

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛОПЛАСТИКОВОЇ АРМАТУРИ

METHOD OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF A REINFORCED CONCRETE BEAM USING GLASS PLASTIC REINFORCEMENT

Клименко Є.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4502-8504, Гриньова І.І., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-7637-6029, Маріо Герак, аспірант, ORCID: 0009-0006-7216-8664(Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Klymenko Ye.V., Sc.D., professor, ORCID: 0000-0002-4502-8504, Grynyova I.I., PhD, Associate prof., ORCID: 0000-0001-7637-6029, Mario Herak, postgraduate, ORCID: 0009-0006-7216-8664 (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

У статті, на основі аналізу літератури, визначені основні фактори та рівні варіювання для дослідження використання композитної арматури в згинальних конструкціях. Було розроблено план експерименту, що включає 15 зразків для випробувань, з метою визначення умов, за яких можливе розширення застосування склопластикової арматури у таких конструкціях.

The article examines the necessity of using fiberglass reinforcement in the construction industry of Ukraine. Due to its high corrosion resistance and low thermal conductivity, fiberglass reinforcement is becoming an effective alternative to steel reinforcement, particularly in structures exposed to aggressive environments. The use of this material extends the lifespan of concrete structures and reduces maintenance costs. However, its application in bending elements is limited due to the lower modulus of elasticity compared to steel reinforcement.

In this study, a detailed literature analysis was conducted to identify key factors and levels of variation for investigating the use of composite reinforcement in bending elements. The research focuses on addressing the limitations of fiberglass reinforcement in these structural applications. A comprehensive experimental design was developed, which includes 15 test samples, aimed at identifying the conditions under which the application of fiberglass reinforcement in bending elements can be expanded. The study's findings will provide important insights into how to optimize the use of this material, potentially lowering construction costs while enhancing the durability and

performance of various structural elements.

Ключові слова: методика проведення експерименту, напружено-деформований стан, склопластикова арматура.
method of conducting the experiment, stressed-deformed state, fiberglass reinforcement.

Вступ. У 2022 році Україна виплавила близько 6,3 млн тонн сталі, що становить третину від показників 2021 року. 58% цього обсягу було вироблено в першому кварталі. Після повномасштабного вторгнення виробництво прокату також скоротилося на 72% до 5,4 млн тонн, та Україна опустилася з 14-го на 25-те місце у світовому рейтингу сталевиробників.

До лютого 2022 року група "Метінвест" мала три основні активи: ММК ім. Ілліча, "Азовсталь" у Маріуполі та "Каметсталь" у Дніпропетровській області. Наразі працює лише "Каметсталь", а також "Запоріжсталь". У 2023 році українським металургам вдалося зберегти обсяги виробництва сталі на рівні 2022 року — 6,2 млн тонн. Без урахування перших місяців 2022 року, виробництво сталі зросло на 26,9%, а прокату — на 31,2%. Порівняно з 2021 роком, після втрати маріупольських заводів, виробництво скоротилося в 3-3,5 рази.

Експорт залишився важливою частиною галузі — у 2023 році 77,9% сталевого прокату було експортовано. Проте частка готової продукції в експорті впала до 37,3%, тоді як частка сировини зросла до 62,7%. Загалом експорт чорних металів знизився на 22%, а надходження від нього скоротилися на 41,6%, до 2,64 млрд доларів. Основними імпортерами залишаються прикордонні до Україні країна ЄС - Польща (40,1%) та сусідня Болгарія (14,6%).

Актуальність наукових досліджень. Європейська комісія планує впровадження механізму прикордонного вуглецевого регулювання (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) з метою зменшення викидів CO₂. Цей механізм покликаний не лише знизити викиди, але й вирівняти умови для європейських і імпортерних виробників, змушуючи останніх сплачувати за викиди таку ж ціну, як і європейські підприємства.

