

**УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДІАГРАМ
ДЕФОРМУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ПРИ СТИСКАННІ**

**IMPROVED METHOD OF DIAGRAMS CONSTRUCTION OF
DEFORMATION HIGH-STRENGTH-CONCRETE FOR COMPRESSION**

Марек Дохойда, orcid.org/0000-0003-0382-805X (Варшавський університет природничих наук), **Філіпчук С.В. к.т.н., доц.**, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Налепа О.І. к.т.н., доц.**, **Ковальчук Ю.Т. аспірант**, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marek Dohojda, orcid.org/0000-0003-0382-805X (Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego), **Filipchuk S.V. candidate of technical sciences, associate professor**, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Nalepa O.I. candidate of technical sciences, associate professor**, **Kovalchuk Y.T. postgraduate** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne),

Запропоновано удосконалену методику побудови діаграм деформування бетону на стиск для високоміцних бетонів. Для визначення максимальних відносних деформацій бетону та граничного рівня напружень в бетоні запропоновані кореляційні коефіцієнти. Визначивши за результатами випробування призм на осьовий стиск за стандартною методикою параметри f_{cm} , E_{c0} , можемо побудувати повну діаграму стану деформування високоміцного бетону.

For accurate calculation and design of concrete and reinforced concrete structures is necessary that the characteristics of the materials from which they are made were identified as accurate as possible. According to current regulations documents, these characteristics are determined by standard methods

by testing standard concrete samples with a short time loading in the press equipment under "soft" mode of loading, that is, a test with a constant increase in load. As a result, deformation diagram only on the ascending branch can be obtained. Then the resistance of the concrete is calculated for which using the tables, the interpolation is made to determine other major parameters. However, with modern technologies of concreting and using various additives that change the deformation characteristics of concrete and modulus of elasticity, with the same class of concrete, using table values is not entirely correct. You can solve this problem

in two ways. First is, to use a special press equipment, for example, testing in "hard" mode. Second is, to use analytical methods with using complete diagrams of deformation of materials.

When constructing diagrams for special types of concrete and new concrete generation, for example, high-grade concrete (C60 and above), fiber concrete, fine-grained concretes and concretes using a variety of the additive, the function must have sufficient flexibility in constructing the deformation curve. For its more perfect construction, for these types of concrete, the function of a polynomial of the fifth degree is best presented in current regulations. In addition, in the current regulatory documents lack of information of mechanical characteristics of high-strength concrete, which requires use of this function in order to improve building codes.

An improved method for constructing deformation diagrams of compressed concrete for high-strength concrete is proposed. To determine the maximum relative deformations of concrete and the stress limit in concrete proposed correlation coefficients. Determining the results testing of prisms for axial compression by standard method parameters f_{cm} , E_{co} , we can construct a complete diagram of the deformation state of high-strength concrete.

Ключові слова:

Міцність, арматура, високоміцний важкий бетон, розрахунок
Strength, armature, high-hard concrete, calculation

Зв'язок деформаційних і міцнісних властивостей бетону відображається на діаграмі стиску і розтягання. Характер такої діаграми суттєво залежать від режиму навантаження. За одноразового навантаження бетонного зразка (призми) зростаючим або розтягуючим зусиллям (з постійною швидкістю збільшення напруження $d\sigma_c / dt = const$) найбільш важливими є два режими: умовно-миттєвий і короточасний стандартний.

Діаграма, яка відповідає миттєвому режиму навантаження, необхідна при побудові розрахункових моделей напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, основаних на гіпотезах і припущеннях теорії механіки деформованого тіла, і при вирішенні задач, пов'язаних з використанням технічної теорії повзучості бетону. Діаграма, яка відповідає короточасному режиму навантаження, використовується в розрахунках міцності і тріщиностійкості залізобетонних конструкцій на основі чинних нормативних документів.

При короточасному поступовому з витримкою на кожному ступені навантаженні в експериментах отримується ступінчата лінія, яка відображає реальний процес деформування стиснутого зразка-призми. За достатньо

великій кількості ступенів навантаження залежність $(\sigma_c - \varepsilon_c)$ можна відобразити плавною кривою лінією, при цьому зі збільшенням навантаження кривизна діаграми збільшується. Ближче до кінця навантаження збільшення деформацій бетону відбувається особливо інтенсивно.

