

УДК 624.012.25

**СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ
ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
ВУГЛЕПЛАСТИКОВОЮ СТРІЧКОЮ**

**КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
УГЛЕПЛАСТИКОВОЙ ЛЕНТОЙ**

**FINITE ELEMENT SIMULATION OF STRENGTHENING REINFORCED
CONCRETE BENDING STRUCTURES WITH CARBON PLASTIC TAPE**

Пиндус Ю.І., к.т.н., доцент, Конончук О.П., к.т.н., ст. викладач
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м.
Тернопіль)

Пиндус Ю.И., к.т.н., доцент, Конончук А.П., к.т.н., ст. преподаватель
(Тернопольский национальный технический университет имени Ивана
Пулюя, г. Тернополь)

Pyndus Y.I., Ph.d. (engineering), Associate Professor, Kononchuk A.P., Ph.d.
(engineering), Senior Lecturer (Ternopil Ivan Pul'uj National Technical
University, Ternopil)

Приведено результати скінченноелементного моделювання згинальних залізобетонних балок до та після їх підсилення вуглепластиковою стрічкою за дії на них одноразового навантаження, які порівняно із даними натурного експерименту.

Приведены результаты конечноэлементного моделирования изгибаемых железобетонных балок до и после их усиления углепластиковой лентой при действии на них однократной нагрузки, которые сравнены с данными натурного эксперимента.

The article presents the results of finite element simulation of reinforced concrete bending structures before and after their strengthening with carbon plastic tape during single load, which are compared with full-scaled experiment data.

Ключові слова:

Залізобетон, підсилення, вуглепластики, моделювання, метод скінченних елементів.

Железобетон, усиление, углепластики, моделирование, метод конечных элементов.

Reinforced concrete, strengthening, carbon plastic, simulation, finite element method.

Вступ. Міцнісні характеристики залізобетонних конструкцій, зокрема, згинальних залізобетонних елементів, можуть бути значно покращені використанням армуючих композитних матеріалів, які наклеюють на тримкі (напружувані розтягом) поверхні. Армовані карбоновим волокном полімери все частіше використовуються для підсилення та продовження експлуатаційного ресурсу залізобетонних конструкцій завдяки високій корозійній стійкості, міцності, опору втомі та співвідношенню високої міцності до маси. Найбільш достовірними підходами щодо дослідження поведінки підсилених залізобетонних конструкцій є експериментальні методи. Проте, експериментальні лабораторні дослідження є трудомісткими, довготривалими та потребують значних матеріальних затрат. Об'єм натурних експериментальних випробувань можна суттєво зменшити шляхом чисельного моделювання поведінки конструкцій методом скінченних елементів (МСЕ). У комплексі з результатами лабораторних досліджень, результати чисельних розрахунків можуть бути використані для моделювання роботи залізобетонних конструкцій за широкого спектру впливів: особливостей зовнішнього навантаження, механічних та теплотехнічних властивостей матеріалів, геометричних розмірів, конструктивного виконання, врахування різного роду дефектів, аварійних ситуацій тощо.

Аналіз останніх досліджень. У світовій практиці багато наукових праць присвячено моделюванню поведінки підсилених залізобетонних конструкцій з використанням МСЕ [1-5]. В оглядовій статті [1] виконано аналіз 12 наукових праць, які присвячені експериментальним та аналітичним дослідженням впливу армованих полімерів на міцнісні характеристики залізобетонних балок. В роботі узагальнено ряд результатів досліджень ефективності застосування різних полімерних композитних матеріалів та способів підсилення ними залізобетонних конструкцій.

Р.А. Ritchie та співавтори [3] провели натурні випробування 14 підсилених волоконними полімерними композитами залізобетонних балок. Для підсилення використовували композитні стрічки з арамідними, вуглецевими та скляними армувальними волокнами. Крім того в роботі виконані дослідження та запропоновані найбільш ефективні способи кріплення армованих композитних стрічок до залізобетонних балок.

Праці [4, 5] також присвячені експериментальним дослідженням методів підсилення залізобетонних конструкцій, зокрема попередньо навантажених [5], армованими полімерними композитами.

З розвитком потужної комп'ютерної техніки та обчислювальних

скінченноелементних (СЕ) комплексів типу ABAQUS та ANSYS дослідники отримали змогу у сукупності з експериментальними дослідженнями проводити чисельне моделювання поведінки складних залізобетонних конструкцій, зокрема підсилених полімерними композитними матеріалами. Однією з фундаментальних праць в даному напрямку є робота D. Kachlakev та його співавторів [2]. Ними аналітично, з використанням СЕ комплексу ANSYS досліджено декілька моделей балок і запропоновано ряд способів їх підсилення композитними полімерами. Доведено ефективність та достатню точність змодельованих результатів з експериментальними даними. Завдяки запропонованим схемам зміцнення авторам вдалось суттєво покращити міцнісні характеристики залізобетонних балок.

Зростаюча потреба та інтенсивність застосування методів підсилення залізобетонних конструкцій армованими композитними матеріалами вказує актуальність та необхідність подальших досліджень у даному напрямку.

Постановка мети і задач досліджень. Зважаючи на світові тенденцію до активного застосування комп'ютерного моделювання при проектуванні та експлуатації конструкцій та будівель в цілому, вітчизняна будівельна галузь не повинна залишатись осторонь. Застосування МСЕ при розробці, дослідженні та впровадженні в виробництво нових методів підсилення залізобетонних конструкцій дозволить значно спростити процес та зекономити час і кошти на реалізацію поставлених задач. Метою дослідження є чисельне моделювання роботи та оцінка міцнісних характеристик повномасштабних згинальних залізобетонних елементів до та після їх підсилення вуглепластиковою стрічкою Sika CarboDur S-512 за дії одноразового навантаження. Провести порівняльний аналіз отриманих даних з експериментальними та встановити можливість застосування МСЕ для аналогічних досліджень при зміні механічних властивостей матеріалів, конструктивних характеристик зразків, силових впливів на них та інших можливих факторів. При програмному СЕ моделюванні враховуються експериментальні нелінійні діаграми деформування бетону та матеріалу внутрішньої сталеві арматури, а також характеристики міцності бетону за умов розтягу. В перспективі чисельне моделювання планується застосувати до балок підсилених вуглепластиковим полотном Sika Wrap, а також врахувати дію малоциклового навантаження на міцнісні характеристики.

Експериментальні дослідження. Випробування проводились в Науково-дослідній лабораторії будівельних конструкцій і споруд кафедри інженерних конструкцій Національного університету водного господарства та природокористування під керівництвом Борисюка О.П. Для експериментальних досліджень було виготовлено 12 залізобетонних балок із бетону класу С 20/25, розмірами 100×160×2000 мм. Зразки армувалися двома поздовжніми робочими арматурними стержнями Ø10 А 500С та поперечними

стержнями $\text{Ø}6 \text{ A}240\text{C}$ з кроком 50 мм (рис. 1а).

Першим етапом досліджень було випробування балок без підсилення та доведення їх до граничного експлуатаційного навантаження. Після цього половина дослідних зразків підсилювалась вуглепластиковою стрічкою Sika CarboDur S-512 за схемою наведеною на рис. 1б та знову випробувалась при тому ж режимі навантаження з доведенням до повного руйнування [6, 7].

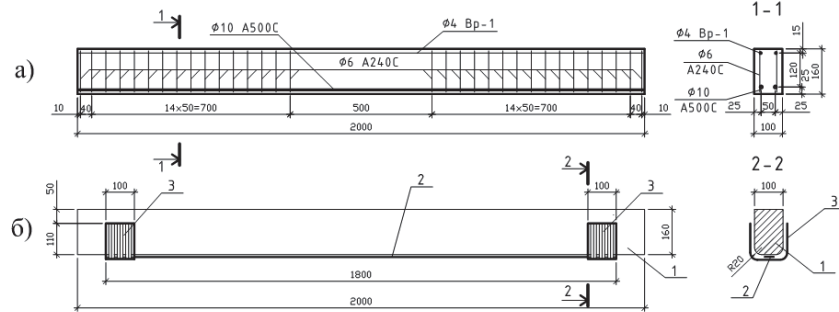


Рис. 1. а) – конструкція та схема армування дослідних балок; б) – схема підсилення дослідних балок вуглепластиковою стрічкою Sika CarboDur S-512; 1 – дослідна балка; 2 – стрічка Sika CarboDur S-512; 3 – анкерівка із полотна Sika Wrap

В процесі випробувань механічним та тензометричним методами замірялись деформації стиснутої зони бетону, розтягнутої робочої арматури, елемента підсилення, зміна деформацій по висоті перерізу у нормальних та у похилих площинах, зміщення стрічки відносно бетону, прогини балок та ширина розкриття тріщин. Більш детальну інформацію про методику досліджень та результати проведеного експерименту можна отримати з [8].

Моделювання методом скінченних елементів. Для чисельного моделювання використано програмний комплекс ANSYS. З урахуванням умов симетрії, моделювали чверть залізобетонної балки (рис. 2). Для дискретизації моделі використано 17524 скінченних елементів, що забезпечує задовільну точність розрахунків [2].

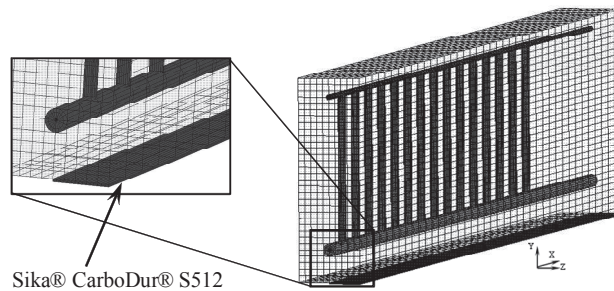


Рис. 2. Повномасштабна тривимірна скінченноелементна модель підсиленої балки

Для достовірного моделювання нелінійної поведінки бетону за стиску та розтягу використали 8-ми вузловий скінченний елемент SOLID65, який володіє трьома ступенями свободи в напрямках OX, OY і OZ. Елемент SOLID65 має здатність до розтріскування при розтягуванні і дроблення при стисканні. Він задовільно описує поведінку бетону відповідно до діаграми деформування, поданої на рис.3 а. У первинному стані, до прикладання навантаження, матеріал елемента є ізотропним.

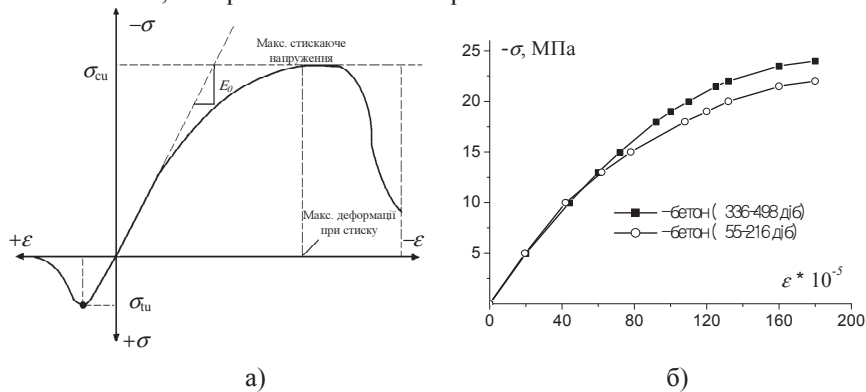


Рис. 3. Діаграми деформування бетону
а) типова одновісна діаграма деформування бетону [2]; б) експериментальна діаграма деформування бетону на стиск [9]

Щоб якомога точніше відтворити роботу натурних зразків, в SE модель закладали експериментальні діаграми деформування бетону на стиск (рис. 3 б) та коефіцієнти [2], подані в табл. 1. Варто зауважити, що при моделюванні непідсиленних та підсиленних балок використовували різні експериментально отримані характеристики бетону у віці 55-216 діб та 336-498 діб відповідно (рис. 3 б, табл. 1).

Таблиця 1.

Вихідні параметри бетону для скінченноелементного моделювання

| Назва параметрів | Бетон у віці 55–216 діб | Бетон у віці 336–498 діб |
|--|-------------------------|--------------------------|
| Модуль пружності E , МПа | $27,3 \times 10^3$ | $23,95 \times 10^3$ |
| Розрахункове значення міцності бетону на стиск f_{cd} , МПа | 21,69 | 24,31 |
| Розрахункове значення міцності бетону на розтяг f_{ct} , МПа | 2,4 | 2,8 |
| Коефіцієнт Пуассона ν | 0,2 | 0,2 |
| Open shear transfer coefficient (β_t). | 0,2 | 0,2 |
| Closed shear transfer coefficient (β_c). | 1 | 1 |

Сталеву арматуру (рис. 2) моделювали з використанням стандартного (ANSYS) скінченного елемента BEAM188. Вказаний елемент розроблений на основі балки Тимошенко і придатний для моделювання прямих балкових конструкцій, які працюють на розтяг, стиск, згин та кручення. Елемент має шість ступенів свободи в кожному вузлі – переміщення в напрямках координатних осей OX, OY, OZ і кути поворотів навколо цих осей. Елемент BEAM188 може бути використаний в задачах для врахування пружності, пластичності, повзучості, в'язкопружності, в'язкопластичності, а також при великих деформаціях та переміщеннях.

Для моделювання матеріалу (сталь) арматури використали ідеально пружно-пластичну діаграму деформування (Bilinear Kinematic Hardening) з наступними параметрами, що були встановлені експериментально: розрахункове значення міцності арматури на границі текучості $f_{yd} = 517,2$ МПа; модуль пружності $E_s = 20,5 \times 10^4$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

Підсилюючу вуглецеву стрічку Sika CarboDur S-512 (рис. 2) моделювали з використанням скінченного елемента Solid185, який застосовують для моделювання тривимірних об'єктів. Solid185 є 8-ми вузловим елементом з трьома ступенями свободи у кожному з них. Цей елемент має властивості пластичності, повзучості, в'язкопружності і в'язкопластичності, а також великих деформацій переміщень.

Матеріал стрічки вважали ідеально пружним. В якості вихідних даних матеріалу задавали такі характеристики: границя міцності на розтяг $f_t = 3100$ МПа; модуль пружності $E_s = 16,5 \times 10^4$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Геометричні розміри стрічки: ширина 50 мм, товщина 1,2 мм. З урахуванням умов симетрії, в моделі (рис. 2) використовували половину ширини стрічки (25 мм). Для зв'язку стрічки з балкою створювали контактну пару поверхонь стрічки та балки (опція "contact pair"), яка перебуває в постійному контакті ("always bonded") без проковзування.

Модель балки навантажували згідно схеми, поданої на рис. 4. На праву торцеву поверхню накладали умови симетрії, обмежуючи її в переміщеннях вздовж осі OX. Ліва опора обмежувала вузли балки в переміщеннях вздовж осі OY. Зусилля $F/4$ розподілено прикладали до ряду вузлів по товщині балки (вздовж осі OZ).

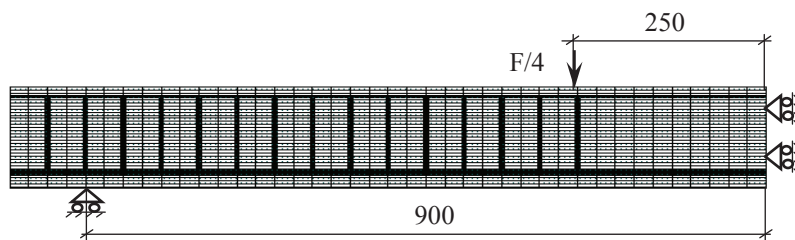


Рис. 4. Схема навантаження SE моделі залізобетонної балки

В роботі програмно моделювали ступінчасте (10 кроків) навантаження балки від 0 до 10,08 кН×м (відповідно до проведених експериментальних досліджень). Варто зазначити, що руйнування підсиленних зразків відбувалось значно пізніше – близько 18 кН×м, але через складність та велику тривалість розрахунків на даному етапі дослідження було обмежено номінальним експлуатаційним навантаженням. Результати моделювання прогинів та деформацій компонентів залізобетонної балки подано на рис. 5 – рис. 10. Експериментальні криві побудовані за усередненими даними натурних випробувань двох балок.

Результати моделювання переміщень вузлів СЕ моделі балки (рис.5) вказують на те, що максимальне значення прогину локалізоване всередині натурної балки, що відповідає експериментальним даним. Результати СЕ моделювання задовільно узгоджуються з експериментальними даними (рис. 6). Більш значні відхилення експериментальної кривої від змодельованої спостерігаються лише на останньому ступені навантаження, що свідчить про досить складні процеси перерозподілу зусиль в залізобетонних конструкціях на стадії їх руйнування, які дуже важко змодельовати.

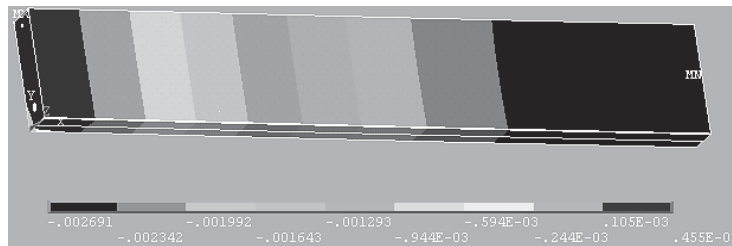


Рис. 5. Типове поле переміщень у напрямку осі OY при згинальному моменті $M=4,03 \text{ кН}\times\text{м}$

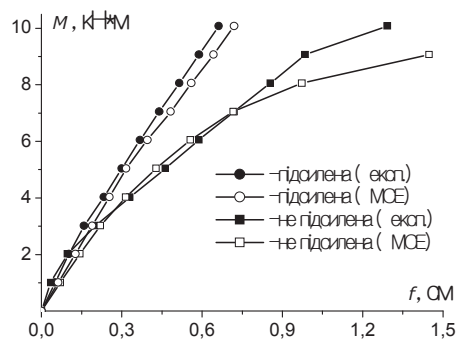


Рис. 6. Величини прогинів зразків випробуваних на одноразове навантаження

На рис. 7 подані результати СЕ моделювання полів деформацій підсиленої залізобетонної балки. Очевидно, що максимальні деформації стиску та розтягу сконцентровані не по середині балки, а на деякій віддалі. Це свідчить про те, що порівняльну оцінку переміщень та деформацій скінченноелементної моделі слід виконувати з урахуванням застосовуваної експериментальної методики досліджень. Для побудови розрахункових МСЕ кривих (рис. 8 – рис. 9) переміщення та деформації визначали з урахуванням специфіки заміру їх в експерименті: значення деформацій визначалось як середнє по базі приладу, яким виконувались заміри.

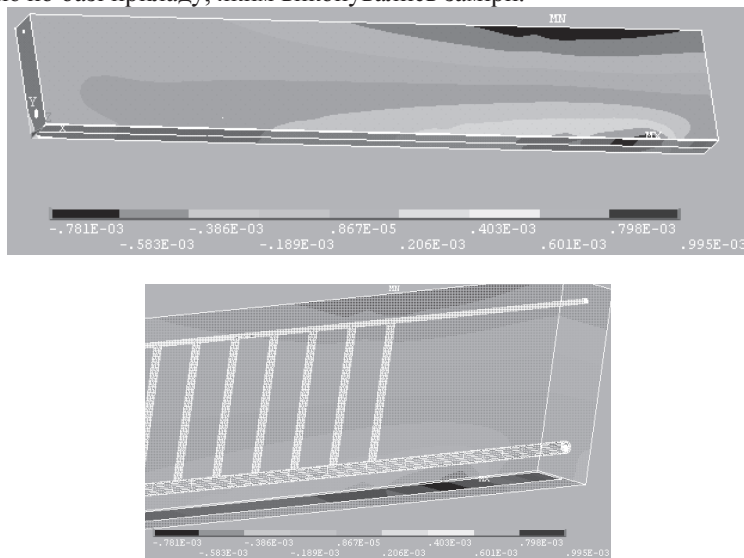


Рис. 7. Поля відносних деформацій підсиленої вуглепластиковою стрічкою залізобетонної балки вздовж осі OX при згинальному моменті $M=4,03 \text{ кН}\cdot\text{м}$

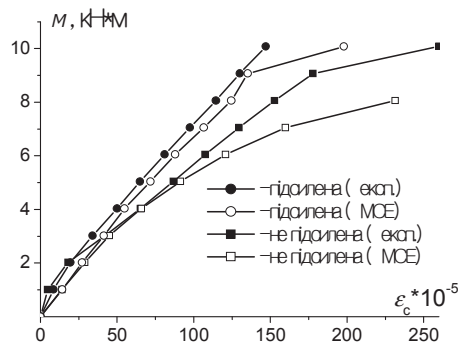


Рис. 8. Відносні деформації крайньої стиснутої фібри бетону балок випробуваних на одноразове навантаження

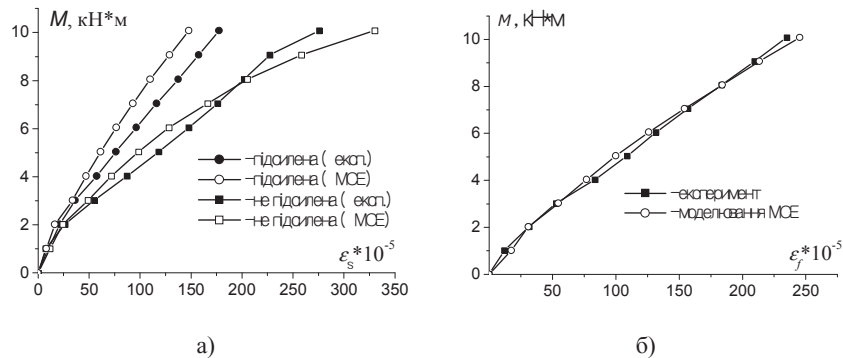


Рис. 9. Відносні деформації: а) – внутрішньої сталеві робочої арматури; б) – зовнішньої композитної арматури

Висновки. Отримано задовільне узгодження розрахункових МСЕ даних з експериментальними в області до критичних навантажень. Програмне моделювання з використанням МСЕ є інструментом який може ефективно використовуватись як при проектуванні залізобетонних конструкцій так і для аналізу поведінки реальних конструкцій тривалої експлуатації з метою оцінки їх міцності, надійності, залишкового ресурсу, а також можливості підсилення та продовження їх використання.

1. G. Murali. Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymer Laminate: A Review / Murali G., Pannirselvam N. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 6, No. 11, November 2011, pp. 41-47.
2. D. Kachlakev. Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthening with FRP Laminates / D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat, T. Potisuk. Special Report SP316, Oregon Department Of Transportation, USA, May 2001. 113 p.
3. P. A. Ritchie, D. A. Thomas, L.W. Lu and G. M. Connelly, External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, ACI structural journal, Title no. 88-S52, July-August 1991. 88(4): pp. 490.
4. M. Arduini, A. D. Tommaso and A. Nannim, Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams, ACI Structural Journal, July-August 1997. 94(4): pp. 363-370.
5. S. F. Brena, R. M. Bramblett, S. L. Wood and M.E. Kreger, Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites, ACI Structural Journal, January-February 2003. 100(6): pp. 827-830.
6. Конончук А.П. Исследование по нормальным сечениям железобетонных балок усиленных разными методами // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: матер. междуна. конф. молодых ученых. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2010. – С. 121.
7. Борисюк О.П. Методика випробовування підсиленних згинальних залізобетонних елементів при малоциклових навантаженнях / Борисюк О.П., Конончук О.П. // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. збірник наукових праць. Випуск 74: Книга 2. Київ, ДП НДІБК, 2011, С. 709-718.
8. Борисюк О.П. Напружено-деформований стан нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсиленних вуглепластиками за дії малоциклового навантаження / О.П. Борисюк, О.П. Конончук // Монографія. – Рівне: НУВГП, 2014. – 136 с.