

УДК 624.012.45.001

**ГРАНИЧНИЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І МІЦНІСТЬ
СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**ПРЕДЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
И ПРОЧНОСТЬ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**THE ULTIMATE STRESS-STRAIN STATE AND COMPRESSIVE
STRENGTH OF CONCRETE ELEMENTS**

Шкурупій О.А., к. т. н, доцент, Митрофанов П.Б., асистент (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

Шкурупій А.А., к. т. н, доцент, Митрофанов П.Б., асистент (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка)

Shkurupiy O.A., the Candidate of Engineering Science, associated professor, Mitrofanov P.B., assistant (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)

Стаття присвячена аналізу методик визначення напружено-деформованого стану (НДС), міцності та граничної деформації стиснутого бетону (ε_{cul}) стиснутих залізобетонних елементів (ЗБЕ) на основі деформаційної моделі (ДМ) з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ). Наведено результати розрахунків параметрів НДС стиснутих ЗБЕ у граничній стадії і їх міцності за методикою на основі ДМ з ЕКМ при різних процентах армування. Розрахунки порівнювались із експериментальними даними одержаними авторами при випробуванні стиснутих ЗБЕ із високоміцних бетонів. Доведено, що результати розрахунків міцності та параметрів НДС у граничній стадії на основі ДМ з ЕКМ дають хорошу збіжність з експериментальними даними.

Статья посвящена анализу методик определения напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и предельной деформации сжатого бетона (ε_{cul}) сжатых железобетонных элементов (ЖБЭ) на основе деформационной модели (ДМ) с экстремальным критерием прочности (ЭКП). Приведены результаты расчетов параметров НДС сжатых ЖБЭ в предельной стадии и их прочности по методике на основе ДМ из ЭКП при разных процентах армирования. Расчеты сравнивались с экспериментальными данными полученными авторами при испытании сжатых ЖБЭ из высокопрочных бетонов.

Доказано, що результати розрахунків прочності і параметрів НДС в предельній стадії на основі ДМ із ЕКМ дають хорошу збіжність з експериментальними даними.

The article is devoted the analysis of methods of determination of the tense-deformed state (TDS), durability and ultimate deformation of the compressed concrete (ε_{cu1}) of the compressed reinforce-concrete elements (RCE) on the basis of deformation model (DM) with the extreme strength criterion (ESC). The results of calculations parameters of TDS compressed RCE are resulted in the ultimate stage and their durability on a method on the basis of DM with ESC at the different percents of reinforcement. The calculations were compared with experimental data obtained by the authors test compressed RCE of high-strength concrete. It is proved that the results of calculations of durability and parameters of TDS in the ultimate stage on the basis of DM with ESC give good convergence with experimental data.

Ключові слова: бетон, арматура, міцність, напружено-деформований стан, залізобетонний елемент, гранична деформація, деформаційна модель, екстремальний критерій.

бетон, арматура, прочность, напряженно-деформированное состояние, железобетонный элемент, предельная деформация, деформационная модель, экстремальный критерий.

concrete, reinforcement, durability, strain-stress behavior, reinforced concrete element, ultimate deformation, deformation model, extreme criterion.

Стан питання та задачі дослідження. Застосування ДМ є певним кроком уперед, оскільки вона використовує повний набір рівнянь механіки деформованого твердого тіла (МДТТ): фізичні для бетону й арматури, геометричні – закон плоских перерізів, статичні – рівняння рівноваги та дозволяє точніше знаходити межу переармування, міцність переармуваних ЗБЕ, враховувати характер діаграми розтягу арматури $\sigma_s - \varepsilon_s$ й інші фактори.

ДМ з ЕКМ має суттєві переваги над ДМ з емпіричним критерієм, що є основою норм [1, 2 і 3]. Вона вперше на основі експериментальних даних запропонована в роботі [5] та детально аналітично обґрунтована й наведена в працях [6, 7, 8 та ін.]. ДМ з ЕКМ дозволяє враховувати реальні діаграми роботи бетону та арматурних сталей з урахуванням їх зон зміцнення при широкому спектрі класів міцності бетону на стиск (аж до $f_{ck,cube} = 120 \text{ МПа}$ і більше), а також аналітично визначати параметри НДС нормальних перерізів у тому числі й ε_{cu1} в граничному стані. Тому розроблення методики на базі ДМ, яка б давала змогу аналітично одержати параметри НДС в нормальному

