

## МІЦНІСТЬ ЗІГНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

**Шкурупій О.А.  
Митрофанов П.Б.**

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

---

### Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Зараз у країнах колишнього СРСР проходить процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій та їх елементів з єврономами [1] (Єврокодом-2), в якому враховуються класи міцності бетону в діапазоні від  $C 12/15$  до  $C 90/105$ . В діючих на Україні нормах і правилах для проектування залізобетонних конструкцій із важких й дрібнозернистих бетонів враховуються лише класи міцності бетонів в діапазоні від  $B 3,5$  до  $B 60$ . У співставленні з [1] це відповідає класам міцності бетонів до  $C 50/60$ . В Єврокод-2 класи міцності бетонів сягають межі  $C 90/105$ . В діючих нормах і правилах [6] відсутні рекомендації щодо розрахунку міцності ЗБЕ із високоміцних бетонів, а також визначення їх фізико-механічних характеристик, тому необхідна розробка методики розрахунку таких ЗБЕ.

### Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

Застосування ДМ в 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. В 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 спектру класів бетону (від  $B 3,5$  до  $B 120$  і більше) [4]. Існуючі ДМ, окрім ДМ з ЕКМ, потребують експериментального визначення граничної деформації стиснутого бетону  $\varepsilon_{bu}$ . 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  $\varepsilon_{bm}, \varepsilon_s$  – деформації найбільш стиснутого волокна бетону та розтягнутої арматури ЗБЕ, що виникають від зовнішнього навантаження,  $\varepsilon_{bu}, \varepsilon_{su}$  – граничні деформації найбільш стиснутого волокна бетону й розтягнутої арматури. Тому розробка методики розрахунку міцності стиснутих і зігнутих ЗБЕ із високоміцних бетонів та визначення їх фізико-механічних характеристик є актуальною задачею.

**Метою роботи** є теоретичне дослідження міцності зігнутих ЗБЕ у нормальному перерізі з високоміцних бетонів, а також визначення  $\varepsilon_{bu}$  на основі ДМ з ЕКМ із урахуванням впливу

процента армування при одиночному та подвійному армуванні, класу міцності бетону, і порівняння отриманих результатів з аналогічними значеннями  $\varepsilon_{bu}$ , які прийняті за основу в [1].

### Виклад основного матеріалу

Згідно з багатьма експериментами, наприклад [5], умова (2) частіше порушується в слабоармованих елементах із високоміцною напруженою дротовою й канатною арматурою. Тому виконання умови (2) можна забезпечити шляхом призначення кількості розтягнутої арматури не нижче відповідного мінімуму  $\mu_{\min} \geq 0,25 - 0,27 \%$ , при якому вже проходить руйнування з роздавлюванням бетону стиснутої зони ЗБЕ, і тоді основне значення матиме умова (1). Такий підхід до виконання умови (2) використовувався в нормах (наприклад, п. 1.19 [6]), 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  $\varepsilon_{bu}$  в умові (1), можуть бути ДМ досить різної точності. Так, у ДМ Єврокоду-2 величини  $\varepsilon_{bu}$  визначались шляхом вимірювання деформацій  $\varepsilon_{bm}$  стиснутої грані в стадії руйнування дослідних залізобетонних балок і позакентровано стиснутих колон. На основі вказаних вимірів у [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  $\sigma_b$  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  $\varepsilon_{bm}$  стиснутої грані бетону ЗБЕ (рис. 1, з). 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).

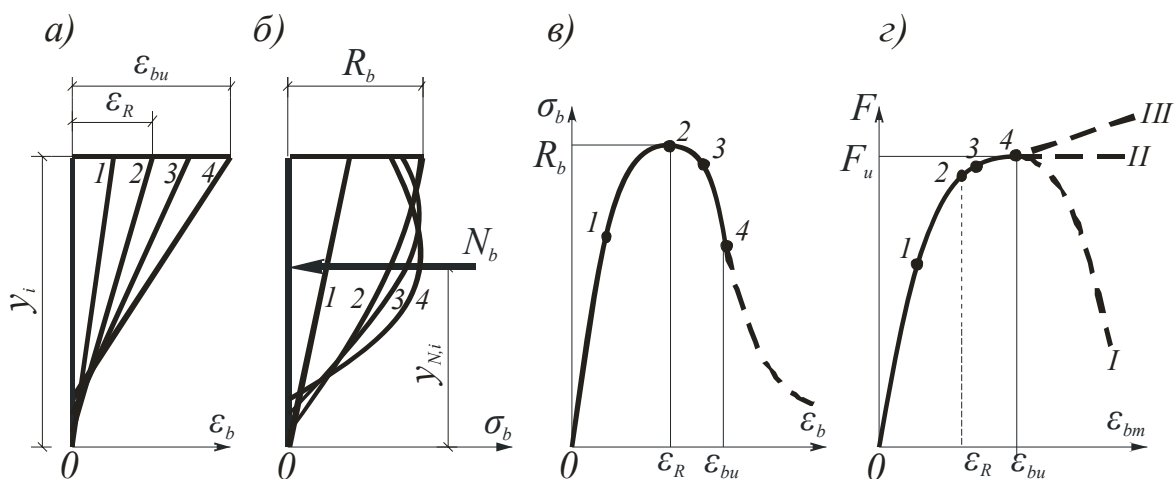


Рис. 1. Дограничні (1,2,3) і граничні (4) стани розвитку деформацій (а) та напружень (б) у стиснутій зоні бетону ЗБЕ. Відповідність станів 1, 2, 3, 4 на діаграмі стискування бетону (в) і кривої „зусилля в перерізу – деформація стиснутої грані бетону”. Пунктирні лінії I, II, III характеризують відповідно псевдопластичні, пластичні й пластичні тіла, що зміцнюються

