

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Стаття присвячена розрахунку міцності стиснутих залізобетонних елементів (ЗБЕ) із високоміцних бетонів, а також визначенню граничної деформації бетону стиснутої зони (ε_{bu}) на основі деформаційних моделей (ДМ) ЗБЕ Єврокоду 2 та ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ). Показані переваги ДМ з ЕКМ, яка дозволяє виконувати розрахунки міцності стиснутих ЗБЕ, аналітично визначати величини ε_{bu} й інші характеристики нормального перерізу ЗБЕ в граничному стані. Доведено, що для ЗБЕ, виготовлених із бетонів низької та середньої міцності, не можна приймати величину ε_{bu} постійною й рівною 3,5 ‰ і зменшувати її значення від 3,5 до 2,8 ‰ для високоміцних бетонів так, як це пропонується в Єврокодi 2. Це не узгоджується з експериментами та розрахунками за ДМ з ЕКМ.

Ключові слова: залізобетонний елемент, гранична деформація бетону, деформаційна модель, критерій міцності.

Статья посвящена расчету прочности сжатых железобетонных элементов (ЖБЭ) из высокопрочных бетонов, а также определению предельной деформации сжатого бетона (ε_{bu}) на основе деформационных моделей (ДМ) ЖБЭ Еврокода 2 и ДМ с экстремальным критерием прочности (ЭКП). Показаны преимущества ДМ с ЭКП, которая позволяет выполнять расчеты прочности сжатых ЖБЭ, аналитически определять величины ε_{bu} и другие характеристики нормального сечения ЖБЭ в предельном состоянии. Доказано, что для ЖБЭ, изготовленных из бетонов низкой и средней прочности, нельзя принимать величину ε_{bu} постоянной и равной 3,5 ‰ и уменьшать ее значение от 3,5 до 2,8 ‰ для высокопрочных бетонов так, как это предлагается в Еврокоде 2. Это не согласовывается с экспериментами и расчетами по ДМ с ЭКП.

Ключевые слова: железобетонный элемент, предельная деформация бетона, деформационная модель, критерий прочности.

The article is devoted to design of durability of compressed reinforced concrete elements (RCE) made of high strength concrete, and also to determination ultimate deformation of compressed concrete (ε_{bu}) on the basis of deformation models (DM) RCE of Eurocode 2 and DM with extreme strength criterion (ESC). Advantages of DM with ESC are shown which allow to carry out design of durability of compressed RCE, analytically to define values ε_{bu} and other characteristics of normal section RCE in a limited condition. It has been proved that for reinforced concrete elements made of low and medium strength concrete it

is impossible to take value ε_{bu} as permanent and equal to 3,5 ‰ and to decrease its value from 3,5 to 2,8 ‰ for high strength concrete as it is offered in Eurocode 2. It does not agree with the experiments and the design according to DM with ESC.

Keywords: *reinforced concrete element, ultimate deformation of concrete, deformation model, strength criterion.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Тенденція масового застосування у світовій будівельній практиці бетонів із високими експлуатаційними й технологічними властивостями, які прийнято позначати терміном High Performance Concrete (HPC) [6, 7], стає очевидною й необоротною. Викликана вона зростаючою потребою суспільства в унікальних та надійних інженерних будівлях і спорудах. Для таких бетонів характерні висока й надвисока міцність, низька проникність, підвищена корозійна стійкість і довговічність, поліпшені деформаційні характеристики. Залізобетонні конструкції з високоміцних бетонів широко застосовуються за кордоном і вже розроблені нормативні документи [1]. Важливою особливістю є те, що зазначені властивості досягаються із застосуванням високорухомих сумішей, а іноді й таких, що самоущільнюються. Існуючі на сьогодні в Україні норми [8] не враховують наявності високоміцних бетонів.

