

2. Про ратифікацію Конвенції про права осіб з інвалідністю і Факультативного протоколу до неї / Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2010, N 9, ст. 77.

3. Закон України „Про освіту” від 01.07.2014 № 1556-VII [Е-ресурс]. – URL: <http://vzn.org.ua/zakonodavstvo/110-zakon-ukrayiny-pro-osvitu>.

4. Концепція розвитку інклюзивної освіти. – URL: <http://www.mon.gov.ua/gr/obg/>.

5. Державні будівельні норми України, **ДБН В.2.2-17:2006**. Будинки і споруди: Доступність будинків і споруд для маломобільних груп населення, Київ Мінбуд України, 2007. – 21 с.

6. Державні будівельні норми України, **ДБН В.2.2-40:2018**. Будинки і споруди: Інклюзивність будівель та споруд, Київ Мінбуд України, 2019. – 24 с.

7. **Бондар Т.І.** Створення інклюзивного освітнього середовища в системі вищої освіти України / Т. І. Бондар // Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology. – 2014. – Т. II, № 27. – С. 20-24.

8. **Давиденко Г.В.** Інклюзія у вищих навчальних закладах Європейського Союзу : [моно-графія] / Г.В. Давиденко. – Вінниця: Нілан-ЛТД, 2015. – 314 с.

9. **Колупаєва А.А.** Інклюзивна освіта: реалії та перспективи: монографія / А. А. Колупаєва. – Київ: „Самміт-Книга”, 2009. – 272 с.

10. **Тимкова В.А.** Інклюзивне освітнє середовище у вищій школі України / В. А. Тимкова // Збірник наукових праць Хмельницького інституту соціальних технологій Університету "Україна". - 2018. - № 1. - С. 99-101

11. **Кольченко К.О.** Концептуальні підходи до впровадження інклюзивної освіти у вищих навчальних закладах/К.О. Кольченко, Г.Ф. Нікуліна // Актуальні проблеми навчання та виховання людей з особливими потребами. – К.:Університет «Україна», 2013. – № 10 (12). – С. 12-22.

12. **Шолух Н.В.** Проектирование для нужд маломобильных групп населения в фокусе внимания академической науки: опыт Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [Текст]/ Н. В. Шолух, А. В. Анисимов, А. Е. Надьярная, А. В. Бородин/Современное промышленное и гражданское строительство. – 2016. –Том 12, Номер 1. –С. 13–22

Рукопис подано до редакції 12.10.2020

УДК 691.3

С.І. САХНО, Є.В. ЛЮЛЬЧЕНКО, Л.А. ЯНОВА,
О.В. ПИЩИКОВА, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Виявлення математичної моделі нелінійної поведінки бетону, що в найбільшій мірі відтворює поведінку лабораторних зразків залізобетонних балок при руйнуванні.

Методи досліджень. Дослідження є порівнянням результатів експериментальної частини, що проводилась в лабораторії Криворізького національного університету та результатів математичного моделювання руйнування залізобетону. Математичне моделювання деформацій та руйнування залізобетонних балок виконувалось в програмній системі ANSYS Student. Для виявлення найбільш близької до реальних результатів моделі руйнування бетону, параметри поведінки залізобетонних балок розраховувалися із застосуванням трьох математичних моделей.

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод математичного моделювання нелінійного руйнування залізобетону. Виявлені закономірності розподілення еластичних та пластичних деформацій в залізобетонних балках. Отримано дослідницький матеріал для корегування особливих параметрів моделей Друккера — Прагера та Менетрея — Вілема.

Практичне значення. Той факт, що математичні моделі Друккера — Прагера та Менетрея — Вілема досить точно відтворюють поведінку реального залізобетону дозволяє застосовувати дані моделі для розрахунків та досліджень складних залізобетонних конструкцій.

Результати. Виявлено та проаналізовано залежності розподілення напружень та деформацій від навантажень для нелінійних моделей руйнування бетону Друккера — Прагера та Менетрея — Вілема. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами лабораторних випробувань. Показано, що обидві нелінійні моделі досить точно описують процес деформацій та руйнування залізобетонних балок, при цьому модель Менетрея — Вілема моделює більш жорстку та крихку поведінку залізобетону. Деформації моделі Менетрея — Вілема нижчі ніж в моделі Друккера — Прагера. Для досягнення повної збіжності в поведінці реального залізобетону та його математичних моделей необхідні попередні випробування відповідних зразків бетону які дозволяють отримати нелінійні характеристики максимально наближені до реальних. Лінійна модель бетону може бути використана тільки в межах пружної поведінки бетону.

