

УДК 624.072; 624.012; 624.04

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЕТАЛОННИХ ТА ПОШКОДЖЕНИХ БЕТОННИХ БАЛОК З БАЗАЛТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ, ПІДСИЛЕНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИМ ПОЛОТНОМ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF REFERENCE AND DAMAGED CONCRETE BEAMS WITH BASALTOPLASTIC REINFORCEMENT REINFORCED WITH CARBON FIBER SHEET**

**Карпюк І.А.к.т.н., доцент, 0000-0003-3437-5882, Глібоцький Р.В. аспірант, 0000-0002-8730-5952, Карпюк В.М.д.т.н., професор, 0000-0002-4088-6489, Целікова А.С. к.т.н., асистент 0000-0002-1394-3986, Костюк А. І. к.т.н., професор, 0000-0002-5642-2443 (Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса)**

**Karpiuk I.A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 0000-0003-3437-5882, Hlibotskyi R.V. graduate student, 0000-0002-8730-5952, Karpiuk V.M. Doctor of Technical Sciences, Professor, 0000-0002-4088-6489, Tselikova A.S. Candidate of Technical Sciences, assistant, 0000-0002-1394-3986 Kostyuk A.I. Candidate of Technical Sciences, Professor, 0000-0002-5642-2443 (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)**

**В статті приведені результати досліджень несучої здатності звичайних (еталонних) і підсилених вуглепластиковим полотном у нижній розтягнутій зоні та на при опорних ділянках пошкоджених бетонних балках з BFRP за дії статичного ступенево зростаючого малоциклового навантаження.**

**.Energy-efficient, environmentally friendly and economical concrete structures with non-metallic composite reinforcement are not only negatively affected by the environment, but also significantly damaged in the form of significant force cracks, chips, potholes during operation and hostilities. Therefore, the study of the effective reinforcement of these structures brought to the ULS limit is an important and urgent task.**

**The article presents the results of studies of bearing capacity of ordinary (reference) concrete beams with basalt-plastic reinforcement under the action of low-cycle gradually increasing load, as well as reinforced with carbon fiber in the lower stretched zone and at support sites under similar load.**

**Comparison of the obtained research results confirmed the expediency and effectiveness of the adopted method of reinforcing damaged beams. Their load-**

bearing capacity was higher than the reference beams, on average, 1.35 times.

Reinforcement of damaged reference beams with FRP external fiber-reinforced plastic (CFRP) also significantly changed the nature of the destruction of the test specimens. If in the reference beam the failure occurred only at the support sections on inclined sections due to shear or displacement of concrete of the compressed zone above the top of the dangerous inclined crack due to imbalance of their normal sections ( $\rho_n > \rho_{nb}$ ), then in reinforced areas increased to twice and intense - the deformed state of normal sections became almost balanced. As a result of the destruction of reinforced specimens - beams with large ( $a/d = 3$ ) and medium ( $a/d = 2$ ) shear spans occurred in normal sections. It began with the rupture of the lower stretched carbon fiber reinforcement layer.

For ease of comparison, the main parameters of bearing capacity of reference and reinforced concrete beams with BFRP are presented in the form of experimental and statistical dependences, which can be used to assess the influence of research factors both in particular and in interaction with each other.

The performed researches allowed to develop physical and computational models of bearing capacity of damaged (ULS) concrete structures with FRP, reinforced with external fiber-reinforced plastics.

**Ключові слова:** бетонна балка, базальтопластикова арматура (BFRP), фіброармований вуглепластик (CFRP), несуча здатність. concrete beam, basaltoplastic reinforcement (BFRP), fiber-reinforced carbon fiber (CFRP), bearing capacity.

