

УДК 624.012

Постернак О.М.,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЕФІЦІЄНТА ЗА ПРИЗНАЧЕННЯМ НА РІВЕНЬ НАДІЙНОСТІ ПІДСИЛЕНИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Розглядаються сучасні методики розрахунку підсиленних залізобетонних згинальних елементів з точки зору теорії надійності та досліджується вплив коефіцієнта за призначенням на загальну надійність конструкції.*

*Ключові слова: надійність, коефіцієнт надійності, методика розрахунку, підсилення залізобетонних конструкцій.*

Першочерговою задачею при проектуванні будівель і споруд є забезпечення безвідмовної роботи конструкцій та всієї будівлі в цілому на протязі всього терміну експлуатації. Будівельні конструкції з часом втрачають свої показники надійності та довговічності внаслідок багаточисленних зовнішніх і внутрішніх впливів, що в ряді випадків вимагає підсилення конструкцій.

Основними причинами підсилення конструкцій є втрата достатньої несучої здатності конструктивних елементів в разі аварійних ситуацій, завершення терміну служби будівлі, зміна призначення будівлі, модернізація виробництва та зміна нормативних вимог до проектування.

Але треба зазначити, що як і при новому будівництві, так і при підсиленні необхідно забезпечувати певний рівень надійності. Для вирішення цієї задачі необхідно змодельовати сумісну роботу елементів підсилення і конструкції та визначити їхню загальну ймовірність відмови.

На даний момент існують два метода розрахунку залізобетонних конструкцій: детермінований і ймовірнісний. Детермінований розрахунок полягає у порівнянні певної детермінованої величини, що обумовлює якість конструкції з навантаженням. Цей метод оснований на оцінюванні запасу певних показників якості конструкцій, який визначають при фіксованих значеннях [2].

Ймовірнісний метод також використовує розрахункові дискретні формули, але особливість в тому вони враховують можливу статистичну мінливість всіх аргументів. Таким чином досягають можливості визначити ймовірність відмови і довговічність конструктивного елемента. Враховуючи, що всі початкові параметри при розрахунку будівельних конструкцій змінюються, необхідно використовувати розрахунок заснований на

ймовірнісних методах. Останні дозволяють дати більш об'єктивну оцінку конструкції про її придатність до нормальної експлуатації. Ймовірнісний підхід ураховує всі властивості міцності матеріалів конструкції, міцнісні, геометричні та деформаційні характеристики конструкцій, а також навантаження і впливи на них, які представляють собою випадкові величини або випадкові процеси [1]

Розрахункові параметри, що впливають на роботу конструкції можуть бути, представлені у вигляді випадкових незалежних величин, тоді умова забезпечення несучої здатності конструкції може трактуватися, як виконання граничного нерівності

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \tilde{R}(x_1, x_2, \dots, x_n) - \tilde{Q}(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0; \\ \text{або } \tilde{g} = \tilde{R} - \tilde{Q} > 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\tilde{g}$  - функція резерву міцності;

$\tilde{Q}$  - функція зусиль (або напруження) в конструкції, виражені через зовнішнє навантаження;

$\tilde{R}$  - функція несучої здатності конструкції, виражена в тих самих одиницях,  $\tilde{Q}$ .

Імовірність виконання нерівності (1) є імовірність працездатності і визначиться, як [3]

$$P = \int_0^{\infty} p_g(g) dg, \quad (2)$$

де  $p_g(g)$  - щільність розподілу функції резерву міцності.

Для обчислення надійності в інтегральному вигляді (2) в практиці найчастіше використовують два метода: метод статистичної лінеаризації і метод Монте-Карло.