Ключові слова: залізобетон, метод скінчених елементів, деформації, міцність, руйнування бетону, модель Менетрея — Вілема, модель Друккера — Прагера.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-108-27-34

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. За останні кілька років значно зросло застосування 3D аналізу конструкцій методом скінчених елементів (МСЕ).

© Сахно С.І., Люльченко Є.В., Янова Л.А., Пищикова О.В., 2020

Такий аналіз дає можливість більш точно вивчити конструкцію, ніж при використанні традиційних інструментів проектування. Незважаючи на велику кількість досліджень і публікацій щодо застосування МСЕ при проектуванні залізобетонних конструкцій, реально МСЕ частіше використовується як інструмент перевірки, але не для проектування. Для використання МСЕ в повсякденній практиці проектування, необхідно вирішити ряд критичних питань. Ці питання пов'язані або з самим СЕ — моделюванням (геометрія, граничні умови, щільність сітки і т. і.), або з подальшою обробкою отриманих результатів (концентрації напружень, вибір критичних ділянок, ширини розподілу і т. ін.). Для нелінійних моделей бетону також важливі параметри, пов'язані з пластичністю і ділатансією. Як правило, дані параметри визначаються експериментальним шляхом і похибки в їх значеннях можуть привести до значних помилок в розрахунках. Тому зіставлення даних, отриманих при лабораторних випробуваннях і даних розрахованих методом скінчених елементів залишається актуальним і сьогодні.

Аналіз досліджень і публікацій. Вперше метод скінчених елементів для аналізу армованих балок був застосований в 1967 р Д. Нго і А. Скорделісом [1]. Згодом було розроблено велику кількість підходів моделювання поведінки бетону як самостійного матеріалу, так і в складі залізобетонних конструкцій [2 – 13]. У процесі численних досліджень було виявлено багато аспектів незвичайної поведінки бетону, таких як прояв нелінійності як при розтягу, так і при стиску, залежність поверхні руйнування від всіх інваріантів напружень та ін. В результаті було розроблено критерії руйнування бетону [13] і моделі бетону на базі пластичності. Ряд моделей знайшли своє застосування в таких програмних комплексах, як ABAQUS і ANSYS.

Постановка задачі. Метою даної статті є перевірка збіжності результатів реальних випробувань залізобетонних балок і їх математичних моделей в програмній системі ANSYS.

Викладення матеріалу та результати. Для перевірки різних моделей руйнування бетону була проведена серія випробувань залізобетонних балок. Балки випробовувались після досягнення проектної міцності, відповідно до методик ДСТУ Б В.2.7-214: 2009. Нелінійний аналіз методом скінчених елементів проводився в ANSYS Student. При цьому, для виявлення найбільш близької до реальних результатів моделі руйнування бетону, параметри поведінки залізобетонних балок розраховувались із застосуванням трьох математичних моделей:

- модель лінійної поведінки бетону з лінійними параметрами модуля Юнга (ЛМ);
- модель Друккера — Прагера (ДП);
- модель Менетрея — Вілема (МВ).

Моделі Друккера — Прагера і Менетрея — Вілема описують непружне деформування бетону і засновані на теорії пластичної течії. Для моделювання руйнування бетону застосовується феноменологічний підхід який складається в описі утворення тріщин за допомогою пластичних деформацій. Він дозволяє уникнути проблем безпосереднього моделювання розвитку тріщин в структурно неоднорідному середовищі і одночасно описувати процес деформування виконаних з крихких матеріалів конструкцій. Моделі бетону ДП і МВ відрізняються одна від іншої перш за все математичним описом поверхонь плинності. У моделі ДП поверхню плинності побудовано шляхом комбінації двох поверхонь Друккера — Прагера, а в моделі МВ використано поверхню Вілема — Варнке.

Обидві моделі базуються на основі функції поверхні плинності, яка будується в просторі головних напружень і описується відповідним рівнянням. Аргументами функції є змінні, що характеризують напружені стани. Для побудови початкової поверхні плинності в обох моделях використовується три параметра: межа міцності матеріалу при одноосьовому розтягу, межа міцності при одноосьовому стиску і межа міцності при двохосьовому стиску. При виникненні пластичних деформацій, поверхні плинності починають змінюватися. Відбувається або зміцнення, або знеміцнення матеріалу. Цей процес описується за допомогою відповідних функцій. Функція поверхні плинності Друккера-Прагера (рис. 1)

$$f_{DP}(s_c, s_m) = 0, f_{DPc} = \frac{s_c}{\sqrt{3}} - b_c s_m - s_{yc}, f_{DPt} = \frac{s}{\sqrt{3}} - b_c s_m - s_{yt} W_c, b_c = \frac{\sqrt{3}(R_c W_c - R_t W_t)}{R_c W_c + R_t W_t},$$

$$b_c = \frac{\sqrt{3}(R_b - R_c)}{2R_b - R_c}, 0 \leq W \leq 1, s_{yt} = \frac{2R_c W_c R_t W_t}{\sqrt{3}(R_c W_c + R_t W_t)}, s_{yc} = \frac{2R_b R_c}{\sqrt{3}(2R_b - R_c)},$$