Деформації бетону, які відповідають максимальним напруженням на діаграмі $(\sigma_c - \varepsilon_c)$, характеризують момент руйнування при навантаженні його зростаючим зусиллям. Інша картина спостерігається при випробуваннях зменшувальним навантаженням при сталому ступеневому збільшенні деформацій. В цьому випадку діаграма $(\sigma_c - \varepsilon_c)$ отримується з екстремумом і низхідною віткою як при миттєвому і короткочасному режимах. Отримання на діаграмі деформування бетону низхідної вітки можливе тільки за наявності спеціального силового обладнання, яке забезпечує випробування бетонних зразків за постійної швидкості прирощення деформацій.

Для точного розрахунку і проектування бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно щоб характеристики матеріалів з яких вони виготовленні були визначені якомога точніше. Згідно діючих нормативних документів ці характеристики визначаються за стандартними методиками шляхом випробування стандартних бетонних зразків короткочасним навантаженням в пресовому обладнанні за "м'якого" режиму навантаження, тобто випробуванням з постійним приростом навантаження. В результаті чого можна отримати діаграму деформування лише на висхідній вітці. Далі знаходиться розрахунковий опір бетону за яким використовуючи таблиці проводиться інтерполювання для визначення інших основних параметрів. Проте при сучасних технологіях бетонування та використання різноманітних добавок, що змінюють деформаційні характеристики бетонів та модуль пружності, при тому ж класі бетону, використання даних табличних значень є не зовсім коректним. Вирішити дану проблему можна двома шляхами. По перше, це використання спеціального пресового обладнання тобто здійснення випробувань в "жорсткому" режимі випробування. По друге, використання аналітичних методів з використанням повних діаграм деформування матеріалів.

Точність розрахунків залізобетонних конструкцій з використанням сучасної деформаційної моделі залежить від вибору аналітичної залежності між напруженнями і деформаціями в бетоні $(\sigma_c - \varepsilon_c)$. Вибір такої залежності наразі достатньо широкий. Для побудови діаграм в теорії залізобетону використовували сплайн-функції, тригонометричні функції та ряди, степеневі, показникові, дробово-раціональні, синусоїдні, лінійні, кусочно-лінійні функції, поліноми 2-го...5-го степенів та інші [1, 2, 3]. Зрозуміло, що задані функції мають відповідати критеріям деформування бетону:

$$\frac{d\sigma_c(\varepsilon_c)}{d\varepsilon_c} = E_{cm}, \text{ при } \varepsilon_c = 0; \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_c(\varepsilon_c)}{d\varepsilon_c} = 0, \text{ при } \varepsilon_c = \varepsilon_{c1}; \quad (2)$$

$$\sigma_c(0) = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_c(\varepsilon_{c1}) = f_{cm}; \quad (4)$$

$$\sigma_c(\varepsilon_{cu1}) = kf_{cm} = 0,7 \div 1,0. \quad (5)$$

Важливою характеристикою діаграм деформування бетону є параметричні точки. Точка 2 діаграми деформування бетону (рис. 1) використовується для знаходження модуля пружності бетону. Аналітична залежність для визначення січного модуля деформацій була запропонована Л.П. Макаренком і Г.А. Фенком [6]. Достовірність цієї лінійної залежності підтверджена багатьма експериментальними дослідженнями. Ними ж було доведено, що початкові експериментальні точки за рівнів напружень в бетоні $\eta_c < 0,1 \dots 0,2$ та прикінцеві точки за рівнів напружень в бетоні $\eta_c > 0,8 \dots 0,9$ відхиляються від заданої функції. Це викликано ущільненням зазорів і мікротріщин за низьких рівнів і неточністю фіксацій деформацій, швидкістю зняття відліків по приладах тощо за високих рівнів завантажень.

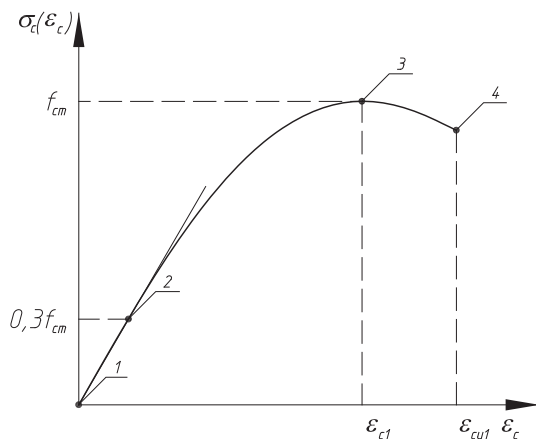


Рис. 1. Діаграма "напруження-деформації" бетону

Точка 3 діаграми є однією з найважливіших, вона зв'язує максимальні напруження в бетоні $\sigma_c = f_{ck}$ з відповідними їм критичними значеннями деформацій бетону $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$. Велечина ε_{c1} змінюється від багатьох факторів таких як: вид та структура бетону, режиму випробування, швидкості

завантаження тощо. Повнота діаграми або протяжність її низхідної вітки характеризується 4 точкою на діаграмі деформування.