перерізі ЗБК та їх елементів, в тому числі й ε_{cu1} , при різних видах завантаження є актуальним завданням. Такою моделлю є ДМ з ЕКМ.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Зараз у країнах колишнього СРСР проходить процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій та їх елементів з Eurocode 2 [1]. ДМ, яка давно використовувалась у країнах Європи, активно розвивалась в Україні [2, 3] і в Росії [4] завдяки дослідженням діаграми стиску бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$ з урахуванням низхідної гілки. Існуючі на сьогодні ДМ, окрім ДМ з ЕКМ, в своїй основі мають емпіричний характер, тобто потребують експериментальних даних для визначення граничних значень деформацій найбільш стиснутої фібри бетону ε_{cu1} , які в нормах [1] визначаються із випробувань ЗБЕ, що працюють на згин та позacentровий стиск, а в нормах [2], значення цих деформацій приймають із випробування бетонних призм. Такий підхід не дає можливості точно враховувати НДС ЗБЕ, так як ε_{cu1} є параметром, що залежить від багатьох факторів (класу бетону, форми перерізу, процента армування тощо) і не може бути постійною величиною. Тому вдосконалення інженерних методик розрахунку міцності бетонних та ЗБЕ при складних і неоднорідних НДС на основі не пружних дилатаційних моделей деформування бетону та реальних діаграм роботи бетону й арматурних сталей є актуальною задачею.

Мета роботи. Визначення напружено-деформованого стану, міцності та граничної деформації стиснутого бетону (ε_{cu1}) стиснутих ЗБЕ на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм та порівняння результатів цих розрахунків із експериментальними даними.

Виклад основного матеріалу. Результатом перерозподілу напружень σ_c в стиснутій зоні бетону ЗБЕ в граничній стадії є ЕКМ нормального перерізу ЗБЕ [6, 7, 8]

$$F(\varepsilon_{cu1}) = \max F(\varepsilon_{cm}), \quad (1)$$

що виражає досягнення строгого максимуму зусиллям F (M або N) перерізу як функцією деформації ε_{cm} стиснутої грані бетону ЗБЕ (рис. 1, з) [7]. Строгий максимум залежності „зусилля перерізу – деформація (кривизна)”, очевидно, може бути тільки при проявленні в стиснутій зоні ЗБЕ строгого максимуму та наявності низхідної гілки діаграми стиснутого бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 1, в) [7]. Дослідні криві „зусилля – деформація”, одержані при

жорсткому завантаженні ЗБЕ з різним НДС, мають чітко виражений строгий максимум (див. рис.2, 3 [6]).

При врахуванні в ДМ критерію (1) утворюється нова, більш довершена ДМ з ЕКМ, для якої не потрібно експериментально визначати ε_{cul} , тому що остання обчислюється з сукупності рівнянь МДТТ і критерію (1) як одна з невідомих величин задачі міцності нормального перерізу [8]. При цьому в якості фізичної залежності бетону використовується формула (4) [7], що використовується в нормах [1], котра порівняно проста та краще за інші відображає окреслення кривих $\sigma_c - \varepsilon_c$ для бетонів різного класу міцності на інтервалі $f_{ck, cube} = 10 \dots 120 \text{ МПа}$. У ДМ з ЕКМ гранична деформація ε_{cul} стиснутої грані бетону ЗБЕ виявляється залежною не тільки від параметрів $E_c, f_{c, prism}, \varepsilon_{c1}$ бетону, але й характеру НДС ЗБЕ, кількості арматури A_s та A_s' , форми перерізу, характеру діаграми роботи арматурної сталі, попереднього напруження та інших факторів. Тому ε_{cul} взагалі не є критеріальною величиною, яка визначає стан руйнування тільки бетону, а є одним із параметрів граничного стану нормального перерізу ЗБЕ.

