

## АНАЛИЗ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ІСНУЮЧИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

Виконано порівняльний розрахунок міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів у нормальних перерізах на основі існуючих деформаційних моделей EN-2, ДБН В.2.6. 98:2009 та ДСТУ Б В.2.6 – 156 : 2010, а також деформаційної моделі з екстремальним критерієм міцності. Результати розрахунків за наведеними вище деформаційними моделями зіставлені з даними експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** бетон, арматура, деформаційна модель, міцність, деформація, нормальний переріз, залізобетонний елемент, екстремальний критерій.

## АНАЛИЗ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Выполнен сравнительный расчет прочности сжатых железобетонных элементов из высокопрочных бетонов в нормальных сечениях на основе существующих деформационных моделей EN – 2, ДБН В.2.6. 98:2009 и ДСТУ Б В.2.6 – 156: 2010, а также деформационной модели с экстремальным критерием прочности. Результаты расчетов по приведенным выше деформационным моделям сопоставлены с данными экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** бетон, арматура, деформационная модель, прочность, деформация, нормальное сечение, железобетонный элемент, экстремальный критерий.

## ANALYSIS OF CALCULATION STRENGTH REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON EXISTING DEFORMATION MODELS

The comparative calculation of durability of the compressed reinforce-concrete elements in normal sections is executed on the basis of existent deformation models of EN-2, ДБН В. 2.6. 98:2009 and ДСТУ Б В. 2.6 156: 2010 and also to the deformation model with the extreme criterion of durability . The results of calculations in the above deformation models are compared with the experimental researches.

**Keywords:** concrete, armature, deformation model, durability, deformation, normal section, reinforce-concrete element, extreme criterion.

**Вступ.** Найважливішими вимогами, що пред'являються до будівельних конструкцій, у тому числі й до залізобетонних, є вимоги щодо забезпечення їх міцності, жорсткості, стійкості та надійності. Всі ці вимоги повинні бути забезпечені перш за все розрахунками.

Специфічні особливості залізобетону накладають додаткові вимоги до методів розрахунку міцності, жорсткості та стійкості залізобетонних конструкцій (ЗБК) та їх елементів (ЗБЕ), де необхідно враховувати й деформації матеріалу, тобто використання деформаційних моделей (ДМ).

На сьогодні однією з головних задач при проектуванні ЗБК є уточнення існуючих та розробка нових методик їх розрахунку на основі ДМ, що пропонується і в нових ДБН В.2.6 - 98:2009 [1].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Розрахункам міцності стиснутих ЗБЕ на основі ДМ присвячена ціла низка літературних джерел [4, 5, 6, та ін.]. Зокрема, більш детально розрахунку міцності ЗБЕ на основі ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ) приділена увага в роботах [4, 6].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Деформаційні моделі з екстремальним критерієм міцності (ДМ з ЕКМ) є альтернативною моделлю по відношенню до існуючих ДМ з емпіричним критерієм міцності [1, 2, 3 та ін.]. На сьогодні жодна з існуючих ДМ, крім ДМ з ЕКМ, не дає можливості розраховувати міцність ЗБК і їх елементів, що працюють на різні види деформування (згин, центральний та позацентровий стиск чи розтяг тощо) без наперед заданого значення найбільш стиснутої фібри бетону нормального перерізу  $\varepsilon_{cu1}$ . Вони потребують даних експериментальних досліджень для визначення  $\varepsilon_{cu1}$ , і їх значення приймаються постійними для конкретного класу бетону. У дійсності  $\varepsilon_{cu1}$  залежить від багатьох факторів, основними з яких є: клас міцності бетону на стиск, форма поперечного перерізу, клас арматурної сталі та її розташування тощо. Лише ДМ з ЕКМ дає можливість аналітично одержати величину  $\varepsilon_{cu1}$  в результаті аналітичного розрахунку.

Значна частка ЗБК та їх елементів під дією навантажень або інших впливів працюють на стиснення. Уточнення існуючих методик розрахунку міцності таких елементів дозволяє виявити резерви економії матеріалів і є актуальним завданням.