Метод статистичної лінеаризації - заснований на розкладанні функції працездатності або резерву міцності  $\tilde{g}$  в ряд Тейлора. Застосовуючи математичні властивості ряду визначають статистичні характеристики функції  $\tilde{g}$  декількох випадкових аргументів. Приймавши, що функції  $g$  відповідає нормальному закону розподілу, то надійність буде обчислюватися, як

$$P = P(g > 0) = \frac{1}{\hat{g}\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x-\hat{g})^2}{2\hat{g}^2}} dx \quad (3)$$

Метод Монте-Карло є модифікованим методом статистичного моделювання, що базується на досить великому числі (50000 ... 100000) статистичних випробувань за схемою Бернуллі, тобто при кожному

випробуванні генеруються значення випадкових величин для функцій  $\tilde{Q}$  і  $\tilde{R}$ . При кожній реалізації виконують детермінований розрахунок значень  $Q$  і  $R$  і перевіряють умову  $Q < R$ . Якщо умова виконується, то цю реалізацію зараховують, як безвідмовну роботу  $n$  конструкції. Частоту появи таких умов розглядають, як оцінку надійності  $P$ .

$$P = \frac{n}{m}, \quad (4)$$

де  $m$  - число випробувань.

Але при кожному методі необхідно мати функції несучої здатності, тобто детермінований розрахунок.

На даний момент вітчизняні нормативні документи для підсиленних залізобетонних конструкцій в повній мірі не регламентують розрахунок і проектування таких конструкцій. Тому при проектуванні підсилення виконують вимоги, як для звичайних залізобетонних конструкцій. А перевірка несучої здатності згинальних залізобетонних підсилених елементів виконують для нормальних та похилих перерізів. Крім того, розраховують на міцність контактні шви між підсилювальною конструкцією і елементом підсилення.

Згідно до ДСТУ В.2.6-98-2011 та ДБН В.2.6-98:2009 розрахунок залізобетонних конструкцій необхідно виконувати за спрощеним методом граничних зусиль або за деформаційною моделлю.

В подальшому для умовного позначення руйнуючого моменту підсиленого елемента визначеного за методом граничних зусиль використано верхній індекс з аббревіатурою ULS (Ultimate Limit State – метод граничних станів), а для деформаційної методики DTP (Deformation theory of plasticity - деформаційна теорія пластичності).

Використовуючи основні положення нормативних документів [4,5], було запропоновано детерміновані розрахунки несучої здатності нормальних перерізів, підсиленних залізобетонних згинальних елементів в стиснутій зоні шаром залізобетону.

Розрахунок за методом граничних зусиль визначається за умови, що в момент руйнування елемента напруження в стиснутому бетоні і розтягнутій арматурі досягають граничних значень. Прийнята розрахункова схема для комплексного перерізу елемента, зображена на рис.1. Розглядають два випадки розрахунку залежно від того, де знаходяться межа стиснутої зони.

Перший випадок, коли нейтральна вісь проходить в елементі, що підсилюють, (рис.1, а) і виконується умова

$$A_s \cdot f_{yd} > f_{cd}^{add} \cdot b \cdot h_{add} + A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add}, \quad (5)$$

Граничне значення згинального моменту визначають за формулою

$$M_u^{ULS} = f_{cd} b \lambda x' (d - h_{add} - 0.5 \lambda x') + f_{cd}^{add} b h_{add} (d - 0.5 h_{add}) + A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add, /} \cdot (d - a'_{add}) + A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - h_{add} - a'), \quad (6)$$

де

$$d = h - a,$$

Відповідно до [5] фактичну висоту стиснутої зони зменшують на коефіцієнт  $\lambda$ , що дорівнює 0,8 для  $f_{ck} \leq 50$  МПа, для можливості застосування рівномірного розподілу нормальних стискуючих напружень.