За наведеним в роботах [7, 8, 9] алгоритмом розрахунку міцності ЗБК та їх елементів на основі ДМ з ЕКМ були проведені розрахунки міцності стиснутих ЗБЕ, та визначені параметри їх НДС у граничній стадії, в тому числі й ε_{cul} . Результати цих розрахунків порівняні з експериментальними даними, одержаними авторами статті (рис. 1, 3). Кубикова міцність бетону на стиск експериментальних зразків становила 70 МПа. Армвання експериментальних зразків приймалось симетричним – $4\emptyset 12 A500C$ (рис. 1, 2), а їх довжина становила 1,2 м. Ексцентриситети прикладання стискуючої поздовжньої сили дорівнювали: 0 м. – центральне стискання; 0,3 м. – позацентрове стискання (малі ексцентриситети); 0,12 м. – позацентрове стискання (великі ексцентриситети)

На рисунках 1 і 2 наведено зміну деформацій та напружень в нормальному перерізі ЗБЕ у граничній стадії, обчислених за методикою ДМ з ЕКМ, в залежності від зміни процента армування ρ_f , при постійному середньому значенні кубикової міцності бетону на стиск 70 МПа. Окремими точками на графіку 1 позначені експериментальні значення деформацій в найбільш стиснутій фібрі бетону та арматурних стержнях.

На рисунку 3 наведено порівняння теоретичних значень міцності стиснутих залізобетонних елементів, одержаних за методикою ДМ з ЕКМ, та експериментальними даними [10]. Результати статистичної обробки співвідношень теоретичних і експериментальних даних міцності стиснутих ЗБЕ (вибірка з 54 даних) при різних класах бетону та процентах армування свідчать про хорошу їх збіжність: середньоарифметичне значення: 0,992;

середньоквадратичне відхилення: 0,027; коефіцієнт варіації: 2,74%; асиметрія: 0,998; ексцес: -0,55.

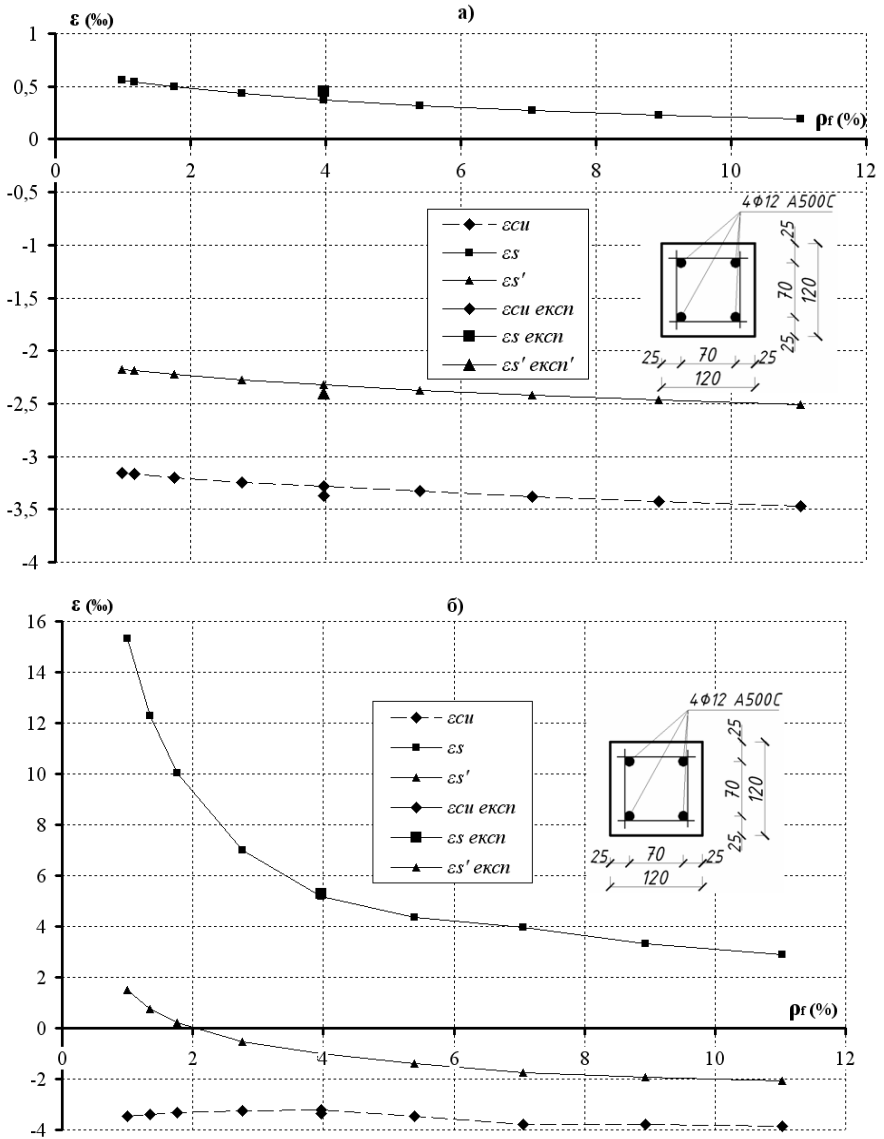


Рис. 1. Значення деформацій в граничному стані нормального перерізу стиснутих ЗБЕ, одержаних за методикою ДМ з ЕКМ при різних процентах армування ρ_f :

