

УДК 624.012

ВЕРИФІКАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ПРИ СТИСКАННІ

С. Філіпчук, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-4464-4620

В. Караван, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-8261-692X

Національний університет водного господарства та природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2022.23.049>

Філіпчук С., Караван В. Верифікація удосконаленої методики побудови діаграм деформування високоміцних бетонів при стисканні

Під час побудови діаграм для спеціальних видів бетонів і бетонів нового покоління, тобто бетонів високих класів (С60 і вище), фібробетонів, дрібнозернистих бетонів та бетонів із використанням різноманітних добавок, функція має бути досить гнучкою при побудові кривої деформування. Для таких типів бетонів якнайкраще підійде функція поліному п'ятого ступеня, закріплена в чинних нормативних документах.

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

Виконано серію досліджень зразків бетонних призм та кубів одного і того ж класу бетону на двох різних пресах. Тобто дослідження проводили у «м'якому» та «жорсткому» режимах навантаження.

Максимальні розходження в деформаціях для призм марки С70 становили 6 %, а для призм марки С100 – відповідно 8 %. Експериментальні криві деформування мають більш пологі форму, а криві, згідно з ДБН, є більш опуклими. Це і призводить до збільшення похибки, хоча розходження в максимальних деформаціях в обох випадках мінімальне.

Для всіх марок призм фактична низхідна вітка значно відрізняється від теоретичної. Крім того, що вища міцність бетону, то низхідна вітка стає меншою, а для бетону призм марки С100 вона майже відсутня.

Ключові слова: міцність, арматура, високоміцний важкий бетон, розрахунок.

Filipchuk S., Karavan V. Verification of the improved technique of constructing the diagram of deformation of highly compact concretes at compression

When constructing diagrams for the special types of concrete and new generation concretes, i.e. high-grade concretes (C60 and higher), fibroconcretes, fine-grained concretes and concretes using various additives, the function must be sufficiently flexible when constructing the deformation curve. For these types of concrete, the function of the fifth degree polynomial, which is presented in the current regulations, is the best.

The improved method for constructing compression deformation diagrams of concrete for high – strength concretes is proposed. Determining the parameters of the prism on axial compression by the standard method of parameters f_{cm} , E_{c0} , we can build a complete diagram of the state of deformation of high-strength concrete. Correlation coefficients are proposed to determine the maximum relative deformations of concrete and the ultimate stress level in concrete. The supercritical area of work of concrete on the descending branch of the deformation diagram in the calculation must be limited by the stress level $\sigma_{cu} = k_u f_{ck}$. The coefficient k_u for high-strength concrete is taken as 0.9

A series of studies was conducted including the studies of samples of concrete prisms and cubes of the same class of concrete on two different presses. That is, the study was conducted in «soft» and «hard» load modes.

The maximum differences in deformations for prisms of the C70 brand made 6 %, and for prisms of the C100 brand accordingly 8 %. The experimental deformation curves have a flatter shape, and curves according to DBN are more convex. It leads to an increase in error, although the difference in the maximum deformation in both cases is minimal.

For all brands of prisms, the actual descending branch differs significantly from the theoretical one. In addition, the higher the strength of concrete, the lower the descending branch becomes smaller, and for concrete prisms brand C100 it is almost absent.

Key words: strength, reinforcement, high-strength heavy concrete, calculation.

Постановка проблеми. Для точного розрахунку і проектування бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно, щоб характеристики матеріалів, з яких вони виготовлені, були визначені

якогомога точніше. Згідно з чинними нормативними документами, характеристики визначаються за стандартними методиками шляхом випробування стандартних бетонних зразків короточасним навантаженням у пресовому обладнанні за «м'якого» режиму навантаження, тобто випробуванням із постійним приростом навантаження. У результаті цього можна отримати діаграму деформування лише на висхідній вітці. Далі знаходиться розрахунковий опір бетону, за яким, використовуючи таблиці, проводиться інтерполявання для визначення інших основних параметрів [1]. Проте за сучасних технологій бетонування та використання різноманітних добавок, що змінюють деформаційні характеристики бетонів і модуль пружності, при тому ж класі бетону, використання таких табличних значень є не зовсім коректним. Вирішити цю проблему можна двома способами: по-перше, використанням спеціального пресового обладнання, тобто випробуваннями у «жорсткому» режимі; по-друге, – використанням аналітичних методів із застосуванням повних діаграм деформування матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У праці Д. В. Кочкарьова [2] для побудови повної діаграми деформування бетону та знаходження параметричних точок діаграми запропоновано методику на основі залежності, що закладена у нормах Єврокод-2. Ця функція добре працює для побудови діаграми деформування для звичайних важких бетонів. Проте в побудові діаграм для спеціальних видів бетонів і бетонів нового покоління, тобто бетонів високих класів (С60 і вище), фібробетонів, дрібнозернистих бетонів та бетонів з використанням різноманітних добавок, означена функція не матиме достатньої гнучкості при побудові кривої деформування. Для більш досконалої її побудови, для цих типів бетонів, якнайкраще застосувати функцію поліному п'ятого ступеня, відображену в чинних нормативних документах [3]. Крім того, у цих документах немає інформації про механічні характеристики високоміцних бетонів, що потребує використання саме цієї функції з метою удосконалення будівельних норм.