**Метою роботи** є проведення порівняльного розрахунку міцності стиснутих залізобетонних елементів у нормальних перерізах на основі існуючих методик, що ґрунтуються на ДМ, а саме: ДБН В.2.6. 98:2009 [1] і ДСТУ Б В.2.6-156: 2010 [2], EN-2 [3] та ДМ з ЕКМ [4, 5], а також зіставлення одержаних результатів розрахунків за наведеними вище ДМ з експериментальними даними.

**Основний матеріал і результати.** Застосування ДМ в теорії залізобетону є відповідним кроком уперед. На сьогодні існує декілька типів ДМ із яких необхідно відмітити дві – з емпіричним і екстремальним критерієм міцності. Існуючі методики розрахунку міцності залізобетонних елементів у нормальному перерізі на основі ДМ з емпіричним критерієм міцності не враховують точно повної діаграми стиску (ПДС) бетону з низхідною гілкою максимальної протяжності, та не дають можливості аналітично одержати граничні деформації найбільш стиснутої фібри бетону  $\varepsilon_{cu1}$ . Цими деформаціями необхідно задаватися заздалегідь.

Для розрахунку міцності нормальних перерізів ЗБЕ необхідна додаткова умова міцності перерізу. Такою умовою може бути умова міцності по бетону чи по арматурі [4, 5, 6].

ДМ з ЕКМ має суттєві переваги над існуючими ДМ. Вона дає можливість розраховувати міцність ЗБК та їх елементів у нормальному перерізі в граничному стані, а також отримувати їх параметри напружено-деформованого стану (НДС), включаючи і  $\varepsilon_{cu1}$ , при застосуванні широкого спектру класів міцності бетону (від С 8/10 до С 115/120 і більше).

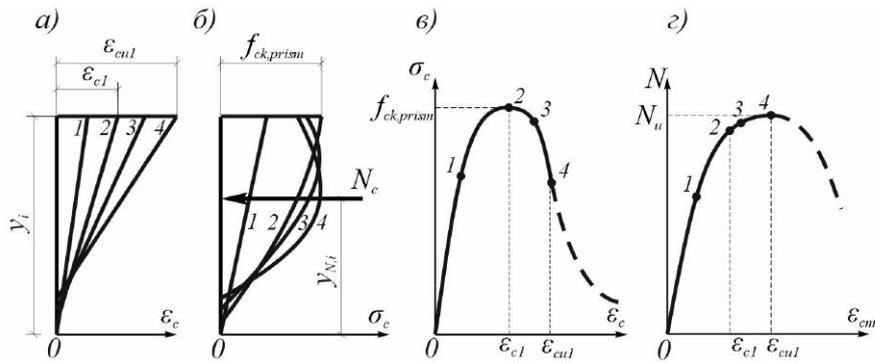
Залежно від того, як враховуються величини  $\varepsilon_{cu1}$ , можуть бути ДМ досить різної точності. Так, у ДМ EN – 2 [3] величини  $\varepsilon_{cu1}$  визначались шляхом вимірювання деформацій  $\varepsilon_{cm}$  стиснутої грані в стадії руйнування дослідних залізобетонних балок і позацентрово стиснутих колон. На основі вказаних вимірів у нормах [3]  $\varepsilon_{cu1}$  прийнято константою ( $\varepsilon_{cu1} = const = 3,5\%$ ) для бетонів низької та середньої міцності (С 12/15...С 50/60 МПа), а для високоміцних бетонів (С 55/67...С 90/105 МПа)  $\varepsilon_{cu1}$  змінюється в інтервалі від 3,2 до 2,8 %.

Результатом перерозподілу напружень  $\sigma_c$  в стиснутій зоні бетону ЗБЕ в граничній стадії є ЕКМ нормального перерізу ЗБЕ [6]

$$F(\varepsilon_{cu}) = \max F(\varepsilon_{cm}), \quad (1)$$

що виражає досягнення строгого максимуму зусиллям  $F$  ( $M$  або  $N$ ) перерізу як функцією деформації  $\varepsilon_{cm}$  стиснутої грані бетону ЗБЕ (рис. 1, з). Строгий максимум залежності „зусилля перерізу – деформація” може бути тільки при проявленні в стиснутій зоні ЗБЕ строгого максимуму і наявності низхідної гілки фізичного закону стиснутого бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$  (рис. 1, в).