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

На рис. 2, 3 показані, відповідно, криві залежностей міцності зігнутих ЗБЕ та деформації  $\varepsilon_{bu}$  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 1-4), а також крива 5, 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.

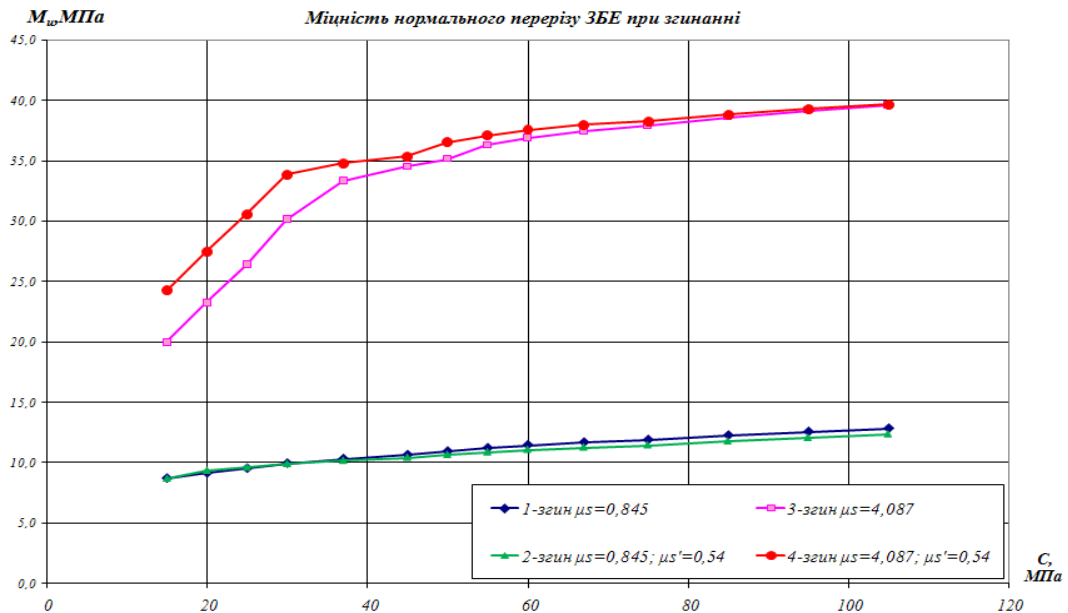


Рис. 2. Міцність нормального перерізу ЗБЕ при згині,  $\mu_s = \mu'_s$  (%):  
 7 –  $\mu_s = 0,845, \mu'_s = 0$ ; 8 –  $\mu_s = 4,087, \mu'_s = 0$ ; 9 –  $\mu_s = 0,845, \mu'_s = 0,54$ ;  
 10 –  $\mu_s = 4,087, \mu'_s = 0,54$

Криві  $C - \varepsilon_{bu}$  за ДМ з ЕКМ (рис. 3) утворюють пучок, що звужується від  $\varepsilon_{bu} \approx 2,25...3,75$  ‰ для бетонів середньої міцності до  $\varepsilon_{bu} \approx 2,9...3,7$  ‰ для бетонів високої міцності. При цьому виявляється закономірне взаємне розташування кривих. Так, нижні криві відповідають перearмованим елементам, як з одиночним так і подвійним армуванням, а верхні – згину

при порівняно невеликому проценті розтягнутої арматури  $\mu_s$ . Верхні криві розташовуються приблизно на постійному рівні з  $\varepsilon_{bu} \approx 3,7$  ‰, близькому до прийнятого в [1] постійного

