

УДК 539.375

Крадінова Т.А.

Луцький національний технічний університет

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ

**Крадінова Т.А. Алгоритм розрахунку залишкового ресурсу залізобетонної балки.** Розглянуто залізобетонну балку на двох опорах з попередньо напруженою арматурою, яка навантажена довготривалими рівнорозподіленими нормальними зусиллями інтенсивності  $p$ . Вважається, що в поперечному перерізі нижнього навантаженого розтягом арматурного стержня діаметра  $D$  утворилася система поверхневих сегментних тріщин початкової глибини  $c_0$ , які при заданому довготривалому навантаженні можуть поширюватися як тріщини низькотемпературної повзучості.

Задача полягає у визначенні такого часу  $t = t_*$ , за який тріщини підростуть від розміру  $C_0$  до критичного розміру  $C = C_*$  і арматура зруйнується.

Розглянута аналогічна задача у випадку згину.

Використовуючи енергетичний підхід, побудовано розрахункову методику для визначення залишкового ресурсу арматури в попередньо напружених залізобетонних конструкціях.

**Ключові слова:** попередньо напружені залізобетонні конструкції, тріщини низькотемпературної повзучості, залишковий ресурс, період докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості, коефіцієнт інтенсивності напружень.

**Крадінова Т.А. Алгоритм расчета остаточного ресурса железобетонной балки.** Рассмотрена железобетонная балка на двух опорах с предварительно напряженной арматурой, которая нагружена долговременными равномерно распределенными нормальными усилиями интенсивности  $p$ . Считается, что в поперечном сечении нижнего нагруженного растяжением арматурного стержня диаметра  $D$  образовалась система поверхностных сегментных трещин начальной глубины  $c_0$ , которые при заданной долговременной нагрузке могут распространяться как трещины низкотемпературной ползучести.

Задача заключается в определении такого времени  $t = t_*$ , за который трещины подрастут от размера  $c_0$  к критическому размеру  $C = C_*$  и арматура разрушится.

Рассмотрена аналогичная задача в случае изгиба.

Используя энергетический подход, построена расчетная методика для определения остаточного ресурса арматуры в предварительно напряженных железобетонных конструкциях.

**Ключевые слова:** предварительно напряженные железобетонные конструкции, трещины низкотемпературной ползучести, остаточный ресурс, период докритического роста трещин низкотемпературной ползучести, коэффициент интенсивности напряжений.

### T.A. Kradinova. Algorithm of calculation of remaining resource of reinforce-concrete beam

Considered reinforced concrete beam on two supports with pre-stressed reinforcement, which loaded long-term runs normal effort intensity  $p$ . It is believed that in the cross section of the loaded lower tensile rebar diameter  $D$  formed by a system of surface radial cracks the initial depth  $c_0$ , which when given a long load can be distributed as crack low-temperature creep.

The objective is to determine a time  $t = t_*$  for which the crack will grow from the size  $c_0$  to the critical size  $C = C_*$  and the armature will be destroyed.

A similar problem is considered in the case of the bend.

Using the energy approach is a calculation method to determine the residual life of the reinforcement in prestressed concrete structures.

**Keywords:** prestressed concrete structures, cracks in the low-temperature creep, residual life, period to critical crack growth of low-temperature creep, the stress intensity factor.

В даний час, коли відбувається інтенсивна експлуатація конструкцій і споруд, важливо передбачити і забезпечити надійну роботу їх елементів. Сюди можна віднести обладнання енергетичного устаткування теплових і атомних електростанцій, нафтогазопроводів, металевих і залізобетонних конструкцій, які працюють за довготривалих статичних навантажень в умовах невисоких температур.

Тут необхідно підкреслити, що на процес поширення тріщин впливають різні фактори, зокрема, такі як напруження, температура, час навантаження, структура матеріалу тощо. Під час довготривалого статичного навантаження руйнування металів проходить (за відсутності агресивних середовищ й інших фізико-хімічних чинників) за механізмами низькотемпературної або високо температурної повзучості. Серед праць, в яких досліджували руйнування такого типу,

можна назвати фундаментальні праці українських учених: Лебедева А.О., Писаренка Г.С., Русинка К.М., Шевченка Ю.М. та інших. Переважно це аналітичні і експериментальні дослідження для бездефектних тіл. Для випадку поширення тріщин низькотемпературної повзучості в полімерах й інших в'язкопружних тілах, така теорія створена в працях А.О. Камінського [6, 7] на базі відомої  $\delta_c$  – моделі і принципу Вольтера в лінійній теорії в'язкопружності. Однак, випадки поширення в металевих пружно-пластичних матеріалах тріщин повзучості не можуть бути описані в рамках такої теорії через відмінності механізмів сповільненого руйнування.