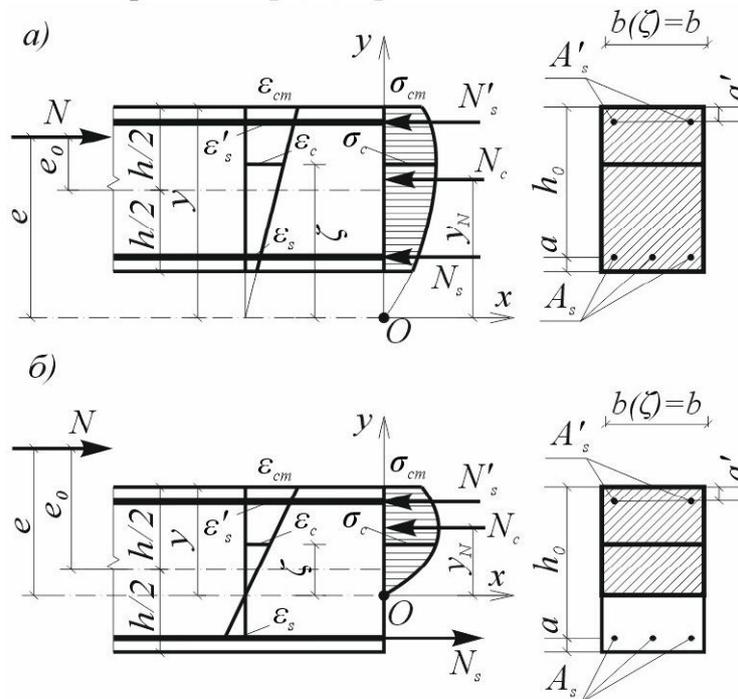
У якості фізичної залежності бетону використовується формула (2) [6], що також прийнята в нормах [1] і [3]. Вона порівняно проста та краще за інші відображає окреслення кривих  $\sigma_c - \varepsilon_c$  для бетонів різної міцності на інтервалі  $C = 10...105$  МПа.



**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 кривій «зусилля – деформація стиснутої грані бетону»**

У ДМ з ЕКМ гранична деформація  $\varepsilon_{cul}$  виявляється залежною не тільки від параметрів  $E_{cm}, f_{ck,prism}, \varepsilon_{cI}$  бетону, але й характеру НДС ЗБЕ, кількості арматури та її розташування, форми перерізу, характеру діаграм матеріалів, попереднього напруження й інших факторів. Тому  $\varepsilon_{cul}$  не 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 [3].

Для визначення напружень, деформацій та інших характеристик перерізу ЗБЕ використовуємо розрахункову схему зображену на рис. 2 та залежності наведені в роботах [4, 5, 6].



**Рис. 2. Розрахункова схема нормального перерізу ЗБЕ для випадків позакентрового стиску при випадках малих (МЕ), (а) та великих (ВЕ) (б) ексцентриситетів**

Така постановка задачі, з урахуванням усіх вихідних параметрів, залежностей може бути вирішена лише за допомогою обчислювальної техніки з використанням чисельних і оптимізаційних методів. Розв'язок цієї задачі був реалізований в програмі для ПЕОМ.

За наведеним у роботах [5 – 7] алгоритмом розрахунку міцності ЗБК та їх елементів на основі ДМ з ЕКМ були проведені розрахунки міцності залізобетонних колон, що працюють на центральний і позацентровий стиск, та визначено параметри їх НДС у граничному стані, в тому числі і  $\varepsilon_{cu1}$ .

В таблиці 1 наведені результати теоретичних розрахунків міцності залізобетонних колон, одержаних за деформаційними методиками ДБН В.2.6–98:2009 [1], EN – 2 [3] та методикою на основі ЕКМ, які зіставлені з експериментальними даними, наведеними в роботі [8]. Також проаналізовано зміну деформацій найбільш стиснутої фібри бетону в нормальному перерізі колони в граничній стадії, що працюють на центральний і позацентровий стиск, при  $f_{cm,cube} = 61 \text{ МПа}$ , залежно від зміни ексцентриситету прикладення навантаження  $e_0$ . Кубикова міцність бетону на стиск експериментальних зразків варіювалася в межах від 20 до 128 МПа.