Зараз у країнах колишнього СРСР відбувається процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій та їх елементів з євронормами [1] (Єврокодом 2), в якому враховуються класи міцності бетону в діапазоні від *C 12/15* до *C 90/105*. У діючих в Україні нормах і правилах для проектування залізобетонних конструкцій із важких та дрібнозернистих бетонів урахуються лише класи міцності бетонів у діапазоні від *B 3,5* до *B 60*. У зіставленні з нормами [1] це відповідає класам міцності бетонів до *C 50/60*. У нормах [1] класи міцності бетонів сягають межі *C 90/105*. У діючих нормах і правилах [8] відсутні рекомендації щодо розрахунку міцності ЗБЕ з високоміцних бетонів, а також визначення їх фізико-механічних характеристик, тому необхідне розроблення методики розрахунку таких ЗБЕ.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Застосування ДМ у теорії залізобетону є відповідним кроком уперед, оскільки вона використовує повний набір рівнянь механіки деформівного твердого тіла (МДТТ): фізичні для бетону й арматури, геометричні та рівняння рівноваги. У результаті ДМ дозволяє точніше знаходити межу переармування, міцність переармованих ЗБЕ, враховувати характер повних діаграм роботи бетону й арматури та інші характеристики. Серед ДМ, що існують на цей час, необхідно відмітити ДМ з ЕКМ [2, 3], яка має суттєві переваги над існуючими ДМ і дає можливість розраховувати міцність ЗБЕ в нормальному перерізі та отримувати фізико-механічні характеристики при застосуванні широкого спектра класів бетону (від *B 3,5* до *B 120* і більше) [4].

Для розрахунку міцності нормальних перерізів ЗБЕ необхідна додаткова умова міцності перерізу. Такою умовою може бути умова міцності по бетону

$$\varepsilon_{bm} \leq \varepsilon_{bu} \quad (1)$$

та умова міцності по арматурі

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}, \quad (2)$$

в яких відповідно ε_{bm} , ε_s – деформації найбільш стиснутого волокна бетону та розтягнутої арматури ЗБЕ, що виникають від зовнішнього навантаження, ε_{bu} , ε_{su} – аналогічні граничні деформації (рис.1).

Існуючі ДМ, окрім ДМ з ЕКМ, потребують експериментального визначення граничної деформації стиснутого бетону ε_{bu} . Методика розрахунку міцності центрально та позацентрово стиснутих ЗБЕ з високоміцних бетонів на основі ДМ з ЕКМ, що запропонована авторами, враховує умови (1) та (2) і дозволяє також аналітично визначати фізико-механічні характеристики стиснутої зони ЗБЕ, в тому числі й ε_{bu} .

Метою роботи є теоретичне дослідження міцності центрально та позацентрово стиснутих ЗБЕ у нормальному перерізі з високоміцних бетонів, а також визначення ε_{bu} на основі ДМ з ЕКМ з урахуванням впливу процента армування при одиночному та подвійному армуванні, класу міцності бетону і порівняння отриманих результатів з аналогічними значеннями ε_{bu} , які прийняті за основу в нормативному документі [1].

Виклад основного матеріалу. Згідно з багатьма експериментами, наприклад, викладеними в роботі [5], умова (2) частіше виконується в слабоармованих елементах. Виконання умови (2) можна забезпечити шляхом призначення кількості розтягнутої арматури не нижче відповідного мінімуму $\mu_{\min} \geq 0,25 - 0,27 \%$, при якому вже відбувається руйнування з роздавлюванням бетону стиснутої зони ЗБЕ, і тоді основне значення матиме умова (1). Такий підхід до виконання умови (2) використовується в нормах (п. 1.19 [8]), і його є сенс зберегти, тому що він суттєво спрощує забезпечення умови (2) при проектуванні залізобетонних конструкцій та їх елементів.