**Вступ.** Підсилення пошкоджених бетонних конструкцій армованими композитними матеріалами має безперечні переваги перед іншими способами. А аналіз останніх публікацій показав, що ні національні норми проектування, ні відомі авторські методики не містять в собі чітких вказівок щодо розрахунку сумісної роботи пошкоджених бетонних балкових конструкцій з FRP або залізобетонних елементів, доведених під час попередньої експлуатації до граничного стану (ULS) або руйнування, з композитними матеріалами підсилення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проведене дослідження [1] спрямоване на експериментальну оцінку ефективності підсилення вуглепластиком у канавках залізобетонних балок. Відзначається, що виконане підсилення значно покращило несучу здатність балок за згин. Проте, у цій роботі не вказана ефективність зазначеного підсилення пошкоджених наскрізними нормальними та похилими тріщинами залізобетонного елемента, доведеного до руйнування.

У праці [2] розглянута поведінка залізобетонних балок, підсилених вуглепластиковими волокнами. Міцність на згин і жорсткість дослідних зразків, підсилених методами EBR або EBROG збільшилися в порівнянні з контрольною непідсиленою балкою, відповідно, на 25-48% і 32-77%. При цьому, режим руйнування балок у цих методах змінювався з відшарування вуглепластика у методі EBR до його розриву у методі EBROG.

У роботі [3] досліджували вплив підвищеної температури та анкерних канавок на зсувні характеристики залізобетонних балок, підсилених композитами із вуглепластику. Відзначається, що суттєве відновлення структурних характеристик значно пошкоджених теплом конструкційних бетонних елементів стає можливим з використанням композиційних матеріалів, армованих вуглецевим волокном (CFRP).

У праці [4] описана поведінка залізобетонних балок, пошкоджених нагріванням і підсилених смугами CFRP, розташованими у канавах. Встановлено, що підвищення температури більше 500°C виражено знижує їхню несучу здатність на згин.

В дослідженні [5] розглядається підсилення на вигин пошкоджених вогнем бетонних балок вуглепластиковими листами. Результати випробування показали, що підсилення балок на вигин з використанням листів вуглепластика покращило несучу здатність дослідних зразків – балок за згин і це покращення вказаних характеристик стало більш помітним зі збільшенням температурного впливу.

**Виділення невирішеної раніше частини проблеми.** Аналіз останніх публікацій [1-5] показав, що ні національні норми проектування, ні відомі авторські методики не містять в собі чітких вказівок по розрахунку сумісної роботи пошкоджених бетонних балкових конструкцій з FRP або залізобетонних елементів, доведених під час попередньої експлуатації до граничного стану (ULS) або руйнування, з композитними матеріалами підсилення[6, 7].

**Мета даної роботи:** експериментальна перевірка можливості та доцільності застосування фіброармованих вуглепластиків для підсилення пошкоджених балкових конструкцій, доведених до граничного (ULS) стану.

**Завдання досліджень:**

- виконати лабораторні дослідження несучої здатності (звичайних) еталонних та підсилених вуглепластиком пошкоджених бетонних балок з BFRP;

- встановити відмінності напружено-деформованих станів в еталонних і підсилених вуглепластиком пошкоджених балок та характеру їх руйнування за дії ступенево-зростаючого малоциклового навантаження;

- отримати експериментально – статистичні залежності основних параметрів несучої здатності дослідних елементів від найбільш значимих конструктивних чинників;

- підготувати відповідні висновки та рекомендації.

**Викладення основного матеріалу і результатів.** Несуча здатність еталонних базальтобетонних (індекс «ref») і підсилених зовнішніми вуглепластиковими (CFRP) волокнами (індекс «ftx») пошкоджених (ULS) балок з BFRP може бути представлена наступними експериментально-статичними залежностями, в яких  $X_1$  – відносний прогін зсуву  $a/h_0=1, 2, 3$ ;  $X_2$  – клас бетону C16/20, C30/35, C40/50;  $X_3$  – коефіцієнт поперечного армування = 0,0029; 0,0065; 0,0115 (АКБ - 800):

$$\hat{Y}(M_{ftx,ult}^{exp}) = 24,43 + 2,40x_2, \text{ кНм, коеф. варіації } \nu = 2,6 \%; \quad (1)$$

