



## МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПРЯМОКУТНОГО ПРИВЕДЕНОГО ПЕРЕРІЗУ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКОВОЇ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Ю. О. Кушнір<sup>a</sup>, В. Ф. Пенц<sup>a</sup>, М. О. Овсій<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,

Першотравневий пр., 24, м. Полтава, Україна, 36011.

<sup>b</sup> ЧП «Будекспертиза», м. Полтава, Україна, 36021.

E-mail: kushnir.pntu@gmail.com

Отримана 17 травня 2012; прийнята 21 вересня 2012.

**Анотація.** Запропонована методика розрахунку міцності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних попередньо напружених сталобетонних балок залежно від напружено-деформованого стану в момент руйнування їх композитних матеріалів (бетону, конструкційного приведенного сталю двотаврового профілю та попередньо напруженої арматури). Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального прямокутного приведенного перерізу попередньо напружених сталобетонних балок були розроблені на основі розрахункової деформаційної моделі з використанням основних практичних наукових положень, які викладені в роботах В. П. Митрофанова [13–16], а також в роботах провідних вітчизняних науковців Є. М. Бабица [6, 7], А. Я. Барашикова [8, 9], В. С. Дорофєєва [11], А. М. Бамбури [5, 10], А. М. Павлікова [13, 16, 17], С. І. Рогового [18] та зарубіжних Джеймса Дж. МакГрегора і Джеймса К. Уайта [19], з урахуванням вимог чинних норм [1]. Залежності, які запропоновані в роботі, дозволять розмежувати випадки розрахунку несучої здатності попередньо напружених сталобетонних балок, що, в свою чергу, дасть можливість спростити і сам процес розрахунку за деформаційною моделлю.

**Ключові слова:** сталь, бетон, попереднє напруження, арматура, балка, нормальний переріз, деформації, граничні напруження, міцність.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЁТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НОРМАЛЬНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРИВЕДЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫХ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК НА ОСНОВЕ РАСЧЁТНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Ю. А. Кушнир<sup>a</sup>, В. Ф. Пенц<sup>a</sup>, Н. А. Овсий<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

Первомайский пр., 24, г. Полтава, Украина, 36011.

<sup>b</sup> ЧП «Стройэкспертиза», г. Полтава, Украина, 36021.

E-mail: kushnir.pntu@gmail.com

Получена 17 мая 2012; принята 21 сентября 2012.

**Аннотация.** Предложена методика расчёта прочности нормального приведенного сечения сплошных прямоугольных предварительно напряжённых сталобетонных балок в зависимости от напряжённо-деформированного состояния в момент разрушения их композитных материалов (бетона, конструкционного приведенного стального двутаврового профиля и предварительно напряжённой арматуры). Методические основы расчёта несущей способности нормального приведенного сечения предварительно

напряжённных сталебетонных балок были разработаны на основе расчётной деформационной модели с использованием основных практических научных положений, которые изложены в работах В. П. Митрофанова [13–16], а также в работах ведущих отечественных учёных Е. М. Бабича [6, 7], А. Я. Барашикова [8, 9], В. С. Дорофеева [11], А. Н. Бамбуры [5, 10], А. Н. Павликова [13, 16, 17], С. И. Рогового [18] и зарубежных Джеймса Дж. МакГрегора і Джеймса К. Уайта [19], с учётом требований действующих норм [1]. Зависимости, которые предложены в работе, позволят разграничить случаи расчёта несущей способности предварительно напряжённных сталебетонных балок, что, в свою очередь, даст возможность упростить и сам процесс расчёта за деформационной моделью.

**Ключевые слова:** сталь, бетон, предварительное напряжение, арматура, балка, нормальное сечение, деформации, граничные напряжения, прочность.