Використаємо експериментальну методику для розрахунку залишкової довговічності арматури у заздалегідь напружених залізобетонних елементах конструкцій. Застосуємо математичну модель, представлену раніше [1,5], для визначення періоду докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості за довготривалого статичного навантаження арматури і модифікацію відомого методу граничної інтерполяції на випадок наближеного визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень біля тріщин в арматурі.

Під час навантаження залізобетонних конструкцій спостерігається утворення тріщин в розтягнутій зоні бетону [2,3]. Із збільшенням навантаження розтягу напруження сприймаються арматурою, а тріщини в бетоні розкриваються. Для великої кількості конструкцій, арматура яких має звичайну міцність (не високоміцна), ширина розкриття тріщин за дії передбачених розрахунком навантажень незначна і не порушує їх експлуатаційних якостей. У тих випадках, коли до конструкції пред'являються вимоги непроникності (резервуари, труби), коли конструкція забезпечена високоміцною арматурою або знаходиться в умовах агресивного середовища, поява тріщин або значне їх розкриття може призвести до втрати експлуатаційних характеристик. Щоб запобігти утворенню тріщин або обмежити ширину їх розкриття у розтягнутій зоні бетону під час виготовлення конструкції заздалегідь створюють значні стискаючі напруження шляхом натягу арматури. В умовах експлуатування такого елемента конструкції під навантаженням розтягальні напруження, що виникають, тільки погашають попереднє стиснення в бетоні. Тому утворення тут тріщин, або їх значне розкриття значно зменшується. Такі залізобетонні конструкції називають попередньо-напруженими.

Розрізняють два основних види залізобетонних конструкцій з попереднім напруженням: з натягом арматури до і після бетонування. У першому випадку арматуру попередньо розтягують і кінці її закріплюють на упорах ферми, потім заливають бетон. Після того, як бетонна суміш затверділа, кінці арматурних стрижнів звільняють від упорів. Другий спосіб передбачає виготовлення залізобетонних конструкцій з поздовжніми каналами, через які пропускають арматурні стрижні, потім їх розтягують і закріплюють на торцях конструкції. Канали заповнюють цементним розчином з метою захисту сталеві арматури від корозії.

Завдяки ефективному використанню високоміцної арматури в попередньо-напружених конструкціях, підвищеною їх жорсткістю і ряду інших переваг ці конструкції широко використовуються в будівництві.

Але попередньо-напружені залізобетонні конструкції мають багато недоліків. Одним з яких є, наприклад, перевантаження в них арматури, що за довготривалого статичного навантаження може привести, особливо за наявності дефектів типу тріщин, до сповільненого руйнування і непередбачуваної аварії.

Використовуючи енергетичний підхід [1,5] побудуємо розрахункову методику для визначення залишкового ресурсу арматури в попередньо-напружених залізобетонних конструкціях.

Розглянемо залізобетонну балку на двох опорах з попередньо напруженою арматурою, яка навантажена довготривалими рівнорозподіленими нормальними зусиллями інтенсивності  $p$ . Припустимо, що в результаті неякісного виготовлення арматури, впливу зовнішніх факторів або довготривалого навантаження в поперечному перерізі нижнього навантаженого розтягом арматурного стрижня діаметра  $D$  утворилася система поверхневих сегментних тріщин початкової глибини  $c_0$ , які при заданому довготривалому навантаженні надалі можуть поширюватися як тріщини низькотемпературної повзучості.

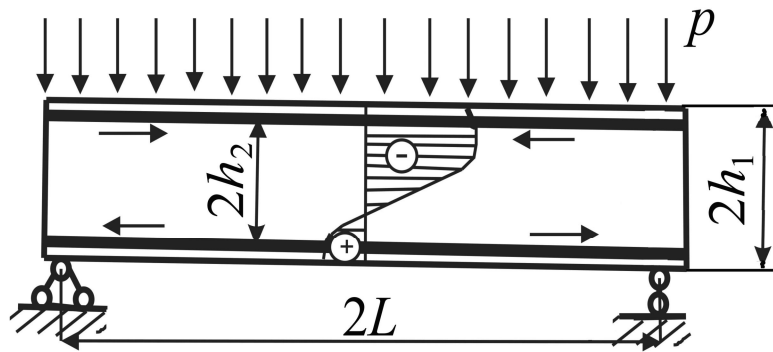


Рис. 1. Схема навантаження залізобетонної балки з наперед напруженою арматурою.

Задача полягає у визначенні такого часу  $t = t_*$ , за який тріщини підростуть від розміру  $c_0$  до критичного розміру  $c = c_*$  і арматура зруйнується.

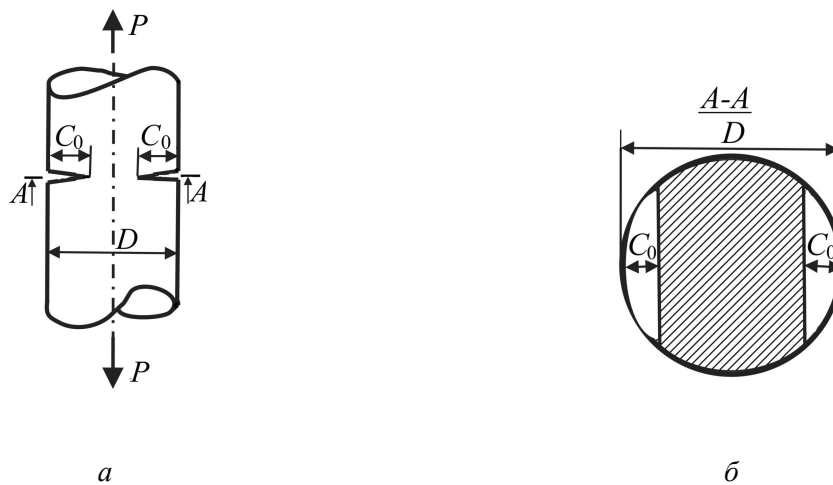


Рис. 2. Схема розтягу (а) циліндричного стрижня з двома сегментними тріщинами (б).

Розв'язок такої задачі здійснюємо на основі розрахункової моделі, яка запропонована в [1,5]. Узагальнивши задачу, розглянемо найгірше розміщення системи двох сегментних тріщин, тобто в одній площині, як показано на рис. 2. В результаті цього, а також вважаючи, що тріщини будуть поширюватися симетрично, задача зведеться до наступної системи рівнянь

$$\frac{dc}{dt} = \frac{A_{2t}(K_I^{2m} - K_{thc}^{2m})}{K_{cc}^{2m}(1 - K_I^2 K_{cc}^{-2})} \quad (1)$$

за початкових і кінцевих умов:

$$t = 0, c(0) = c_0; \quad t = t_*, c(t_*) = c_*, \quad K_I(p, c_*) = K_{cc}.$$

Тут  $K_I(p, c)$  – найбільше значення коефіцієнта інтенсивності напружень біля контурів сегментних тріщин, яке буде посередині хорд сегментів і для визначення якого необхідно знайти навантаження нижньої арматури в залізобетонній балці.

Необхідно визначити навантаження нижньої арматури в залізобетонній балці.

Потрібно зазначити, що при виготовленні залізобетонної балки арматуру натягають до початкового контрольованого напруження  $\sigma_{con}$  на опори форм, виконують бетонування, теплову

обробку і витримують бетон в формі до набуття ним необхідної передавальної міцності  $R_{bp}$ . В цьому стані проходять перші втрати  $\sigma_{los,1}$  попереднього натягу арматури [10].

Далі при звільненні з опорів форм і відпуску натягу арматури, яка щеплена з бетоном, проходить обтиснення бетону, в якому розвиваються деформації швидкої повзучості і проходять втрати обтиску бетону, а також попереднього натягу арматури  $\alpha\sigma_{bp}$ , тобто в ній залишаються напруження розтягу

$$\sigma_a = \sigma_{con} - \sigma_{los,1} - \alpha\sigma_{bp}. \quad (2)$$

Тут  $\sigma_{bp}$  – напруження обтиску бетону;  $\alpha$  – коефіцієнт зменшення напруження обтиску бетону під час його повзучості.

Прикладемо до балки рівномірно розподілене експлуатаційне навантаження інтенсивності  $p$ , тоді розподіл напружень в балці визначиться так, як показано на рис. 1.

Додаткові напруження розтягу  $\sigma_p$ , які виникають при цьому напружені в арматурі за рахунок експлуатаційного навантаження  $p$  буде визначитися на основі результатів [8] так

$$\sigma_p = 0,75ph_2L^2h_1^{-3}. \quad (3)$$

Тоді на основі співвідношень (2), (3) сумарне напруження  $\sigma_{ap}$  в арматурі можна буде визначити згідно формули

$$y_{ap} = y_{con} - y_{los,1} - \sigma_{yp} + \frac{3ph_2L^2}{4h_1^3}.$$

Аналогічним способом знайдемо залишковий ресурс залізобетонної балки за згину. Для розв'язання математичної задачі (1) і визначення часу до руйнування  $t = t_*$  нижньої арматури в залізобетонній балці необхідно знайти коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  біля контуру тріщини (рис. 2) в поперечному перерізі арматури. Таким чином, в даному випадку задача зведеться до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) біля контурів системи сегментних тріщин в поперечному перерізі циліндричного стрижня (рис. 2) діаметра  $D$ , який розтягується зусиллями  $P = 0.25\pi\sigma_{ap}D^2$ .

Дана задача розв'язана наближено у праці [7] методом граничної інтерполяції, де коефіцієнт інтенсивності напружень біля контурів тріщин визначається так

$$K_I = \frac{2\sqrt{2}P}{D\sqrt{D}} f(\varepsilon), \quad f(\varepsilon) = \frac{2,244\sqrt{\pi\varepsilon(1-\varepsilon)}}{S_1\sqrt{12,4247\varepsilon + 4(1-\varepsilon)}}, \quad \varepsilon = 2cD^{-1}, \quad (4)$$

$$S_1 = \pi - 2(\arcsin \sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2} - (1-\varepsilon)\sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2}).$$

Якщо підставити дане рівняння (4) в рівняння (1), то отримаємо таке співвідношення

$$\frac{dc}{dt} = \frac{A_{2t} \{ [2\sqrt{2}PD^{-1.5} f(\varepsilon)]^{2m} - K_{thc}^{2m} \}}{K_{cc}^{2m} [1 - 8P^2D^{-3} f^2(\varepsilon) K_{cc}^{-2}]} \quad (5)$$

за початкових і кінцевих умов:

$$t = 0, c(0) = c_0; \quad t = t_*, c(t_*) = c_*, \quad 2\sqrt{2}PD^{-1.5} f(\varepsilon_*) = K_{cc}.$$

Інтегруючи отриманий вираз (5) за вказаних початкових і кінцевих умов, отримаємо формулу для визначення часу до руйнування  $t = t_*$  нижньої арматури, а отже і в цілому залізобетонної балки

$$t_* = 0,5DK_{cc}^{2m} A_{2t}^{-1} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{[1 - 8P^2D^{-3} f^2(\varepsilon) K_{cc}^{-2}]}{[2\sqrt{2}PD^{-1.5} f(\varepsilon)]^{2m} - K_{thc}^{2m}} d\varepsilon.$$

Крім того, з отриманого результату, маючи діаметр та характеристики арматури, можна визначити  $K_{ce}$ ,  $K_{thc}$ , критичний розмір тріщини, а також визначити залежність залишкового ресурсу  $t_*$  арматури від початкового розміру тріщин  $c_0$ .

1. *Андрейків О.С.* Визначення довговічності пластин з системами тріщин в умовах дії довготривалого статичного розтягу і низькотемпературного поля. /О.С. Андрейків, Ю.Я. Матвіїв, Т.А. Крадінова // Мат. методи і фіз.-мех. поля. – 2011. – №4. – С 161–169.
2. *Гнідець Б.Г.* Залізобетонні конструкції з напружуваними стиками і регулюванням зусиль./Б.Г. Гнідець – Львів: Вид. Нац. універ. “Львівська політехніка”. – 2008. – 548 с.
3. *Байков В.Н.* Железобетонные конструкции: Общий курс: Учебное пособие для вузов./ В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов – М.: Стройиздат. – 1991. – 767 с.
4. Визначення залишкового ресурсу арматури у попередньо напружених залізобетонних конструкціях/Ю.Я. Матвіїв, Т.А. Крадінова//Міжвузівський збірник “Наукові нотатки” - Луцьк, 2012. - №36. – С 195 -199.
5. Довговічність пластин з тріщинами за довготривалого статичного навантаження і локальної повзучості /О.С. Андрейків, В.Р. Скальський, Ю.Я. Матвіїв, Т.А. Крадінова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – № 1. – С 39–46.
6. Каминский А. А. Механика разрушения вязкоупругих тел / А. А. Каминский. – К.: Наукова думка, 1980. – 157 с.
7. Kaminsky A. A. Subcritical Crack Growth in Polymer Composite Materials under Creep / А. А. Kaminsky // Advances in fracture resistance and structural integrity: Selected papers from the 8<sup>th</sup> International Conference on Fracture (8-14 June 1993), Kijev, Ukraine – Pergamon, 1994. – P. 513–520.
8. *Писаренко Г.С.* Справочник по сопротивлению материалов. /Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев – К.: Наукова думка, 1988. – 734 с.
9. *Панько І.М.* Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій./І.М. Панько – Львів : ФМІ НАНУ.– 200.– 280 с.
10. *Скальський В.Р.* Методика оцінки характеристик повзучості матеріалів /В.Р. Скальський, Ю.Я. Матвіїв, Т.А. Крадінова //Машинознавство. – 2012. – №2.