$$\hat{Y}(F_{ftx,ult}^{appr(відпов)}) = 69,2 - 46,0x_1 + 8,6x_2 + 2,0x_3 + 22,7x_1^2 - 4,2x_1x_2, \text{ кН, } \nu = 2,8 \%; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{f_1,ult}^{ref}) = 51,8 - 30,1x_1 + 11,8x_2 + 5,5x_3 + 15,9x_1^2 - 5,5x_2^2 - 2,3x_3^2 - 4,8x_1x_3, \text{ кН, } \nu = 5 \%. \quad (3)$$

Коефіцієнт зміцнення пошкоджених (ULS) бетонних балок з BFRP, підсилених одношаровим вуглепластиковим полотном (CFRP) у нижній розтягнутій зоні та вуглепластиковими сорочками на приопорних ділянках  $k_{ftx/f}^{amp} = F_{ftx,ult}^{appr} / V_{f_1,ult}^{ref}$  характеризується виразом:

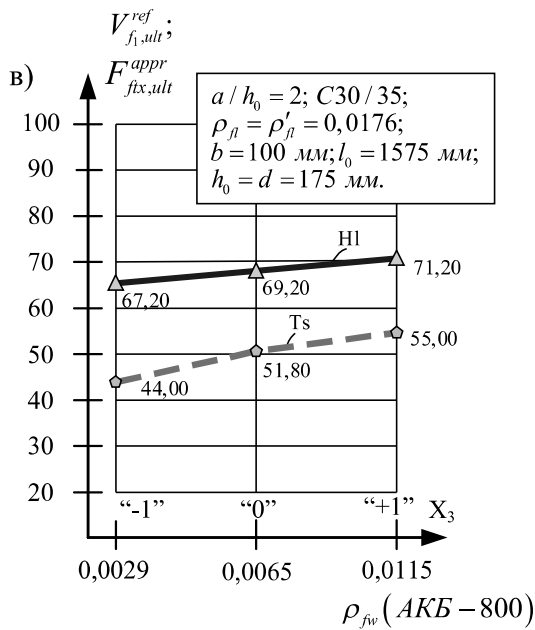
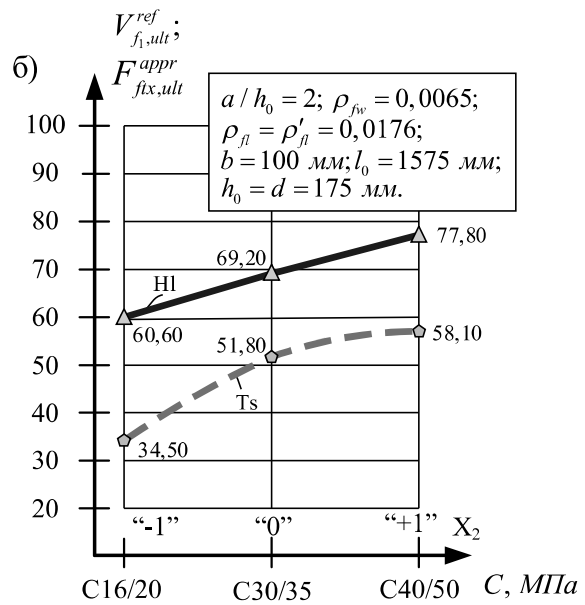
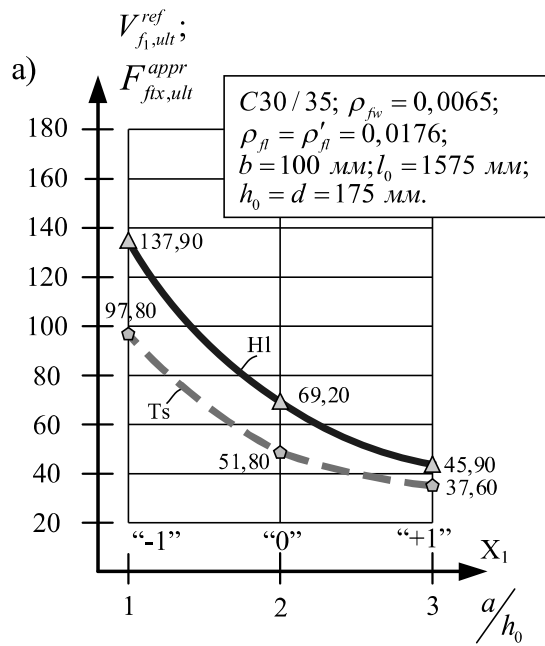
$$\hat{Y}(k_{ftx/f}^{amp}) = 1,35 - 0,05x_1 - 0,12x_2 - 0,06x_3 - 0,04x_1^2 + 0,20x_2^2 + 0,06x_3^2 + 0,18x_1x_2 + 0,06x_1x_3 + 0,04x_2x_3, \nu = 5,02 \%; \quad (4)$$

Графічна інтерпретація вказаних залежностей відображена рис.1,2.

Деформації бетону стиснутої зони, розтягнутої робочої базальтопластикової (BFRP) арматури та зовнішньої вуглепластикової обійми (CFRP) підсилення пошкоджених (ULS) дослідних балок перед їх руйнуванням замалоциклового повторного навантаження ( $\eta_2=0,95F_{ult}$ ) виражається:

$$\hat{Y}(\varepsilon_{cf_1,ult}^{ref,\eta_2} \cdot 10^5) = 157 + 29x_1 - 5x_2 + 17x_3 + 4x_1^2 - 12x_1x_2, \quad (5)$$

$\nu = 6,6 \%;$



Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону  $C$  (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) на несучу здатність еталонних ("ref") базальтобетонних і підсилених вуглепластиковим полотном (CFRP – 1 шар) пошкоджених дослідних бетонних балок з BFRP

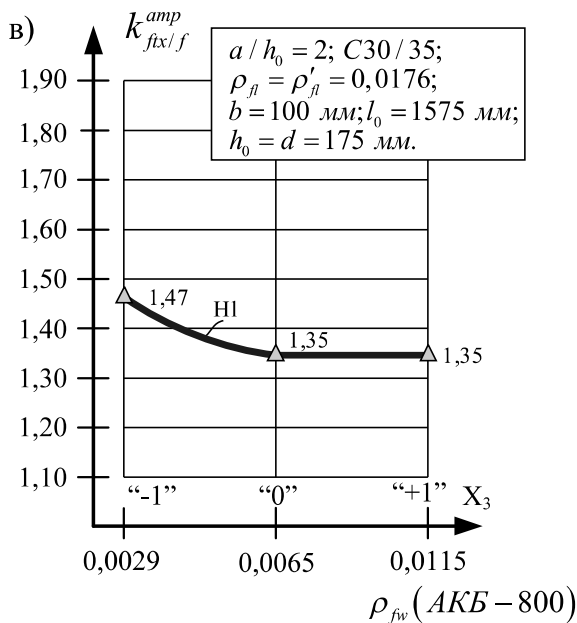
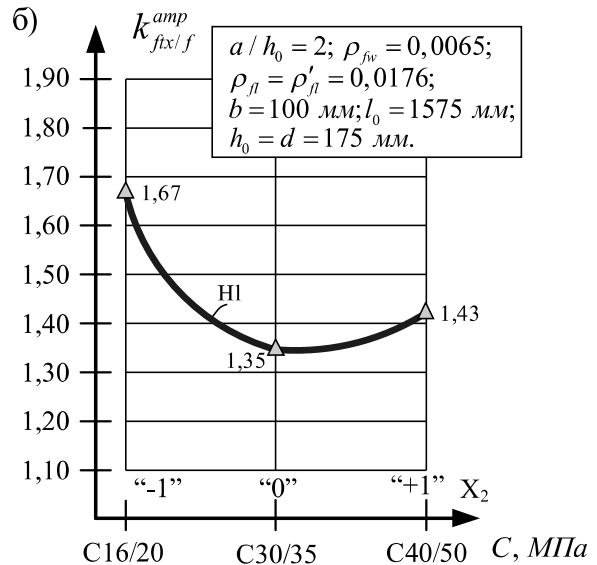
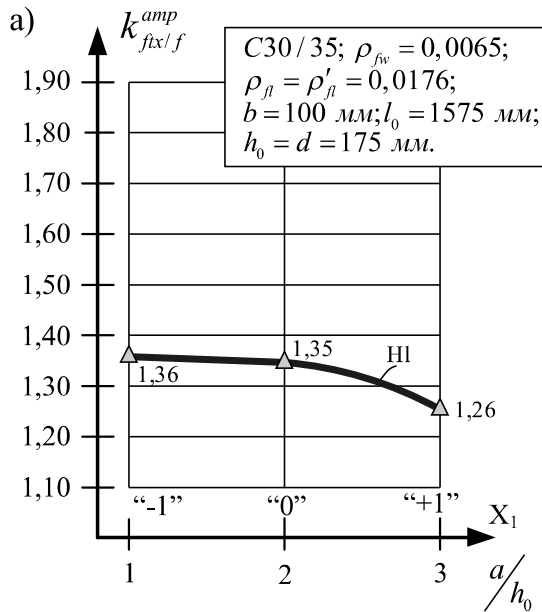
$$\hat{Y}(\varepsilon_{cftx}^{\eta_2} \cdot 10^5) = 277 + 47x_1 - 19x_2 - 45x_1^2 - 8x_2^2 - 11x_1x_2, \quad (6)$$

$$\nu = 5,1\%;$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_1,ult}^{ref, \eta_2} \cdot 10^5) = 745 + 112x_1 + 99x_2 + 47x_3 - 25x_1^2 - 67x_2^2 - 22x_3^2, \quad \nu = 5,5\%; \quad (7)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_f^{\eta_2} \cdot 10^5) = 735 + 148x_1 + 48x_2 + 50x_3 + 30x_1x_2 + 28x_1x_3, \quad \nu = 2,7\%; \quad (8)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_{tx}}^{\eta_2} \cdot 10^5) = 880 + 176x_1 + 52x_2 + 57x_3 + 32x_1x_2 + 32x_1x_3, \nu = 4,8\% \quad (9)$$



Залежність коефіцієнта зміцнення підсилених вуглепластиковим полотном (CFRP – 1 шар) пошкоджених дослідних (ULS) бетонних балок з BFRP від величини відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону  $C$  (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в)

Прогини еталонних бетонних балок з BFRP та підсилених вуглепластиковими (CFRP) обоймами пошкоджених базальтобетонних зразків-балок перед їх руйнуванням на рівні навантаження ( $\eta_2=0,95F_{ult}$ ) виражаються залежностями:

$$\hat{Y}(f_{f_1, \eta_2}^{ref}) = 14,28 + 1,34x_1 + 1,46x_2 + 1,01x_3 - 1,03x_1^2, \text{ мм}, \nu = 5,6\% \quad (10)$$

$$\hat{Y}(f_{ftx,\eta_2}) = 16,72 + 2,06x_1 + 0,47x_2 + 0,80x_3 - 1,27x_1^2, \text{ мм } \nu = 4,9\%; \quad (11)$$

Ширина розкриття нормальних тріщин у розтягнутій зоні “чистого згину” еталонних базальтобетонних балок та підсилених вуглепластиковим полотном пошкоджених бетонних балок з BFRP при експлуатаційному рівні навантаження ( $\eta_1=0,65F_{ult}$ ) можна представити наступними експериментально-статичними залежностями:

$$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_1}^{ref}) = 0,35 + 0,06x_1 + 0,10x_2 + 0,05x_3 + 0,02x_1x_3, \text{ мм, } \nu = 11,5\%; \quad (12)$$

$$\hat{Y}(W_{kftx,\eta_1}) = 0,40 + 0,10x_1 + 0,03x_2 + 0,03x_3 - 0,05x_1^2 + 0,02x_2^2 - 0,02x_3^2 \text{ мм, } \nu = 5,3\%; \quad (13)$$

Напередодні руйнування ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) ширина розкриття нормальних тріщин в еталонних базальтобетонних та підсилених вуглепластиковим полотном пошкоджених бетонних балок з BFRP виражається:

$$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_2}^{ref}) = 0,51 + 0,04x_1 + 0,13x_2 + 0,07x_3, \text{ мм, } \nu = 11\%; \quad (14)$$

$$\hat{Y}(W_{kftx,\eta_2}) = 0,52 + 0,04x_1 + 0,03x_2 + 0,02x_3 - 0,03x_1^2 + 0,02x_2^2 \text{ мм, } \nu = 5,7\%. \quad (15)$$

### **Висновки:**

1. Виконаними експериментально-теоретичними дослідженнями встановлена можливість та доцільність підсилення пошкоджених і доведених до граничного стану (ULS) бетонних конструкцій з BFRP зовнішніми фіброармованими пластиками (CFRP) при дотриманні встановленої технології. При цьому, ефект підсилення вказаних балкових конструкцій досягав 208%.

2. Руйнування дослідних підсиленних базальтобетонних балок з великими ( $a/d=3$ ) і середніми ( $a/d=2$ ) прольотами зсуву відповідало напружено-деформованому стану майже збалансованого нормального поперечного перерізу.

Руйнування балок з малими ( $a/d \leq 1$ ) прольотами зсуву супроводжувалося подальшим розкриттям раніше утворених похилих тріщин і розривом замкнених вуглепластикових сорочок на бічних гранях їхніх приопорних ділянок.

3. Несучу здатність зруйнованих або доведених до граничного стану (ULS) бетонних балкових конструкцій, з неметалевою композитною арматурою слід визначати, в основному, на дію згинального моменту за нормальними перерізами у зразках з великими ( $a/d=3$ ) і середніми ( $a/d=2$ ) відносними прольотами зсуву, а також за похилими перерізами (за небезпечною похилою тріщиною) в балках з малими ( $a/d=1$ ) приопорними ділянками.

1. Mashrei MA, Makki JS, Sultan AA. Flexural strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets with Grooves. *Latin American Journal of Solids and Structures* 16(4):e176 (2019).

2. Abed RJ, Mashrei MA, Sultan AA. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer using different strengthening techniques. *Advances in Structural Engineering*; 25(2):355-373 (2022). doi:10.1177/13694332211049992.

3. Rajai Z. Al-Rousan, Impact of elevated temperature and anchored grooves on the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 14, e00487, ISSN 2214-5095 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00487>

4. Rajai Z. Al-Rousan, Jameel N. Al-Muhiedat, The behavior of heated-damaged reinforced concrete beams retrofitted with different CFRP strip length and number of transverse groove, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 16, e00896, ISSN 2214-5095 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00896>

5. Hamed Jafarzadeh, Mahdi Nematzadeh, Flexural strengthening of fire-damaged GFRP-reinforced concrete beams using CFRP sheet: Experimental and analytical study, *Composite Structures*, Volume 288, 115378, ISSN 0263-8223 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115378>.

6. Karpiuk V., Syomina Yu., Antonova D.V. Calculation Model of the Bearing Capacity of Span Reinforced Concrete Structures Support Zones. *Materials Science Forum: Actual Problems of Engineering Mechanics*. Vol. 968. Pp. 209-226 (2019). doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.968.209

7. V. Karpiuk, A. Tselikova, A. Khudobych, I. Karpiuk, A. Kostyuk Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP. *Eastern-European journal of enterpris technologies*. Харків, Vol. 4/7 (106) p.42-53 (2020). <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209378/211998>