

**ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ
КОМБІНОВАНО-АРМОВАНИХ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ
ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**CALCULATION OF BEARING CAPACITY OF NORMAL CROSS-
SECTIONS OF COMBINED-REINFORCED SFRC BENDING
ELEMENTS**

**Андрійчук О.В., к.т.н., доц., Кислюк Д.Я., к.т.н., доц., Нінічук М.В.,
аспірант (Луцький національний технічний університет, м Луцьк)**

**Andriiuchuk O.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Kysliuk
D.Y., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Ninichuk M.V.,
postgraduate student, (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

***Анотація.** Удосконалено методику розрахунку несучої здатності
комбіновано-армованих сталевібробетонних елементів за допомогою врахування
спрощених діаграм деформування сталевібробетону на тиск і на розтяг.*

***Summary.** In recent years, the scope of application of reinforced concrete and
combined-reinforced structures in load-bearing structures is expanding. Studies by many
authors indicate the significant advantages of reinforced concrete and combined-
reinforced bending elements over the classic reinforced concrete. Current state
regulations do not take into account all the properties of reinforced concrete, and
therefore the load-bearing capacity of structures can in many cases be underestimated.
Therefore, it is advisable to take into account, when calculating, all the properties of this
material.*

*The current state standards for the calculation and design of reinforced concrete
structures are based on the fact that reinforced concrete is considered as one of the types
of disperse-reinforced material. However, with this approach, many factors are taken
into account, the value of which, in real conditions, can be in a wide range of values, so
they are taken into account with a margin.*

*The article proposes a simplified force method for calculating the bearing capacity
of combined-reinforced reinforced concrete bending elements. Simplified diagrams of
deformation of reinforced concrete under compression and tensile obtained on the basis
of experimental tests are taken into account. The tensile diagram is proposed to be three-
line. To evaluate the effectiveness of the method and study a number of other
characteristics, two series of experimental studies of inseparable combined – reinforced
concrete beams were performed. Research methods and the nature of the beams in the
test process, described in [8-10]. For comparison with the obtained experimental data,
the article presents the calculation of experimental beams, performed according to state
standards and a simplified force method.*

*The results show that when determining the load-bearing capacity of the section,
the results determined by a simplified force model show the best agreement with the*

experimental ones. It is obvious that taking into account the full operation of reinforced concrete in compression and tension, increases the accuracy of the calculation. The average error is 3... 5%.

Ключові слова: бетон, сталева фібра, СФБ, розрахунок, деформації, несуча здатність.

Keywords: concrete, steel fiber, SFRC, calculation, strain, bearing capacity.

Постановка проблеми. Останніми роками розширюється сфера застосування сталевібробетонних і комбіновано-армованих конструкцій у цивільному та промисловому будівництві. Найчастіше сталевібробетон використовують у конструкціях підлог, доріг, елементах водовідвідних інженерних мереж, а також розширюється його застосування в несучих елементах будівель і споруд. Однак, незважаючи на накопичений значний експериментальний досвід і велику кількість досліджень елементів із сталевібробетону, до розрахунку таких конструкцій підходять із деякою обережністю. Чинні державні будівельні норми не враховують усіх властивостей сталевібробетону, а тому несуча здатність конструкцій у багатьох випадках може бути недооцінена.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Дослідження роботи сталевібробетонних конструкцій та особливостей їх напружено-деформованого стану проводились багатьма вченими. Бабичем Є.М. із Дробішинцем С.Я. було встановлено напружено-деформований стан сталевібробетонних і комбіновано-армованих балок при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях [1]. Ними досліджувався вплив відсотка армування сталевіброфіброю на характеристики НДС балок, була запропонована деформаційна методика розрахунку такого типу елементів. Вченим Білозіром В.В. [2] досліджувалися утворення та розкриття нормальних тріщин згинальних сталевібробетонних і комбіновано-армованих елементів із армуванням фіброю з листа. Дослідження міцності, деформативності та тріщиностійкості СФБ елементів кільцевого перерізу при одноразовому та повторному навантаженні, а також напружено-деформаційний стан цих елементів представлено в роботі [3]. Ці дослідження, а також дослідження інших авторів, вказують на суттєві переваги сталевібробетонних і комбіновано-армованих згинальних елементів над класичними залізобетонними. Тому під час розрахунку доцільним є врахування всіх властивостей цього матеріалу.

Мета статті – вдосконалити методику розрахунку комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів із врахуванням повної роботи сталевібробетону на стиск і на розтяг.