де σ_e – еквівалентні напруження; σ_m – середні напруження; $\beta_t, \beta_c, \sigma_{yt}, \sigma_{yc}$ – константи, які визначаються межею міцності при одноосьовому розтягу R_t , межею міцності при одноосьовому стиску R_c і межею міцності при двохосьовому стиску R_b ; Ω_c, Ω_t – функції зміцнення/зменшення при стиску і розтягу.

Функція поверхні плинності Менетрея – Вілема (рис. 2)

$$f_{MW}(I_1, J_2, J_3) = 0, \quad f_{MW} = \frac{c_2}{c_3} \sqrt{2x + rr} + r^2 - \frac{1}{c_3}, \quad c_2 = f(\bar{R}_t, \bar{R}_c, \bar{R}_b), \quad c_3 = f(\bar{R}_c), \quad \bar{R}_t = R_t W_{tc},$$

$$\bar{R}_c = R_c W_c, \quad \bar{R}_b = R_b W_c, \quad W_{tc} = \begin{cases} W_t, & \text{якщо } k_c \leq k_{cm} \\ W_t W_c, & \text{якщо } k_c > k_{cm} \end{cases}, \quad x = f(I_1), \quad r = f(J_2), \quad r = f(J_2, J_3),$$

де I_1, J_1, J_2 – інваріанти тензора напружень; k_c – параметр зміцнення; k_{cm} – константа матеріалу.

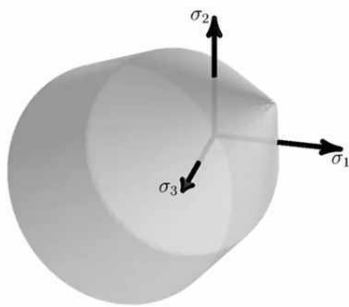


Рис. 1. Поверхня плинності Друккера - Прагера

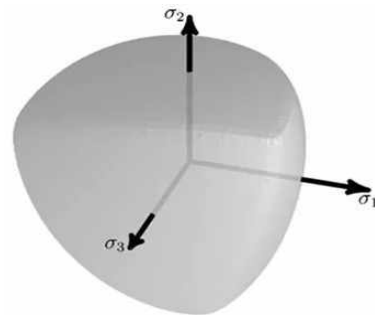


Рис. 2. Поверхня плинності Менетрей - Вілема

Функція пластичного потенціалу, що описує розвиток пластичних деформацій може відрізнятися від форми поверхні плинності. У цьому випадку використовується неасоційований закон пластичної течії. Це, наприклад, необхідно в тих випадках, коли необхідно врахувати ділатансію — зміну обсягу матеріалу при зсувній деформації. У моделі ДП можна використовувати або асоційований, або неасоційований закон пластичної течії. А в моделі МВ використовується тільки неасоційований закон. Якщо використовується неасоційований закон течії, матриця жорсткості стає несиметричною.

Дослідження балок. Лабораторні випробування залізобетонних балок (рис. 3, 4) проводилися з урахуванням вимог ДСТУ Б В.2.7-214: 2009.



Рис. 3. Залізобетонна балка готова до випробувань



Рис. 4. Залізобетонна балка після руйнування

Результати випробувань наведено в табл. 1.

Математична модель для випробування залізобетонних балок (рис. 5) включає в себе бетонний паралелепіпед розміром 1000×220×100 мм і два елементи армування довжиною 1000 мм і діаметром 12 мм кожен. Механічні характеристики матеріалів, що були використані в розрахунках залізобетонних балок наведено в табл. 2 [14].

Таблиця 1
Прогини залізобетонної балки при різних величинах навантажень

Навантаження [Н]	Прогини [м]
12262,50	0,00006
15328,13	0,00012
18393,75	0,00020
21459,38	0,00031
24525,00	0,00042
27590,63	0,00055
30656,25	0,00070
33721,88	0,00084
36787,50	0,00101
39853,13	0,00110
42918,75	0,00130

