УДК 692

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Хміль Р.Є., к.т.н., доцент,
Титаренко Р.Ю., аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»
roman.y.khmil@lpnu.ua, romantaren27@gmail.com

Анотація. Стаття присвячена аналітичному огляду наукових праць з проблематики визначення оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів. Розглянуто питання встановлення відповідного рівня надійності таких елементів згідно їх ймовірнісних розрахунків, базованих на методі моделювання Монте-Карло. Відповідно до проаналізованої літератури представлено вплив зовнішнього підсилення полімерними (FRP) та вуглепластиковими (CFRP) стрічками на надійність залізобетонних елементів. З огляду на статистичний характер проектних змінних продемонстровано ефективність такого підсилення, при його використанні в умовах відновлення та реконструкції несучих елементів будівель та споруд.

Ключові слова: надійність, підсилення, залізобетон, ймовірність відмови, фактор безпеки, статистична кореляція, статистичний метод, метод Монте-Карло.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Хмиль Р.Е., к.т.н., доцент,
Титаренко Р.Ю., аспирант
Национальный университет «Львовская политехника»
roman.y.khmil@lpnu.ua, romantaren27@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена аналитическому обзору научных трудов по проблематике определения оценки надежности усиленных железобетонных элементов. Рассмотрены вопросы установления соответствующего уровня надежности таких элементов согласно их вероятностным расчетам, основанных на методе моделирования Монте-Карло. Согласно проанализированной литературы представлено влияние внешнего усиления полимерными (FRP) и углепластиковыми (CFRP) лентами на надежность железобетонных элементов. Учитывая статистический характер проектных переменных, продемонстрирована эффективность такого усиления, при его использовании в условиях восстановления и реконструкции несущих элементов зданий и сооружений.

Ключевые слова: надежность, усиление, железобетон, вероятность отказа, фактор безопасности, статистическая корреляция, статистический метод, метод Монте-Карло.

THE FEATURES OF RELIABILITY EVALUATION OF STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Khmil R.Ye., PhD, Assistant Professor,
Tytarenko R.Yu., post-graduate
Lviv Polytechnic National University
roman.y.khmil@lpnu.ua, romantaren27@gmail.com

Abstract. The article is devoted to a brief analytical overview of study of a problem of determination of reliability evaluation of strengthened reinforced concrete (RC) elements. The issues of definition of the appropriate reliability level of such members are considered. The probabilistic calculations, that are considered in the article, are based on the Monte Carlo method. According to the analyzed literature the effect of external strengthening with fibre-reinforced plastic (FRP) and carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) strips on the reliability of RC elements is presented. In the conditions of renovation and reconstruction of the supporting members of buildings and structures, considering the statistical character of the design variables (geometry, material properties etc.), the efficiency of such strengthening is demonstrated. The conclusions highlight the importance of calculation of reliability evaluation of strengthened RC members. Moreover, the work presents an extensive list of scientific publications in the field of reliability of strengthened RC elements, and normative literature, used in writing this article.

Keywords: reliability, strengthening, reinforced concrete, probability of failure, safety factor, statistical correlation, statistical method, Monte Carlo method.

Вступ. Проектування будь-яких будівельних конструкцій (в даному випадку – залізобетонних) практично завжди відбувається за невизначених умов: геометричні розміри елементів, характеристики матеріалів, навантаження і впливи є стохастичними (випадковими) змінними чи функціями. Визначений рівень надійності проектування відповідно до методу граничних станів (напівімовірнісний метод розрахунку згідно ДБН В.2.6-98:2009 [1]) забезпечується завдяки виконанню умови, що мінімальна розрахункова величина несучої здатності перевищує зусилля від максимальних розрахункових величин навантажень. Випадковий характер вищезгаданих невизначених умов даний метод враховує за допомогою системи коефіцієнтів надійності. Однак, метод граничних станів не дозволяє провести кількісну оцінку надійності конструкцій і, тим більше, проектувати їх із заданим рівнем надійності (ризику) [2]. При цьому можливі випадки, коли надійність елементів відповідальних будівель та споруд є нижчою за надійність конструкцій будівель та споруд класу наслідків (відповідальності) СС3 (згідно ДБН В.1.2-14-2009 [3]). Виходячи з цього, можна зробити наступний висновок, що розрахунок залізобетонних конструкцій як систем, що містять випадкові параметри, слід вести в ймовірнісній постановці на основі методів теорій ймовірностей та випадкових функцій. Отже, гарантія ненастання граничного стану певного елемента будівлі чи споруди може бути забезпечена з визначеною імовірністю – імовірністю безвідмовної роботи. Таким чином, ймовірнісний підхід до розрахунку залізобетонних конструкцій дозволяє проектувати їх із заданим рівнем надійності і, як наслідок, отримувати ефективні проектні рішення [2].