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

де $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$; ε_{c1} – деформації при максимальних напруженнях, що приймаються за нормативним документом [3]: при розрахунку за першою групою граничних станів – $\varepsilon_{c1,ck}$; за другою

групою граничних станів – $\varepsilon_{c1,ck}$; a_k – коефіцієнти полінома, що знаходяться за [4].

Згідно з [4], максимальні та граничні відносні деформації стиснутого бетону пропонується визначати за такими формулами:

$$E_c = 54.6 \frac{f_c}{f_c + 20} \times 10^3; \quad (2)$$

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

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

У дослідях бетонні призми переважно випробовують короточасним ступінчастим навантаженням із постійною швидкістю прирощення напружень. За такої методики деформації зразка вимірюються до певної межі і їх неможливо визначити в момент руйнування. Але отримані експериментальні дані на висхідній вітці навантаження дають змогу визначити коефіцієнти a_k , які входять у рівняння діаграми у вигляді (1), теоретичним шляхом за обґрунтованими формулами.

Постановка завдання. Наше завдання – запропонувати удосконалену методику побудови реальних діаграм деформування бетону на основі методики [2] та поліному п'ятого ступеня (1).

Виклад основного матеріалу. Щоб побудувати повну діаграму деформування бетону за функцією $\sigma_c - \varepsilon_c$, необхідно визначити граничні відносні деформації бетону ε_{c1} .

Для обчислення граничного значення відносної деформації ε_{c1} 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

$$\varepsilon_{ci} = \frac{\eta_i f_{cm}}{E_{c0} + b \eta_i}, \quad (5)$$

а також модулі деформації бетону $E_{c1,i}$ [5]

$$E_{c1,i} = E_{c0} + b \eta_{\sigma i}, \quad (6)$$

та $E_{cE,i}$ з формули (1)

$$E_{cE,i} = \frac{\sigma_{cE,i}}{\varepsilon_{ci}}. \quad (7)$$

Визначення модуля $E_{cE,i}$ проводиться за допомогою ітерації, змінюючи значення ε_{c1} доти, доки сума квадратів різниць $E_{c1,i} - E_{cE,i}$ не буде найменшою. Умова методу найменших квадратів відхилень виглядає так:

$$\varepsilon_{c1} \rightarrow \min \sum_{i=1}^n E_{c1,i} - E_{cE,i}^2 \quad (8)$$

Отже, згідно з наведеною методикою, знаходимо параметр ε_{c1} . Інший параметр ε_{cu} знаходимо згідно з формулою (8), дещо підкоригувавши її для високоміцних бетонів:

$$\varepsilon_{cu} = \left(\frac{320 \times 10^{-5}}{1 + 6f_{cm}^3 \times 10^{-5}} + 235 \times 10^{-5} \right) K_{\sigma\sigma}; \quad (9)$$

де $K_{\sigma\sigma}$ – коефіцієнт приведення граничних відносних деформацій для стиснутого високоміцного бетону; $K_{\sigma\sigma} = 0,85$ для звичайних високоміцних бетонів; $K_{\sigma\sigma} = 1,5$ – для високоміцних бетонів із 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 приймаємо 0,9.

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

Для підтвердження зазначеної методики проведено серію досліджень зразків бетонних призм і кубів одного і того ж класу бетону на двох різних пресах. Тобто дослідження проводилося в «м'якому» та «жорсткому» режимах навантаження. Досліджували зразки, виготовлені в лабораторіях кафедр технології будівельних виробів і матеріалознавства та промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП. Для досягнення мети й реалізації завдань забетонували 6 призм розмірами $10 \times 10 \times 40$ см та 6 кубів розмірами $10 \times 10 \times 10$ см із бетону проектної міцності С60. Першу частину досліджень виконували у Варшавському університеті природничих наук (SGGW, Warszawa, Polska). Випробування проводили в універсальній машині INSTRON 8806 (рис. 1). Як перевірка коректності отриманих даних, окрім жорсткого режиму навантаження, на таких же зразках зусилля подавалося традиційним способом – приростом навантаження.

Розглянемо результати досліджень бетону класу С70 та С100. У випробуванні бетонних кубиків і призм на стиск у віці 28 діб для марки С70 отримано такі результати: $f_{cm, cube} = 75,8$ МПа та $f_{cm, prism} = 50,06$ МПа, а для марки С100 відповідно $f_{cm, cube} = 112,2$ МПа та $f_{cm, prism} = 85,9$ МПа. Для цих бетонів виконували обчислення і будували діаграми деформування стиснутого бетону (рис. 2). Для

призми марки С70 максимальні відносні деформації за удосконаленою методикою на основі ДБН 2.6-98-2009 становили $\varepsilon_{c1} = 183,2 \times 10^{-5}$, а дані з експерименту за жорсткого режиму навантаження такі: $\varepsilon_{c1} = 186,4 \times 10^{-5}$. Відповідно, для призм марки С100 вони становили $\varepsilon_{c1} = 309,8 \times 10^{-5}$ і $\varepsilon_{c1} = 272,7 \times 10^{-5}$. Ідентичним є характер руйнування призм як за м'якого, так і за жорсткого режимів навантаження (див. рис. 2).