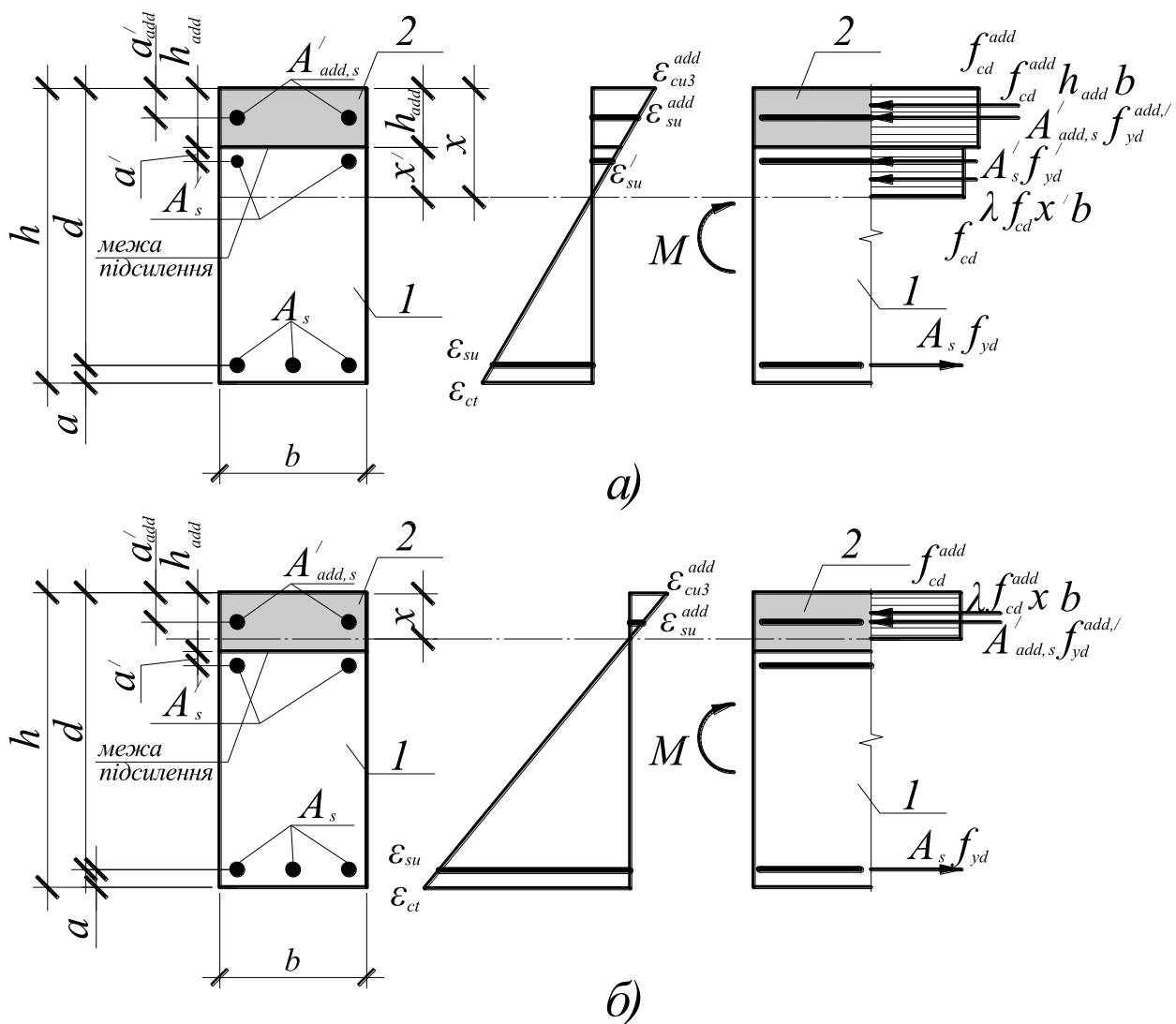


Рис.1. До розрахунку за міцністю балки за двома випадками, підсиленої у стиснутій зоні перерізу: 1 – існуюча конструкція; 2 – елемент підсилення; а – межа стиснутої зони знаходиться в існуючій конструкції, б – межа стиснутої зони знаходиться в елементі підсилення.

Висота ефективної стиснутої зони перерізу

$$x_1 = \lambda x' + h_{add}, \quad (7)$$

де

$$x' = \frac{A_s \cdot f_{yd} - f_{cd}^{add} \cdot b \cdot h_{add} - A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add} - A'_s \cdot f'_{yd}}{f_{cd} \cdot b}, \quad (8)$$

$f_{cd}^{add}$  – розрахунковий опір нарощувального матеріалу на стиск;

$b$  – ширина перерізу;

$d$  – робоча висота перерізу;

$f_{cd}$  – розрахунковий опір бетону на стиск;

$f_{yd}$  – розрахунковий опір стержньової арматури на розтяг;

$A_s$  – площа розтягнутої стержньової арматури;

$h_{add}$  – товщина шару нарощування.

Другий випадок, коли нейтральна вісь проходить в шарі нарощеного бетону або фібробетону (рис.1, б) і виконується умова

$$A_s \cdot f_{yd} \leq f_{cd}^{add} \cdot b \cdot h_{add} + A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add}, \quad (9)$$

Граничне значення згинального моменту визначають за формулою

$$M_u^{ULS} = f_{cd}^{add} \cdot b \cdot x_1 \cdot (d - 0.5x_1) + A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add} \cdot (d - a'_{add}), \quad (10)$$

Висота ефективної стиснутої зони перерізу

$$x_1 = \lambda x, \quad (11)$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd} - A'_{add,s} \cdot f_{yd}^{add}}{f_{cd}^{add} \cdot b}, \quad (12)$$

де

Використання деформаційної моделі для розрахунку підсиленних залізобетонних конструкцій, дозволяє в повній мірі враховувати дійсні деформації та напруження в конструкції, що підсилюється.

Рівняння напружено-деформованого стану збалансованого нормального перерізу згинального залізобетонного елемента, підсиленого в стиснутій зоні шаром залізобетону (рис. 2.)

$$\frac{bf_{cd}}{2\aleph} \left( 2(\varepsilon_{c3,1} - \varepsilon_{c3}) + \varepsilon_{c3} \right) + bf_{cd}^{add} h_{add} + A_s^{add} \sigma_s^{add} + A'_s \sigma'_s - A_s f_{yd} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{bf_{cd}}{6N^2} (3\varepsilon_{c3,1}^2 - \varepsilon_{c3}^2) + bf_{cd}^{add} h_{add} (x - 0,5h_{add}) + A_s^{add,i} \sigma_s^{add,i} z_{s1} +$$

$$+ A_s^i \sigma_s^i z_{s2} + A_s f_{yd} z_{s3} - M_u^{DTP} = 0 \quad (14)$$

де

$$\sigma_s^{add,i} = E_s^{add,i} \varepsilon_s \leq f_{yd}^{add,i}, \quad (15)$$

$$\sigma_s^i = E_s^i \varepsilon_s^i \leq f_{yd}^i, \quad (16)$$

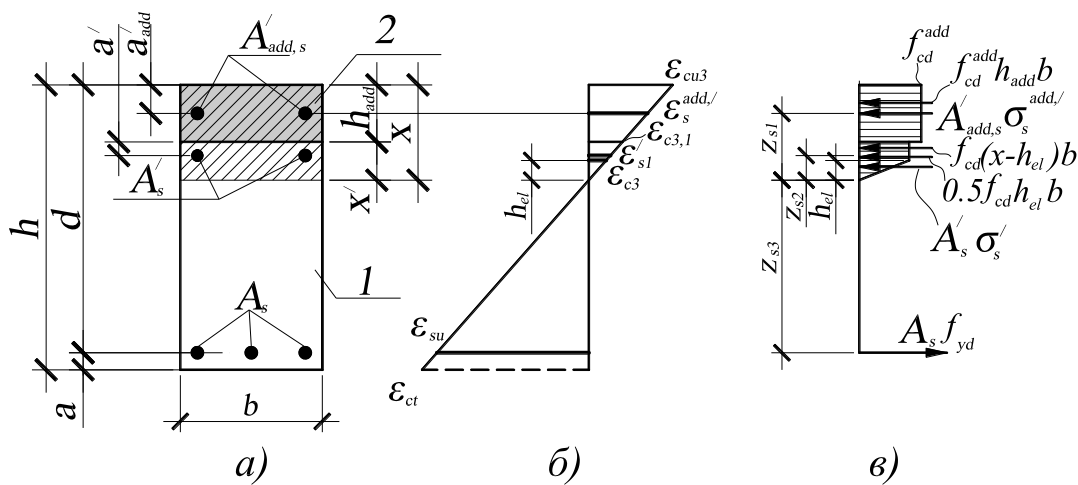


Рис.2. Напружено-деформований стан перерізу балки, підсиленої у стиснутій зоні: а) – поперечний переріз; б) – еюра відносних деформацій; в) – еюра напружень; 1 – існуюча конструкція; 2 – елемент підсилення.

$\kappa = \frac{(\varepsilon_{c3,1} - \varepsilon_{ct})}{h}$  – кривизна вигнутої осі елемента, що підсилюється;

$x' = \frac{h}{(\varepsilon_{c3,1} - \varepsilon_{ct})} \varepsilon_{\varepsilon_{c3,1}}$  – висота стиснутої зони в межах існуючого елемента;

$x = x' + h_{add}$  – загальна висота стиснутої зони перерізу;

$z_i$  – відстань центра ваги і-го стрижня арматури до нейтральної осі.

$\varepsilon_{c3}$  – розрахункові відносні деформації бетону при максимальних напруженнях;

$h_{el} = \frac{h}{(\varepsilon_{c3,1} - \varepsilon_{ct})} \varepsilon_{c3}$  – відстань від нейтральної осі до прошарку бетону з

відносними деформаціями, що дорівнюють  $\varepsilon_{c3}$ .

Отримані детерміновані методи розрахунку та основи теорії надійності дозволяють визнати рівень надійності підсиленої конструкції залежно від різних факторів, але треба зазначити певну обмеженість кожного методу. Так при деформаційній моделі розрахунку, виникають труднощі в визначенні часткових похідних в нелінійній системі рівнянь. Тому при розробці імовірнісних алгоритмів розрахунку на надійність конструкцій за допомогою деформаційної теорії треба віддати перевагу методу Монте-Карло. А для методу граничних зусиль, де функція несучої здатності майже скрізь безперервна, можливе використання як методу статистичного моделювання, так і методу лінерізації.

Відповідно до ДБН В.1.2-14-2009 [6] всі будівельні конструкції повинні мати певний мінімальний рівень надійності, що залежить від класу наслідків об'єкта та категорії відповідальності конструкції. Також кожному класу наслідків будівлі і категорії відповідальності конструкції відповідають значення коефіцієнти надійності за відповідальністю (табл.1).

Тобто, зміна коефіцієнта за відповідальності безпосередньо впливає на рівень надійності конструкції. Було виконано дослідження впливу коефіцієнта за відповідальності на рівень надійності підсиленних згинальних елементів з різними характеристиками матеріалів існуючої конструкції, елементу підсилення та їх геометричними параметрами. Результати досліджень зміни значення надійності підсиленних згинальних елементів наведені в табл.1 і на рис.3.

Таблиця 1.

Надійність залізобетонних згинальних елементів підсиленних в стиснутій зоні шаром залізобетону залежно від коефіцієнту за відповідальністю  $\gamma_n$

Клас наслідків	Категорія відповідальності конструкції	Коефіцієнт за відповідальністю $\gamma_n$	Рекомендоване значення надійності конструкції $P_c$	Надійність конструкції $P$ несучою здатністю		
				Метод Монте-Карло		Метод лінерізації
				метод граничних зусиль	деформаційна методика	метод граничних зусиль
СС3	А	1,250	0.999999	0.99997	0.99999	0.99996
	Б	1,200	0.999995	0.99992	0.99995	0.99991
	В	1,150	0.999990	0.99983	0.99987	0.999797
СС2	А	1,100	0.999995	0.99951	0.99967	0.999548
	Б	1,050	0.999990	0.99902	0.99947	0.998901
	В	1,000	0.999950	0.99784	0.99829	0.997277
СС1	А	1,000	0.999990	0.99784	0.99829	0.997277
	Б	0,975	0.999950	0.99649	0.99775	0.995918
	В	0,950	0.999900	0.99528	0.99673	0.994557