Актуальність та постановка проблеми. Згідно Єврокоду EN 1990:2002 [4] під поняттям «надійність» розуміють наступне визначення: «Надійність – це здатність споруди чи її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну експлуатації». Необхідно брати до уваги, що вищезгаданий Єврокод EN 1990:2002 також декларує, що поняття «надійність» також охоплює такі фактори як безпека, експлуатаційна придатність і довговічність будівлі чи споруди. Очевидно, що надійність та безпечпечна експлуатація елементів будівель та споруд, а також обмеження аварійних ситуацій на них – надзвичайно актуальне питання за сучасного стану економіки у нашій державі. Саме тому, зараз особливо гострою є необхідність підтримання й підвищення якості конструкцій існуючих будівель та споруд шляхом проведення їх відновлення, модернізації або ж повної реконструкції.

На сьогоднішній день зроблено багато наукових досліджень [5, 6, 7] з проблеми визначення надійності залізобетонних конструкцій різних типів (балок, плит, колон тощо), але ефективних методів встановлення такої оцінки для власне підсилених залізобетонних конструкцій, поки що немає. Звідси, головною метою авторів у цій публікації постає виконання аналітичного огляду літератури, яка присвячена проблемі оцінки надійності підсилених залізобетонних конструкцій, а також виокремлення переваг і недоліків вже існуючих методів її встановлення.

Розвиток проблематики встановлення оцінки надійності підсилених залізобетонних конструкцій та аналіз досліджень. Опираючись на аналіз великої кількості літератури з надійності будівельних конструкцій, робимо висновок, що найбільший вклад в розроблення принципових методів її оцінки здійснили такі радянські вчені як А.Р. Ржаніцин [8], В.Д. Райзер [9] та багато інших. Серед їх європейських та світових послідовників насамперед варто виокремити імена К.А. Корнелла [10] та Г.О. Медсена [11]. Сучасні українські вчені – А.В. Перельмутер [12], С.Ф. Пічугін [13], А.І. Лантух-Лященко [14]. Усі згадані вище науковці розробляли й розробляють проблематику оцінки надійності елементів будівель й споруд на основі їх ймовірнісного моделювання. Дослідженням оцінки надійності підсилених залізобетонних конструкцій активно розпочали займатися з початку XXI століття, насамперед беручи до уваги ефективність самих методів підсилення, а також збільшення обсягів робіт з відновлення та реконструкції несучих елементів будівель та споруд по всьому світу. Серед вчених, які займаються питанням дослідження надійності залізобетонних конструкцій, підсилених при дії навантаження, відзначимо імена С.Г. Альсаєда [15], Х.А. Барроса [16], Б.Р. Еллінгвуда [17], Дж.Р. Касас [18] та інших.

Науковець з університету Короля Сауда (Ер-Ріяд, Саудівська Аравія) С.Г. Альсаєд [15] у своїй роботі запропонував дослідження впливу закріплених ззовні вуглепластикових (CFRP) стрічок підсилення на надійність залізобетонних балок з недостатньою міцністю на зсув за проектного навантаження. Для встановлення цього питання було випробувано шість залізобетонних балок прольотом 2,0 м (дві з них були без додаткового підсилення, чотири – з додатковим підсиленням за допомогою CFRP-стрічок шириною 50 мм в зонах максимальних зсувних зусиль). Аналіз надійності, за спрощеним ймовірнісним алгоритмом базованим на методі Монте-Карло, тут був проведений для діапазону номінальних навантажень – від експлуатаційного до граничного. Параметри, що враховувалися, були наступні: ефект орієнтації стрічок, вплив ширини стрічки та інтервалу між ними. Отримані результати продемонстрували, що за робочого навантаження 60% і менше від руйнівного, балка буде достатньо надійною для всіх значень орієнтації CFRP-стрічок в діапазоні 30…60° до поздовжньої осі балки. В свою чергу, коли прикладене навантаження складало 70% й більше від руйнівного – бажана надійність досягалася лише за умови зміни ширини стрічок чи їх кроку (збільшення інтервалу між стрічками від 100 до 150 мм – відповідно з результатами випробувань), або ж одночасно й одного, й іншого. Варто також додати, що номінальна міцність на зсув залізобетонних балок, підсилених за допомогою вуглепластикових стрічок, тут була отримана за допомогою рівнянь, запропонованих в нормах ACI 440.2R-02 [19].

Загалом, роботу С.Г. Альсаєда [15] можна вважати актуальною й наочною в отриманих результатах, вона є однією з найповніших стосовно опису підходу до оцінки надійності саме підсилених залізобетонних конструкцій, однак, після її детального аналізу, можна зробити наступні висновки й виокремити такі недоліки: а) використаний тип підсилення немає єдиного підходу до розрахунку (на сьогодні українські норми проектування підсилень з FRP-систем відсутні); б) оцінку надійності виконували на основі розрахунку міцнісних параметрів, отриманих згідно американських норм проектування ACI (необхідна адаптація до вітчизняних норм); в) здебільшого, найбільш поширені аварійні ситуації в залізобетонних балкових конструкціях виникають через перевищення проектних максимальних згинальних зусиль, а не зсувних (переважно забезпечені з великими запасами).

Цікавою, з точки зору встановлення оцінки надійності підсилених залізобетонних конструкцій, є робота Х.А. Барроса [16] – доцента з університету Мінью (Азурем, Португалія). Основною перевагою цієї роботи над попередньою є та, що аналіз надійності в ній був проведений відповідно до експериментальних результатів міцності на зсув більш ніж для 250 залізобетонних балок, підсилених при дії навантаження закріпленням зовнішніх FRP-систем. Для оцінки надійності автором було використано: різноманітні перерізи балок – прямокутні, таврові, двотаврові; широкий діапазон параметрів підсилення – орієнтація FRP-стрічок, їх крок, ширина тощо; найбільш поширені типи підсилення FRP-стрічками, залежно від виду перерізу балок.

В даному випадку найкраща збіжність отриманих коефіцієнтів безпеки була досягнута відповідно до положень європейських норм проектування CNR-DT200 [20], гірша – відповідно до положень вже згаданих вище норм ACI 440.2R-02 [19]. Проте, згідно аналізу результатів показників надійності таких підсилених конструкцій, великий розкид коефіцієнта безпеки не може забезпечити чіткого й єдиного критерію розуміння впливу на загальну надійність, власне, самого підсилення FRP-системами. Крім того, ще одним недоліком цієї роботи можна вважати той, що повним чином не досліджено і не враховано такого явища, як значний вплив поперечної арматури залізобетонної балки, який великим чином компенсує внесок зовнішнього підсилення, при встановленні об'єктивної оцінки надійності в даному дослідженні – характеристики (коефіцієнта) безпеки.

Досконалішою за попередні роботи, з точки зору врахування спільної роботи елементів підсиленої залізобетонної конструкції і підходу до оцінки її надійності, є робота Б.Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка [17] – професорів з Технологічного Інституту Джорджії (Атланта, США). Ці вчені запропонували методику оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених зовнішнім закріпленням FRP-композитів. Найважливішою перевагою цієї методики є та, що застосована вона до підсилених залізобетонних елементів, які мають недостатню міцність на згин (дослідження стосується міцності нормальних перетинів, а не похилих – на відміну від розглянутих вище наукових праць [15, 16]). Даний фактор надає роботі Б.Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка виключної актуальності для реальних умов реконструкції згинаних залізобетонних елементів. Більше того, для встановлення оцінки надійності підсилених конструкцій, науковці у своїх дослідженнях використали не тільки залізобетонні балки, як згинані елементи, а й плити.