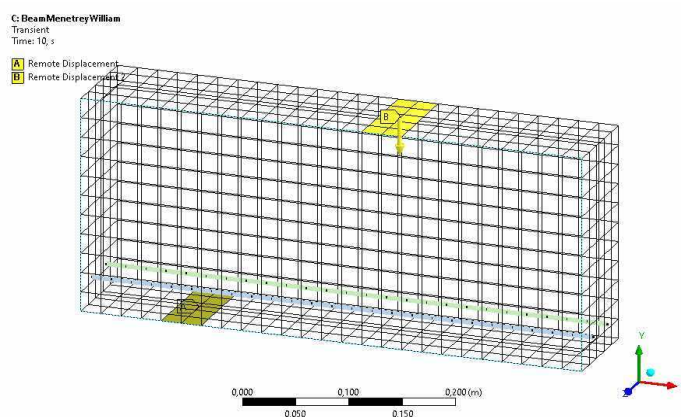


Рис. 5. Розрахункова модель балки

Механічні характеристики використаних в розрахунках матеріалів [14]

Таблиця 2

Параметр	Значення
Загальні параметри лінійної та нелінійної моделі бетону	
Модуль Юнга	3E+10, Pa
Коефіцієнт Пуасона	0,18000
Модуль об'ємного стиску	1,5625E+10, Pa
Модуль зсуву	1,2712E+10, Pa
Гранична міцність на стиск	2,5E+07, Pa
Гранична міцність на розтяг	2,1E+06, Pa
Загальні параметри для нелінійних моделей бетону	
Одноосьова гранична міцність на стиск	2,5E+07, Pa
Одноосьова гранична міцність на розтяг	2,1E+06, Pa
Двоосьова міцність на стиск	3,0E+07, Pa
Пластична відносна деформація при одноосьовому стиску	0,0015000
Максимальна ефективна пластична відносна деформація при стиску	0,0035000
Відносне напруження на початку нелінійного зміцнення	0,90000
Залишкове відносне стискуєче напруження	0,20000
Гранична відносна пластична деформація при розтягу	0,00015000
Граничне відносне напруження при розтягу	0,100000
Особливі параметри моделі Друккера-Прагера	
Розтягнута і стисло-розтягнута ділатансія	0,25000
Ділатансія стиску	1,0000
Особливі параметри моделі Менетрея-Вілема	
Кут ділатансії	10 Градусів
Енергія утворення тріщин	100,00, Дж/м ²
Арматурна сталь	
Модуль Юнга	2E+11, Pa
Коефіцієнт Пуасона	0,30000
Модуль об'ємного стиску	1,6667E+11, Pa
Модуль зсуву	7,6923E+10, Pa
Гранична міцність на стиск	0, MPa
Межа плинності на стиск	2,5E+08, Pa
Гранична міцність на розтяг	4,6 E+08, Pa
Межа плинності на розтяг	2,5, E+08, Pa

При побудові розрахункової СЕ моделі для чисельного аналізу враховано симетрію розрахункової області. При створенні моделі використано скінченні елементи: для бетону (B35) – SOLID186, для арматури (сталь А-300) – REINF264.

SOLID186 – тривимірний твердий елемент, що складається з 20 вузлів, який демонструє поведінку квадратичного зміщення. Елемент визначається 20 вузлами, що мають три ступені свободи зрушення на вузол в вузлових напрямках x, y і z. Елемент підтримує пластичність, гіпереластичність, повзучість, зміцнення напруженням, великі відхилення і великі деформації.

REINF264 застосовується в аналізах структурного посилення 3D – балок, оболонок і твердих елементів. Елемент підходить для моделювання волокон армування з довільною орієнтацією. Кожне волокно моделюється окремо як елемент, який має тільки одноосову жорсткість. Елемент REINF264 має властивості пластичності, зміцнення напруженням, повзучості, і великих деформацій.

Для створення сітки арматури використовувався елемент MESH200.

Для покращання збіжності розрахунку та раціонального використання розрахункових ресурсів завантажування математичних моделей балок виконувалась шляхом переміщення зони прикладання навантаження в напрямку (-Y). Максимальна величина переміщення склала 1 мм. При цьому максимальні вертикальні деформації (прогини) в центрі прольоту балок склали 1,25 мм, 1,38 мм, 1,43 мм відповідно в ЛМ, моделі ДП і моделі МВ. Необхідні для таких переміщень зусилля визначалися шляхом введення в розрахунок параметра Force Reaction (сила реакції) який знімався безпосередньо в зоні прикладання деформацій до балки.

Розподіл еквівалентних напружень в напівбалках з різними моделями поведінки показано на рис. 6 – 8. Добре видно, що лінійна модель має напруження, які значно перевищують межу міцності бетону як на стиск, так і на розтяг. У реальних умовах при одноосових і двохосових завантаженнях такі значення не можливі.

На рис. 7 і 8 видно відмінність як в максимальному досягнутих напруженнях, так і в безпосередньому розподілі полів напружень в моделях ДП і МВ.