## METHODICAL BASIS CALCULATING THE CARRYING CAPACITY OF THE NORMAL RECTANGULAR REDUCED SECTION PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BEAMS BASED ON THE ESTIMATED DEFORMATION MODEL

Iuliia Kushnir <sup>a</sup>, Volodumir Pents <sup>a</sup>, Mukola Ovsyiy <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk,  
24, Pershotravnevyi Ave, Poltava, Ukraine, 36011.*

<sup>b</sup> *PE «Building expertise»,*

*Poltava, Ukraine, 36021.*

*E-mail: kushnir.pntu@gmail.com*

*Received 17 May 2012; accepted 21 September 2012.*

**Abstract.** Proposed the method of calculating the strength the normal section of continuous of rectangular prestressed steel-concrete beams depending on the stress-strain state at the time of the destruction of composite materials (concrete, structural steel I-sections and prestressed tendon). Methodical basis calculating the carrying capacity of the normal reduced section prestressed reinforced concrete beams were designed based on the estimated deformation model using basic practical scientific propositions, which presented V. Mitrofanov in papers [13–16], as well as leading national scholars E. Babich [6, 7], A. Barashikov [8, 9], V. Dorofeyev [11], A. Bambura [5, 10], A. Pavlikov [13, 16, 17], S. Rogovoy [18] and foreign James J. McGregor and James C. Wight [19], taking into account the requirements of the standards [1]. Mathematical expressions, which are propose in the work, permit tell apart the cases calculating the bearing capacity prestressed reinforced concrete beams, which, in turn will, deliver the opportunity to simplify the process calculation using the deformation model.

**Keywords:** steel, concrete, prestressed, rebar, beam, normal cross section, deformation, boundary tension, strength.

### Постановка проблеми. Зв'язок з науковими і практичними завданнями

Діючі методи розрахунку сталезалізобетонних (СЗБ) згинальних конструкцій (елементів) базуються на розрахунку за граничними напруженнями з використанням прямокутних епюр напружень для обох матеріалів [3, 4]. Запропонована в роботах [2, 5] нова концепція розрахунку впроваджує в практику метод граничних деформацій, який дозволить наблизитися до реального напружено-деформованого стану (НДС) СЗБ кон-

струкцій (елементів). В той же час запропоновані в роботах [2, 5] 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.

Тому 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 чинних нормативних документів [1], в своїй роботі [2] відзнача-

ють 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 невирішених питань**

За останні роки методи розрахунку залізобетонних елементів зазнали подальшого розвитку на основі деформаційної моделі, яка враховує реальні діаграми роботи бетону і арматури. Так, значний вклад в розробку відмічених вище методів внесли вчені Є. М. Бабич [6, 7], А. Я. Барашиков [8, 9] А. М. Бамбура і Ю. Г. Аметов [5, 10], В. С. Дорофеев і В. Ю. Барданов [11], Д. М. Лазарев [12, 14], В. П. Митрофанов [13–16], А. М. Павліков [13, 16, 17], С. І. Роговий [18], О. А. Шкурупій [14, 16] та ін. В той же час методи розрахунку СЗБ конструкцій (елементів) за рівнем розвитку значно відстають від методів розрахунку залізобетонних елементів, які впроваджують у практику розрахунку з використанням деформаційної моделі роботи бетону. Для підвищення ефективності та більш широкого розповсюдження СЗБ конструкцій (елементів) необхідне удосконалення теорії і методів їх розрахунку. Вищевикладене визначило актуальність теми дослідження, її важливе народногосподарське значення.

**Загальна мета дослідження** полягає у розробці методики розрахунку несучої здатності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних попередньо-напружених сталобетонних балок (ПНСББ) залежно від НДС в момент руйнування їх композитних матеріалів (бетону, конструкційного приведенного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) та попередньо напруженої арматури). Досягнення мети здійснювалося за рахунок розв'язання наступних задач, які полягали в:

- обґрунтуванні умов застосування деформаційної моделі та граничних критеріїв розрахунку;
- розробці методики розрахунку оптимального перерізу конструктивного приведенного

сталюого двотаврового профілю (КПСДП) та площі попередньо напруженої арматури, якими армовано нормальний переріз прямокутної сталобетонної балки;

- отриманні рішення задач міцності нормального прямокутного перерізу згинальних ПНСББ, залежно від НДС бетону, конструкційного приведенного сталюого профілю і попередньо напруженої арматури в момент руйнування.

#### **Викладення основного матеріалу. Обґрунтування отриманих результатів**

Для проведення подальших наукових досліджень та удосконалення розрахункових положень чинних норм [1] виникла необхідність в класифікації попередньо напружених сталезалізобетонних балок за типом їх загального приведенного перерізу і загальними випадками їх напружено-деформованого стану, які класифікують їх композитні властивості (табл. 1). У цій статті авторами досліджувався напружено-деформований стан попередньо напружених сталобетонних балок (ПНСББ) прямокутного перерізу, які мають суцільне зчеплення між бетоном і конструкційним сталюим профілем (випадок III-B, за табл. 1).

Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального прямокутного приведенного перерізу попередньо напружених сталобетонних балок (ПНСББ) були розроблені на основі розрахункової деформаційної моделі з використанням основних практичних наукових положень робіт Є. М. Бабича [6, 7], А. Я. Барашикова [8, 9], В. П. Митрофанова [13–16], А. М. Бамбури [5, 10], Джеймса Дж. МакГрегора і Джеймса К. Уайта [19] та окремих положень чинних вітчизняних і зарубіжних норм [1, 20, 21] і включають в себе розв'язок двох задач: підбору площі попередньо напруженої арматури та перерізу конструкційного приведенного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) жорсткого армування нормального прямокутного перерізу ПНСББ, що є прямою задачею оптимізаційного проектування; перевірки міцності нормального прямокутного перерізу ПНСББ.

1. Задачі перевірки міцності і підбору перерізу КПСДП ( $A_a$ ) (жорсткого армування) та площі попередньо напруженої арматури ( $A_p$ )

нормального прямокутного перерізу згинальної ПНСББ базуються на наступних критеріях:

- задача підбору оптимального перерізу  $A_a$  КПСДП та попередньо напруженої арматури  $A_p$ , якими армовано нормальний переріз прямокутної ПНСББ, розв'язується на основі критерію:

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

де  $A_a = 2 \times A_f + A_w$  – площа перерізу КПСДП, яка відповідно складається із суми площ його полиць і ребра;

$A_p$  – площа попередньо напруженої арматури;  
 $\epsilon_{cu}$  – граничні відносні деформації стиснення в крайньому верхньому волокні стисненої зони бетону нормального перерізу прямокутної ПНСББ, які приймаються рівними  $\epsilon_{cu} = 0,0035$  (при  $f_{cd} = 8...60$  МПа) або відповідно даних табл. 2 [18, табл. 1.1] чи [20, табл. 3.1];

$\epsilon_{au}; \epsilon_{pu}$  – граничні відносні деформації розтягу відповідно в крайньому нижньому волокні розтягнутої зони КПСДП і попередньо напруженої арматури, якими армовано нормальний переріз прямокутної ПНСББ, значення яких приймаються відповідно положень п. 6.3.3 [1] та п. 3.3.6.6 [20];

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

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a > \epsilon_{au}; \epsilon_p \geq \epsilon_{pu}) = \max;$$

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a; \epsilon_p \geq \epsilon_{pu}) = \max;$$

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a < \epsilon_{au}; \epsilon_p \geq \epsilon_{pu}) = \max;$$

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a > \epsilon_{au}; \epsilon_p < \epsilon_{pu}) = \max;$$

$$M(\epsilon_{cu}; \epsilon_a; \epsilon_p < \epsilon_{pu}) = \max;$$

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

Таблиця 1. Випадки деформування ПНСЗБ балок з затяжками залежно від виду їх приведенного перерізу і умов зчеплення композитних матеріалів

Тип загального приведенного перерізу ПНСЗБ балок		Деформований стан ПНСЗБ балок на стадії руйнування		
		А без зчеплення	Б часткове зчеплення	В повне зчеплення
I				
II				
III		Варіант не існує		

де  $M$  – максимальне значення згинального моменту, який може сприйняти нормальний приведений переріз прямокутних попередньо напружених сталобетонних балок;

$\epsilon_a$  – відносні деформації в крайньому нижньому волокні розтягнутої зони КПСДП;

$\epsilon_p$  – відносні деформації в попередньо напруженій арматурі.

2. Для розв'язання відмічених вище задач були прийняті наступні передумови розрахунку:

- на граничній стадії деформування розподіл відносних деформацій композитних матеріалів по висоті нормального перерізу ПНСББ здійснюється за лінійними залежностями (3), (4), (5) і (6), тобто підтверджується гіпотеза плоских перерізів:

$$\text{при } \epsilon_a \geq \epsilon_{au}, \epsilon_p \geq \epsilon_{pu}, C_p < h - Y_B \\ (\epsilon_{cu} + \epsilon_{au})/h = \epsilon_{cu}/Y_B, \quad (3)$$

$$\text{при } \epsilon_a \geq \epsilon_{au}, \epsilon_p \geq \epsilon_{pu}, C_p > h - Y_B \\ (\epsilon_{cu} + \epsilon_{pu})/h = \epsilon_{cu}/Y_B, \quad (4)$$

$$\text{при } \epsilon_a < \epsilon_{au}, \epsilon_p < \epsilon_{pu}, C_p < h - Y_B \\ (\epsilon_{cu} + \epsilon_a)h = \epsilon_{cu}Y_B, \quad (5)$$

$$\text{при } \epsilon_a < \epsilon_{au}, \epsilon_p < \epsilon_{pu}, C_p > h - Y_B \\ (\epsilon_{cu} + \epsilon_p)/h = \epsilon_{cu}/Y_B, \quad (6)$$

де  $h, Y_B$  – висоти відповідно перерізу ПНСББ і його стисненої зони;

- між бетоном і поверхнею КПСДП існують сили зчеплення, в результаті чого проявляються максимальні композитні властивості ПНСББ, тобто відносні деформації бетону і КПСДП в стисненій зоні по висоті нормального перерізу і в розтягненій його зоні на ділянках між тріщинами рівні ( $\epsilon_c = \epsilon_a; \epsilon_c' = \epsilon_a'$ );

- нормальне зосереджене зусилля ( $F_C$ ) в стисненій зоні бетону перерізу ПНСББ, стан якої в момент руйнування описується діаграмою «напруження – відносні деформації» (« $\sigma_c - \epsilon_c$ ») (рис. 1), визначається за залежністю (7), яка була запропонована науковцями в роботах [19, 21, 22]:

$$F_C = 0,85 \times f_{cd} \times \beta_1 \times Y_B \times b, \quad (7)$$

де  $f_{cd}$  – розрахункове значення міцності бетону на стиск;

$b$  – ширина прямокутного перерізу ПНСББ;

$\beta_1$  – приведений коефіцієнт стисненої зони бетону до висоти стисненої зони нормального перерізу ПНСББ, який в результаті аналізу експериментальних досліджень був запропонований Джеймсом Дж. МакГрегором і Джеймсом К. Уайтом в 1997 році [19], визначається за залежностями, що наведені в табл. 3 відповідно до даних наукової роботи [22] і норм [21]:

- відстань від найбільш стисненої фібри бетону в нормальному перерізу ПНСББ до осі прикладення його зосередженого зусилля стиснення ( $F_C$ ) визначається за залежністю (8), яка була запропонована О. Ф. Ільїним в роботі [23, (3)]:

$$Y_B - z_1 = [0,5 - 238,1 \times f_{cd}^{0,69} / E_a] \times \beta_1 \times Y_B; \quad (8)$$

- для розрахунку міцності поперечного нормального перерізу ПНСББ були прийняті спрощені діаграми «напруження – відносні деформації» конструкційної сталі (« $\sigma_a - \epsilon_a$ ») (рис. 2) відповідно до вимог рекомендацій п. 6.3.2 [1] та арматурної сталі (« $\sigma_p - \epsilon_p$ ») (рис. 3), яка використовується для попереднього напруження, відповідно до п. 3.3.6.6 [20]. Значення граничних відносних деформацій конструкційної сталі визначаємо

**Таблиця 2.** Середні значення величини  $\epsilon_{cu}$  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

**Таблиця 3.** Значення коефіцієнта приведення стисненої зони бетону  $\beta_1$  до висоти стисненої зони  $Y_B$  нормального перерізу ПНСББ залежно від розрахункового значення міцності бетону на стиск  $f_{cd}$

варіант джерело	а		б		в	
	Границі зміни $f_{cd}$	$\beta_1$	Границі зміни $f_{cd}$	$\beta_1$	Границі зміни $f_{cd}$	$\beta_1$
[21]	$f_{cd} \leq 56$ МПа	0,85	$56 \text{ МПа} < f_{cd} < 126$ МПа	$0,970 - 0,015 \times f_{cd} / 7$ МПа	$f_{cd} \geq 126$ МПа	0,7
[22]	$f_{cd} \leq 28$ МПа	0,85	$28 \text{ МПа} < f_{cd} < 56$ МПа	$0,85 - 0,05 \times (f_{cd} - 28 \text{ МПа}) / 7$ МПа	$f_{cd} \geq 56$ МПа	0,65