Не залежно від того при якому режимі навантаження буде виконуватися випробування "м'якому" чи "жорсткому" форма функції $(\sigma_c - \varepsilon_c)$ залишається однаковою а от параметричні точки діаграми можуть змінюватися.

В роботі Кочкарьова Д.В. [3] для побудови повної діаграми деформування бетону та знаходження параметричних точок діаграми була запропонована методика на основі залежності, що закладена у нормах Єврокод-2. А саме:

$$\sigma_c = \frac{E_{c0}\varepsilon_c - f_{cm} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + \left(\frac{E_{c0}\varepsilon_{c1} - 2}{f_{cm}} \right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \quad (6)$$

Дана функція добре працює для побудови діаграми деформування для звичайних важких бетонів. Проте при побудові діаграм для спеціальних видів бетонів та бетонів нового покоління, тобто бетонів високих класів (С60 і вище), фібробетонів, дрібнозернистих бетонів та бетонів з використанням різноманітних добавок дана функція не буде мати достатню гнучкість при побудові кривої деформування. Для більш досконалої її побудови, для даних типів бетонів, якнайкраще підійде функція поліному п'ятого ступеня, що представлена в діючих нормативних документах [2]. Крім того, в діючих нормативних документах відсутня інформація про механічні характеристики високоміцних бетонів, що потребує використання саме цієї функції з метою удосконалення будівельних норм.

$$\sigma_c = f_{(ck),(cd)} \sum_{k=1}^5 a_k \eta^k \quad (7)$$

де: $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$;

ε_{c1} – деформації при максимальних напруженнях, що приймаються за нормативним документом [2]: при розрахунку за першою групою граничних станів - $\varepsilon_{c1,cd}$; за другою групою граничних станів - $\varepsilon_{c1,ck}$;

a_k – коефіцієнти полінома, що знаходяться за [5].

$$\beta = \sigma_{cu} / f_{cm,prism} = 1,33 - \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_{c1}} \quad (8)$$

$$K_2 = 2.7(\varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c1}) - 6.1 - 0.05 / (\varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c1} - 1)^2; \quad (9)$$

$$a_1 = 1.1 \frac{E_c \varepsilon_{c1}}{f_c}; \quad (10)$$

$$a_5 = \frac{F_1(\eta - 1)^2 \eta^2 - F_2}{2\eta^2 F_3}; \quad (11)$$

$$a_4 = \frac{F_1 - 2a_5(10\eta^3 - 9\eta + 2)}{2(6\eta^2 - 6\eta + 1)}; \quad (12)$$

$$a_2 = 1 - a_1 - a_3 - a_4 - a_5; \quad (13)$$

$$a_3 = a_1 - 2a_4 - 3a_5 - 2; \quad (14)$$

$$\text{де: } -F_1 = K_2 + 2a_1(2 - 3\eta) + 12\eta - 6;$$

$$-F_2 = 2[\beta + a_1\eta(2\eta - \eta^2 - 1) + \eta^2(2\eta - 3)](6\eta^2 - 6\eta + 1);$$

$$-F_3 = (10\eta^3 - 9\eta^2 + 2)(\eta - 1)^2 - (\eta^3 - 3\eta + 2)(6\eta^2 - 6\eta + 1).$$

Таким чином, визначаються всі необхідні вихідні дані для отримання коефіцієнтів полінома п'ятого ступеня для опису діаграми $(\sigma_c - \varepsilon_c)$ бетону.

Згідно [5] модуль пружності, максимальні та граничні відносні деформації стиснутого бетону пропонується визначати за формулами:

$$E_c = 54.6 \frac{f_c}{f_c + 20} \times 10^3 \quad (15)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{320 \times 10^{-5}}{1 + 6 f_{cm}^3 \times 10^{-5}} + 235 \times 10^{-5}; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{c1} = \left(235 - \frac{81}{1 + 7.75 \times 10^{-4} \times f_{cm}^2} \right) \times 10^{-5}. \quad (17)$$

В дослідях, в основному, бетонні призми випробовуються короткочасним ступінчастим навантаженням з постійною швидкості прирощення напружень. За такої методики, як правило деформації зразка вимірюються до певної межі і їх неможливо визначити в момент руйнування. Але отримані експериментальні дані на висхідній вітці навантаження дають можливість визначити коефіцієнти a_k , які входять в рівняння діаграми у вигляді (7), теоретичним шляхом по обґрунтованим формулам.

Запропонуємо удосконалену методику побудови реальних діаграм деформування бетону на основі методики [3] та поліному п'ятого ступеня (7).

Виходячи з фізичних передумов зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону при стиску повинен відповідати таким критеріям:

1. Крива проходить через початок координат.

2. При деформаціях $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$ напруження в бетоні досягають максимальних значень і дорівнюють міцності бетонних призм.

3. На всьому діапазоні існування кривої від $\varepsilon_c = 0$ до $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ вона має один екстремум при $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$.

4. При досягненні бетоном граничних деформацій $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$, напруження дорівнюють $\sigma_c = \sigma_{cu}$.

5. Жорсткість бетонної призми, що знає стиску, $E_{cm}A_c$ лінійна по відношенню до рівня навантаження $\eta_N = \frac{N_c}{N_u}$. Для центрально-стиснутого бетонного елемента дана гіпотеза інтерпретується, як гіпотеза лінійності модуля деформацій E_{cm} відносно рівня напружень $\eta_\sigma = \sigma_c / f_{cm}$ [6].

6. Низхідна ділянка діаграми деформування визначається параметрами висхідної вітки.

Знаходимо міцність бетону на осьовий тиск f_{cm} і цілий ряд деформацій бетонів за різних рівнів навантаження $\eta_\sigma = \frac{\sigma_b}{f_{cm}}$ від 0 до 1,0 шляхом випробування призм за стандартною методикою.

Для того щоб оцінити похибку при описанні функції скористаємось методикою, наведеною в [3].

Рівняння залежності E_c - η_σ запишемо у вигляді

$$E_c = E_{c0} + b\eta_\sigma. \quad (18)$$

Початковий модуль деформації бетону обчислюємо за формулою

$$E_{c0} = \bar{E}_{c\phi} - b\bar{\eta}_\sigma, \quad (19)$$

де $\bar{E}_{c\phi}, \bar{\eta}_\sigma$ - середні значення модуля деформацій і рівня напружень за експериментальними даними:

$$\bar{E}_{c\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{c\phi i}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_i}}{n}; \quad (20)$$

$$\bar{\eta}_\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{\sigma i}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ci}}{f_{cm}}}{n}. \quad (21)$$

Коефіцієнт рівняння b знаходимо за формулою

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{\sigma i} - \bar{\eta}_\sigma)(E_{c\phi i} - \bar{E}_{c\phi})}{\sum_{i=1}^n (\eta_{\sigma i} - \bar{\eta}_\sigma)^2}. \quad (22)$$

Проводимо коригування залежності (19) вибракуванням окремих результатів випробування призми, які не задовільняють умову

$$\frac{E_{ci} - E_{c\phi i}}{S_T} \leq 2, \quad (23)$$

де E_{ci} - модуль деформацій бетону, обчислений за формулою (19) для певного рівня навантаження; $E_{c\phi i} = \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_i}$ – модуль деформацій бетону за результатами

випробування для i -го рівня навантаження; S_T – остаточне середнє квадратичне відхилення, яке визначаємо за формулою

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{c\phi i} - E_{ci})^2}{n-2}}. \quad (24)$$

Якщо якісь результати вибракувані, залежність встановлюють заново по формулах (19), (20), (21) за результатами, що залишились.

Залежність можна вважати достовірною, якщо відносна похибка менше 10%

$$\frac{S_T}{E_{c\phi}} \times 100 \leq 10\%. \quad (25)$$

Таким чином, за результатами випробування призм на осьовий стиск за стандартною методикою встановлена міцність бетону f_{cm} і описана залежність модуля деформацій бетону від рівня напружень (19).

Щоб побудувати повну діаграму деформування бетону за функцією $\sigma_c - \varepsilon_c$, необхідно визначити граничні відносні деформації бетону ε_{cl} .

Для обчислення граничного значення відносної деформації ε_{cl} визначимо на ділянці $0 < \eta_{\sigma} \leq 1$ декілька точок $\eta_{\sigma i}$ (у межах 15...20) і для кожної з них обчислимо відносні деформації бетону за формулою, отриманою із залежності (18),

$$\varepsilon_{ci} = \frac{\eta_i f_{cm}}{E_{c0} + b \eta_i}, \quad (26)$$

а також модулі деформації бетону $E_{cl,i}$ з формули (18)

$$E_{cl,i} = E_{c0} + b \eta_{\sigma i}, \quad (27)$$

та $E_{cE,i}$ з формули (7)

$$E_{cE,i} = \frac{\sigma_{cE,i}}{\varepsilon_{ci}}. \quad (28)$$

Визначення модуля $E_{cE,i}$ проводиться шляхом ітерації, змінюючи значення ε_{cl} до тих пір, доки сума квадратів різниць $E_{cl,i} - E_{cE,i}$ буде найменшою. Умова методу найменших квадратів відхилень має наступний вигляд

$$\varepsilon_{cl} \rightarrow \min \left(\sum_{i=1}^n (E_{cl,i} - E_{cE,i})^2 \right). \quad (29)$$

Таку задачу розв'язують, використовуючи комп'ютерні програми. За відсутності їх можна використати інший шлях, дещо втративши у точності результату. Для цього, провівши деякі перетворення, формулу (18) подамо у такому вигляді, для середніх значень змінних $E_{c,b}$, η_{σ} , ε_{ci}

$$\varepsilon_{ci}^2 \left(\frac{\bar{E}_{ci}}{f_{cm}} + \bar{\eta}_{\sigma i} \frac{E_{c0}}{f_{cm}} - \frac{E_{c0}}{f_{cm}} \right) - 2\bar{\eta}_{\sigma i} \varepsilon_{ci} + \bar{\varepsilon}_{ci} = 0. \quad (30)$$

Для всіх вибраних точок, про які йшлося вище, обчислюємо середні значення

$$\frac{\bar{E}_{ci}}{f_{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{\sigma i}}{n}; \bar{\eta}_{\sigma i} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{\sigma i}}{n}; \bar{\varepsilon}_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ci}}{n}. \quad (31)$$

Отже, згідно наведеної методики знаходимо параметр ε_{ci} . Інший параметр ε_{cu} знаходимо згідно формули (16) дещо підкорегувавши для високоміцних бетонів.

$$\varepsilon_{cu} = \left(\frac{320 \times 10^{-5}}{1 + 6 f_{cm}^3 \times 10^{-5}} + 235 \times 10^{-5} \right) K_{\sigma\delta}; \quad (32)$$

де $K_{\sigma\delta}$ - коефіцієнт приведення граничних відносних деформації для стиснутого високоміцного бетону. $K_{\sigma\delta} = 0,85$ для звичайних високоміцних бетонів, $K_{\sigma\delta} = 1,5$ - для високоміцних бетонів з використанням добавок, що підвищують пластичність бетонів.

Крім того, закритичну область роботи бетону на низхідній вітці діаграми деформування при розрахунку необхідно обмежувати рівнем напруження $\sigma_{cu} = k_u f_{ck}$. Коефіцієнт k_u для високоміцних бетонів приймається 0,9.

Таким чином, визначивши за результатами випробування призм на осьовий стиск за стандартною методикою параметри f_{cm} , E_{c0} , можемо побудувати повну діаграму стану деформування високоміцного бетону.

Висновок. 1. Запропоновано удосконалену методику побудови діаграм деформування бетону на стиск для високоміцних бетонів.

2. Для визначення максимальних відносних деформацій бетону та граничного рівня напружень в бетоні запропоновані кореляційні коефіцієнти.

1. О.И. Берг *Fyzicheskiye osnovy teoryy prochnosti betona y zhelezobetona*. – М.: Hosstroizdat, 1961. – 96 s.

2. DBN V.2.6-98-2009 *Betonni ta zalizobetonni konstruktsii*. К.: Minbud Ukrainy, 2009. – 71 s.

3. Kochkarev D.V. *Neliniyniy opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii sylovym vplyvam: Dysertatsiia na zdobuttia stupenia doktora nauk*. – Rivne: 2017. – 467s.

4. Bambura A. *K otsenke prochnosti zhelezobetonnykh konstruktsiyi na osnove deformatsyonnoho podkhoda y realnykh dyahramm deformyrovanyia betona y armatury // Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya: Materyaly 1-y Vserossyiskoi konferentsyy po problemam betona y zhelezobetona*. - Moskva, 2001.- 2-ya knyha. - S. 750 – 757.

5. Bambura A.M., Sazonova A.I., Dorohova O.V., Voitsekhivskiy O.V. *Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii*. Posibnyk. – Kyiv – 239 s.

6. Makarenko L. P., Fenko H. A. *Hrafo-analytycheskiy sposob opredeleniya modulia uprugosti betona pry nalychyy treshchyn // Yzv.vuzov. Ser.Str-vo y arkhytektura – 1972. – №8. – S. 146–147.*