Чинні державні норми розрахунку та проектування сталевібробетонних конструкцій [4] базуються на тому, що сталевібробетон розглядається, як один із видів дисперсно-армованого матеріалу. Сталеві фібри приводяться до дисперсної арматури і міцність

матеріалу на розтяг визначають, як добуток міцності фібри та коефіцієнтів зчеплення фібри з бетоном, орієнтації, типу і кількості фібр, що попадають в розрахунковий переріз. Однак, при такому підході, в розрахунку приймається багато факторів, величина яких у реальних умовах може знаходитися в широкому діапазоні значень, тому враховуються вони із запасом.

Несучу здатність фібробетонних і комбіновано-армованих згинальних елементів визначають, виходячи із наступних передумов:

- для перерізів вважається справедливою гіпотеза про лінійний розподіл деформацій по висоті;
- у стиснутій зоні зв'язок між напруженнями та деформаціями приймається у вигляді діаграм із ДБН В.2.6-98:2009 [5];
- у розтягнутому сталевіробетоні зв'язок між напруженнями та деформаціями описується діаграмою, що представлена на рис. 1.

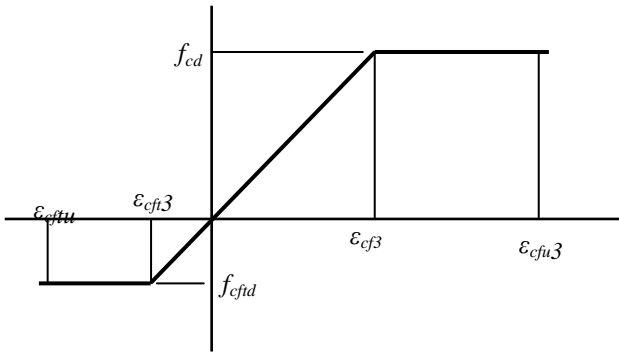


Рис. 1. Діаграма деформування сталевіробетону при розтягу, що пропонується ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016

Граничні деформації сталевіробетону при розтягу пропонується приймати рівними:

$$\varepsilon_{cfu} = \frac{1,8 f_{cfd}}{E_{cd}}, \quad (1.1)$$

Розрахунковий опір сталевіробетону на стиск f_{cd} приймають таким, що дорівнює розрахунковому опору цементно-піщаної матриці, на базі якої виготовляється сталевіробетон.

Значення граничного згинального моменту для перерізів сталевіробетонних згинальних елементів визначають рішенням наступної системи рівнянь:

$$\frac{b f_{cd}}{S} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} - b f_{cfd} \left(h - x_l - \frac{x_l f_{cfd}}{2 E_{cd} \varepsilon_{cf(1)}} \right) - N = 0, \quad (1.2)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} - \frac{1}{2} bf_{ctd} (h - x_I)^2 + \frac{1}{3} bx_I^2 \frac{f_{ctd}^3}{E_{cd}^2 \varepsilon_{cf}(1)} - M = 0, \quad (1.3)$$

де $\gamma = \varepsilon_{c(1)} / \varepsilon_{cl}$;

$x_I = \varepsilon_{c(1)} / \aleph$ – висота стиснутої зони;

$\aleph = \aleph / \varepsilon_{cl}$ – відносна кривина.

Розв'язування цієї системи нелінійних рівнянь виконується методом підбору за критерієм вичерпання несучої здатності, з контролем на кожному кроці розрахунку.

Визначення граничних деформацій сталевібробетону при розтягу за формулою (1.1), при підстановці експериментально отриманих значень f_{ctd} та E_{cd} , дає результат приблизно рівний, а то й менший, ніж середня гранична розтягваність бетону. Однак чисельні дослідження роботи сталевібробетонних згинальних елементів вказують на значно більший діапазон роботи сталевібробетону за розтягу при згині. Особливо у комбіновано-армованих сталевібробетонних елементах, де основні зусилля розтягу сприймає стержнева арматура.

Для європейських норм, асоціацією RILEM пропонується ідеалізовану діаграму при розтягу прийняти трилінійною [6]. Висхідна вітка цієї діаграми продовжується горизонтально прямою до значень, що рівні $\varepsilon_{fct} = 3,5 \cdot 10^{-5}$, а низхідна вітка закінчується при деформаціях $\varepsilon_{fctm} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2). Тут граничні деформації сталевібробетону вважаються рівними граничним деформаціям стержневої арматури для комбіновано армованих сталевібробетонних елементів.

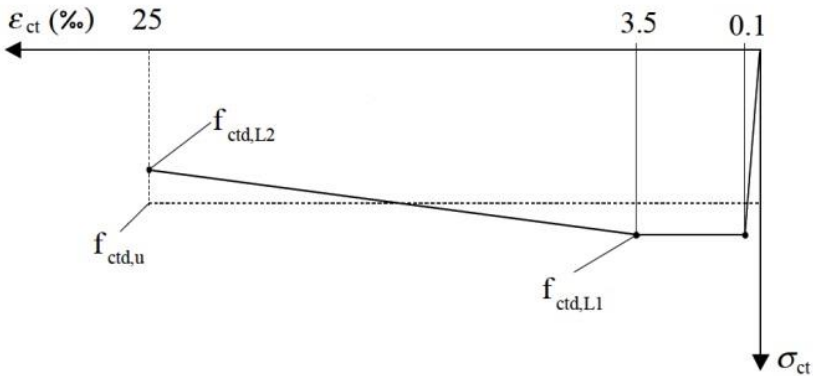


Рис. 2. Ідеалізована діаграма деформування сталевібробетону при розтягу, що пропонується для європейських норм асоціацією RILEM

Сучасна методика розрахунку залізобетонних конструкцій, із урахуванням нелінійного деформування матеріалів, у тому числі при розтягу, дозволяє доволі точно описувати роботу згинальних елементів на всіх етапах навантаження. Однак основна складність у застосуванні деформаційних моделей до розрахунку сталевібробетонних конструкцій полягає в описанні самих діаграм деформування. Повне їх описання вимагає значної кількості обчислень і, як правило, використання комп'ютерної техніки. У більшості випадків розрахунок потребує лише визначення несучої здатності елемента, без необхідності контролю напружено-деформованого стану перерізу на всіх етапах навантаження. Тому, як підтверджують дослідження, діаграму деформування бетону можна приймати трилінійною. Також, без суттєвої втрати у точності, такі діаграми можна приймати прямокутними з відповідними коефіцієнтами.

У статті пропонується силова методика розрахунку комбіновано-армованих сталевібробетонних елементів за спрощених діаграм деформування стиснутої та розтягнутої зон (рис. 3). В даній методиці пропонується міцність на стиск приймати рівною міцності сталевібробетону, а не матриці. Також враховується повна робота сталевібробетону на розтяг, яка описується діаграмою на рис. 4.

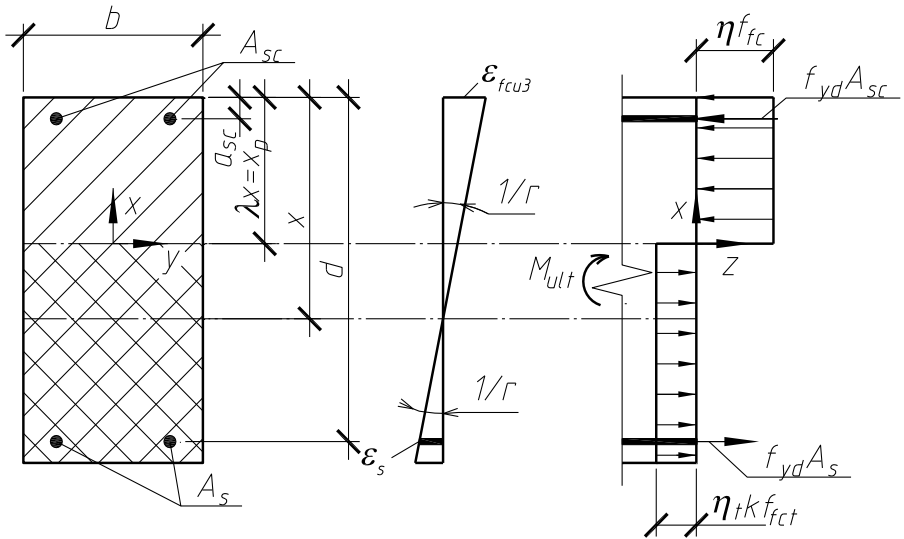


Рис. 3. Схема зусиль та епюри напружень у нормальному перерізі комбіновано-армованого сталевібробетонного елемента

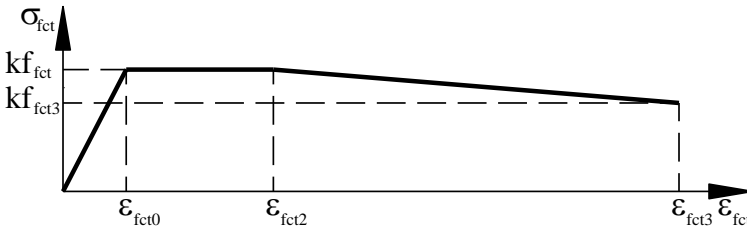


Рис. 4. Діаграма деформування СФБ при розтягу, прийнята в методиці

Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням при $\xi = x_p / d \leq \xi_R$ визначається за виразом:

$$M_{ult} = \eta f_{fc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{fct} b \left(h - x_p \right) \left(\frac{h - x_p}{2} - a \right) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}), \quad (1.4)$$