Для України, де значна частка експорту припадає на металургію, цей механізм може створити труднощі. Українські виробники не завжди мають фінансові ресурси для швидкої модернізації та зниження викидів CO₂. Згідно з дослідженнями [1], під час виробництва 1 тонни чавуну викиди CO₂ становлять 2085 кг, що значно більше порівняно з іншими матеріалами, такими як композитна арматура.

На початковому етапі впровадження механізму CBAM (з 2023 до

2026 року) імпортери товарів будуть зобов'язані лише надавати документацію щодо викидів вуглецю під час виробництва. Починаючи з 2026 року, імпортери будуть повинні купувати сертифікати СВАМ відповідно до обсягу своїх викидів.

Зважаючи на перелік продуктів, які підпадають під СВАМ, можна оцінити, які країни і галузі постраждають найбільше. Україна може бути однією з найбільш вразливих країн.

Україна експортує до ЄС товари, охоплені СВАМ, на суму 4,5 млрд доларів США на рік, переважно продукцію з заліза та сталі, яка становить близько 20% від загального експорту України в ЄС. Це означає, що значна частина українських товарів буде підпадати під вимогу купівлі сертифікатів СВАМ при імпорті до ЄС, що створює додаткові фінансові труднощі для українських виробників. Тому дослідження використання композитної арматури у залізобетонних конструкціях є актуальним для України.

Мета та завдання. Встановити вплив різних значущих чинників на несучу здатність залізобетонних балок прямокутного перетину з використанням змішаного армування на основі вивчення їх напружено-деформованого стану. Для реалізації поставлених завдань досліджень в якості базового об'єкта дослідження була розроблена модель залізобетонної балки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Композитна арматура набуває все більшого поширення в будівельній галузі України [2-3] завдяки своїм фізико-механічним властивостям [4], що дозволяють замінювати сталеву арматуру частково або повністю. Однією з ключових переваг композиту є його висока корозійна стійкість, що подовжує термін служби бетонних конструкцій, особливо тих, що піддаються агресивним середовищам [5-6]. Найбільш ефективно скло- та базальтопластикова арматура застосовується у конструкціях на пружній основі, таких як фундаменти [6]. Однак її використання у згинальних конструкціях обмежене через низький модуль пружності порівняно зі сталевією арматурою [7-8]. Визначення умов для ефективного застосування композитної арматури в згинальних елементах є актуальним завданням [9-10], яке може значно розширити сферу її використання та знизити кошторисну вартість будівництва.

Планування експерименту.

Базуючись на дослідженнях Одеської державної академії будівництва та архітектури і робіт інших вчених, застосування теорії математичного планування експерименту є ефективним [11]. Цей метод дозволяє отримати точні результати при мінімальній кількості дослідів, знижуючи матеріальні витрати та трудомісткість. Планування експерименту виникло у 50-х роках ХХ століття для

сільськогосподарських досліджень, а згодом поширилося в інші галузі. З робіт, присвячених математичній теорії експериментів та експлуатаційно-статистичному моделюванню у вирішенні будівельно-технологічних задач, значне місце належить дослідженням видатного матеріалознавця професора В.А. Вознесенського [11] та його наукової школи.

Для оптимального експериментально-статистичного моделювання на основі аналізу попередньо проведених досліджень було обрано проведення трифакторного експерименту з трьома рівнями за методом Бокса-Бенкена використовується спеціальна схема, яка дозволяє зменшити кількість експериментальних точок у порівнянні з повним факторним планом. Замість 27 точок (по одній для кожної комбінації рівнів трьох факторів), цей метод дозволяє скоротити кількість точок до 15, при цьому зберігаючи високий рівень інформативності.

Основними етапами планування є визначити вхідні та вихідні параметри, які визначаються на основі попереднього аналізу і включають такі фактори, як відсоток склопластикової арматури в перерізі (X_1), принцип прикладання навантаження (X_2), клас бетону (X_3)(табл.1).