Модель МВ точніше показує вужчу зону еквівалентних напружень по лінії «навантаження - опора» яка краще відповідає характеру руйнування балки. При лабораторних випробуваннях руйнування залізобетонної балки відбулося в зоні максимальних поперечних напружень (рис. 4).

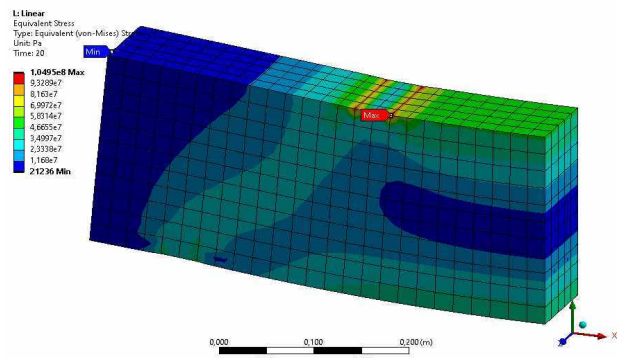


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень в залізобетонній балці з лінійною моделлю бетону

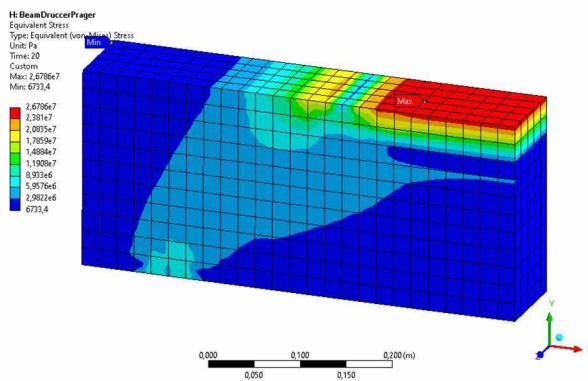


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень в залізобетонній балці модель Друккера — Прагера

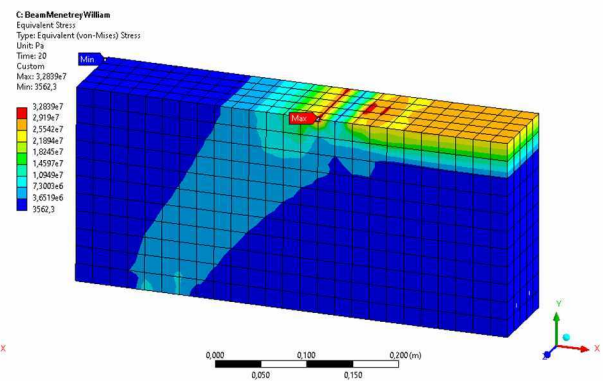


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень в залізобетонній балці модель Менетрея — Вілема

Дотичні напруження в даній зоні з деякими відмінностями добре відображають обидві нелінійні моделі бетону (рис. 9, 10).

Розподіл поздовжніх напружень в моделях ДП (рис. 11) і МВ (рис. 12) відрізняється не суттєво за винятком кількох локальних зон в зоні прикладання навантаження. Як і очікувалося, лінійна модель (рис. 13), дає неприйнятні значення як за максимальними значеннями поздовжніх напружень, так і за їхніми розподіленням

Розподіл поздовжніх напружень в арматурі показано на рисунках 14 – 16.

Максимальні поздовжні напруження в арматурі моделі ДП становлять 80,6 МПа, моделі МВ – 82,6 МПа. Ці відмінності підтверджують більш жорстку поведінку бетону в моделі МВ. У лінійної моделі бетону поздовжні напруження в арматурі досягають 229 МПа, що пов'язано з відсутністю в даній моделі пластичних деформацій.

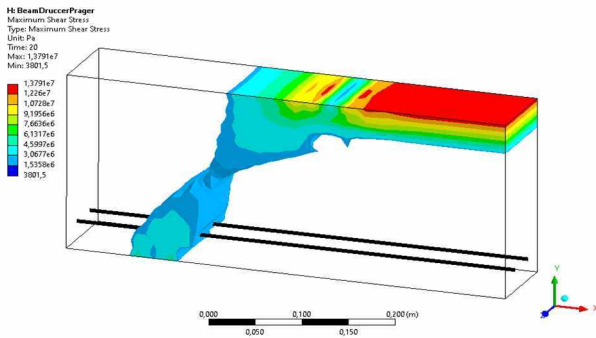


Рис. 9. Ізоповхні максимальних дотичних напружень в залізобетонній балці. модель Друккера — Прагера