де $a = h - d$, для дрібнозернистого бетону $\lambda = 0,7$; x_p – висота стиснутої зони перерізу за спрощеної прямокутної епюри напружень, яка для комбіновано-армованих елементів визначається за формулою:

$$x_p = \frac{f_{yd} A_s - f_{yd} A_{sc} + \eta_t k f_{fct} b h}{(\eta_t k f_{fct} h + \eta f_{fc}) b}. \quad (1.5)$$

$k = 0,56$ – коефіцієнт приведення прямокутної епюри напружень у розтягнутій зоні перерізу до дійсної криволінійної; $\eta = 1$, для класів бетону до С60; η_t – коефіцієнт повноти епюри напружень у розтягнутій зоні в перерізі сталеві фібробетонного елемента, приймається залежно від відношення опору фібробетону на розтяг при згині, до залишкової міцності фібробетону на розтяг при згині [7]:

$$\eta_t = \begin{cases} 0,75 \text{ при } 0,5 \leq f_{fct3} / f_{fct} < 0,7; \\ 0,85 \text{ при } 0,7 \leq f_{fct3} / f_{fct} < 0,9; \\ 0,95 \text{ при } 0,9 \leq f_{fct3} / f_{fct} < 1,1; \\ 1,05 \text{ при } 1,1 \leq f_{fct3} / f_{fct} < 1,3; \\ 1,15 \text{ при } 1,3 \leq f_{fct3} / f_{fct}. \end{cases} \quad (1.6)$$

Фактична висота стиснутої зони x , визначається як $x = x_p / \lambda$.

Граничне значення висоти стиснутої зони визначаємо за умови:

$$\xi_R = \frac{\varpi \varepsilon_{fcu,3}}{\varepsilon_{fcu,3} + \varepsilon_{s0}}, \quad (1.7)$$

де $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$ – розрахункове значення граничних відносних

деформацій арматури; $\varepsilon_{fcu,3}$ – граничні значення деформацій стиснутого сталевібробетону при використанні спрощеної діаграми деформування (рис. 3); ϖ – характеристика стиснутої зони фібробетону, яка приймається для дрібнозернистого бетону рівною 0,7.

Для оцінки ефективності методики та дослідження ряду інших характеристик, було виконано дві серії експериментальних досліджень нерозрізних комбіновано-армованих сталевібробетонних балок. Методика дослідження та характер роботи балок у процесі випробувань, описані в роботах [8-10]. Для порівняння виконаємо розрахунки за методикою, що наведена в ДСТУ -Н Б В.2.6 - 218:2016 [4], та спрощеною силовою методикою.

Для застосування наведених методик використовуємо експериментально встановлені механічні характеристики матеріалів для балок другої серії: міцність сталевібробетону на стиск $f_{ck} = 24,5$ МПа; міцність на розтяг $f_{ct} = 2,35$ МПа; $\varepsilon_{cl} = 180,6 \times 10^{-5}$. Значення a_i визначалися згідно методики НДІБК і відповідно склали: $a_1 = 2,534$; $a_2 = -2,226$; $a_3 = 0,865$; $a_4 = -0,189$; $a_5 = 0,016$. Розміри перерізу $b \times h = 10 \times 16$ см.

Армування для балок 2Б1-1,2 приймаємо двома стержнями Ø10A500C, для балок 2Б1-3 – двома стержнями Ø12A500C. Характеристики арматури: $E_s = 195000$ МПа; $\sigma_y = 508$ МПа; $\varepsilon_{s0} = 0,00314$.

Вищезгаданою особливістю методики розрахунку СФБ елементів згідно з ДСТУ -Н Б В.2.6 - 218:2016 є те, що розрахунковий опір фібробетону на стиск f_{cd} приймається рівним розрахунковому опору бетону матриці, який використовується для його отримання. Для дрібнозернистого бетону міцність матриці на стиск зазвичай значно менша, ніж сталевібробетону, що суттєво впливає на несучу здатність перерізу. У нашому випадку міцність матриці становила $f_{ck} = 20,6$ МПа. Результати розрахунку балок представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння результатів розрахунку несучої здатності
балок другої серії