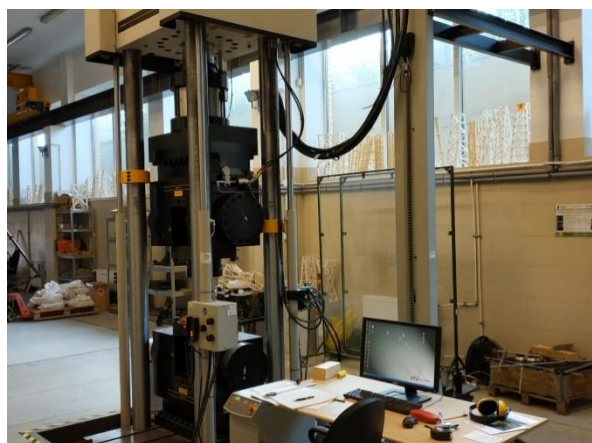


Рис. 1. Загальний вигляд випробувальної машини INSTRON 8806 у Варшавському університеті природничих наук (SGGW, Warszawa, Polska)

Максимальні розходження в деформаціях для призм марки С70 становили 6 %, а для призм марки С100 – відповідно 8 %. На рис. 2 зображено, що експериментальні криві деформування мають більш полого форму, а криві, згідно з ДБН, є більш опуклими. Це і призводить до збільшення похибки, хоча розходження в максимальних деформаціях в обох випадках мінімальне. Якщо розглянути фактичні криві деформування бетону на низхідній ділянці, то можна зауважити, що для всіх марок призм фактична низхідна вітка значно відрізняється від теоретичної. Крім того, чим вища міцність бетону, тим низхідна вітка стає меншою, а для бетону призм марки С100 вона майже відсутня.

Висновки. Запропоновано вдосконалену методику побудови діаграм деформування бетону на стиск для високоміцних бетонів. Для визначення максимальних відносних деформацій бетону та граничного рівня напружень у бетоні запропоновані кореляційні коефіцієнти. Для досліджених бетонів установлені основні деформаційні характеристики діаграм механічного стану та доведено можливість теоретичного описання процесу деформування поліномом п'ятого ступеня, який передбачають нормативні документи з проектування залізобетонних конструкцій.

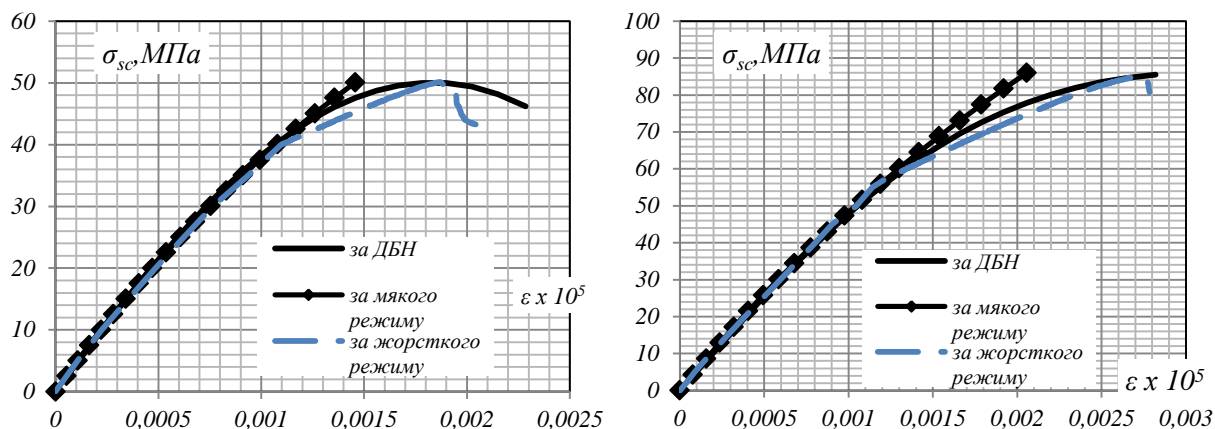


Рис. 2. Діаграми деформування для експериментальної призми:
а) для призми марки С1-3; б) для призми марки С-4

Бібліографічний список

1. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона Москва: Госстройиздат, 1961. 96 с.
2. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: дис. ... д-ра техн. наук. Рівне, 2017. 467с.
3. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції.

Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

4. Проектування залізобетонних конструкцій: посібник / А. М. Бамбура, А. І. Сазонова, О. В. Дорогова, О. В. Войцехівський. Київ, 2018. 239 с.

5. Макаренко Л. П., Фенко Г. А. Графоаналитический способ определения модуля упругости бетона при наличии трещин. *Изв. вузов. Серия: Строительство и архитектура*. 1972. № 8. С. 146–147.

Стаття надійшла 02.07.2022