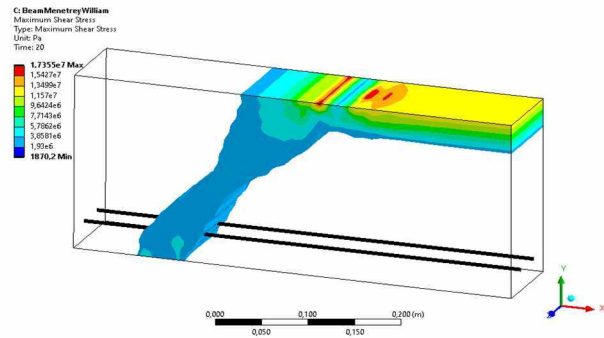


Рис. 10. Ізоповхні максимальних дотичних напружень в залізобетонній балці модель Менетрея — Вілема

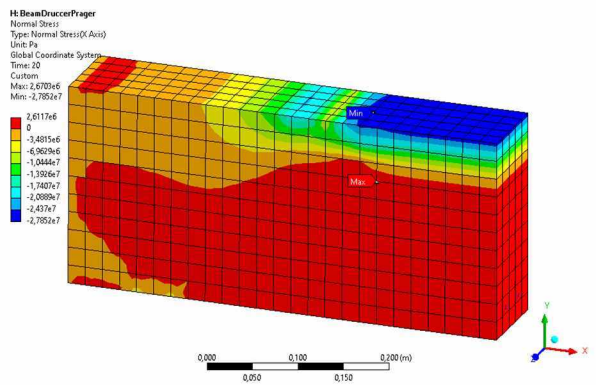


Рис. 11. Нормальні напруження в залізобетонній балці, модель Друккера — Прагера

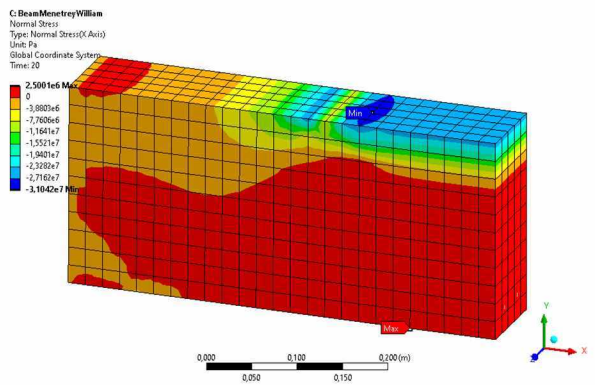


Рис. 12. Нормальні напруження в залізобетонній балці, модель Менетрея — Вілема

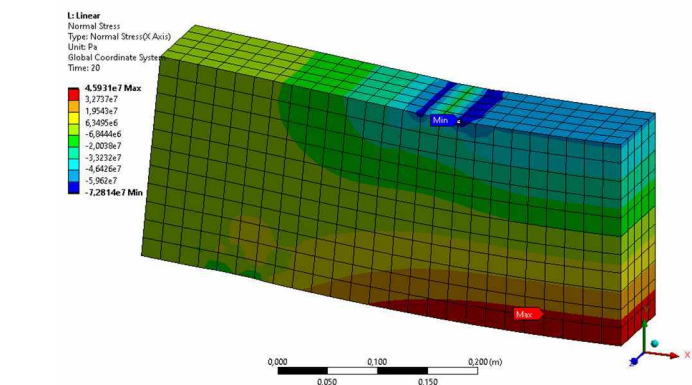


Рис. 13. Нормальні напруження в залізобетонній балці, лінійна модель

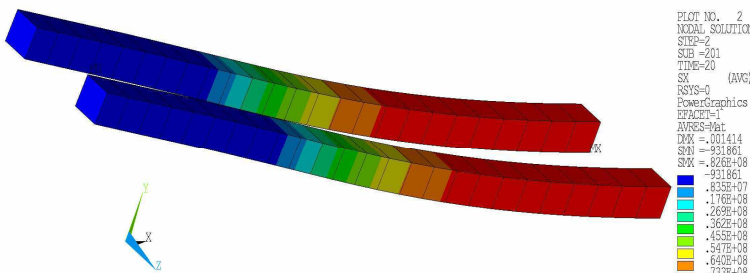


Рис. 14. Повздовжні напруження в арматурі в моделі Друккера-Прагера

При порівнянні прогинів математичних моделей балок і балок, випробуваних в лабораторії (рис. 17) помітний більш лінійний характер деформацій останніх. Однак в цілому, значення досить близькі. Для отримання більшої збіжності результатів математичної і реальної моделі бетону, в ДП і МВ моделях необхідно провести корекцію параметрів пластичної деформації і ділатансії. На графіку також видно що модель ДП дає більші прогини.

