978-619-90939-9-3, стр. 49-59;
- Борисов Б., Павлов П., (2024) „Корозия на подземни стоманобетонни съоръжения – методи за защита и превенция“ – Сборник с доклади от Девета национална научно-техническа конференция с международно участие „Технологии и практики при подземен добив и минно строителство“ 7–10.10.2024, гр. Девин – приет за публикуване;

Защита на строителните конструкции от корозия, норми и правила за проектиране, Утвърдени със заповед № 1940 от 27.VI.1980 г. на МССМ и № 335 от 24.VI.1980 г. на КАБ, [http://kab-sofia.bg/images/stories/normi/3-v-3\\_korozia.pdf](http://kab-sofia.bg/images/stories/normi/3-v-3_korozia.pdf);

Симеонов Й. и др., (1991) Строителни Материали, изд. „Техника“, София;

Антикорозионни покрития. Решения на Sika за ремонт на структури, страдащи от алкало-силициева реакция, Sika България, (2015) <https://izolacii.eu/resheniya-na-sika-za-remont-na-strukturi-stradashti-ot-alkalo-silitsieva-reaktsiya/>;

БДС 14851:2015, Добавъчни материали за бетон. Методи за определяне на алкалореакционна способност;

Albinski S. An., Concrete cancer: characterization of Alkali Silica Reaction early stage products by electron microscopy, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur Laboratoire des matériaux de construction, Programme doctoral en science et génie des matériaux, 2022;

Classification of alkali–silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study, Construction and Building Materials, Volume 95, 1 October 2015, Pages 406–413;

Diamond S., (1992) 'Alkali aggregate reactions in concrete. an annotated bibliography 1939-1991';

Stanton T. E., (1940) 'A study of alkali-aggregate reactivity', Proc. Amer. Soc. Civ. Eng, vol. 66, pp. 1781–1792;

Stanton T. E. (1940), 'Influence of cement and aggregate on concrete expansion', Engineering News-Record;

Marwa Abdelrahman et al., (2016) "Structural Effects of ASR on Concrete Structures ". FPrimeC Solutions. Pages 10-28;

Merz C., Hunkeler F., and Griesser, A. (2006) 'Schaden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz';