

УДК 624.016: 624.046.2

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ БЕТОННИМ ВЕРХНІМ ПОЯСОМ І ЗОВНІШНІМ (ВИНЕСЕНИМ) АРМУВАННЯМ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКОВОЇ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК С ВЕРХНИМ БЕТОННЫМ ПОЯСОМ И ВНЕШНИМ (ВЫНЕСЕННЫМ) АРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

METHODICAL BASES OF CALCULATION OF THE STRENGTH THE NORMAL SECTION OF STEEL-CONCRETE BEAMS WITH OF CONCRETE UPPER BELT AND THE OUTER (REMOTE) REINFORCEMENT ON THE BASIS OF THE CALCULATED DEFORMATION MODEL

Галінська Т.А., к.т.н., доцент, Муравльов В.В., к.т.н., доцент, (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка), Овсій М.О. (ПП “Будекспертиза”, м. Полтава)

Галинская Т.А., к.т.н., доцент, Муравлёв В.В., к.т.н., доцент (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка), Овсий Н.А. (ЧП “Стройэкспертиза”, г. Полтава)

Galinska T.A., Ph.D. in Engineering, Associate Proffessor, Muravl'ov V.V., Ph.D. in Engineering, Associate Proffessor (Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk), Ovsiy N.A. (PE “Building expertise”, city of Poltava)

Запропонована методика дозволяє проводити розрахунок міцності нормального перерізу сталевобетонних балок з верхнім бетонним поясом і зовнішнім (винесеним) армуванням (СББВА) залежно від напружено-деформованого стану (НДС) в момент руйнування їх компонентів (бетону і конструкційного приведенного сталюого профілю).

Предложенная методика позволяет проводить расчёт прочности нормального сечения сталевобетонных балок с верхним бетонным поясом и внешним (вынесенным) армированием в зависимости от напряжённо-деформированного состояния в момент разрушения их компонентов (бетона и конструкционного приведенного стального профиля).

The proposed method allows to carry out calculation of the strength the normal section of steel-concrete beams with concrete upper belt and the outer (remote) reinforcement depending on the stress-strain state at the time of the destruction of their components (concrete and structural of the reduced steel profile).

Ключові слова:

сталь, бетон, балка, нормальний, переріз, напруження, деформації, міцність, сталь, бетон, балка, нормальное, сечение, напряжения, деформации, прочность.

steel, concrete, beam, normal, cross-section, stress, strain, strength.

Постановка проблеми. Зв'язок з науковими і практичними завданнями. Провідні вітчизняні науковці Ю.Г. Аметов, А.М. Бамбура., О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, Л.І. Стороженко, В.Г. Тарасюк, які є співавторами розробки нині діючих нормативних документів [1], в своїй роботі [2] відзначають необхідність подальшої роботи над редакцією ДБН «Сталезалізобетонні конструкції» [1]. Одним із напрямків удосконалення норм [1] є розробка конкретних практичних методів розрахунку і проектування сталезалізобетонних конструкцій з урахуванням їх основних положень та окремих положень «Єврокоду-4» [3], що діє в країнах ЄС.

Аналіз публікацій. Виділення не вирішених питань. В роботі [4] В.В. Муравльовим обґрунтована ефективність застосування залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій з винесеним армуванням, дана їх загальна класифікація та проаналізовані недоліки та переваги конструктивних рішень сталезалізобетонних балок із зовнішнім армуванням, що були досліджені в роботах за участю А.В. Іванюка [5], О.А. Крупченка [6] і Т.П. Куч [7]. У свій час А.П. Васильєв та В.М. Голосов в роботі [8] провели узагальнюючий аналіз стану та перспектив ефективного застосування конструкцій з зовнішнім армуванням, який показав, що, наприклад, улаштування в будівлях із сталевим чи залізобетонним каркасом монолітних перекриттів із профільованим сталевим настилом дозволить, порівняно з монолітним залізобетонним перекриттям по сталевим балкам, зменшити трудовитрати в 1,5 рази при однаковій вартості 1 м² перекриття, а витрати бетону - на 35%.

Зменшення матеріалоемності несучих сталезалізобетонних конструкцій досягається за рахунок: застосування високоміцних й ефективних матеріалів (бетону і конструкційної сталі), опір яких використовується у повному обсязі; створення нових конструктивних форм їх поперечних перерізів шляхом раціонального поєднання прокатних профілів та залізобетону. Проектування цих конструкцій ґальмується відсутністю оптимальних методів їх розрахунку, сутність яких полягає у визначенні мінімального

перерізу арматури і конструкційної сталі, розмірів поперечного перерізу та способів армування складних конструктивних елементів.

Діючі методи розрахунку сталезалізобетонних (СЗБ) конструкцій (елементів), що згинаються, базуються на розрахунку за граничними напруженнями з використанням прямокутних епюр напружень для обох матеріалів [3, 9]. Запропонована в роботах [2, 10] нова концепція розрахунку, впроваджує в практику метод граничних деформацій, який дозволить наблизитися до реального напружено-деформованого стану (НДС) СЗБ конструкцій (елементів). В той же час запропоновані в роботах [2, 10] і нормах [1] розрахункові положення не враховують: загальну деформаційну модель елемента; конструкцію його перерізу; характер і міцність зв'язків між бетоном і конструктивною арматурою; вплив зусиль зсуву.

За останні два роки методи розрахунку сталезалізобетонних елементів зазнали подальшого розвитку на основі розрахункової деформаційної моделі, яка враховує реальні діаграми роботи бетону і арматури. Так в роботах [11-13] приведені методики розрахунку сталобетонних балок суцільного прямокутного перерізу та двотаврового перерізу з бетонною верхньою полицею, які дозволяють визначити міцність нормального їх перерізу з урахуванням НДС їх компонентів в момент руйнування.

В той же час методи розрахунку СББВА за рівнем розвитку відстають від методів розрахунку залізобетонних елементів, які впроваджують у практику розрахунку з використанням деформаційної моделі роботи бетону. Для підвищення ефективності та більш широкого розповсюдження СББВА необхідне удосконалення теорії і методів їх розрахунку. Вищевикладене визначило актуальність теми дослідження, її важливе народногосподарське значення.

Загальна мета дослідження полягає у розробці методики розрахунку міцності нормального перерізу сталобетонних балок з верхнім бетонним поясом і зовнішнім (винесеним) армуванням (СББВА) залежно від НДС в момент руйнування їх компонентів (бетону і конструкційного приведенного сталюого профілю). Досягнення мети здійснювалося за рахунок вирішення наступних задач, які полягали в:

- обґрунтуванні умов застосування деформаційної моделі та граничних критеріїв розрахунку;
- розробці методики розрахунку оптимального перерізу конструктивного сталюого двотаврового профілю (КСДП), яким армований нормальний переріз СББВА;
- отриманні рішення задач міцності нормального перерізу СББВА, що згинаються, залежно від НДС їх компонентів: бетону і конструкційного сталюого профілю в момент руйнування.

Викладення основного матеріалу. Обґрунтування отриманих результатів. Методичні основи розрахунку міцності нормального перерізу сталобетонних балок з верхнім бетонним поясом і зовнішнім (винесеним)

армуванням (СББВА) були розроблені на основі розрахункової деформаційної моделі з використанням основних практичних наукових положень робіт Є.М. Баби́ча [14, 15], А.Я. Барашикова [16, 17], А.М. Бамбури [10, 18], В.П. Митрофанова [19, 20], Кочкарьова Д.В і Баби́ча В.І. [21], Джеймса Дж. МакГрегора і Джеймса К. Уайта [22] та окремих положень діючих вітчизняних і зарубіжних норм [1, 23, 24] і включають в себе рішення двох задач: підбору перерізу конструкційного сталюого двотаврового профілю (КСДП) залежно від висоти бетонного поясу СББВА, яка є прямою задачею оптимізаційного проектування; перевірки міцності нормального перерізу СББВА.

1. Задачі перевірки міцності і підбору перерізу КСДП нормального перерізу СББВА, що згинаються, базуються на наступних критеріях:

- задача підбору оптимального перерізу A_a КСДП, який є несучим елементом нормального перерізу СББВА, вирішується на основі критерію:

$$A(\epsilon_{cu}; \epsilon_{au}) = A_a = \min, \quad (1)$$

де $A_a = 2 \times A_f + A_w$ - площа перерізу КСДП, яка відповідно складається із суми площ його полиць і ребра; ϵ_{cu} - граничні відносні деформації стиснення в крайньому верхньому волокні стисненої зони бетону нормального перерізу бетонної полиці СББВА, які приймаються рівними $\epsilon_{cu} = 0,0035$ (при $f_{cd} = 8 \dots 60$ МПа) або відповідно даних табл. 1 [11-13, табл.1.1] чи табл.3.1 [23]; ϵ_{au} - граничні відносні деформації розтягу в крайньому нижньому волокні розтягнутої зони КСДП, який є несучим елементом нормального перерізу СББВА, значення яких приймаються відповідно положень п.6.3.3 [1].

Таблиця 1

Середні значення величини ϵ_{cu} для стисненої зони бетону прямокутної форми

f_{cd} , МПа	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$\epsilon_{cu} \times 10^{-3}$	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0

- задача перевірки міцності нормального прямокутного перерізу сталобетонних балок базується на критеріях:

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a > \epsilon_{au}) = \max; M(\epsilon_{cu}; \epsilon_{au}) = \max; M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a < \epsilon_{au}) = \max, \quad (2)$$

де M – максимальне значення згинального моменту, який може прийняти нормальний переріз сталобетонних балок з верхнім бетонним поясом і зовнішнім (винесеним) армуванням; ϵ_a - відносні деформації в крайньому нижньому волокні розтягнутої зони КСДП.

2. Для вирішення вище відмічених задач були прийняті наступні передумови розрахунку:

- на граничній стадії деформування розподіл відносних деформацій по висоті нормального перерізу СББВА здійснюється за лінійними залежностями (3) і (4), тобто підтверджується гіпотеза плоских перерізів:

$$\text{при } \varepsilon_a = \varepsilon_{au} \quad (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{au})/h = \varepsilon_{cu}/Y_B, \quad (3)$$

$$\text{при } \varepsilon_a > \varepsilon_{au}; \varepsilon_a < \varepsilon_{au} \quad (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_a)/h = \varepsilon_{cu}/Y_B, \quad (4)$$

де h , Y_B – відповідно висота СББВА і висота від верхньої фібри бетону полиці до горизонтальної нульової лінії (вісі) її нормального перерізу;

Між бетонною верхньою полицею і КСДП існують зв'язки у вигляді жорстких вертикальних чи похилих стержнів, які забезпечують сумісну (одночасну) їх роботу в нормальному перерізі СББВА, в результаті чого проявляються максимальні композитні властивості їх компонентів, тобто відносні деформації бетону і КСДП по висоті нормального перерізу змінюються по закону плоских перерізів;

- нормальне зосереджене зусилля (F_C) в стисненій зоні бетону перерізу верхньої полиці СББВА, стан якої в момент руйнування описується діаграмою “напруження - відносні деформації” (“ $\sigma_c - \varepsilon_c$ ”) (рис. 1), визначається за залежностями (5), яка була запропонована науковцями в роботах [22, 24, 25], та (6):

$$F_C = 0,85 \times f_{cd} \times \beta_1 \times Y_B \times b, \text{ при } \beta_1 \times Y_B \leq T_f \quad (5)$$

$$F_C = 0,85 \times f_{cd} \times T_f \times b, \text{ при } \beta_1 \times Y_B > T_f \quad (6)$$

де f_{cd} - розрахункове значення міцності бетону на стиск; b – ширина перерізу верхньої полиці СББВА; β_1 – приведений коефіцієнт стисненої зони бетону по її висоті, який в результаті аналізу експериментальних досліджень був запропонований Джеймсом Дж. МакГрегором і Джеймсом К. Уайтом в 1997 році [22], визначається за залежностями, що приведені в табл.2 відповідно даних наукової роботи [25] і норм [24]:

Таблиця 2

Значення коефіцієнта приведення стисненої зони бетону β_1 до висоти Y_B залежно від розрахункового значення міцності бетону на стиск f_{cd}

варіант джерело	а		б		в	
	Границі зміни f_{cd}	β_1	Границі зміни f_{cd}	β_1	Границі зміни f_{cd}	β_1
[24]	$f_{cd} \leq 28 \text{ МПа}$	0,85	28 МПа < f_{cd} < 56 МПа	$0,85 - 0,05 \times (f_{cd} - 28 \text{ МПа}) / 7 \text{ МПа}$	$f_{cd} \leq 56 \text{ МПа}$	0,65
[25]	$f_{cd} \leq 56 \text{ МПа}$	0,85	56 МПа < f_{cd} < 126 МПа	$0,97 - 0,015 \times f_{cd} / 7 \text{ МПа}$	$f_{cd} \leq 126 \text{ МПа}$	0,7

- відстань від найбільш стисненої фібри бетону верхньої полиці в нормальному перерізу СББВА до осі прикладення його зосередженого зусилля стиснення (F_C) визначається за залежностями (7), яка була запропонована О.Ф.Ільїним в роботі [26, (3)], та (8):

$$Y_B - z_1 = [0,5 - 238,1 \times f_{cd}^{0,69} / E_a] \times \beta_1 \times Y_B, \text{ при } \beta_1 \times Y_B \leq T_f \quad (7)$$

$$T_f/2, \text{ при } \beta_1 \times Y_B > T_f \quad (8)$$

- для розрахунку міцності нормального перерізу СББВА були прийняті спрощені діаграми “напруження - відносні деформації” (“ $\sigma_a - \epsilon_a$ ”) конструкційної сталі (рис. 2) відповідно рекомендацій п.6.3.2 [1]. Значення граничних деформацій конструкційної сталі визначаємо відповідно рекомендацій п.6.3.3 [1] за залежністю:

$$\epsilon_{au} = 16,5 \times f_y / E_a, \quad (9)$$

де f_y – характеристичний опір арматурної сталі на границі текучості; E_a – модуль пружності конструкційної сталі;

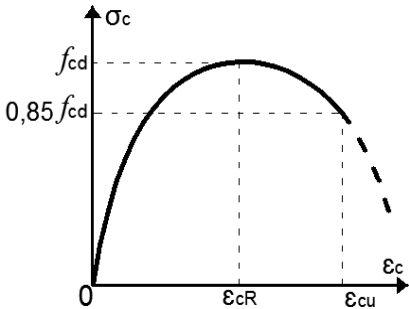


Рис.1. Діаграма стиснення бетону $\sigma_c - \epsilon_c$

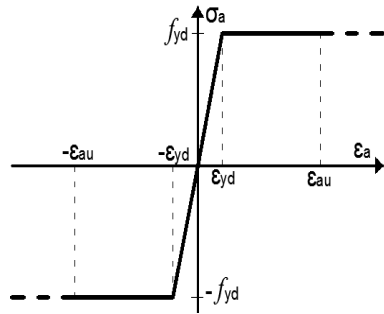


Рис.2. Діаграма стиснення-розтяг для конструкційної сталі $\sigma_a - \epsilon_a$

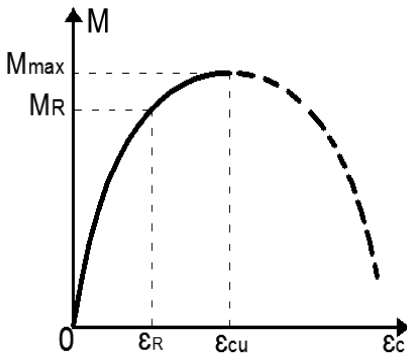


Рис.3. Діаграма стану СББВА трансформована з діаграми $\sigma_c - \epsilon_c$

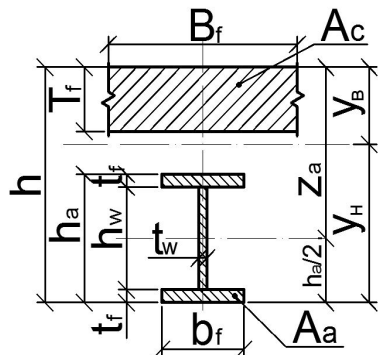


Рис.4. Загальний приведений переріз СББВА

- розрахунок міцності і оптимальної площі КСДП нормального перерізу СББВА здійснюється на основі розрахункової деформаційної моделі з використанням критеріїв появи граничного стану, які викладені в положеннях п.5.6.1.1, п.5.6.1.6 і п.5.6.2.3 ДБН В.2.6-160:2010 [1], і діаграм стану матеріалів (рис.1 і рис.2). Основним критерієм появи граничного

стану в нормальному перерізі СББВА є екстремальний критерій досягнення деформаціями стисненого бетону граничних значень ε_{cu} , при якому несуча здатність буде максимальною (M_{max}) (див. рис.3);

- при проведенні порівняння перерізів сталобетонних балок з бетонною верхньою полицєю і сталевим несучим елементом, що має перерізи у вигляді двотавра (а), квадратної (б) чи круглої (в) труб, які розташовані на різній відстані від полиці, були отримані характеристичні ряди (див. рис. 5), які свідчать про залежність окремих їх величин. Типологічний аналіз різних варіантів армування нормального перерізу СББВА та їх міцностних величин показав, що усі перерізи можемо привести до одного приведенного, який наводиться на рис.4.

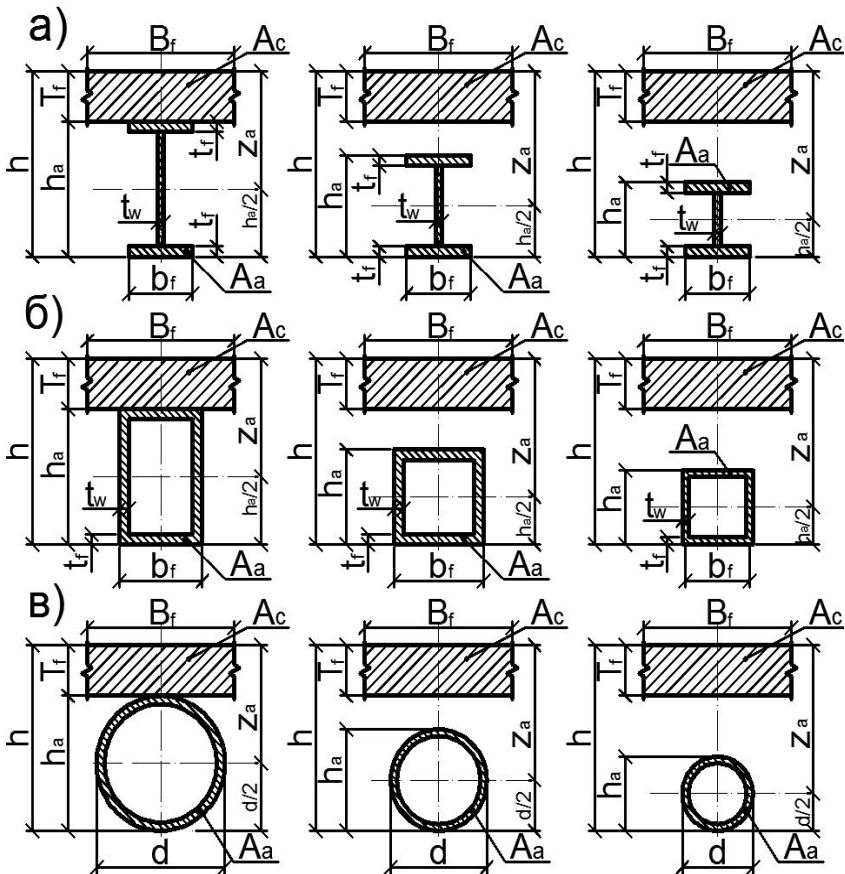


Рис.5. Характеристичні ряди перерізів сталобетонних балок з верхньою бетонною полицєю і винесеним армуванням (СББВА).

Далі приводяться розрахункові аналітичні залежності щодо вирішення задач перевірки міцності і підбору перерізу КСДП (жорсткого армування) нормального перерізу СББВА, які були отримані в результаті числових рішень.

3. Рішення задачі: підбір необхідного перерізу КСДП (A_a), яким армується нормальний переріз СББВА. Метою задачі є визначення оптимального перерізу КСДП СББВА, при якому деформації в крайніх верхній (бетонній) і нижній (стальній) фібрах її нормального перерізу одночасно досягають відповідно граничних значень ϵ_{cu} і ϵ_{au} .

Оптимальну площу перерізу КСДП (A_a) СББВА пропонується визначати за наступними залежностями:

$A_a = A_b \times \mu_{opt}$; $\mu_{opt} = [2 \times \Delta_Z \times \Delta_\epsilon \times (1 + \Delta_h) - \Delta_\epsilon - 1] / \{\alpha_a \times [2 \times \Delta_Z \times (1 + \Delta_h) - \Delta_h \times (1 + \Delta_\epsilon)]\}$, (10)
де $\alpha_a = E_a / E_b$ – коефіцієнт співвідношення модулів пружності конструктивної сталі і бетону; $\Delta_\epsilon = \epsilon_{cu} / \epsilon_{au}$ – коефіцієнт співвідношення величин граничних відносних деформацій бетону (ϵ_{cu}) і КСДП (ϵ_{au}); $\Delta_h = h_a / T_f$ – коефіцієнт співвідношення величин висоти КСДП (h_a) до висоти полиці СББВА (T_f); $\Delta_Z = Z_a / (T_f + h_a / 2)$ – коефіцієнт співвідношення величин висот приведенного нормального перерізу СББВА; $\mu_{opt} = A_a / A_b$ – оптимальний коефіцієнт армування конструктивним стальним двотавровим профілем (КСДП) нормального перерізу СББВА; $A_b = T_f \times V_f$ – площа перерізу верхньої бетонної полиці СББВА.

В результаті перетворень із залежності (10) можемо отримати залежності відносно величин Δ_ϵ і Δ_h :

$$\Delta_\epsilon = \{1 + \alpha_a \mu \times [2 \Delta_Z (1 + \Delta_h) - \Delta_h]\} / [\alpha_a \mu \Delta_h + 2 \Delta_Z (1 + \Delta_h) - 1], \quad (11)$$

$$\Delta_h = [\alpha_a \mu \times (2 \Delta_Z - \Delta_\epsilon - 1) - 2 \Delta_\epsilon \Delta_Z] / [2 \Delta_\epsilon \Delta_Z - 2 \alpha_a \mu \Delta_Z - \Delta_\epsilon - 1]. \quad (12)$$

Координати нейтральної лінії по висоті перерізу (h) СББВА маємо можливість визначити за залежностями при $h = Y_B + Y_H$:

$$Y_B = h \times \{[1/2 + \alpha_a \mu \Delta_Z \times (1 + \Delta_h/2)] / [(1 + \alpha_a \mu) \times (\Delta_Z + \Delta_Z \Delta_h/2 + \Delta_h/2)]\} \quad (13)$$

$$Y_H = h \times \{[\Delta_Z \times (\Delta_h + 2) + (1 + \alpha_a \mu) \times \Delta_h - 1] / [2 \times (1 + \alpha_a \mu) \times (\Delta_Z + \Delta_Z \Delta_h/2 + \Delta_h/2)]\} \quad (14)$$

В результаті розрахунків були отримані числові залежності між безрозмірними коефіцієнтами співвідношень Δ_ϵ , Δ_h , Δ_Z і добутком $\alpha_a \mu_{opt}$. Так значення добутку $\alpha_a \mu_{opt}$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень Δ_h та Δ_ϵ для нормального перерізу СББВА при коефіцієнті $\Delta_Z = 1$ приведені в табл.3, а при коефіцієнтах $\Delta_Z = 5$ і $\Delta_Z = 10$ – відповідно в табл.4 та табл.5.

Оптимальну площу перерізу КСДП (A_a) СББВА визначаємо за залежністю (10), задавшись вихідними величинами: розмірами перерізу бетонного верхнього поясу балки V_f і T_f ; міцностними характеристиками бетону і сталі: E_c , E_a , ϵ_{cu} і ϵ_{au} ; співвідношенням висот перерізів КСДП і балки: $\Delta_h = h_a / T_f$; співвідношенням величин висот Z_a : $\Delta_Z = Z_a / (T_f + h_a / 2)$.

4. Рішення задачі: перевірка міцності нормального перерізу СББВА. Метою задачі є визначення граничного значення параметру згинального моменту (M_u) заданого нормального перерізу СББВА і порівняння його з діючим у ньому моментом (M) від зовнішніх навантажень:

Таблиця 3

Значення добутку $\alpha_a \mu_{\text{опт}}$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень Δ_h та Δ_ε при коефіцієнті $\Delta_z=1$

$\Delta_\varepsilon \backslash \Delta_h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0043
0,06	-	-	-	-	-	-	-	0,0021	0,0134	0,0228
0,07	-	-	-	-	-	-	0,0059	0,0201	0,0318	0,0416
0,08	-	-	-	-	-	0,0053	0,0237	0,0385	0,0506	0,0607
0,09	-	-	-	-	-	0,0228	0,0418	0,0571	0,0697	0,0802
0,10	-	-	-	-	0,0154	0,0405	0,0602	0,0761	0,0891	0,100
0,11	-	-	-	-	0,0326	0,0586	0,0790	0,0954	0,1089	0,1202
0,12	-	-	-	0,0145	0,0500	0,0769	0,0980	0,1150	0,1290	0,1407
0,13	-	-	-	0,0310	0,0677	0,0956	0,1174	0,1350	0,1495	0,1617
0,14	-	-	-	0,0478	0,0857	0,1145	0,1372	0,1554	0,1704	0,1830
0,15	-	-	0,0110	0,0648	0,1040	0,1338	0,1572	0,1761	0,1917	0,2048
0,16	-	-	0,0265	0,0821	0,1226	0,1534	0,1777	0,1972	0,2134	0,2269
0,17	-	-	0,0423	0,0996	0,1415	0,1734	0,1985	0,2188	0,2355	0,2495
0,18	-	-	0,0583	0,1174	0,1607	0,1936	0,2196	0,2407	0,2580	0,2725
0,19	-	-	0,0745	0,1355	0,1802	0,2143	0,2412	0,2630	0,2809	0,2960
0,20	-	0,0001	0,0909	0,1538	0,2000	0,2353	0,2632	0,2857	0,3043	0,3200
0,21	-	0,0140	0,1076	0,1725	0,2202	0,2567	0,2855	0,3089	0,3282	0,3444
0,22	-	0,0281	0,1244	0,1914	0,2407	0,2784	0,3083	0,3325	0,3525	0,3694
0,23	-	0,0424	0,1415	0,2106	0,2615	0,3006	0,3315	0,3566	0,3774	0,3948
0,24	-	0,0568	0,1589	0,2302	0,2828	0,3232	0,3552	0,3812	0,4027	0,4208
0,25	-	0,0714	0,1765	0,2500	0,3043	0,3462	0,3793	0,4063	0,4286	0,4474
0,26	-	0,0862	0,1943	0,2702	0,3263	0,3696	0,4039	0,4318	0,4550	0,4745
0,27	-	0,1012	0,2124	0,2907	0,3487	0,3934	0,4290	0,4579	0,4819	0,5022
0,28	-	0,1163	0,2308	0,3115	0,3714	0,4177	0,4545	0,4845	0,5094	0,5304
0,29	-	0,1316	0,2494	0,3326	0,3946	0,4425	0,4806	0,5117	0,5375	0,5593
0,30	-	0,1471	0,2683	0,3542	0,4182	0,4677	0,5072	0,5395	0,5663	0,5889
0,31	-	0,1627	0,2875	0,3761	0,4422	0,4935	0,5344	0,5678	0,5956	0,6191

Таблиця 4

Значення добутку $\alpha_a \mu_{\text{опт}}$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень Δ_h та Δ_ε при коефіцієнті $\Delta_z=5$

$\Delta_\varepsilon \backslash \Delta_h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	-	0,0161	0,0258	0,0317	0,0356	0,0385	0,0406	0,0423	0,0436	0,0447
0,06	0,0074	0,0265	0,0364	0,0424	0,0464	0,0493	0,0515	0,0532	0,0546	0,0557
0,07	0,0174	0,0370	0,0470	0,0531	0,0573	0,0602	0,0625	0,0642	0,0656	0,0668
0,08	0,0275	0,0474	0,0577	0,0639	0,0681	0,0712	0,0734	0,0752	0,0767	0,0778
0,09	0,0375	0,0579	0,0683	0,0747	0,0790	0,0821	0,0844	0,0862	0,0877	0,0889
0,10	0,0476	0,0683	0,0790	0,0855	0,0899	0,0931	0,0954	0,0973	0,0988	0,1000
0,11	0,0577	0,0788	0,0897	0,0964	0,1008	0,1040	0,1065	0,1084	0,1099	0,1111
0,12	0,0678	0,0893	0,1004	0,1072	0,1118	0,1150	0,1175	0,1194	0,1210	0,1223
0,13	0,0779	0,0999	0,1112	0,1181	0,1227	0,1261	0,1286	0,1306	0,1321	0,1334
0,14	0,0880	0,1104	0,1219	0,1290	0,1337	0,1371	0,1397	0,1417	0,1433	0,1446
0,15	0,0981	0,1209	0,1327	0,1399	0,1447	0,1482	0,1508	0,1528	0,1545	0,1558
0,16	0,1083	0,1315	0,1435	0,1508	0,1557	0,1593	0,1619	0,1640	0,1657	0,1671
0,17	0,1184	0,1421	0,1543	0,1617	0,1668	0,1704	0,1731	0,1752	0,1769	0,1783
0,18	0,1286	0,1527	0,1651	0,1727	0,1778	0,1815	0,1843	0,1864	0,1882	0,1896
0,19	0,1388	0,1633	0,1760	0,1837	0,1889	0,1927	0,1955	0,1977	0,1995	0,2009
0,20	0,1489	0,1739	0,1868	0,1947	0,2000	0,2038	0,2067	0,2090	0,2108	0,2122
0,21	0,1591	0,1846	0,1977	0,2057	0,2111	0,2150	0,2180	0,2202	0,2221	0,2236
0,22	0,1693	0,1952	0,2086	0,2168	0,2223	0,2262	0,2292	0,2316	0,2334	0,2350
0,23	0,1795	0,2059	0,2195	0,2278	0,2334	0,2375	0,2405	0,2429	0,2448	0,2464
0,24	0,1898	0,2166	0,2304	0,2389	0,2446	0,2487	0,2518	0,2542	0,2562	0,2578
0,25	0,2000	0,2273	0,2414	0,2500	0,2558	0,2600	0,2632	0,2656	0,2676	0,2692
0,26	0,2102	0,2380	0,2523	0,2611	0,2670	0,2713	0,2745	0,2770	0,2790	0,2807
0,27	0,2205	0,2487	0,2633	0,2723	0,2783	0,2826	0,2859	0,2885	0,2905	0,2922
0,28	0,2308	0,2595	0,2743	0,2834	0,2896	0,2940	0,2973	0,2999	0,3020	0,3037
0,29	0,2410	0,2702	0,2854	0,2946	0,3008	0,3053	0,3087	0,3114	0,3135	0,3152
0,30	0,2513	0,2810	0,2964	0,3058	0,3121	0,3167	0,3202	0,3229	0,3250	0,3268
0,31	0,2616	0,2918	0,3075	0,3170	0,3235	0,3281	0,3316	0,3344	0,3366	0,3384

Таблиця 5

Значення добутку $\alpha_a \mu_{\text{опт}}$ залежно від величин коефіцієнтів співвідношень Δ_h та Δ_ε при коефіцієнті $\Delta_z=10$

$\Delta_\varepsilon \backslash \Delta_h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,0244	0,0337	0,0384	0,0412	0,0431	0,0445	0,0445	0,0463	0,0470	0,0475
0,06	0,0344	0,0439	0,0487	0,0516	0,0535	0,0549	0,0560	0,0568	0,0574	0,0580
0,07	0,0444	0,0541	0,0590	0,0620	0,0639	0,0654	0,0664	0,0673	0,0679	0,0685
0,08	0,0545	0,0643	0,0693	0,0723	0,0743	0,0758	0,0769	0,0777	0,0784	0,0790
0,09	0,0645	0,0745	0,0796	0,0827	0,0848	0,0862	0,0874	0,0882	0,0889	0,0895
0,10	0,0746	0,0848	0,0900	0,0931	0,0952	0,0967	0,0978	0,0987	0,0994	0,1000
0,11	0,0846	0,0950	0,1003	0,1035	0,1056	0,1072	0,1083	0,1092	0,1099	0,1105
0,12	0,0947	0,1053	0,1106	0,1139	0,1161	0,1176	0,1188	0,1197	0,1205	0,1211
0,13	0,1047	0,1155	0,1210	0,1243	0,1265	0,1281	0,1293	0,1303	0,1310	0,1316
0,14	0,1148	0,1258	0,1314	0,1347	0,1370	0,1386	0,1399	0,1408	0,1416	0,1422
0,15	0,1248	0,1360	0,1417	0,1452	0,1475	0,1491	0,1504	0,1513	0,1521	0,1528
0,16	0,1349	0,1463	0,1521	0,1556	0,1580	0,1597	0,1609	0,1619	0,1627	0,1633
0,17	0,1450	0,1566	0,1625	0,1661	0,1685	0,1702	0,1715	0,1725	0,1733	0,1739
0,18	0,1551	0,1669	0,1729	0,1765	0,1790	0,1807	0,1820	0,1830	0,1839	0,1845
0,19	0,1652	0,1772	0,1833	0,1870	0,1895	0,1913	0,1926	0,1936	0,1945	0,1951
0,20	0,1753	0,1875	0,1937	0,1975	0,2000	0,2018	0,2032	0,2042	0,2051	0,2058
0,21	0,1854	0,1978	0,2041	0,2080	0,2105	0,2124	0,2138	0,2148	0,2157	0,2164
0,22	0,1955	0,2081	0,2146	0,2185	0,2211	0,2229	0,2243	0,2254	0,2263	0,2270
0,23	0,2056	0,2185	0,2250	0,2290	0,2316	0,2335	0,2350	0,2361	0,2370	0,2377
0,24	0,2157	0,2288	0,2354	0,2395	0,2422	0,2441	0,2456	0,2467	0,2476	0,2484
0,25	0,2258	0,2391	0,2459	0,2500	0,2527	0,2547	0,2562	0,2574	0,2583	0,2590
0,26	0,2339	0,2495	0,2564	0,2605	0,2633	0,2653	0,2668	0,2680	0,2689	0,2697
0,27	0,2461	0,2598	0,2668	0,2711	0,2739	0,2759	0,2775	0,2787	0,2796	0,2804
0,28	0,2562	0,2702	0,2773	0,2816	0,2845	0,2866	0,2881	0,2893	0,2903	0,2911
0,29	0,2663	0,2806	0,2878	0,2922	0,2951	0,2972	0,2988	0,3000	0,3010	0,3018
0,30	0,2765	0,2909	0,2964	0,3027	0,3057	0,3079	0,3095	0,3107	0,3117	0,3126
0,31	0,2866	0,3013	0,3088	0,3133	0,3164	0,3185	0,3202	0,3214	0,3225	0,3233

$$M_u \geq M. \quad (15)$$

В результаті узагальнення було виділено три окремі випадки напружено-деформованого стану (НДС) нормального перерізу СББВА на стадії її руйнування чи при граничному стані залежно від положення нейтральної вісі по відношенню до сталого профілю і верхньої полиці (див. рис. 6):

- випадок “а”: коли в крайньому верхньому волокні стиснутої бетонної ділянки перерізу відносні деформації бетону досягають величини граничних деформацій стиску $\varepsilon_b = \varepsilon_{cu}$, а в крайньому нижньому волокні, що розтягується, відносні деформації КСДП змінюються у межах $\varepsilon_a > \varepsilon_{au}$, тобто існує зона пластичних деформацій;
- випадок “б”: коли відносні деформації бетону досягають величини $\varepsilon_b = \varepsilon_{cu}$, а відносні деформації КСДП - величини $\varepsilon_a = \varepsilon_{au}$;
- випадок “в”: коли відносні деформації бетону досягають величини $\varepsilon_b = \varepsilon_{cu}$, а відносні деформації КСДП змінюються у межах $\varepsilon_a < \varepsilon_{au}$.

Загальні рівняння рівноваги для кожного із випадків НДС нормального перерізу СББВА становлять:

- у випадках 1а, 2а:

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 \quad (16)$$

- у випадках 1б, 1в, 2б, 2в:

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 \quad (17)$$

- у випадку 3а:

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 + F_a' \times z_4 \quad (18)$$

- у випадках 3б, 3в:

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a' \times z_4 \quad (19)$$

де F_c ; F_a' ; F_a ; F_a^{pl} – сумарні нормальні зусилля в перерізі балок відповідно стиснутої його ділянки бетону чи конструкційного сталевго профілю та розтягнутої його ділянки конструкційного сталевго профілю, яка працює у пружній і пластичній стадіях; z_1 ; z_2 ; z_3 ; z_4 – відстані по вертикалі від зусиль до нейтральної лінії перерізу (див. рис. 6).

На першому етапі розрахунку міцності нормального перерізу СББВА при заданих параметрах (ε_{cu} ; ε_{au} ; E_c ; E_a ; f_{cd} ; f_y ; $A_c = B_f \times T_f$; $A_a = 2 \times h_f \times b_f + h_w \times t_w$) перевіряємо умову:

$$\alpha_a \mu \geq \alpha_a \mu_{опт} \quad (20)$$

Якщо умова задовольняється, то тоді НДС нормального перерізу СББВА відповідає НДС за випадком “в”, а якщо ні – то НДС за випадком “а”.

При умові $\alpha_a \mu = \alpha_a \mu_{опт}$ – НДС перерізу СББВА відповідає безпосередньо НДС за випадком “б”.

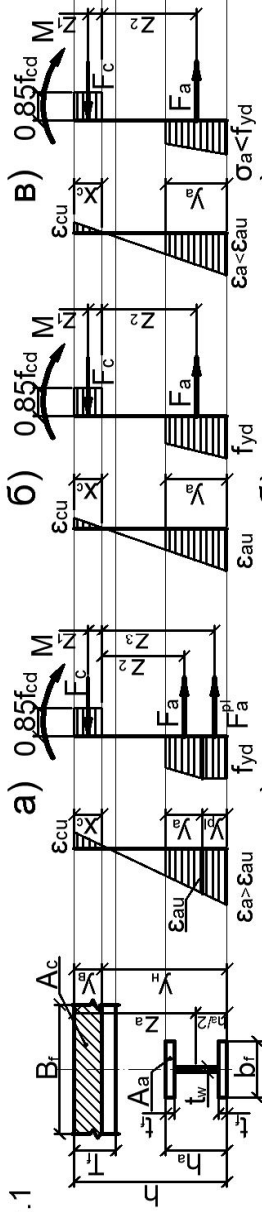
На другому етапі розрахунку визначаємо положення нейтральної вісі по відношенню до нормального перерізу КСДП за умовами (21) і (22):

$$h - Y_B \leq h_a, \quad (21)$$

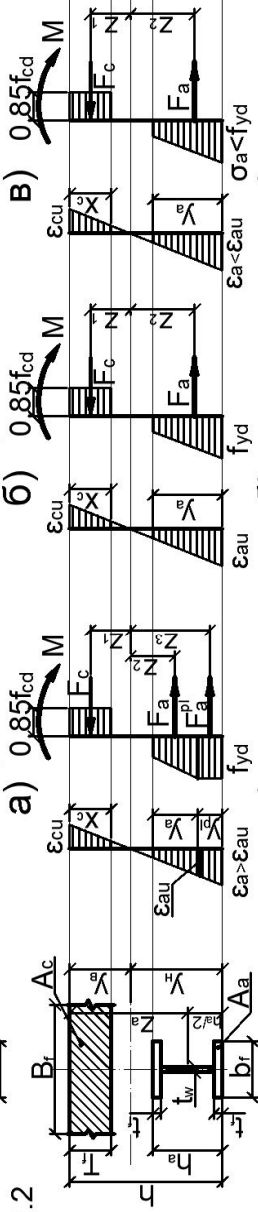
$$h - T_f \leq h - Y_B, \quad (22)$$

де величину Y_B знаходимо за залежністю (13), а величина $h_a = 2 \times h_f + h_w$.

Вип.1



Вип.2



Вип.3

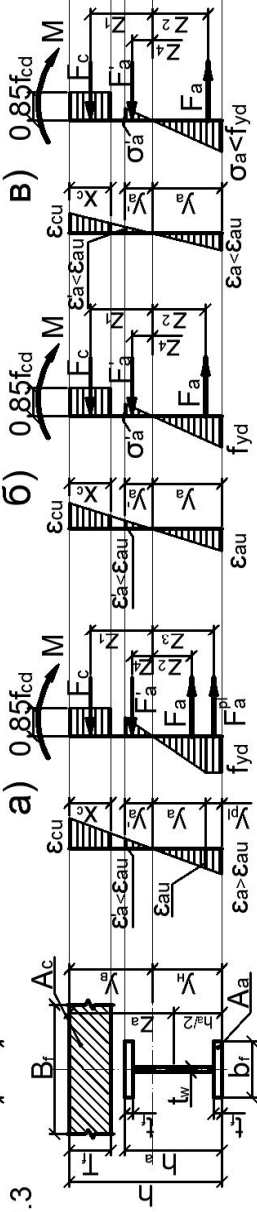


Рис. 6 Випадки напружено-деформованого стану нормального перерізу СББВА залежно від положення нейтральної вісі

Якщо умови (21) і (22) не задовольняються, то нейтральна вісь проходить між нижньою гранню верхньої полиці і верхньою гранню перерізу КСДП (випадок 2), якщо задовольняється умова (21) – то нейтральна вісь проходить через переріз КСДП (випадок 3), якщо задовольняється умова (22) – то нейтральна вісь проходить через переріз верхньої бетонної полиці нормального перерізу СББВА (випадок 1).

На третьому етапі розрахунку складаємо рівняння рівноваги згинальних моментів відносно нейтральної лінії нормального перерізу СББВА відповідно визначеного випадку НДС та перевіряємо за залежністю (15) дотримання умови його міцності.

Висновок та перспективи подальших розробок. Викладені основні положення методики розрахунку міцності нормального приведенного перерізу СББВА залежно від НДС бетону і КСДП. Запропоновані залежності дозволять розмежувати випадки розрахунку несучої здатності СББВА, що, в свою чергу, дасть можливість спростити і сам процес розрахунку за деформаційною моделлю.

Метою подальших досліджень є:

- розробка методу розрахунку оптимальної площі конструктивного сталюого двотаврового профілю (КСДП), який є одним із основних компонентів нормального приведенного перерізу сталобетонних балок із верхньою бетонною полицею та зовнішнім (винесеним) армуванням (СББВА);
- розробка загального алгоритму та аналітичних залежностей (рівнянь рівноваги згинальних моментів) розрахунку міцності нормальних перерізів СББВА, що згинаються, залежно від варіантів його НДС.

1. ДБН В.2.6-160:2010 Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення: Затв. Мінрегіонбудом України від 15.11.2010 р №447 та від 30.12.2010 р. №571, чинні з 01.09.2011 р.- К.: ДП "Укрархбудінформ", 2010.- 81 с. 2. Проблеми розробки національного нормативного документа «Сталезалізобетонні конструкції» / Ю.Г. Аметов, А.Н Бамбура, О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, Л.І. Стороженко, В.Г. Тарасюк // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць.– Київ, 2008. - Вип.70. – С.10-14. 3. Єврокод 4: Проектування комбінованих сталезалізобетонних конструкцій – Частина 1-1: Загальні норми і правила для будівель / Український переклад англomовної версії: НДІБК – Київ, 2007.– 118 с. 4. Муравльов В.В. Проблеми та перспективи розвитку залізобетонних конструкцій з винесеним армуванням / В.В. Муравльов // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: Полт.НТУ.- 2012. – Вип. 3 (33). – С. 141-147. 5. Іванюк А.В. Напружено-деформований стан та несуча здатність сталезалізобетонних балкових конструкцій з армуванням вертикальними листами [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / Іванюк Андрій Володимирович; Полтав. нац. техн. ун-т імені Юрія Кондратюка. - Полтава, 2012. - 21 с. 6. Крупченко О.А. Напружено-деформований стан та міцність сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 - “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / Крупченко

Олександр Анатолійович; Полтавський національний технічний ун-т ім. Юрія Кондратюка.- Полтава, 2008. - 20 с. **7.** Куч Т.П. Напружено-деформований стан та несуча здатність сталезалізобетонних балкових конструкцій з винесеним армуванням трубами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 – “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / Куч Тетяна Петрівна; Полтав. нац. техн. ун-т імені Юрія Кондратюка. - Полтава, 2012. - 21 с. **8.** Васильев А.П. Состояние и перспективы развития конструкций с внешним армированием // А.П. Васильев, В.Н. Голосов // Бетон и железобетон.- 1981.- №3.- С.23-24. **9.** Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой: НИИЖБ, ЦНИИПромзданий. – М.: Стройиздат, 1978.- 55 с. **10.** Бамбура А.М. До оцінки здатності сталобетонних елементів, що згинаються, на основі деформаційного методу і реальних діаграм деформації матеріалів / А.М. Бамбура, Ю.Г. Аметов // Сталезалізобетонні конструкції, Кривий Ріг: КТУ, 2004.- Вип.6.- С.71-76. **11.** Кушнір Ю.О. Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального прямокутного приведенного перерізу попередньо-напружених сталобетонних балок на основі розрахункової деформаційної моделі / Ю.О. Кушнір, В.Ф. Пенц, М.О. Овсій // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – ДонНАБА, 2012. – Том 8, № 3.– С. 107 – 122. **12.** Кушнір Ю.О. Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального прямокутного приведенного перерізу сталобетонних балок на основі розрахункової деформаційної моделі / Ю.О. Кушнір, В.Ф. Пенц, М.О. Овсій // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП.- 2012. – Вип. 24. – С. 167-179. **13.** Овсій М.О. Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального перерізу сталобетонних двотаврових балок із бетонним верхнім поясом на основі розрахункової деформаційної моделі / М.О. Овсій, В.Ф. Пенц, Т.А. Галінська // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: Полт.НТУ.- 2012. – Вип. 3 (33). – С. 152-161. **14.** Бабич С.М. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із використанням деформаційної моделі: Рекомендації / С.М. Бабич, В.С. Бабич, В.В. Савицький.– Рівне: Вид-тво НУВГП, 2005.– 37 с. **15.** Бабич С.М. Напружено-деформований стан нормальних перерізів залізобетонних балок з урахуванням нелінійності деформування бетону / С.М. Бабич, Ю.О. Крусь, В.С. Бабич // Вісник РДТУ: Збірник наукових праць.- Рівне: Вид-во РДТУ, 1999.- Випуск 2. – Частина 3.- С. 13-20. **16.** Барашиков А.Я., Задорожнікова І.В. Спрошені розрахунки несучої здатності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів за деформаційною моделлю // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: Зб. наук. статей. Вип.12.- Рівне, 2005.- С.109-115. **17.** Барашиков А.Я. Методика розрахунку залізобетонних конструкцій за деформаційною моделлю згідно з проектом нових норм України / А.Я. Барашиков. – Сучасне промислове та цивільне виробництво. – 2005.- Том 1, №1.- С.13-18. **18.** Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі та споруди”/ Бамбура Андрій Миколайович; ХДТУБА. – Харків, 2006.– 49 с. **19.** Митрофанов В.П. О предельной сжимаемости бетона в деформационных моделях железобетонных элементов / В.П. Митрофанов, А.А. Шкурупий, Д.Н. Лазарев// Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць.– Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 16. Ч.2. – С. 264–271. **20.** Митрофанов В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов/ В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сборник. – 2004.- Вип. 60.- С.29-48.

21. Кочкарьов Д.В. Практичний розрахунок залізобетонних елементів на міцність за дії згинального моменту на базі ДБН В.2.6-98:2009 / Д.В. Кочкарьов, В.І. Бабич // Комунальне господарство міст: наук.-техн. збірник.-2012.- №103.- С.46-57.

22. Wight James K. Reinforced Concrete: Mechanics and Design / James K. Wight, F.E. Richart, Jr., James G. Macgregor.- 6th ed.- 2011.- pp.1177. **23.** ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: Затв. Мінрегіонбудом України від 24.12.2009 №680, чинні з 01.07.2011 р.- К.: ДП "Укрархбудінформ", 2011.- 75 с. **24.** ACI Innovation Task Group 4: Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications (ACI ITG 4.3) // American Concrete Institute.- Farmington Hills: MI.- pp.212. **25.** Kaar Paul H. Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete / Paul H. Kaar, Norman W. Hanson, and H. T. Capell // Douglas McHenry International Symposium on Concrete Structures, ACI Publication SP-55, American Concrete Institute.- Detroit: MI, 1978.- pp. 161-185. **26.** Ильин О.Ф. Обобщённая методика расчёта прочности нормальных сечений с учётом особенностей свойств различных бетонов / О.Ф. Ильин // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности.- М.: ПЭМ ВНИИС Госстроя СССР, 1980.- С.47-54.