Публікація професорів Б.Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка [17] наочно продемонструвала можливість розроблення методики визначення оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених при дії навантаження CFRP-пластинами на основі досягнення граничного стану відповідно до американських норм проектування ACI 318 [21]. В свою чергу, закріплені при дії навантаження до нижніх граней згинаних залізобетонних елементів (великопролітних балок та плит) CFRP-пластини включаються в роботу конструкції на певному етапі та збільшують її міцність та деформативність.

Аналіз надійності тут запропоновано проводити на основі методики встановлення відповідної оцінки надійності для таких підсилених залізобетонних елементів за їх наступних можливих відмов: текучості поздовжньої робочої арматури, роздроблення стиснутої зони бетону або ж порушенні зчеплення вуглепластикової пластини. Іншими словами, згідно [17], граничний стан g(X) = 0 (визначений відповідно до норм ACI 318 [21]) може бути записаний у вигляді:

$$M \le M_u, \tag{1}$$

де M – згинальний момент, визначений згідно ACI 318 [21]; M_u – граничний згинальний момент від прикладеного постійного і змінного навантаження.

Алгоритм визначення оцінки надійності підсиленого залізобетонного елемента детально описаний для однієї з балок досліджуваної серії (решта випадків, згідно з [17], обробляється аналогічним чином – у роботі представлене резюме з усіма результатами).

Припустивши, що через зміну експлуатаційного використання конструкції номінальне змінне навантаження збільшиться на 50%, до нижньої грані залізобетонної балки (армованої згідно американських норм AISC [22]) були додані FRP-пластини підсилення, щоб забезпечити додаткову несучу здатність. Необхідна несуча здатність при згині була забезпечена склеюванням двох армуючих шарів FRP-пластин до нижньої грані залізобетонної балки. Власне, аналіз надійності, що проводився згідно ймовірнісного методу Монте-Карло як для непідсилених, так і для підсилених FRP-пластинами елементів, базувався на статистичних даних (які відображали стохастичні параметри моделювання матеріалів) попередніх досліджень, що стосувалися визначення ймовірностей відмов конструкцій (Галамбоса у 1982 та МакГрегора у 1996 році). Надійність підсилених конструкцій (як балок, так і плит), в першу чергу, залежала від якості встановлення FRP-

пластин та виражалася через наступний критерій – показник надійності для згинаних елементів β (ще одна назва – індекс надійності).

Загалом, роботу Б.Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка [17] можна назвати фундаментальною у сфері дослідження надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених при дії навантаження за допомогою FRP-пластин, оскільки вона дає чітку методику визначення критерію оцінки надійності таких елементів – індексу надійності β, а отримані у ній результати можуть стати відправною точкою зростання інтересу науковців щодо питань підходів до оцінки надійності залізобетонних елементів, підсилених FRP-композитами. Єдиним ж її недоліком можна назвати той, що вона адаптована до американських норм проектування.

Дж.Р. Касас [18] із Технічного Університету Каталонії (Барселона, Іспанія) запропонувала методику знаходження розрахункових факторів (коефіцієнтів) безпеки згинаних залізобетонних мостів, підсилених CFRP-стрічками, для аналізу їх надійності (дана методика була застосована до семи існуючих залізобетонних мостів із недостатньою міцністю на згин). Згідно з отриманими результатами, якщо глобальний коефіцієнт (фактор) безпеки такої підсиленої конструкції дорівнює 0,85 – він відповідає рівню безпеки з індексом надійності β = 3,5. За таких умов, відповідно до праці [18], запропонована модель розрахунку фактору безпеки є актуальною щодо згаданих вище згинаних залізобетонних мостів, підсилених CFRP-стрічками. Також слід додати, що згідно проведених досліджень науковець встановила залежність – значення коефіцієнта (фактору) безпеки строго пов’язане із прийнятою моделлю прогнозованого порушення зчеплення елементів конструкції. Недолік роботи [18] – можливість застосування лише для великопролітних балкових конструкцій.

В.М. Кербхері [23] у своїй роботі використав два найбільш поширені прогностичні підходи (статистичні методи прогнозування) для отримання оцінок надійності щодо довготривалого погіршення цілого ряду характеристик матеріалу підсилення (в даному випадку – зволожених вуглецю або епоксидної смоли), які потім порівнюються з експериментальними даними, отриманими протягом періоду трьохрічного впливу. Отримані прогнози надійності порівнювались з коефіцієнтами (факторами) безпеки запропонованими ACI 440.2R-02 [19]. Недоліком праці [23] можна назвати той, що підхід до прогнозування надійності (описаний тут двома статистичними методами) можна застосувати лише для конструкції самого підсилення.

В Україні ж найбільш близькою за тематикою досліджень, що стосуються оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів, є робота науковців Луцького НТУ П.О. Сунака, А.В. Шостака, С.В. Синього та О.П. Сунака [24]. Їх публікація описує методику визначення надійності підсилених шаром сталефібробетону залізобетонних елементів при реконструкції будівель і споруд. Були отримані залежності для детермінованого розрахунку міцності нормальних перетинів балки комплексного перерізу та виконаний розрахунок балки на надійність (оцінка надійності тут була проведена методом статистичної лінеаризації). Також у роботі [24] наведена формула для визначення характеристики безпеки β_s:

$$\beta_s = \frac{\overline{M}_u - \overline{M}}{\sqrt{\widehat{M}_u + \widehat{M}}}, \qquad (2)$$

де $\overline{M}, \widehat{M}$ – середнє значення та дисперсія згинального моменту, що діє в поперечному перерізі елемента від зовнішнього навантаження; $\overline{M}_u, \widehat{M}_u$ – середнє значення та дисперсія несучої здатності елемента.

В загальному, публікація науковців [24] Луцького НТУ є актуальною, через описаний надійнісний підхід до розрахунку підсиленого згинаного елемента (враховує випадковий характер введних у розрахунок величин). Недоліком ж можна назвати малопоширений в Україні тип підсилення залізобетонних конструкцій (сталефібробетон) а також не врахування в теорії розрахунку навантаження, яке практично завжди наявне під час підсилення.

Також дуже цікавою є робота О.П. Воскобійник [25] із Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка, в якій цілий розділ присвячено дослідженню проектного й фактичного

рівня безвідмовності різних типів сталезалізобетонних конструкцій (СЗБК) на всіх етапах їх життєвого циклу. Зокрема, тут була розроблена і наведена методика визначення ймовірності відмови й забезпеченості розрахункового опору СЗБК, що утворюються при підсиленні залізобетонних згинальних елементів із різним ступенем пошкоджень за допомогою жорсткої сталевої арматури.

Значний прогрес у сфері розроблення методів визначення оцінки надійності підсилених будівельних конструкцій, який відбувся у XXI столітті, зумовлений, насамперед, загальним розвитком теорії надійності будівель і споруд та активним розвитком і впровадженням сучасних матеріалів та систем для підсилення несучих конструкцій будівель та споруд. Окремі дослідження питань оцінки надійності підсилених залізобетонних конструкцій наведені в наукових працях таких вчених як Р. Аль-Махаіді [26], Н. Плевріс [27], Е. Фер'єр [28], Дж. Веселек [29].

Висновки. У даній роботі зібрано, описано й проаналізовано наукові праці закордонних та українських вчених, що стосуються проблематики оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів. Перспективи розвитку цього питання великі – ймовірнісний підхід до проектування конструкцій та будівель і споруд загалом, а також до підсилених залізобетонних елементів зокрема (що є тематикою цієї публікації), здатний наблизити розрахунок будівельних конструкцій до їх дійсної роботи із забезпеченням гарантованої безпеки (або ж заданої надійності) підсилених конструкцій протягом всього життєвого циклу. Крім того, ймовірнісний підхід є більш раціональний (порівняно з напівімовірнісним) – він дозволяє повніше й точніше враховувати фактор економічності при проектуванні (особливо для підсилених конструкцій), що є надзвичайно важливою його перевагою.

Головне завдання, яке випливає з проведеного аналізу наукових праць – отримання адекватної методики оцінки надійності підсилених згинаних залізобетонних елементів (встановити єдиний критерій такої оцінки) адаптовану до українських норм проектування та практики реконструкції.

Література

1. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
2. Пшеничкина В.А. Надежность строительных систем: учебное пособие / В.А. Пшеничкина, А.Н. Богомолов, А.А. Чураков. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. – 40 с.
3. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с.
4. Eurocode: Basis of structural design. EN 1990:2002. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002. – 87 p.
5. Duprat F. Reliability of RC beams under chloride-ingress / F. Duprat // Construction and building materials. – 2007. – No. 8, Vol. 21. – p. 1605-1616.
6. Low H.Y. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading / H.Y. Low, H. Hao // Structural safety. – 2001. – No. 2, Vol. 23. – p. 157-178.
7. Shi Y.F. Spatial reliability analysis of explosive blast load damage to reinforced concrete columns / Y.F. Shi, M.G. Stewart // Structural safety. – 2015. – Vol. 53. – p. 13-25.
8. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с.
9. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании: Монография / В.Д. Райзер. – М.: изд-во АСВ, 1998 – 304 с.
10. Cornell C.A. A Probability Based Structural Code / C.A. Cornell // ACI-Journal. – 1969. – No. 12, Vol. 66. – p. 974-985.

11. Ditlevsen O. Structural Reliability Methods: Monograph / O. Ditlevsen, H.O. Madsen. – Chichester: John & Wiley Sons Ltd, 1996. – 384 p.

12. Перельмутер А.В. Об оценке уязвимости строительных конструкцій / А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин // Magazine of Civil Engineering. – 2014. – No. 5. – С. 5-14.

13. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Монография / С.Ф. Пичугин. – М.: изд-во АСВ, 2011. – 455 с.

14. Лантух-Лященко А.И. Концепция надежности в Еврокоде / А.И. Лантух-Лященко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – №6. – С. 79-88.

15. Alsayed S.H. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips / S.H. Alsayed, N.A. Siddiqui // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 42. – p. 238-247.

16. Lima J.L. Reliability analysis of shear strengthening externally bonded FRP models / J.L. Lima, J.A. Barros // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings. – 2011. – Vol. 164. – p. 43-56.

17. Wang N.Y. Reliability-Based Evaluation of Flexural Members Strengthened with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites / N.Y. Wang, B.R. Ellingwood, A.H. Zureick // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 2010. – Vol. 136. – p. 1151-1160.

18. Trentin C. Safety factors for CFRP strengthening in bending of reinforced concrete bridges / C. Trentin, J.R. Casas // Composite Structures. – 2015. – Vol. 128. – p. 188-198.

19. American Concrete Institute (ACI) ACI 440.2R-02: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. – ACI, Farmington Hills, MI, 2002. – 80 p.

20. CNR (National Research Council) CNR-DT200: Guidelines for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre reinforced composites. – CNR, Rome, 2004. – 164 p.

21. American Concrete Institute (ACI) ACI 318-05: Building code requirements for reinforced concrete. – ACI, Farmington Hills, MI, 2005. – 369 p.

22. American Institute of Steel Construction (AISC) ANSI/AISC 360-05: Specification for structural steel buildings. – AISC, Chicago, 2005. – 461 p.

23. Karbhari V.M. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening / V.M. Karbhari, M.A. Abanilla // Composites Part B: Engineering. – 2007. – No. 1, Vol. 38. – p. 10-23.

24. Сунак П.О. Методика визначення надійності підсилених шаром сталефібробетону залізобетонних елементів при реконструкції будівель і споруд / П.О. Сунак, А.В. Шостак, С.В. Синій, О.П. Сунак // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – №93. – С. 498-503.

25. Воскобійник О.П. Методологія нормування технічних станів сталезалізобетонних конструкцій: дис. … доктора техн. наук / Воскобійник Олена Павлівна. – Полтава, 2014. – 495 с.

26. Pham H.B. Reliablity analysis of bridge beams retrofitted with fibre reinforced polymers / H.B. Pham, R. Al-Mahaidi // Composite Structures. – 2008. – No. 2, Vol. 82. – p. 177-184.

27. Plevris N. Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates / N. Plevris, T. Triantafillou, D. Veneziano // Journal of Structural Engineering. – 1995. – No. 7, Vol. 121. – p. 1037-1044.

28. Ferrier E. Long-time concrete-composite interface characterization for reliability prediction of RC beam strengthened with FRP / E. Ferrier, P. Hamelin // Materials and Structures. – 2002. – No. 9, Vol. 35. – p. 564-572.

29. Weselek J. Bending load capacity of strengthened RC beams with stochastically distributed material properties / J. Weselek, U. Haussler-Combe // Computational Modelling of Concrete Structures. – 2014. – p. 859-869.