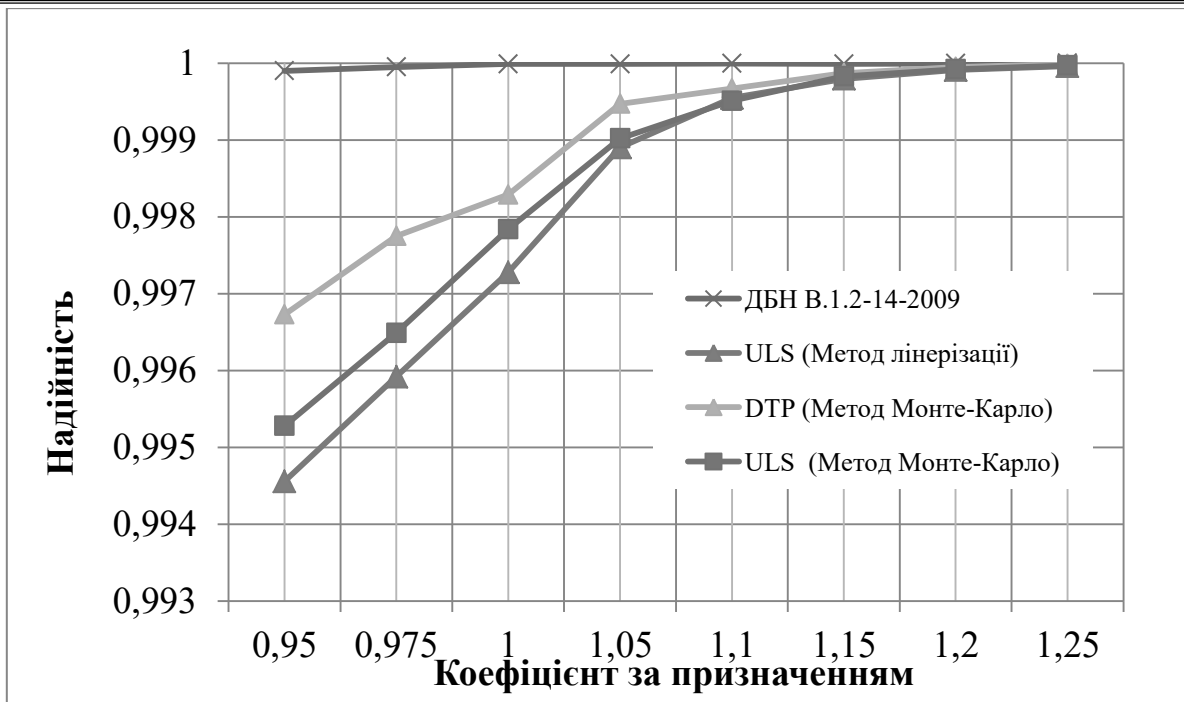


Рис. 3. Графік зміни надійності згинального елемента підсиленого шаром залізобетону в стиснутій зоні розрахованого різними методами від коефіцієнту за відповідальністю  $\gamma_n$ .

### Висновки.

- При збільшенні коефіцієнта надійності за призначенням майже лінійно збільшується надійність конструкції.
- При будь-яких значеннях коефіцієнта надійності за призначенням рівень надійності не залежно від методики розрахунку завжди менший, чим рекомендоване нормативне значення. Але зі збільшенням значення коефіцієнта, зменшується відхилення надійності конструкції від нормативного рівня.
- Для забезпечення нормативного значення надійності необхідно додатково вводити коефіцієнт невизначеності розрахункової моделі, що залежить від способу підсилення, методу розрахунку, реологічних впливів та багатьох інших факторів, які не розглядаються розрахунковою моделлю.

### Список літератури

1. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании: Монография/ В.Д. Райзер – М.: изд-во АСВ, 1998 .
2. Валовой О.І., Валовой М.О., Єрьоменко О.Ю. Ймовірнісний підхід в оцінці надійності будівельних конструкцій./Гірничий вісник: зб.наук. пр./ДВНЗ «Криворізький національний університет» - Кривий ріг, 2013 с. 113-115.
3. Лозовський Д.Н. Усиление железобетонных конструкций строительных сооружений.-Новополоцк: Изд-во Полоцкого гос. Ун-та, 1998.-8 с.



4. ДСТУ В.2.6-98-2011. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2011.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2011.
6. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2009.

### **Аннотація**

В статье рассматриваются современные методики расчета усиленных железобетонных изгибаемых элементов с точки зрения теории надежности, а также исследуется влияние коэффициента по ответственности зданий и сооружения на общую надежность конструкции.

Ключевые слова: надежность, коэффициент надежности, методика расчета, усиления железобетонных конструкций.

### **Abstract**

This article deals with the modern methods of calculation of strengthened flexural reinforced concrete elements in terms of reliability theory and investigates the influence partial safety factor to the overall reliability the construction.

Key words: reliability, safety factor, design procedure, strengthening of concrete structures.