Як видно з таблиці 1, методика розрахунку міцності стиснутих ЗБЕ за EN–2 [3] завищує результати у порівнянні з експериментальними даними [8], а методика ДБН В.2.6–98:2009 [1] – занижує. Розрахунки ж міцності таких ЗБЕ на основі ДМ з ЕКМ є точнішими і краще співпадають із експериментальними даними ( $\bar{X} = 0,986$ ,  $C_v = 3,012 \%$ ).

**Таблиця 1. Порівняння граничних значень деформацій та міцності стиснутих залізобетонних колон**

Методика розрахунку	Деформація найбільш стиснутої фібри бетону ЗБЕ при зміні ексцентриситету прикладання поздовжньої сили, $\varepsilon_{cu1}$ , ‰			Граничне навантаження стиснутих ЗБЕ при зміні ексцентриситету прикладання поздовжньої сили, $N_u$ , кН		
	$e_0=0$	$e_0=0,03 \text{ м}$	$e_0=0,12 \text{ м}$	$e_0=0$	$e_0=0,03 \text{ м}$	$e_0=0,12 \text{ м}$
ДБН В.2.6.-98:2009	2,29	2,29	2,29	839	365	96
Eurocode 2	3,5	3,5	3,5	802	461	112,4
на онові ЕКМ	2,44	3,19	3,25	882	438	112
Експеримент	2,4	3,24	3,46	870	440	110,9

## Висновки:

1. Методика на основі ЕКМ є більш точною та узагальненою в порівнянні з існуючими деформаційними моделями. Тільки вона дозволяє аналітично визначати, як одну з невідомих величин, граничну деформацію найбільш стиснутої фібри бетону ЗБЕ  $\varepsilon_{cul}$  з урахуванням впливу цілого ряду факторів, на відміну від інших деформаційних моделей.  $\varepsilon_{cul}$  суттєво змінює свої значення при зміні класу міцності бетону на стиск, характеру та процента армування, класу арматурної сталі, форми поперечного перерізу ЗБЕ, характеру завантаження тощо. Тому прийняття постійною величиною  $\varepsilon_{cul} \approx 3.5\%$  призводить до неточностей в розрахунках міцності, особливо для переармованих ЗБЕ.

2. Оптимізаційний характер задачі розрахунку міцності нормального перерізу, з цільовою функцією (1) та відповідними функціями обмеження дає можливість аналізувати повний комплекс граничних параметрів нормальних перерізів залізобетонних колон у стадії їх руйнування, виявляти пружний або пружно-пластичний стан роботи арматури.

3. ЕКМ відображає в граничному стані характерну властивість псевдопластичних матеріалів типу бетону – прояв строгого максимуму і низхідної гілки діаграми стиснення бетону.

4. Лише методика на основі ЕКМ не потребує експериментального визначення граничної деформації  $\varepsilon_{cul}$  для обчислення параметрів НДС у граничній стадії. Її величина визначається перерозподілом напружень по висоті неоднорідно напруженої стиснутої зони нормального перерізу ЗБЕ в граничному стані та залежить від багатьох факторів (класу бетону, форми перерізу, процента армування тощо) і не може бути постійною величиною для відповідного класу бетону.

## Література

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. - [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с.
3. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004.–226 p.
4. Шкурупій О.А. Міцність залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 1. – Київ, ДП НДІБК, 2011. – С. 605–614.
5. Шкурупій О.А. Застосування деформаційної моделі з екстремальним критерієм для розрахунку міцності залізобетонних елементів із високоміцних бетонів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – № 46. – С. 377 – 387.

6. 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.

7. Митрофанов, В.П. *Алгоритмы решения задач прочности нормальных сечений железобетонных элементов на основе экстремальных критериев* / В.П. Митрофанов, П.Б. Митрофанов // *Науковий вісник будівництва.* – Вип. 69.– Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2012. – С. 137 – 149

9. Митрофанов П.Б. *Експериментальні дослідження міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів* / П.Б. Митрофанов // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) – Полтава: ПолтНТУ, 2011.* – Вип. 29. – С. 74. – 79.

*Надійшла до редакції 16.10.2013*  
© О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов