

ТЕХНІЧНИЙ СТАН, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ПІДСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

УДК 624.012.025

**ПРАКТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПІДСИЛЕНИХ
ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**PRACTICAL METHOD OF STRENGTHENING REINFORCED
CONCRETE ELEMENTS CALCULATION**

Бабич В.Є., к.т.н., доц., Савицький В.В., к.т.н., доцент, ORCID ID 0000-0001-8807-9486. Зятюк Ю.Ю., ст. викладач, (Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне).

Babich V.Ye., doctor PhD, preprofessor,, Savitskiy V.V., doctor PhD, preprofessor, ORCID ID 0000-0001-8807-9486. Ziatyuk Y.Y., senior lecturer, (National university of water and environmental engineering, Rivne).

В статті наведені теоретичні основи та методика розрахунку згинальних залізобетонних елементів згідно з новими нормами проектування залізобетонних конструкцій ДБН В.2.-6-98:2009 «Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення» та ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування», які базуються на сучасній деформаційній моделі і повністю гармонізовані з європейськими стандартами (Єврокод 2).

Industrial and civil construction is characterized by widespread use of reinforced concrete structures, which are one of the main supporting elements of buildings and structures. Reinforced concrete bending elements (beams, slabs, frames, etc.) have been widely used in building structures in the past.

For today, taking into account earlier theoretical and experimental studies, normative documents have been issued in Ukraine for calculating reinforced concrete elements reinforced with composite materials and for calculating and designing dispersed reinforced fibrous concrete structures.

Strengthening of reinforced concrete structures is carried out only when all other possibilities of ensuring their reliable exploitation are exhausted. For today, the simultaneous strengthening of the compressed and stretched zones is not sufficiently investigated. Therefore, further research of reinforced concrete elements reinforced by modern and highly effective materials, namely steel-fiber reinforced concrete and composite materials

based on carbon fibers, have an important theoretical and practical significance. The use of modern carbon-plastic materials and steel-fiber reinforced concrete is an effective way to strengthen bending reinforced concrete elements.

The article presents the theoretical bases and method of calculation of bending reinforced concrete elements according to the new design standards of reinforced concrete structures DBN V.2.-6-98: 2009 "Concrete and reinforced concrete constructions. Basic provisions" and B V.2.6-156 ISO: 2010 "Concrete and reinforced concrete construction with heavy concrete. Design rules", which are based on the modern deformation model and fully harmonized with European standards (Eurocode 2). Reinforced concrete beams simultaneous strengthening under load research is resulted by the glued on compos as carbon fibres in the stretched area, and steelfiberconcrete with metallic fiber in the compressed zones.

Ключові слова :

Підсилення, навантаження, балка, сталевібробетон, композити.
Strengthen, load, beam, steelfiberconcrete, composites.

Вступ. Промислове та цивільне будівництво характеризується широким використанням залізобетонних конструкцій, які є одним з основних несучих елементів будівель і споруд. Залізобетонні згинальні елементи (балки, плити, ферми, та ін.) широко використовувалися серед будівельних конструкцій у минулому. Серед вибору методу підсилення залізобетонних згинальних елементів можна виділити два способи: підсилення тільки стиснутої або тільки розтягнутої зони.

На сьогоднішній день, зважаючи на раніше теоретичні та експериментальні дослідження, в Україні з'явилися нормативні документи з розрахунку залізобетонних елементів підсилені композитними матеріалами та розрахунку і проектування дисперсноармованих фібробетонних конструкцій.

Фіброволокно посилює кути і торці бетонних конструкцій, на початку твердіння бетону знижує усадку і утворення тріщин, при знятті опалубки нівелює ймовірність пошкодження [1]. Не достатньо досліджено на сьогодні одночасне підсилення стиснутої та розтягнутої зон. Тому подальше дослідження залізобетонних елементів, підсилені сучасними та високоефективними матеріалами, а саме сталевібробетону та композитних матеріалів на основі вуглецевих волокон, мають важливе теоретичне і практичне значення.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженню підсилень залізобетонних елементів від різноманітних силових впливів свої роботи присвятили: Б.А.Ашимов, А.Я. Барашиков, Є.М. Бабич, А.М. Бамбура, В.В.Білозір, З.Я. Бліхарський, Б.А. Боярчук, О.І. Валовой, І.О.

Валовой, О.Б.Голишев, О.Д.Журавський, І.В. Задорожнікова, В.Г. Кваша, М.Д. Климпуш, А.І. Мальганов, І.В. Мельник, А.Я. Мурин, О.П. Перлова, Я.В. Римар, М.Ю. Смолянінов, С.Д. Семенюк, О.П. Сунак, та багато інших.

Мета і завдання дослідження отримавши експериментальні дані про роботу залізобетонних балок підсилених одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні удосконалити наявні методи розрахунку. Виконати практичний метод розрахунку підсилених залізобетонних балок.

Об'єкт досліджень: підсилені залізобетонні згинальні елементи.

Матеріали. Залізобетонні балки з розмірами 100×200×2000 мм, бетон класу С16/20. Поздовжня робоча стержнева арматура 2Ø10 А 500С та поперечна арматура Ø6 А240С з кроком 50 мм, крім зони чистого згину. Верхня монтажна арматура із дроту Ø4 Вр-І. Підсилення розтягнутої зони вуглепластикові стрічки Sika® CarboDur® S-512 та полотно SikaWrap®-230 С/45 [2,3,4]. Підсилення стиснутої зони половину балок підсилювали дрібнозернистим бетоном(Б) С16/20, іншу сталевібробетоном(СФБ 3%) товщиною 50мм. Технологія підсилення та випробовування конструкцій виконували за методикою [5,6].

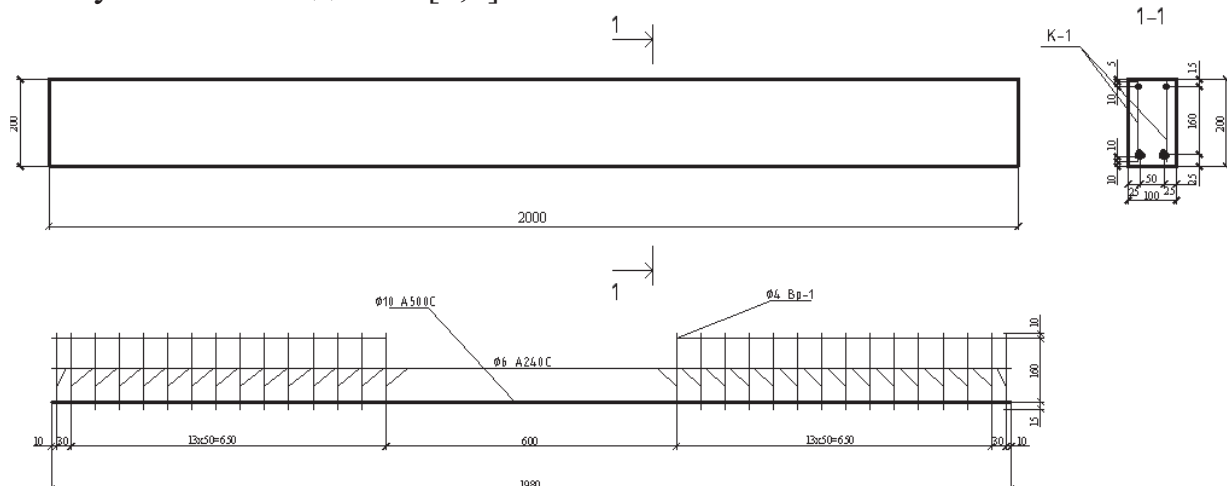


Рис.1. Конструкція дослідних балок до підсилення

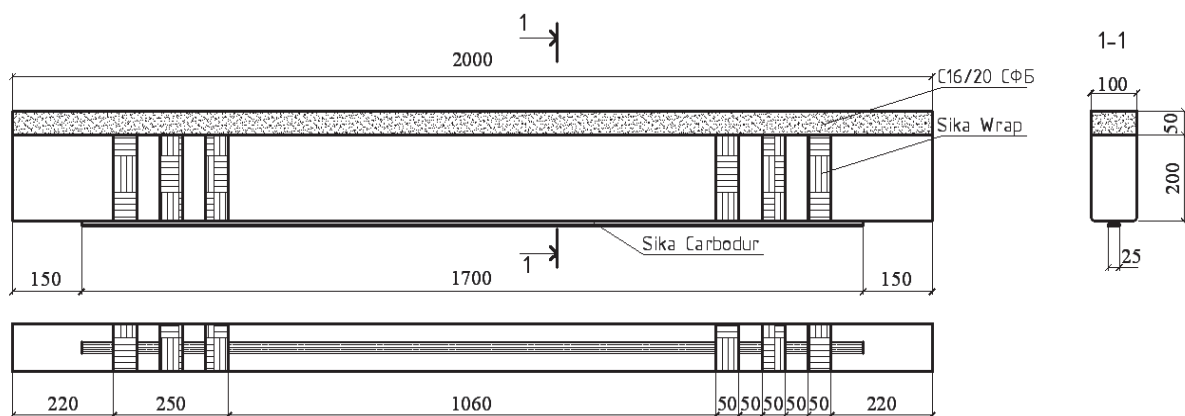
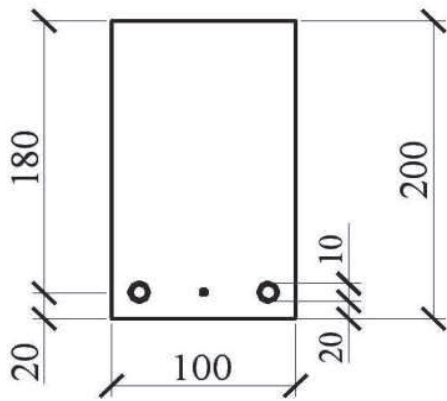


Рис.2. Конструкція підсилення дослідних балок

Перший етап розрахунку. Несуча здатність залізобетонного елемента



без підсилення. Вихідні дані: бетон класу С 16/20: $f_{cd} = 11,5$ МПа; $f_{cm,prism} = 19,23$ МПа; $E_{cd} = 20 \times 10^3$ МПа; $\varepsilon_{cl} = 166 \times 10^{-5}$; $\varepsilon_{cul} = 415 \times 10^{-5}$. Арматура класу А 500С: $A_s = 1,57$ см²; $f_{yd} = 500$ МПа; $E_s = 21 \times 10^4$ МПа, [7,8]. $\varepsilon_{ud} = 0,02$. Параметри перерізу: $h = 0,2$ м; $b = 0,1$ м; $\alpha_s = 0,02$ м. Розрахувати міцність нормальних перерізів на дію згинального моменту залізобетонної одно пролітної балки з розрахунковим прольотом $L_0 = 1,8$ м.

Рис. 3. Поперечний переріз балки

Подальший розрахунок буде проводитись за допомогою ЕОМ за рекомендаціями [9]. в табличній формі .

Другий етап розрахунку. Несуча здатність залізобетонного елемента підсиленого в розтягнутій зоні за допомогою системи з вуглепластиків фірми Sika®.

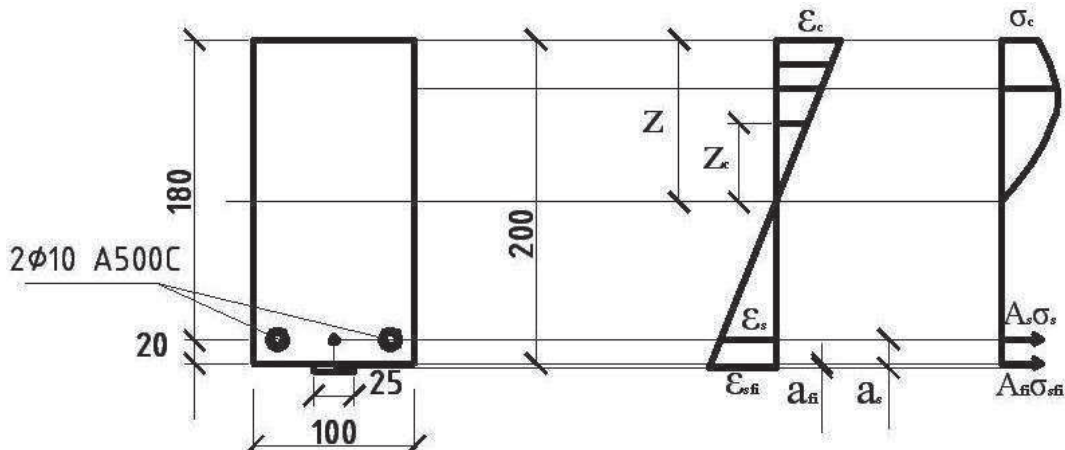


Рис. 4. Напружено деформований стан підсиленої балки в розтягнутій зоні

Вихідні дані: Характеристики бетону та арматури тіж самі. Параметри стрічки Sika® CarboDur® S-512 : $f_f = 3100$ МПа; $E_f = 16,5 \times 10^4$ МПа; $\varepsilon_{fy} = 500 \times 10^{-5}$, $t_f = 0,002$ м. Параметри полотна SikaWrap® -230 C/45 : $f_{fy} = 150$ МПа; $E_f = 2,8 \times 10^4$ МПа; $t_f = 0,001$ м.

За гіпотезою плоских перерізів при заданому значенні деформацій у стиснутій крайній фібрі бетону $\varepsilon_c = \varepsilon_{c(1)}$ деформації у розтягнутій арматурі $\varepsilon_{s1(1)}$ і $\varepsilon_{s2(1)}$ за фіксованого значення $x = z_{(1)}$, яке відповідає значенню $\varepsilon_c = \varepsilon_{c(1)}$, визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{s(1)} = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{z_{(1)}} (d - z_{(1)}); \varepsilon_{sf(1)} = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)}).$$

Епюра напружень в стиснутому бетоні має криволінійний характер, а тому внутрішнє зусилля в бетоні $S_{c(1)}$ можна визначити як суму зусиль в елементарних площадках нескінченної малої висоти :

$$S_{c(1)} = \omega_c b z_{(1)} f_{cm,prism}$$

де ω - коефіцієнт повноти епюри напружень в стиснутому бетоні,

Внутрішні зусилля в арматурі та стрічці визначаються залежно від напружень та відносних деформацій :

$$S_{s(1)} = A_s \sigma_{s(1)} = A_s E_s \varepsilon_{s(1)}; S_{sf(1)} = A_f \sigma_{sf(1)} = A_f E_f \varepsilon_{sf(1)};$$

$$S_{c(1)} = S_{s(1)} + S_{sf(1)}.$$

де E_s – модуль пружності арматури, та E_f – модуль пружності стрічки.
Сумарний момент від зусиль в перерізі рівний

$$M_{s(1)} = \beta_c b f_{cm,prism} z_1^2 + S_{s(1)}(d - z_{(1)}) + S_{sf(1)}(h - z_{(1)})$$

де β – коефіцієнт відносної несучої здатності нормального перерізу.

Третій етап розрахунку. Несуча здатність залізобетонного елемента підсиленого в розтягнутій зоні за допомогою системи з вуглепластиків фірми Sika® та сталевібробетонном у стиснутій зоні.

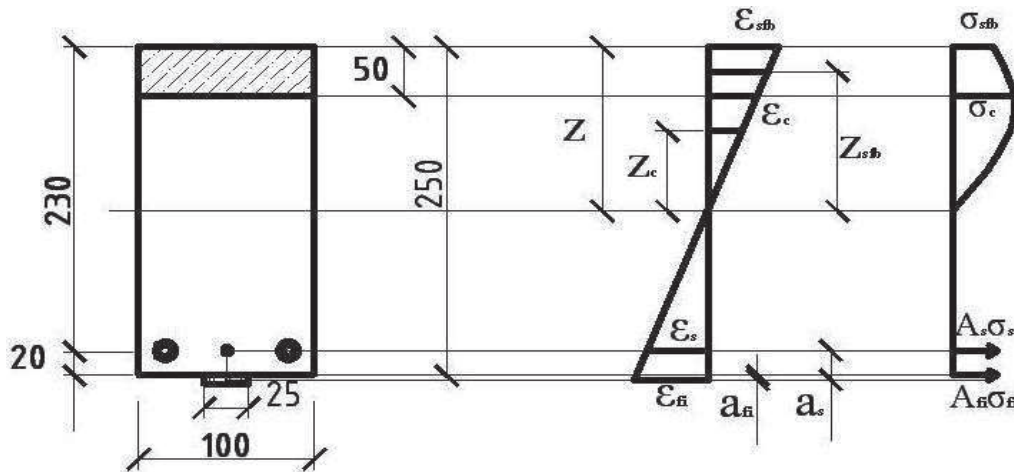


Рис. 5. Напружено деформований стан підсиленої балки в розтягнутій та стиснутій зоні

Вихідні дані: бетон класу С 16/20: $f_{cd} = 11,5$ МПа; $f_{cm,prism} = 19,23$ МПа, $E_{cd} = 20 \times 10^3$ МПа; $\varepsilon_{cl} = 166 \times 10^{-5}$; $\varepsilon_{cul} = 415 \times 10^{-5}$. Арматура класу А 500С: $A_s = 1,57$ см²; $f_{yd} = 500$ МПа; $E_s = 21 \times 10^4$ МПа, $\varepsilon_{ud} = 0,02$. Параметри перерізу: $h = 200$ мм; $h_{sf,ad} = 50$ мм; $b = 10$ мм; $\alpha_s = 0,025$ м. Параметри стрічки Sika® CarboDur® S-512 : $f_f = 3100$ МПа; $E_f = 16,5 \times 10^4$ МПа; $\varepsilon_{fy} = 500 \times 10^{-5}$, $t_f = 0,002$ м. Параметри полотна SikaWrap®-230 C/45 : $f_{fy} = 150$ МПа; $E_f = 2,8 \times 10^4$ МПа; $t_f = 0,001$ м. Підсилення стиснутої зони виконали сталевібробетоном (СФБ 3%). Умовно вважається увесь переріз із сталевібробетону.

Розглядається два випадки: $x \leq h_{sf}$ нейтральна лінія проходить в бетоні підсилення, елемент розраховується що складається з бетону одного виду і

класу (бетону підсилення), в другому випадку $x > h_{sf}$ в бетоні основного перерізу. Розглядаємо випадок нейтральна лінія проходить в межах основного бетонного перерізу. Задаємося $\varepsilon_{cf(1)}$ та $\varepsilon_{cf(1)}$ наближення $z_{(1)}$.

$$\varepsilon_{c(1)} = \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h_{cf,ad}); \quad \varepsilon_{s(1)} = \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)} - a_s);$$

$$\varepsilon_{sf(1)} = \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{(1)}} (h_c - z_{(1)}).$$

Епюра напружень в стиснутому бетоні має криволінійний характер, а тому внутрішнє зусилля в бетоні $S_{c(1)}$ можна визначити як суму зусиль в елементарних площадках нескінченної малої висоти :

$$S_{c(1)} = \omega_c b z_{(1)} f_{cfb,ad}.$$

Внутрішні зусилля в арматурі , бетоні підсилення та стрічці визначаються залежно від напружень та відносних деформацій :

$$S_{s(1)} = A_s \sigma_{s(1)} = A_s E_s \varepsilon_{s(1)}; \quad S_{sf(1)} = A_f \sigma_{sf(1)} = A_s E_{sf} \varepsilon_{sf(1)};$$

$$S_{c(1)} = S_{c(1)} + S_{sf(1)}.$$

де E_s – модуль пружності арматури, та E_f – модуль пружності стрічки.

Сумарний момент від зусиль в перерізі рівний

$$M_{s(1)} = \beta_c b f_{cfb,ad} z_1^2 + S_{s(1)} (d - z_{(1)}) + S_{sf(1)} (h - z_{(1)}).$$

Визначаєм умовну міцність перерізу без висоти підсилення зі сталевібробетону:

$$M = 0,454 \times 0,10 \times 0,018^2 \times 23 \times 10^6 = 3,38 + 0,51 + 12,11 = 16,00 \text{ кН/м}$$

$$M_c = 0,454 \times 0,10 \times 0,018^2 \times 19,23 \times 10^6 = 2,8 + 0,51 + 12,11 =$$

$$15,42 \text{ кН/м}$$

$$M = 17,44 - 16,00 + 15,42 = 16,87 \text{ кН/м.}$$

За експериментальними даними встановлено за рахунок анкерування стрічки полотном в розтягнутій зоні та підсиленням сталевібробетоном у стиснутій зоні за рахунок значних адгезійних властивостей підсилення, несуча здатність підсиленого елемента збільшується.

На основі наведених даних отримано наступну залежність визначення несучої здатності нормальних перерізів залізобетонних балок підсиленних композитною арматурою та сталевібробетоном:

$$M_{s(1)} = \left(\beta_c b f_{cfb,ad} z_1^2 + S_{s(1)} (d - z_{(1)}) + S_{sf(1)} (h - z_{(1)}) \right) \times \gamma_f^{sfb}$$

γ_f^{sfb} - коефіцієнт, що враховує збільшення несучої здатності за рахунок підсилення стиснутої та розтягнутої зон елемента, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти рівним 1,25 (аналогічні залежності пропонуються для визначення несучої здатності іншими дослідниками).

Таблиця 1
Результати дослідження несучої здатності балок [10].

Назва балки	Площа поперечного перерізу елементу підсилення			Площа внутрішньої сталевий арматури	Експериментальний згинальний момент	Розрахунковий згинальний момент	Ефект підсилення
	A_{f_2} , см^2	A_{b_2} , см^2	A_{sfb_2} , см^2				
БП-1 _{СФБ}	0,3	-	50	1,57	20,91	17	23
БП-2 _Б	0,3	50	-	1,57	22,46	17	32,12
БЦП-1 _{СФБ}	0,3		50	1,57	21,96	17	29,18
БЦП-2 _Б	0,3	50	-	1,57	21,13	17	24,3
БЦП _{0,6-5Б}	0,3	50	-	1,57	22,72	17	33,65
БЦП _{0,6-6СФБ}	0,3	-	50	1,57	22,59	17	32,8

Висновки. Аналізуючи величину експериментальних значень несучої здатності з розрахунковим значенням можна зазначити суттєву розбіжність. Несуча здатність підсилених залізобетонних балок вуглепластиковими матеріалами та сталевібробетоном на 47% та 56% більша ніж в непідсилених залізобетонних балок при одноразовому навантаженні балки БП-1_{СФБ}, БП-2_Б та на 60% при повторних навантаженнях балки БЦП-1_{СФБ}, БЦП-2_Б. Можна відмітити, що застосування під час підсилення сучасних вуглепластикових матеріалів та сталевібробетону є ефективним способом підсилення згинальних залізобетонних елементів. Застосування такого методу підсилення підвищило жорсткість підсилених балок, а розрахунок таких конструкцій є складним. Застосування отриманої методики при розрахунку більш простота, в порівнянні із іншими особливо при застосуванні ручних розрахунків. Основною ж перевагою є можливість широкого застосування комп'ютерної техніки. В наступних публікаціях планується продовжити порівняння експериментальних та розрахункових даних за різними методиками розрахунку. Подальше дослідження на експериментальних зразках всіх серій досліджень дозволить з'ясувати та усунути розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними.

1. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства/ Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Дворкін. - К.: Основа, 2007.

Dvorkin L.Y. Fundamentals of Concrete Studies / Dvorkin L.Yu., Dvorkin O.L. Dvorkin - K.: Basis, 2007

2. Техническое описание материала системы SikaWrap® Композитные тканые материалы для структурного и сейсмического усиления,. Издание 05.2015, 3с.

Technical description of material of SikaWrap® system. Composite woven materials for structural and seismic reinforcement. Published 05.2015, 3p.

3. Техническая карта материала. Идентификационный №: 020206010010000040 Sika® CarbDur® S Ленты из углеродных волокон для усиления конструкций - составная часть системы Sika® CarboDur®. Издание: 24/07/2014; UA_YS_01/2015, 5с.

Technical map of the material. Identification No.: 020206010010000040 Sika® CarbDur® S Carbon fiber reinforcing strips - part of the system Sika® CarboDur®. Издание: 24/07/2014; UA_YS_01/2015, 5 p.

4. Техническая карта материала. Идентификационный №: 020206020010000025 SikaWrap®-230 C/45. Ткань из углеродных волокон для усиления конструкций, Издание: 21/07/2014; UA_YS_01/2015, 4с.

Technical map of the material. Identification No.: 020206020010000025 SikaWrap®-230 C / 45. Carbon Fiber Fabric for Strengthening Structures, Edition: 21/07/2014; UA_YS_01 / 2015, 4p.

5. Зятюк Ю.Ю. Операційність технології виконання робіт при підсиленні дослідних залізобетонних зразків (матеріалами фірми «Sika») / Ю.Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – вип. 32. – С. 466 – 475.

Ziatiuk Y.Y. Leadthrough technology operation works at strengthening of pre-production reinforced concrete models (firm "SIKA" materials) / Y.Y. Ziatiuk // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures - Rivne: NUWEE, 2016. - Issue 32. - P. 466 - 475.

6. Борисюк О.П., Зятюк Ю.Ю. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених у стиснутій і розтягнутій зоні / О.П. Борисюк, Ю.Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб.наук.праць. – Рівне: НУВГП, 2013. – вип. 27. – С. 27 – 33.

Borisyuk O.P., Zyatyuk Yu.Yu. Method of experimental research of reinforced concrete beams reinforced in compressed and stretched zone / O.P. Borisyuk, Y.Y. Ziatiuk // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: - Rivne: NUWEE, 2013. - Issue 27. - P. 27 - 33.

7. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71с.

DBN V.2.6-98: 2009. Concrete and reinforced concrete constructions. Substantive provisions. - Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2011. – 71p.

8. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 166 с.

DSTU B V.2.6-156: 2010. Concrete and reinforced concrete constructions. Design rules.- Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine,2010.-166 p.

9. Бабич Є. М., Бабич В. Є. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок : навчальний посібник / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич. – 2-ге видання, перероблене і доповнене. – Рівне : НУВГП, 2017. – 191 с

Babich E.M., Babich V.Ye. Calculation and design of reinforced concrete beams: textbook / E. M. Babich, V. E. Babich. - 2nd edition, revised and supplemented. - Rivne: NUVGP, 2017. - 191 p.

10. Зятюк Ю.Ю. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок підсилених в стиснутій та розтягнутій зонах / Ю.Ю. Зятюк // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. Збірник / Відпов. ред. М.М. Осстрін. – К., КНУБА, 2016. – Вип. 61 (спеціальний) –С. 216 – 222.

Ziatiuk Y.Y. Results of experimental research of reinforced concrete beams strengthened in compressed and stretched zones / Y.Y. Ziatiuk // Urban Planning and Territorial Planning: Scientific-Technical Collection / Responses Ed. MM Osetrin - K., KNUBA, 2016. - Issue 61 (special) - P. 216 - 222.