На рис. 18 показані графіки максимальних еквівалентних напружень в нелінійних моделях бетону. З графіків видно, що до моменту утворення тріщин обидві моделі ведуть себе практично однаково. Проте все змінюється з початком утворення тріщин. У моделі ДП утворення тріщин починається при менших напруженнях. На графіку

ДП чітко видно утворення п'яти тріщин. Модель МВ показує утворення лише двох тріщин, проте втрати напружень від даних тріщин набагато більші, ніж в моделі ДП. Даний факт ще раз підкреслює більш жорсткий характер поведінки бетону в моделі МВ.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Порівняння результатів експериментальної частини, що проводилась в лабораторних умовах та результатів математичного моделювання показало ефективність як моделі Друккера – Прагера так і моделі Менетрея – Вілема. Модель Менетрея – Вілема моделює більш жорстку та крихку поведінку бетону при менших деформаціях. Для досягнення повної збіжності в поведінці реального залізобетону та його математичних моделей необхідні попередні випробування відповідних зразків бетону. Це дозволить отримати нелінійні характеристики максимально наближені до реальних. Лінійна модель бетону може бути використана тільки в межах пружної поведінки бетону. Подальші роботи повинні бути направлені на накопичення експериментальних та розрахункових даних які б дозволили стандартизувати специфічні характеристики бетонів для розрахунків їх поведінки за межею лінійності.