а) малі ексцентриситети; б) великі ексцентриситети

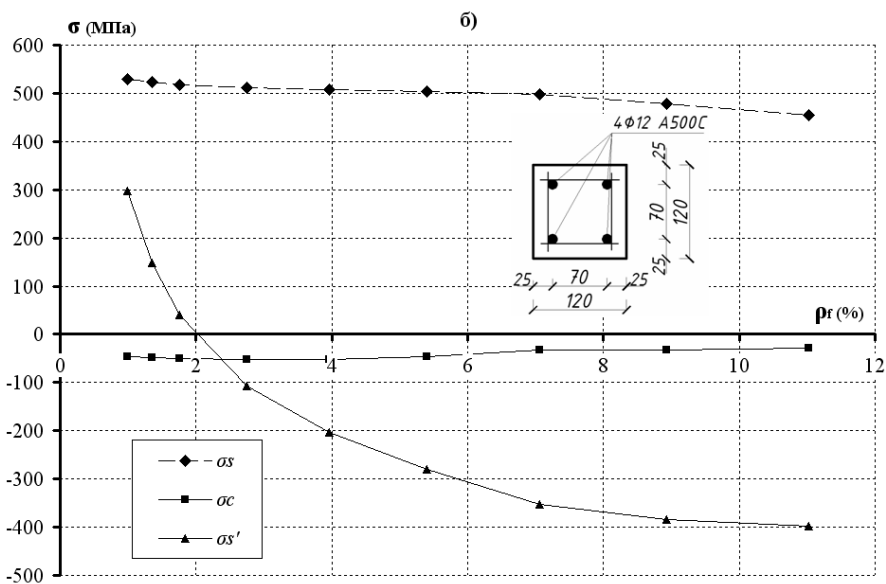
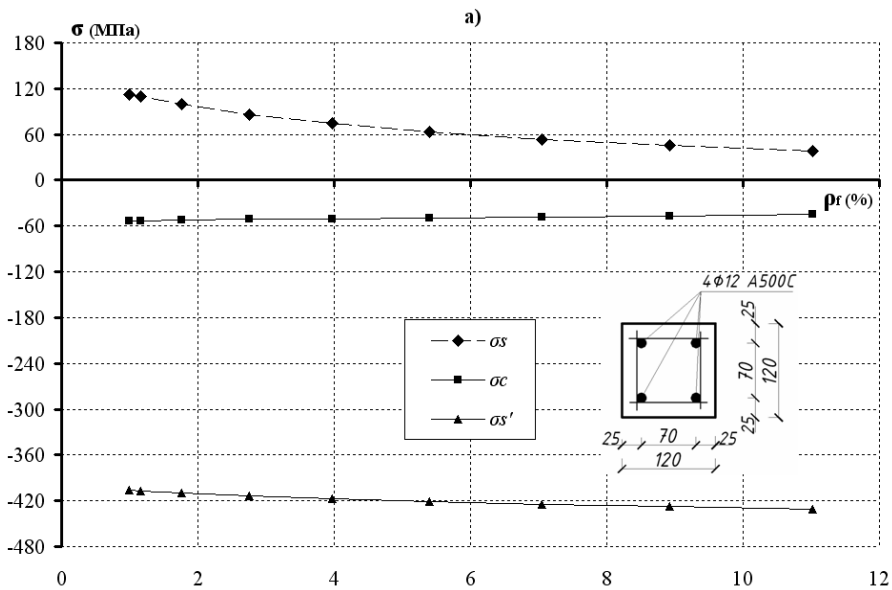


Рис. 2. Значення напружень в граничному стані нормального перерізу стиснутих ЗБЕ, одержаних за методикою ДМ з ЕКМ при різних процентах армування ρ_f :