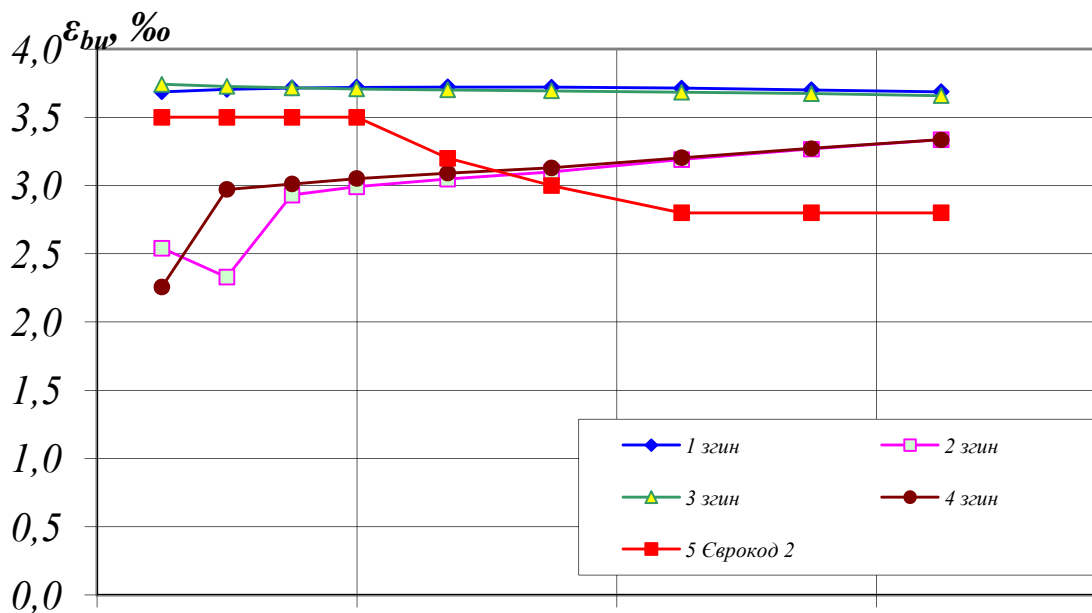


Рис. 3. Залежність граничної деформації  $\varepsilon_{bu}$  від класу бетону за ДМ з ЕКМ

при  $\mu_s = \mu'_s$  (в ‰): 1 –  $\mu_s = 0,845$ ,  $\mu'_s = 0$ ; 2 –  $\mu_s = 4,087$ ,  $\mu'_s = 0$ ;

3 –  $\mu_s = 0,845$ ,  $\mu'_s = 0,54$ ; 4 –  $\mu_s = 4,087$ ,  $\mu'_s = 0,54$

значення  $\varepsilon_{bu} = 3,5$  ‰ для бетонів низької та середньої міцності. Але за ДМ з ЕКМ рівень  $\varepsilon_{bu} \approx 3,7$  ‰ зберігається і для бетонів високої міцності аж до  $C = 105$  МПа, для якого в [1]  $\varepsilon_{bu} = 2,8$  ‰. Проте у випробуваннях балок із циліндричною міцністю бетону  $f_{cm} = 97,9...108,3$  МПа, арматурою з фізичною межею текучості  $\sigma_{sy} = 430,9$  МПа і параметром  $\xi = y/h = 0,282$  одержано  $\varepsilon_{bu} = 3,21...3,74$  ‰ [6], тобто експериментальні дані підтверджують розрахунок  $\varepsilon_{bu}$  за ДМ з ЕКМ краще, ніж [1].

З рис. 3 видно, що крива  $C - \varepsilon_{bu}$  у відповідності з [1] розташовується в "коридорі", обмеженому кривими ДМ з ЕКМ, але для високоміцних бетонів вона поступово знижується до значень кривих перearмованих ЗБЕ із високоміцних бетонів, як з одиночним так і подвійним армуванням. Зниження граничних деформацій зігнутих ЗБЕ із високоміцних бетонів у євронормах [1] обумовлене підвищеною їх крихкістю і напевне прийняте з метою забезпечення надійності ЗБЕ.

## 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  $\varepsilon_{bu}$  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  $\varepsilon_{bu}$ .
3. ЕКМ відображає в граничному стані характерну властивість псевдопластичних матеріалів типу бетону, гірських порід і 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 стискуючої сили  $e_0 \rightarrow 0$ .
4. Прийняте в євронормах [1] постійне значення  $\varepsilon_{bu} \approx 3,5$  ‰ для бетонів низької та середньої міцності є завищеним для зігнутих переармованих ЗБЕ, як з одиночним так і подвійним армуванням, а також стиснутих ЗБЕ з різними процентами армування. Урахування підвищеної крихкості в зоні високоміцних бетонів фізично було б більш обгрунтоване введенням у розрахунки підвищених коефіцієнтів надійності або знижених коефіцієнтів умов роботи, а не так, як у Єврокод-2, – зниженням граничної деформації  $\varepsilon_{bu}$ , що не узгоджується з експериментами та розрахунками за ДМ з ЕКМ.
5. На граничну деформацію  $\varepsilon_{bu}$ , як зігнутих так і стиснутих ЗБЕ впливає багато факторів, які необхідно враховувати в розрахунках їх міцності. Як показують розрахунки за ДМ з ЕКМ,  $\varepsilon_{bu}$  суттєво змінює свої значення при зміні класу бетону, характеру та процента армування, класу арматурної сталі, зміні форми поперечного перерізу ЗБЕ, характеру завантаження тощо. Тому прийняття постійною величиною  $\varepsilon_{bu} \approx 3,5$  ‰ призводить до неточностей в розрахунках міцності, особливо для переармованих ЗБЕ.

## 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 // Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. – Х.: ХДТУБА, 2008. – Вип. 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. – pp. 709–718.
6. СНиП 2.03.01–84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.