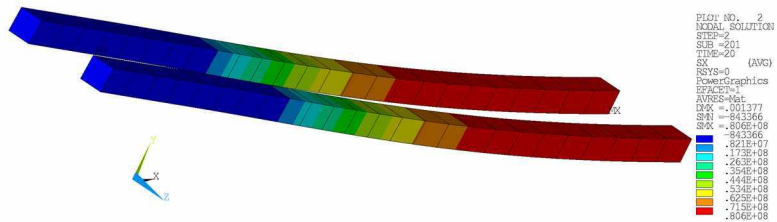


Рис. 15. Повздовжні напруження в арматурі в моделі Менетрея-Вілема

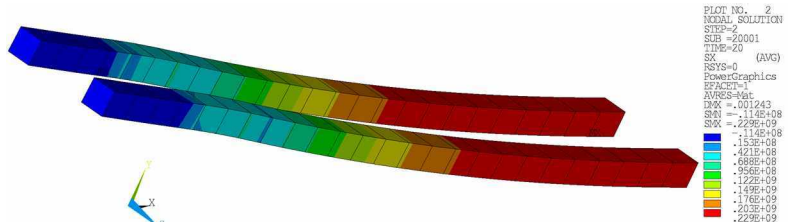


Рис. 16. Повздовжні напруження в арматурі лінійної моделі

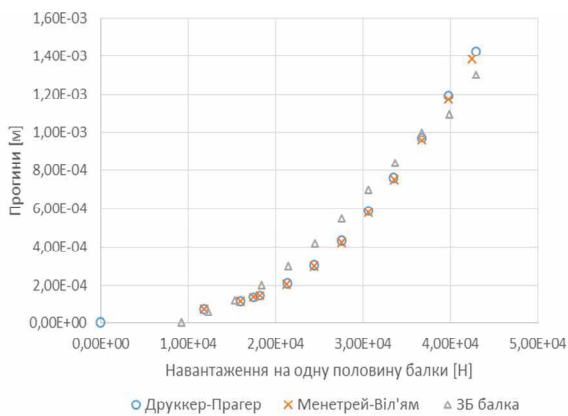


Рис. 17. Прогини математичних моделей та реальних залізобетонних бал

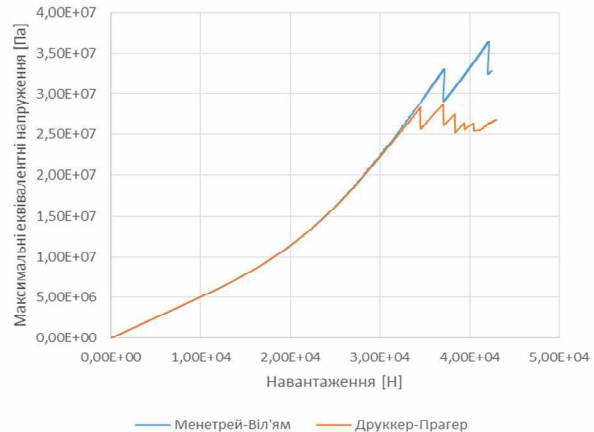


Рис. 18. Еквівалентні напруження в нелінійних математичних моделях балок

Список літератури

1. Ngo, D., & Scordelis, A. C. Finite element analysis of reinforced concrete beams. *ACI Journal*, 64(3), 1967, 152–163.
2. Sakhno S., Liulchenko Y., Chyrva T., Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method, *Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph.* — Sofia: Publishing House “St.Ivan Rilski”, 2020. , p. 326 — 340.
3. An, X., & Maekawa, K. Computer aided reinforcement design of RC structures. *Computers and Concrete*, 1(1), 2004, 15–30.
4. de Borst, R. Fracture in quasi-brittle materials: A review of continuum damage-based approaches. *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 2002, 95–112.
5. Hu, H. T., & Lin, Y. Ultimate analysis of PWR prestressed concrete containment subjected to internal pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83, 2006, 161–167.
6. Khelifa, M., Oudjene, M., & Khennane, A. Fracture in sheet metal forming: Effect of ductile damage evolution. *Computers & Structures*, 85(3/4), 2007, 205–212.

7. **Khennane, A.** Performance design of reinforced concrete slabs using commercial finite element software. *Structural Concrete*,6(4), 2005, 141–147.
8. **Malm, R.** Shear crack in concrete structures subjected to in-plane stresses. Licentiate thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 2006
9. **Mercan, B., Schultz, A. E., & Stolarski, H. K.** Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Engineering Structures*,32, 2010, 2804–2813.
10. **Syroka, E., Bobinski, J., & Tejchman, J.** FE analysis of reinforced concrete corbels with enhanced continuum models. *Finite Element in Analysis and Design*,47, 2011, 1066–1078.
11. **Tabatai, S. M. R., & Mosalam, K. M.** Computational platform for non-linear analysis/optimal design of reinforced concrete structures. *Engineering Computations*,18(5), 2001, 726–743.
12. **Tanimura, Y., & Sato, T.** Evaluation of shear strength of deep beams with stirrups. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Japan*,46(1), 2005, 53–56.
13. **Willam, K. J., & Warnke, E. P.** Constitutive models for the triaxial behavior of concrete. *Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering*,19, 1975, 1–30.
14. **Сахно С.І., Люльченко Є.В., Білашенко К.С., Домнічев А.О.** Дослідження застосовності нелінійних математичних моделей міцності бетону для моделювання руйнування бетонних призм. *Кр.Ріг – наук. техн. зб. КНУ Гірничий вісник №107*, 2020, 68-73.

Рукопис подано до редакції 15.10.2020

УДК 681.54: 658.562.3

С. А. РУБАН, І. А. МАРИНИЧ, кандидати техн. наук, доценти, М. Є. ФЕДОРОВ, аспірант
Криворізький національний університет

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПІДГОТОВКИ ШИХТИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ НА БАЗІ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ГІПЕРСТІЙКОСТІ

Мета. Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів для виготовлення залізорудних котунів, забезпечення заданої вологості шихти шляхом формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування, зокрема теорії адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості (для розробки структури системи керування та алгоритмів її функціонування), теорії ідентифікації систем (для вибору і обґрунтування структури математичної моделі об'єкту керування), методи імітаційного моделювання (для тестування розробленої системи на ЕОМ).

Наукова новизна. Отримав подальший розвиток метод адаптивного керування процесами транспортування та дозування компонентів шихти шляхом формування адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості, що забезпечує інваріантність системи до дії збурень, пов'язаних зі змінами транспортного запізнення об'єкту керування внаслідок змін режимів роботи тракту шихтопідготовки та якості вхідної сировини.

Практична значимість. Вирішення завдання забезпечення заданого вмісту складових матеріалів (концентрат, вапно, бентоніт), заданої вологості та сталості складу шихти у часі дозволяє стабілізувати процес огрудкування, що позитивно відображається на якості сирих котунів, збільшенні продуктивності огрудковувачів і випалювальної машини.

Результати. Для забезпечення підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів при виготовленні залізорудних котунів запропоновано використовувати для формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти підхід на базі теорії гіперстійкості, що забезпечує високу якість процесу регулювання та адаптацію до змін транспортного запізнення об'єкту керування. Виконано комп'ютерне моделювання системи керування продуктивністю групового живильника концентрату фабрики огрудкування на базі методів теорії гіперстійкості. Аналіз результатів моделювання запропонованої системи показує, що застосування методу формування адаптивного керування на базі теорії гіперстійкості забезпечує зменшення часу перехідного процесу з 60 с до 40 с у порівнянні з системою на базі типового ПІД-регулятора, одночасно із забезпеченням аперіодичного характеру перехідного процесу із перерегулюванням в межах 25 % та може бути рекомендовано до впровадження.

Ключові слова: автоматизація, адаптивне керування, дозування, груповий дозатор, фабрика огрудкування, шихта, котуни.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-108-34-39

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Якісна підготовка шихти для виготовлення залізорудних котунів на фабриці огрудкування є одним з найголовніших фак-