Залежно від того, як визначаються величини ε_{bu} в умові (1), можуть бути ДМ досить різної точності. Так, у ДМ Єврокоду 2 величини ε_{bu} визначались шляхом вимірювання деформацій ε_{bm} стиснутої грані в стадії руйнування дослідних залізобетонних балок і позацентрово стиснутих колон. На основі вказаних вимірів у нормах [1] прийнято для бетонів низької та середньої міцності ($C 12/15 \dots C 50/60$ МПа) $\varepsilon_{bu} = \text{const} = 3,5 \%$, а для високоміцних бетонів ($C 55/67 \dots C 90/105$ МПа) $\varepsilon_{bu} = 3,2 \dots 2,8 \%$.

Результатом перерозподілу напружень σ_b в стиснутій зоні бетону ЗБЕ в граничній стадії є екстремальний критерій міцності нормального перерізу ЗБЕ [3]

$$F(\varepsilon_{bu}) = \max F(\varepsilon_{bm}), \quad (3)$$

що виражає досягнення строгого максимуму зусиллям F (M або N) перерізу як функцією деформації ε_{bm} стиснутої грані бетону ЗБЕ (рис. 1, з).

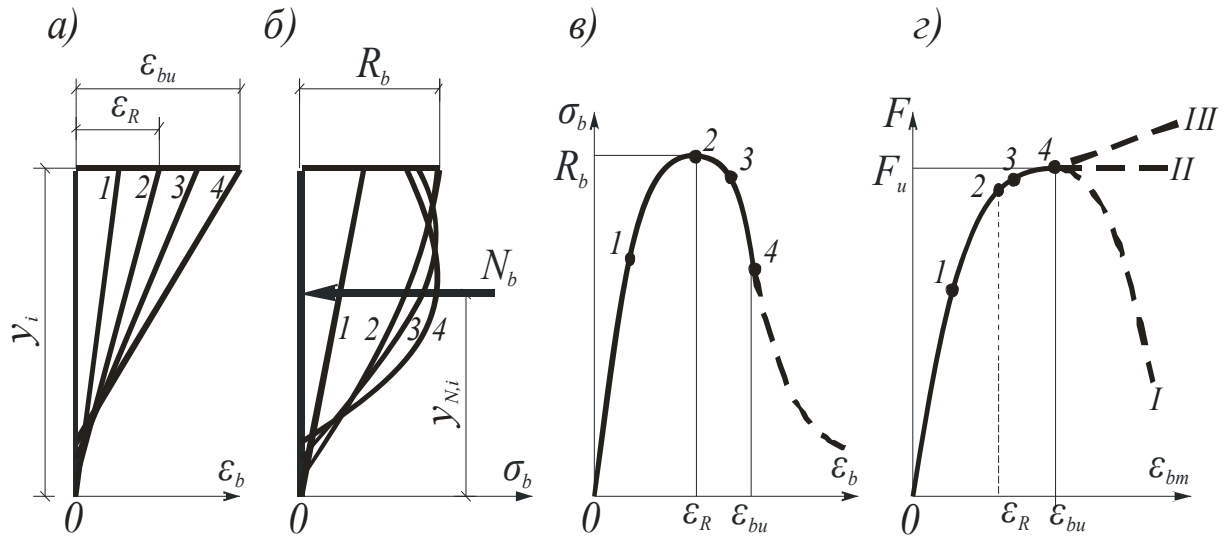


Рис. 1 – Дограничні (1, 2, 3) і граничні стани (4) розвитку деформацій (а) та напружень (б) у стиснутій зоні бетону ЗБЕ. Відповідність станів 1, 2, 3, 4 на діаграмі стискання бетону (в) і кривій «зусилля в перерізі – деформація стиснутої грані бетону».

Пунктирні лінії I, II, III характеризують відповідно псевдопластичні, пластичні й пластичні тіла, що зміцнюються

Строгий максимум залежності «зусилля перерізу – деформація», очевидно, може бути тільки при проявленні в стиснутій зоні ЗБЕ строгого максимуму і наявності низхідної гілки фізичного закону стиснутого бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$ (рис. 1, в).

При заміні в ДМ критерію (1) на критерій (3) утворюється нова, більш довершена ДМ з ЕКМ, для якої не потрібно експериментально визначати ε_{bu} , тому що остання обчислюється із сукупності рівнянь МДТТ і критерію (3) як одна з невідомих величин задачі міцності нормального перерізу [3]. При цьому в якості фізичної залежності бетону використовується формула (2) з роботи [3], що також прийнята в нормах [1]. Вона порівняно проста та краще за інші відображає окреслення кривих $\sigma_b - \varepsilon_b$ для бетонів різної міцності на інтервалі $C = 15 \dots 105 \text{ МПа}$. У ДМ з ЕКМ гранична деформація ε_{bu} виявляється залежною не тільки від параметрів E_b, R_b, ε_R бетону, але й характеру НДС ЗБЕ, кількості арматури A_s та A_s' , форми перерізу, характеру діаграми арматури, попереднього напруження й інших факторів. Тому ε_{bu} взагалі не є критеріальною величиною, яка визначає стан руйнування тільки бетону, а є одним із параметрів граничного стану нормального перерізу ЗБЕ, і вона не може бути константою так, як це прийнято в нормах [1].

На рис. 2, 3 показані криві залежностей міцності та деформації ε_{bu} центрально й позакентрово стиснутих ЗБЕ від класу міцності бетону C , одержані за ДМ з ЕКМ для різних напружено-деформованих станів ЗБЕ, при різній кількості арматури в розтягнутій та стиснутій зонах нормального

перерізу (криві 1 – 6), а також крива 7, яка відповідає рекомендаціям [1] (рис. 3).

Обчислення за ДМ з ЕКМ наведених на графіках залежностей виконані для ЗБЕ прямокутного перерізу з арматурою класу А400С без попереднього напруження з подвійним і одиночним армуванням.

Криві $C - \varepsilon_{bu}$ за ДМ з ЕКМ (рис.3) утворюють пучок, що звужується від $\varepsilon_{bu} \approx 2,25...2,8 \text{ ‰}$ для бетонів середньої міцності до $\varepsilon_{bu} \approx 2,9...3,6 \text{ ‰}$ для бетонів високої міцності. При цьому виявляється закономірне взаємне розташування кривих. Так, нижні криві відповідають осьовому стисненню, а верхні – позацентровому стиску з великими ексцентриситетами. Посередині пучка розташовуються криві при позацентровому стиску ЗБЕ з малими ексцентриситетами.

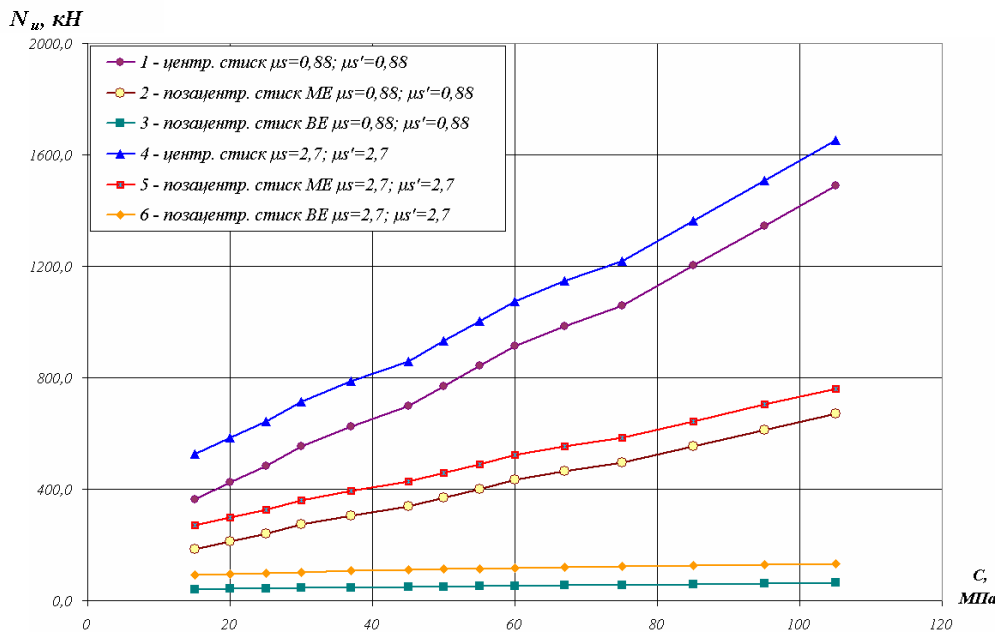


Рис. 2 – Міцність нормального перерізу ЗБЕ при стисканні при

$$\mu_s = \mu'_s \text{ (\%): } 1, 2, 3, -0,88; 4, 5, 6 - 2,7; 7 - \mu_s = 0,845, \mu'_s = 0; 8 - \mu_s = 4,087, \mu'_s = 0; 9 - \mu_s = 0,845, \mu'_s = 0,54; 10 - \mu_s = 4,087, \mu'_s = 0,54$$

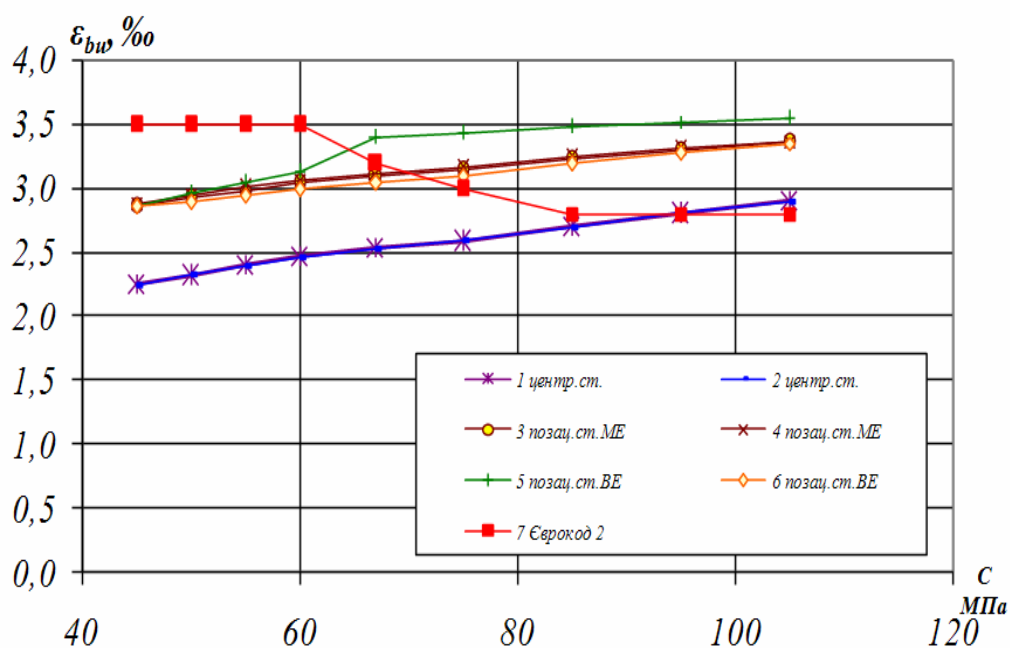


Рис. 3 – Залежність граничної деформації ε_{bu} від класу бетону за ДМ з ЕКМ при $\mu_s = \mu'_s$ (%): 1, 3, 5 – 0,88; 2, 4, 6 – 2,7

Нижні криві для центрально стиснених ЗБЕ майже повторюють криву граничних деформацій бетону при осьовому стисненні ε_R і тому не викликають сумнівів у їх реальності. Верхні криві монотонно зростають з 2,9 до 3,6 ‰, що близько до прийнятого в нормах [1] постійного значення $\varepsilon_{bu} = 3,5$ ‰ для бетонів низької та середньої міцності. Але для ЗБЕ середньої міцності за ДМ з ЕКМ рівень деформацій менший, ніж прийнятий у нормах [1] $\varepsilon_{bu} \approx 3,5$ ‰, і змінюється в межах $\varepsilon_{bu} \approx 2,25 \dots 3,2$ ‰. У зоні високоміцних бетонів крива Єврокоду 2 знаходиться в межах коридору, утвореного кривими за ДМ з ЕКМ.

Висновки:

1. Стани бетонної призми на низхідній гілці діаграми стиснення $\sigma_b - \varepsilon_b$ являють собою стани наростаючого руйнування, які є стійкими тільки при жорсткому режимі навантаження. Недостатня жорсткість навантажувальної установки може викликати залежно від ступеня її жорсткості нестійке деформування («момент руйнування») в будь-якій точці низхідної гілки діаграми стиснення бетону. Тому деформація $\tilde{\varepsilon}_{bu}$, що відповідає «моменту руйнування» призми, не є критеріальною характеристикою міцності бетону як матеріалу.

2. Гранична деформація ε_{bu} стиснутого волокна бетону ЗБЕ визначається перерозподілом напружень на висоті неоднорідно напруженої стиснутої зони нормального перерізу в граничному стані. Такий перерозподіл напружень неможливий у центрально стиснених бетонних призмах, і тому вони не можуть використовуватись для визначення ε_{bu} .

3. ЕКМ відображає в граничному стані характерну властивість псевдопластичних матеріалів типу бетону, гірських порід та їм подібних – прояв строгого максимуму і низхідної гілки діаграми стиснення. ДМ з ЕКМ

точніша порівняно з іншими відомими ДМ. Наприклад, тільки вона забезпечує перехід $\varepsilon_{bu} \rightarrow \varepsilon_R$ при зміні ексцентриситету подовжньої стискної сили $e_0 \rightarrow 0$.

4. Прийняте в нормах [1] постійне значення $\varepsilon_{bu} \approx 3,5 \text{ ‰}$ для бетонів низької та середньої міцності є завищеним для стиснутих ЗБЕ з різними процентами армування. Урахування підвищеної крихкості в зоні високоміцних бетонів фізично було б більш обґрунтоване введенням у розрахунки підвищених коефіцієнтів надійності або знижених коефіцієнтів умов роботи, а не так, як у Єврокод 2, – зниженням граничної деформації ε_{bu} , що не узгоджується з експериментами та розрахунками за ДМ з ЕКМ.

Література:

1. EN 1992-1-1:2004:Е. Єврокод 2: Проектування бетонних конструкцій / CEN-2004.
2. Митрофанов В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: архитектура и технические науки. Вып. 60. – К.: Техника, 2004. – С. 29 – 48.
3. Шкурупій О.А. Використання чисельних і оптимізаційних методів для розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Коммунальное хозяйство городов: сб. науч. тр. – Вып. 76. – К.: Техника, 2007. – С. 71 – 79.
4. Митрофанов В.П. О методах определения предельной деформации бетона железобетонных элементов / В.П. Митрофанов, А.А. Шкурупий, Д.Н. Лазарев // Научный вестник строительства: сб. науч. пр. – Х.: ХДТУБА, 2008. – Вып. 45. – С. 34 – 45.
5. Weiss W.J. An Experimental Investigation to Determine the Influence of Size on the Flexural Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams / W.J. Weiss, K. Guler, S.P. Shah // 5-th Int. Symp. on Utilization of HS/HP Concrete. 20–24 June 1999, Sandefjord, Norway. – Proceedings, Vol. 2. – P. 709 – 718.
6. Каприелов С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – №6. – С. 6 – 10.
7. Баженов Ю.М. Новый век – новые эффективные технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы 1-ой Всероссийской конференции. – М., 2001. – С. 91 – 101.
8. СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.

Надійшла до редакції 5.06.2009

© **О.А. ШКУРУПІЙ, П.Б. МИТРОФАНОВ**