Марка зразка	M_u^{exp} кН*м	M_u^{DCTV} , кН*м	$M_u^{sil.}$ кН*м	M_u^{DCTV} / M_u^{exp}	$M_u^{sil.} / M_u^{exp}$
2Б1-1	12,9	10,9	12,64	0,84	0,98
2Б1-2	13,1			0,83	0,96
2Б1-3	17,2	15,1	16,2	0,87	0,94

Висновки

Як видно з представлених результатів, при визначенні несучої здатності перерізу, на крашх збіжність із експериментальними показують результати, визначені за допомогою спрощеної силової моделі. Очевидно, що врахування повної роботи сталевібробетону на стиск і на розтяг сприяє збільшенню точності розрахунку. Середня величина похибки не перевищує 3...5 %.

References

1. Droboshynets S.Ia., Vplyv povtornykh malotsyklovykh navantazhen na mekhanichni kharakterystyky stalefibrobetonu ta robotu zghynalnykh elementiv na yoho osnovi: dyss. kand. tekhn. nauk. Luts'k: LNTU, 2006.
2. Bilozir V.V. Vplyv nyzkhnidnoi vitky diahramy deformuvannya stalefibrobetonu za roztyahnu na nesuchu zdatsnist balok. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. – Dubliany: LNAU, 2015. Vyp. № 16. S. 60-64.
3. Andriichuk O. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads / Andriichuk O., Babich V., Yasyuk I., Uzhehov S. MATEC Web of Conferences, N 116, p 02001 (2017), 1-9.
4. DSTU-N B V.2.6-218:2016 Nastanova z proektuvannya ta vyhotovlennia konstruksii iz dyspersno-armovanoho betonu. K: DP «UkrNDNC». 2017.
5. DBN V.2.6-98:2009 Konstruksii budynkiv ta sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia proektuvannya. K: Minrehionbud Ukrainy. 2009.
6. RILEM TC 162-TDF. "Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle)." Materials and Structures, Vol. 35, No., June 2002, pp. 262-278.
7. Rekomendatsii z proektuvannya zalizobetonnykh konstruksii fortyfikatsiinykh sporud: rekomendatsii. Ye.M. Babych, L.I. Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi. Rivne: NUVHP, 2018.
8. Ninichuk M.V., Vplyv sposobu armuvannya stalevymy fibramy nerozriznykh zalizobetonnykh balok na yikh napruzhenno deformovanyi stan/ Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. - Rivne: NUVHP, 2015. Vyp. 31. S. 459-466.

9. Ninichuk M.V., Vplyv kombinovanoho armuvannia na prohyny nerozriznykh zalizobetonnykh balok. Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP, 2016. Vyp. 32. S. 220-225.

10. Andriichuk O.V. Eksperymentalni doslidzhennia roboty sterzhnevoi armatury v pererizakh kombinovano-armovanykh nerozriznykh zalizobetonnykh balok/ O.V. Andriichuk, M.V. Ninichuk // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zbirnyk naukovykh prats. Lutsk, 2019. Vyp. 12. S. 3-12.

Список використаної літератури

1. Дробошинець С.Я., Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі: дисс. канд. тех. наук. Луцьк: ЛНТУ, 2006.

2. Білозір В.В. Вплив низхідної вітки діаграми деформування сталевібробетону за розтягу на несучу здатність балок. Вісник Львівського національного аграрного університету. Дубляни: ЛНАУ, 2015. Випуск № 16. С. 60-64.

3. Andriichuk O. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads / Andriichuk O., Babich V., Yasyuk I., Uzhehov S. // MATEC Web of Conferences, N 116, p 02001 (2017), 1-9.

4. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій із дисперсно-армованого бетону. К: ДП «УкрНДНЦ». 2017.

5. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – К: Мінергіонбуд України. – 2009.

6. RILEM TC 162-TDF. "Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle)." Materials and Structures, Vol. 35, No., June 2002, pp. 262-278.

7. Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд: рекомендації. С.М. Бабич, Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський. Рівне: НУВГП, 2018.

8. Нінічук М.В. Вплив способу армування сталевими фібрами нерозрізних залізобетонних балок на їх напружено деформований стан/ Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Рівне: НУВГП, 2015. Випуск 31. С. 459-466.

9. Нінічук М.В. Вплив комбінованого армування на прогини нерозрізних залізобетонних балок. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Рівне: НУВГП, 2016. Випуск 32. С. 220-225.

10. Андрійчук О.В., Експериментальні дослідження роботи стержневої арматури в перерізах комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок/ О.В. Андрійчук, М.В. Нінічук. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: збірник наукових праць. Луцьк, 2019. Випуск 12. С. 3-12.