

## РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ ВНАСЛІДОК КОРОЗІЇ АРМУВАННЯ

**Редченко В.П.**

*Дніпропетровський комплексний відділ ДерждорНДІ*

---

Аналізуючи досвід обстеження та проектування ремонту конструкцій залізобетонних мостів, можна побачити, що значну частину загального об'єму всіх корозійних дефектів займають дефекти, які пов'язані з руйнуванням захисного шару бетону внаслідок його розтріскування та відшарування від арматури, яка вражена корозією. Розтріскування та руйнування захисного шару бетону в цьому випадку відбувається внаслідок розпирання бетону зсередини продуктами корозії арматури, об'єм яких в 2-2,5 рази більший ніж початковий об'єм прокородованої сталі. Незважаючи на масове розповсюдження вказаного дефекту, природа його появи та розвитку майже не освітлена в літературі та зовсім не відображена в нормах на проектування. Далі в статті викладено основні моменти виконаного автором аналізу природи руйнування бетону внаслідок корозії армування.

Розглянемо сталевий арматурний стержень радіусом  $r$ , який розміщено в безкінечній товщі бетону. Розрахункову модель приймемо у вигляді двох товстостінних циліндрів, один з яких щільно входить в інший. При цьому внутрішній циліндр (арматурний стержень) має зовнішній радіус  $r$ , а його внутрішній радіус рівний нулю. Зовнішній циліндр (бетонна товща) має безкінечний зовнішній радіус та внутрішній радіус  $r$ . При збільшенні радіуса внутрішнього циліндра на величину  $\Delta$  (натяг) напружений стан обох циліндрів змінюється. Величину напружень, які виникли внаслідок збільшення радіуса внутрішнього циліндра, знаходимо аналогічно виведенню відомих формул Ляме, які описують напружений стан товстостінних циліндрів у загальному випадку [1]. Максимальні напруження в бетоні мають місце по контакту з арматурним стержнем, і величина їх визначається наступною формулою:

$$p = \frac{\frac{\Delta}{2}}{\frac{r}{E_b}(1 + \mu_b) + \frac{r}{E_c}(1 - \mu_c)}, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус арматурного стержня;

$\Delta$  – величина збільшення радіуса арматурного стержня;

$E_b$  – модуль пружності бетону;

$\mu_b$  – коефіцієнт Пуассона для бетону;

$E_c$  – модуль пружності сталі;

$\mu_c$  – коефіцієнт Пуассона для сталі.

Другий доданок в знаменнику формули (1) на порядок менший від першого доданку, тому наближено маємо:

$$p = \frac{\Delta E_b}{2r(1 + \mu_b)}. \quad (2)$$

Якщо прийняти величину збільшення об'єму сталі при корозії в 2,5 рази, то при товщині прокородованого шару сталі  $t$ , маємо збільшення радіуса  $\Delta = 1,5t$ , отже максимальні напруження в бетоні:

$$p = \frac{0,75tE_{\sigma}}{r(1 + \mu_{\sigma})} \approx \frac{0,6tE_{\sigma}}{r}. \quad (3)$$

З формули (3) визначимо величину корозійного зносу армування  $t_{mp}$ , при якому починається утворення тріщин, прийнявши відношення  $p_{mp}/E_{\sigma} = \text{const} = 0,00012$ :

$$t_{mp} = \frac{r p_{mp}}{0,6E_{\sigma}} = 0,0002 \cdot r. \quad (4)$$

Взявши для прикладу радіус арматурного стержня 10 мм, можна побачити, що тріщиноутворення розпочнеться вже при поверхневому зношенні величиною всього в  $t_{mp} = 0,002$  мм. Звичайно, наведені формули отримані при ряді спрощень, а саме: бетон прийнято як однорідне тіло, характеристики корозійного шару (враховуючи його малу товщину) взяті як для сталі, також є певні наближення при виведенні формул (3) та (4). Але навіть збільшивши в декілька разів чисельне значення корозійного зношення стержня, однозначно можна зробити висновок, що тріщиноутворення в бетоні в зоні арматурного стержня розпочинається майже одночасно з початком корозії арматурного стержня.

Для практичних цілей нас цікавить розвиток тріщин в зоні арматурного стержня, який кородує, не в безкінечній товщі бетону, а поблизу відкритої грані на відстані товщини захисного шару бетону. Дослідження розрахункових моделей для арматурного стержня поблизу грані бетонного тіла виконувалися з використанням програмного комплексу, який реалізує МСЕ.

Було розглянуто два варіанти: стержень поблизу середньої частини грані та стержень поблизу ребра (біля кута перерізу). За першим варіантом спочатку були визначені місця зародження тріщин навколо арматурного стержня. Поступово зменшуючи товщину захисного шару бетону  $h$  від безкінечного масиву до  $0,5r$ , встановили, що при значеннях  $h$  близьких до  $br$ , рівномірний розподіл напружень навколо арматурного стержня змінюється з утворенням двох виражених зон максимальних розтягувальних напружень в бетоні. Ці зони розташовані вздовж діаметра стержня паралельного вільній грані бетону (зони "А" на рис. 1а).

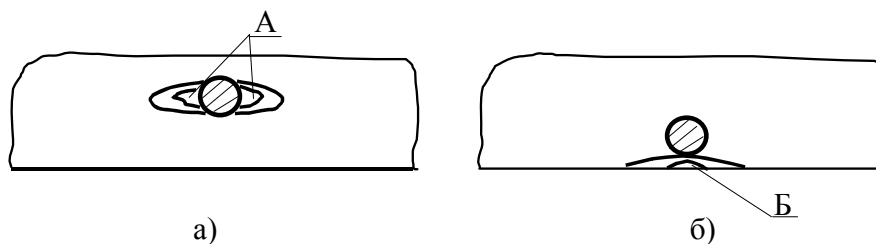


Рис. 1. Зони зародження тріщин при корозії арматури

З подальшим зменшенням товщини захисного шару бетону з'являється ще одна зона співрозмірних розтягувальних напружень в бетоні, яка розташована на вільній грані бетону навпроти арматурного стержня (зона "Б" на рис. 1б). При зменшенні товщини захисного шару величина напружень в зоні "Б" зростає та стає більшою ніж в зонах "А" при значеннях  $h < r$ .

Узагальнюючи виконані дослідження, можна виділити дві моделі руйнування бетону в зоні арматурного стержня, який розташований поблизу грані бетонного тіла та кородує:

- 1) відколювання одним блоком у вигляді трапеції;
- 2) відколювання двома блоками значно менших розмірів.

За першою моделлю (рис. 2, а) руйнування бетону відбувається, за умови коли товщина захисного шару бетону в декілька разів більша радіусу арматури (орієнтовно  $h > 2,5r$ ). В цьому випадку тріщини, які утворилися в зоні "А" з ростом тиску зі сторони стержня, швидко розповсюджуються під кутом  $\alpha = 15...30^\circ$  до вільної грані бетону. Величина кута залежить від співвідношення  $h/r$ , чим воно більше тим більш паралельно до грані бетону розповсюджуються тріщини. Відколювання бетону (в площині, яка розглядається) відбувається у вигляді трапеції, однією з сторін якої є частина отвору поблизу арматурного стержня, а другою є вільна грань бетонного тіла. Зона руйнування по грані бетону за цією моделлю має розміри від  $4h$  до  $12h$ . Фото відколювання за трапецією натурних зразків бетону показано на рис. 3.

За другою моделлю (рис. 2б) руйнування бетону відбувається при умові, що товщина захисного шару менша радіусу арматурного стержня. В цьому випадку тріщина, яка утворилася в зоні "Б", з ростом тиску з боку стержня швидко досягає отвору навколо стержня, після чого розвиваються тріщини в зонах "А", які розповсюджуються під кутом  $\alpha = 45^\circ$  до вільної грані бетону. Відколювання бетону відбувається у вигляді двох невеликих блоків. Зона руйнування по грані бетону за цією моделлю має значно менші розміри – від  $2r$  до  $4r$ .

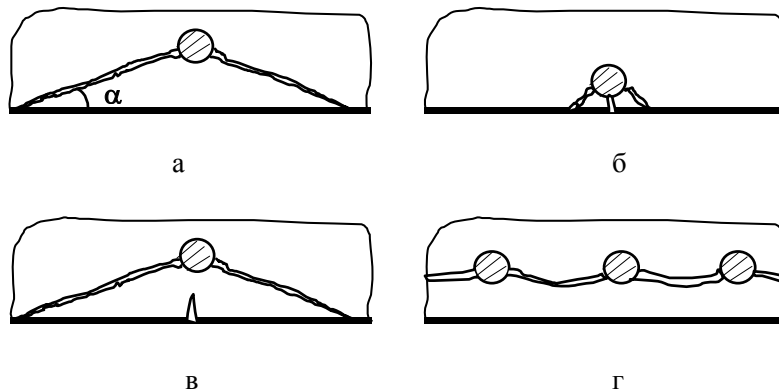


Рис. 2. Схеми руйнування бетону внаслідок корозії арматури

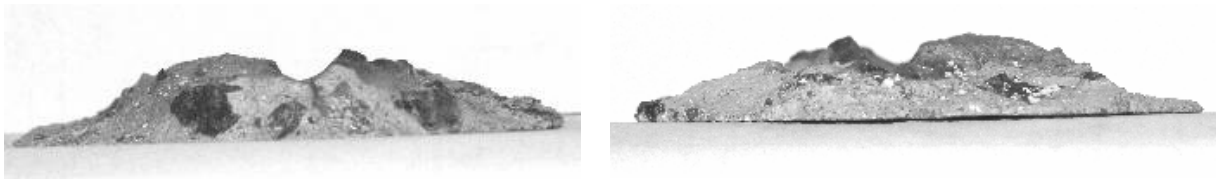


Рис. 3. Фото зразків сколювання бетону внаслідок корозії арматури

При значеннях  $r < h < 2r$  руйнування бетону відбувається за першою моделлю, але з утворенням додаткової тріщини, яка починається в зоні "Б", але не досягає отвору в бетоні, тому відколювання бетону все ж відбувається у вигляді трапеції (рис. 2, в).

При розташуванні поруч декількох арматурних стержнів та достатній товщині захисного шару бетону тріщини від окремих стержнів з'єднуються, і при цьому відшаровується весь захисний шар бетону майже по лінії арматурних стержнів (рис. 2, г).

У випадку, коли арматурний стержень розташований біля ребра бетонного тіла (в куті), також маємо дві характерні моделі руйнування бетону: утворення тріщин при розташуванні центра

стержня на бісектрисі кута та утворення тріщин при зміщенні стержня до однієї з граней (рис. 4).

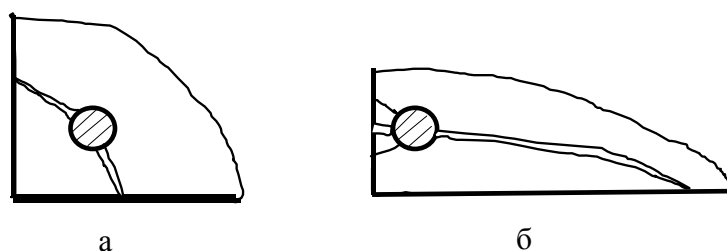


Рис. 4. Утворення тріщин при розміщенні стержня біля ребра бетонного тіла

У першому випадку (рис. 4, а) відколювання частини бетонного тіла відбувається по площині, яка близька до перпендикуляра до бісектриси кута. У другому випадку (рис. 4, б) руйнування починається по грані з меншим захисним шаром бетону (це може бути одна або декілька тріщин), а згодом розвивається тріщина під невеликим кутом до грані з захисним шаром більшої товщини.

Чинні норми не пов'язують призначення товщини захисного шару бетону в залежності від діаметра армування. Для більшості несних конструкцій нормативна товщина захисного шару не перевищує 30 мм [2], отже для більшості діаметрів робочого армування маємо величину відношення  $h/r = 2...3$ . В розглянутих випадках при  $h < 3r$  для протікання всього процесу розвитку тріщин від їх появи до повного відколювання частини бетонного тіла достатньо було зростання корозійного зносу лише в декілька разів у порівнянні з його значенням на початку утворювання тріщин ( $t_{mp}$  за формулою 4). Взагалі зростання корозійного зношення, яке необхідне для досягнення тріщиною поверхні бетону (повне руйнування), залежить від співвідношення  $h/r$ . Ця залежність в першому наближенні є гіперболічною, та вже при  $h > 4r$  значно ускладнюється, оскільки стає необхідним більш точне врахування пружності іржі та її захисної особливості – при значному обтисненні процес корозії уповільнюється.

Враховуючи, що на момент початку утворення тріщин величина корозійного зносу трохи менша сотої долі міліметра, можна зробити висновок, що для появи мікротріщин в бетоні, які призводять до відколювання захисного шару від армування, досить корозійного зношення армування в декілька сотих часток міліметра. Корозія шару такої товщини відбувається вже на протязі одного року від початку корозії. Завдяки неоднорідній структурі бетону, заклинюванні його фракційних частинок одна з одною, на практиці навіть після появи мікротріщин захисний шар бетону продовжує втримуватися на своєму місці аж до розкриття тріщин на величину в декілька міліметрів. Звісно, в цьому випадку про його захисні функції мова вже не йде, тому корозійний знос арматури інтенсивно зростає. Навіть при захисті від прямого зволоження корозійне зношення протікає в середньому зі швидкістю 0,1 мм/рік, а отже через 10 років буде зменшення радіуса арматурного стержня на 1,0 мм і пропорційно збільшиться розкриття мікротріщин, які стають вже добре видимими (розкриття 0,5 мм та більше).

Так для бетону класу В25 при товщині захисного шару в 15 мм (враховуємо вірогідність його зменшення від нормативного при встановленні армування в опалубку) втрата пасивувальних властивостей бетону (карбонізація) на глибині армування настає через 10...15 років. Додавши ще 10 років на розвиток тріщин до розкриття в 0,5 мм, отримаємо термін 20...25 років. Саме цей термін експлуатації є середньостатистичним, коли при обстеженні масово починають фіксуватися руйнування захисного шару бетону.

Напружений стан бетону при корозії арматурного стержня є дуже подібним до напруженого стану бетону при його охолодженні після нагрівання, що має місце після пропарювання збірного залізобетону. Наявність різниці між температурою поверхні залізобетонного елемента

та температурою арматурного стержня діє, як умовне збільшення діаметру стержня. Моделювання цього процесу показує, що за певного рівня перепаду температур поява та розвиток мікротріщин майже ідентичний випадку руйнування при корозії армування. Ось чому дуже часто саме збірні залізобетонні елементи мають видимі руйнування захисного шару вже на перших 10 роках після здачі їх в експлуатацію – поява мікротріщин навколо арматурного стержня, а значить і корозія армування може починатися відразу після виготовлення збірного залізобетону.

Узагальнюючи вищесказане, можна зробити наступні **висновки**:

1. Призначення товщини захисного шару бетону без врахування діаметра армування призводить до прогнозованого руйнування бетону в середньому на протязі 20..25 років експлуатації для більшості залізобетонних конструкцій. Особливо нестійкими в цьому плані є збірні конструкції, які пропарювалися.
2. Для запобігання руйнування захисного шару внаслідок корозії армування при проектуванні слід намагатися витримати величину відношення товщини захисного шару до радіуса арматурного стержня  $h/r > 4$ , навіть якщо за нормами товщина може бути і меншою.

### **Література**

1. Писаренко Г. С. «Сопротивление материалов». Киев, 1974 г.
2. ДБН В.2.3-14:2006 “Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування”.