а) малі ексцентриситети; **б)** великі ексцентриситети

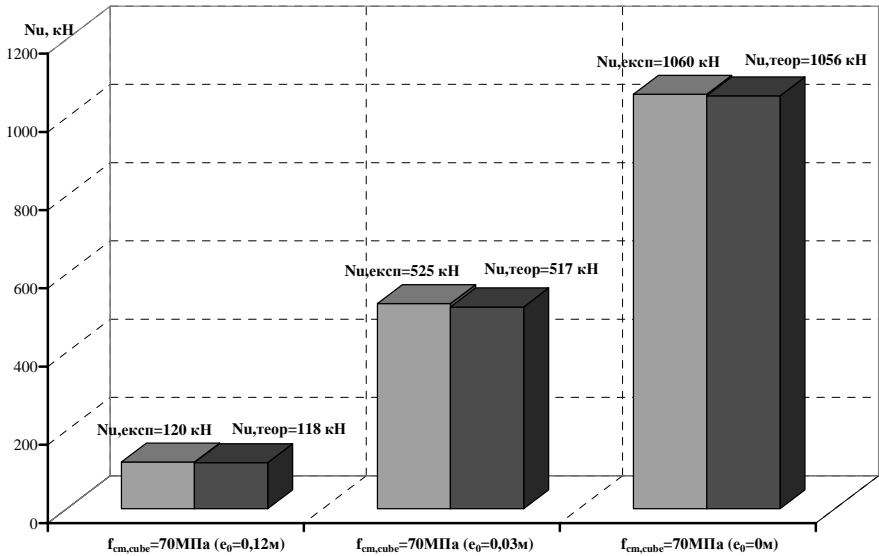


Рис. 3. Порівняння теоретичних значень міцності стиснутих ЗБЕ, одержаних за методикою ДМ з ЕКМ, та експериментальними даними [10]

Висновки.

1. Методика розрахунку міцності ЗБЕ на основі екстремального критерію є більш точною та узагальненою порівняно з існуючими. Тільки вона дозволяє аналітично визначати як одну з невідомих величин граничну деформацію найбільш стиснутої фібри бетону ЗБЕ ϵ_{cu1} з урахуванням впливу цілого ряду факторів, на відміну від інших методик. ϵ_{cu1} суттєво змінює свої значення при зміні класу міцності бетону на стиск, характеру та процента армування, класу арматурної сталі, форми поперечного перерізу, характеру завантаження тощо. Тому, в розрахунках міцності ЗБЕ задаватися наперед величиною ϵ_{cu1} або приймати її постійною не коректно так, як це призводить до неточностей в обчисленнях, особливо для переармованих ЗБЕ.

2. Оптимізаційний характер задачі розрахунку міцності ЗБЕ у нормальному перерізі з цільовою функцією (1) та відповідними функціями обмеження дає можливість аналізувати НДС нормального перерізу ЗБЕ у граничній стадії, виявляти пружний чи пружно-пластичний стан роботи арматури.

3. ЕКМ відображає в граничному стані характерну властивість псевдопластичних матеріалів типу бетону та йому подібних, тобто прояв строгого

максимуму й низхідної гілки повної діаграми стискання бетону. При зміні ексцентриситету поздовжньої стискаючої сили $e_0 \rightarrow 0$ лише ДМ з ЕКМ забезпечує перехід $\varepsilon_{cul} \rightarrow \varepsilon_{c1}$.

1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p. **2.** Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. - [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с. **3.** ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с. **4.** Залесов А. С., Чистяков Е. А., Ларичева И. Ю. Деформационная расчётная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил // Бетон и железобетон. – 1996. – № 5. – С. 16–18. ISSN 0005-9889. **5.** Байков В. Н., Горбатов С. В. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям напряжения – деформации бетона и арматуры // Бетон и железобетон. – 1985. – № 6. – С. 13–14. **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. – 250 пр. ISBN 978-966-2283-13-6. **7.** 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. – 250 пр. ISBN 978-966-2283-13-6. **8.** Шкурупій О.А., Лазарев Д.М. Використання чисельних і оптимізаційних методів для розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм // Коммунальное хозяйство городов : Сб. научных трудов. – Вып. 76. – К.: Техника, 2007. – С. 71–79 – 500 пр. ISSN 0869-1231. **9.** Шкурупій О.А. Розрахунок міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів на основі деформаційної моделі / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 43 – 49. **10.** Митрофанов П.Б. Експериментальні дослідження міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів / П.Б. Митрофанов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 29. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 74 – 79.