Таблиця 1

Варіювання обраними факторами для трифакторної моделі планування експерименту

Значення показника	Параметр показника		
	-1	0	+1
X_1 Відсоток склопластикової арматури в перерізі	100% (3 стержні склопластикової арматури+ 0 стержнів металеві)	66% (2 стержні склопластикової арматури + 1 стержень металеві)	33% (1 стержень склопластикової арматури + 2 стержні металеві)
X_2 Принцип прикладання навантаження	Від 0 M_{cr} і до руйнування	Від 0 до 0,8 від M_{cr} ; розвантаження до 0,4 від M_{cr}	Від 0 до 0,5 від M_{cr} ; розвантаження до 0,3 від M_{cr}
X_3 Клас бетону	C12/15	C16/20	C25/30

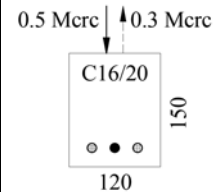
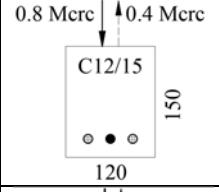
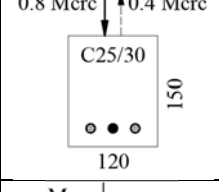
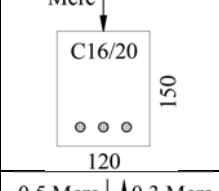
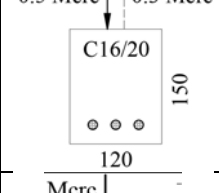
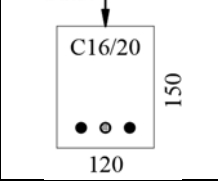
Для проведення експериментальних досліджень в лабораторії кафедри залізобетонних конструкцій та транспортних споруд ОДАБА буде виготовлено 15 дослідних зразків – балок (Табл.2) прямокутного перерізу із різним відсотком армування та з різного бетону. Для визначення характеристик міцності і деформативності бетону згідно вимог чинних норм та рекомендацій [12 та ін.] буде

виготовлено 3 бетонних призми розмірами 150×150×600 мм для випробування на стиск, 3 бетонних призми розмірами 150×150×600 мм для випробування на розтяг при згині та 3 бетонних куба розмірами 150×150×150 мм з того ж замісу бетонної суміші, що й балки.

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

Код зразку	Схема розрізу балки	Значення показника		
		X ₁ Відсоток склопластикової арматури в перерізі	X ₂ Принцип прикладання навантаження	X ₃ Клас бетону
Б 0 0 0	<p>0.8 Mcrc ↓ ↑ 0.4 Mcrc</p> <p>C16/20</p> <p>150</p> <p>120</p>	66%	Навантаження до 0,8 від Mcr, розвантаження до 0,4 від Mcr	C16/20
Б -1 0 0	<p>0.8 Mcrc ↓ ↑ 0.4 Mcrc</p> <p>C16/20</p> <p>150</p> <p>120</p>	100%	Навантаження до 0,8 від Mcr, розвантаження до 0,4 від Mcr	C16/20
Б 1 0 0	<p>0.8 Mcrc ↓ ↑ 0.4 Mcrc</p> <p>C16/20</p> <p>150</p> <p>120</p>	33%	до 0,8 від Mcr, розвантаження до 0,4 від Mcr	C16/20
Б 0 -1 0	<p>Mcrc ↓</p> <p>C16/20</p> <p>150</p> <p>120</p>	66%	Від 0 Mcr і до руйнування	C16/20

Б 0 1 0		66%	Навантаження до 0,5 від Mсг, розвантаження до 0,3 від Mсг	C16/20
Б 0 0 -1		66%	Навантаження до 0,8 від Mсг, розвантаження до 0,4 від Mсг	C12/15
Б 0 0 1		66%	Навантаження до 0,8 від Mсг, розвантаження до 0,4 від Mсг	C25/30
Б -1 -1 0		100%	Від 0 Mсг і до руйнування	C16/20
Б -1 1 0		100%	Навантаження до 0,5 від Mсг, розвантаження до 0,3 від Mсг	C16/20
Б 1 -1 0		33%	Від 0 Mсг і до руйнування	C16/20

Б 1 1 0		33%	Навантаження до 0,5 від Mrc, розвантаження до 0,3 від Mrc	C16/20
Б -1 0 -1		100%	Навантаження до 0,8 від Mrc, розвантаження до 0,4 від Mrc	C12/15
Б -1 0 1		100%	Навантаження до 0,8 від Mrc, розвантаження до 0,4 від Mrc	C25/30
Б 1 0 -1		33%	Навантаження до 0,8 від Mrc, розвантаження до 0,4 від Mrc	C12/15
Б 1 0 1		33%	Навантаження до 0,8 від Mrc, розвантаження до 0,4 від Mrc	C25/30

Випробування балок буде відбуватись за допомогою гідравлічного домкрату ДГ-50 та універсальної силової установки. Дослідні балки плануються випробуватись як однопрогінні вільно оперті балки, що зазнають вигину під зосередженим навантаженням (схему зображено рис.1). Домкрат ДГ-50 утворював зосереджену силу, яка буде контролюватись спеціальним манометром насосної станції домкрата та передавати на дослідні зразки залізобетонних балок.

Навантажувались балки поступово ступенями рівними близько 1/10 від прогнозованої несучої здатності елемента та з витримкою кожної ступені навантаження в межах 5-10 хвилин, а також в залежності від фактору X_2 відвантажувати до 0,4(0,3) від максимального очікуваного навантаження. Дані

показів приладів знімалися під час кожної ступені на початку і в кінці та заносилися до таблиць журналу випробувань.

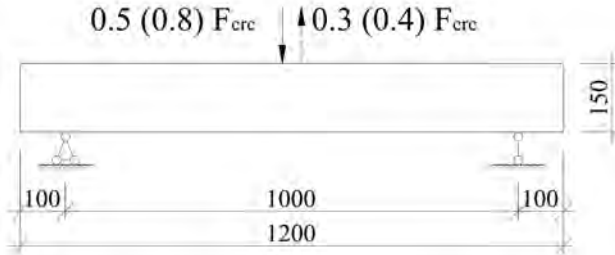


Рис.1 Схема балки-зразка з прикладанням зусилля.

Також в процесі випробувань будуть фіксуватись такі показники як момент утворення нормальних і похилих тріщин та їх ширина розкриття за допомогою спеціального відлікового мікроскопу типу МПБ-2 (дата випуску 28.07.1975 р., №754324) з ціною поділки 0,05 мм. На дослідних зразках з обох граней будуть маркуватись тріщини, їх подальший характер розкриття з відміткою ділянок початку та кінця на кожній ступені навантаження.

Висновок. На основі розробленої методики та експериментального плану буде проведено натурний експеримент, який включає випробування 15 зразків склопластикової арматури в згинальних елементах. Цей експеримент дозволить оцінити ефективність використання композитної арматури в умовах згину, а також визначити оптимальні параметри для її застосування у будівельних конструкціях. Отримані результати дадуть змогу розширити сферу використання склопластикової арматури, зменшити витрати на будівництво та підвищити експлуатаційні характеристики конструкцій, що піддаються впливу агресивних середовищ.

1. Руських В.П., Хавалиць Ю.В. Про перехід на водневу металургію. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. Вип. 46. 2023. С.87-92

Ruskykh V.P., Khavalyts Yu.V. Pro perekhid na vodnevu metalurhiiu. Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seria: Tekhnichni nauky. Vyp. 46. 2023. S.87-92

2. Клімов Ю.А., Вітковський Ю.А., Солдатченко О.С. Використання неметалевої композитної арматури для армування бетонних конструкцій. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Вип. 42. 2011. С. 13-17.

Klimov Yu.A., Vitkovskiy Yu.A., Soldatchenko O.S. Vykorystannia nemetalevoi kompozytnoi armatury dlia armuvannia betonnykh konstrukttsii. Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika. Vyp. 42. 2011. S. 13-17.

3. Арматура композитна для армування бетонних конструкцій. Загальні технічні умови : ДСТУ 9065:2021. – Офіц. вид. – К. : УкрНДНЦ, 2021. 26 с. – (Національний стандарт України).

Armatura kompozytna dlia armuvannia betonnykh konstrukttsii. Zahalni tekhnichni umovy : DSTU 9065:2021. – Ofits. vyd. – K. : UkrNDNTs, 2021. 26 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

4. Романенко С. М. Дослідження фізико-механічних властивостей склопластикової арматури та її анкерування в бетонних виробках. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 37. 2019. С. 198-205.

Romanenko S. M. Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei skloplastykovoi armatury ta yii ankeruvannya v betonnykh vyrobakh. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Vyp. 37. 2019. S. 198-205.

5. Гамеляк І. П., Тимошенко О. В., Кулак В. В. Порівняння властивостей металевої та склопластикової арматури для дорожнього будівництва. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. Вип. 25-26, 2020. С.81-91.

Hameliak I. P., Tymoshenko O. V., Kulak V. V. Porivniannia vlastyvostei metalevoi ta skloplastykovoi armatury dlia dorozhnogo budivnytstva. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V.M. Shymanovskoho. Vyp. 25-26, 2020. S.81-91.

6. Воскобийник С.П. Особливості армування фундаментів неметалевою композитною арматурою. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю.Кондратиюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. 2016. Вип. 1. С.174-180.

Voskobiinyk S.P. Osoblyvosti armuvannya fundamentiv nemetalevoiu kompozytnoiu armaturoiu. Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu.Kondratiuka. Serii: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstv. 2016. Vyp. 1. S.174-180.

7. Shantha Kumar D., Rajkumar R. Experimental investigation on flexural behavior of concrete beam with glass fibre reinforced polymer rebar as internal reinforcement // International Journal of Chemical Sciences. – 2016. – No. 14(S1). – P. 319 – 329.

8. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars // International Journal of ChemTech Research. – 2015. – Vol.8, No.2. – P. 635 – 642

9. Валовой О.І., Попруга Д.В., Люльченко Є.В., Чорна К.В. Визначення прогинів згинальних елементів армованих склопластиковою і металевою арматурою. Гірничий вісник, Вип. 103, 2018. С.7-12.

Valovoi O.I., Popruha D.V., Liulchenko Ye.V., Chorna K.V. Vyznachennia prohyniv zghynalnykh elementiv armovanykh skloplastykovoio i metalevoiu armaturoiu. Hirnychyi visnyk, Vyp. 103, 2018. S.7-12.

10. Орешкін Д.А., Бондаренко Ю.В., Спиранде К.В., Мольський М.М. Експериментальні дослідження міцності і деформативності склопластикової арматури при стисканні і стислих склопластбетонних елементів. Науковий вісник будівництва. Том 84 № 2. 2016. С.250-258

Oreshkin D.A., Bondarenko Yu.V., Spyrande K.V., Molskyi M.M. Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti i deformatyvnosti skloplastykovoi armatury pry styskanni i styslykh skloplastbetonnykh elementiv. Naukovyi visnyk budivnytstva. Tom 84 № 2. 2016. S.250-258

11. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-ое изд., испр. и доп. М.: Финансы и статистика, 1981. 215 с

Voznesenskyi V. A. Statystycheskye metody planirovaniya eksperymenta v tekhniko-ekonomycheskykh yssledovaniakh. 2-oe yzd., uspr. y dop. M.: Fynansy y statystyka, 1981. 215 s

12. Методи визначення призової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона.: ДСТУ Б В.2.7-217:2009. – [чинний від 2009-09-10]. К. : Мінбудрегіон України, 2010. 20 с. (Національний стандарт України).

Metody vyznachennia przyzvoi mitsnosti, modulia pruzhnosti i koefitsiienta Puassona.: DSTU B V.2.7-217:2009. – [chynnyi vid 2009-09-10].