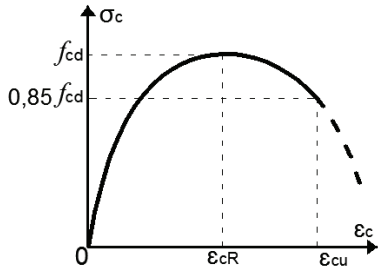


Рисунок 1. Діаграма стиснення бетону  $\sigma_c - \epsilon_c$ .

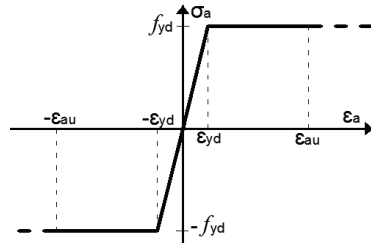


Рисунок 2. Діаграма стиснення-розтяг для конструкційної сталі  $\sigma_a - \epsilon_a$ .

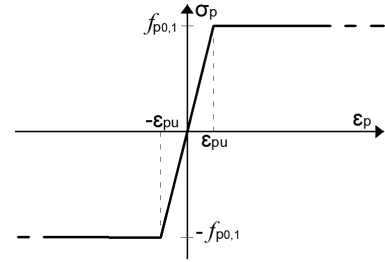


Рисунок 3. Діаграма стиснення-розтяг для арматурної сталі  $\sigma_p - \epsilon_p$ .

відповідно до вимог 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. Значення граничних відносних деформацій попередньо напруженої арматури ( $\epsilon_{pu}$ ) приймаємо відповідно до положень п. 3.3.6.6 [20] за залежністю:

$$\epsilon_{pu} = \epsilon_{ud} = 0,9 \times \epsilon_{uk} \text{ або } \epsilon_{pu} = \epsilon_{ud} = 0,02; \quad (10)$$

- розрахунок міцності і оптимальних площ КПСДП та попередньо напруженої арматури нормального прямокутного перерізу ПНСББ 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, 2 і 3). Основним критерієм появи граничного стану в нормальному перерізі

ПНСББ є екстремальний критерій досягнення деформаціями стисненого бетону граничних значень  $\epsilon_{cu}$ , при якому несуча здатність буде максимальною ( $M_{max}$ ) (рис. 4);

- в роботі [24] був проведений типологічний аналіз різних варіантів армування прямокутних перерізів сталобетонних балок, в результаті якого обґрунтовано загальний характеристичний ряд приведених прямокутних перерізів ПНСББ, які наводяться на рис. 5 і 6.

Далі наводяться розрахункові аналітичні залежності щодо розв'язання задач перевірки міцності і підбору перерізу ( $A_a$ ) КПСДП (жорсткого армування) і площі попередньо напруженої арматури ( $A_p$ ) нормального прямокутного перерізу згинальної ПНСББ які були отримані в результаті числових рішень.

3. Розв'язання задачі: підбір необхідного перерізу КПСДП ( $A_a$ ) і площі попередньо напруженої арматури ( $A_p$ ), якими армується нормальний переріз ПНСББ. Метою задачі є визначення

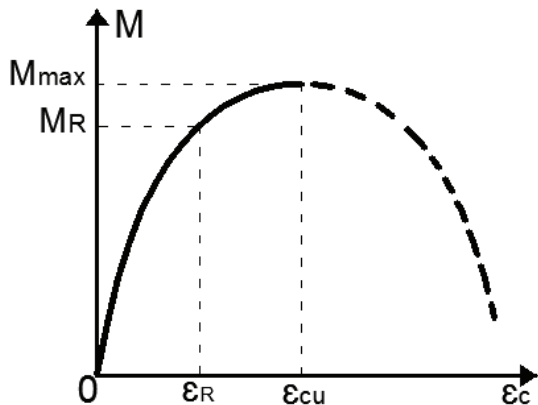


Рисунок 4. Діаграма стану ПНСББ, яка трансформована з діаграми  $\sigma_c - \epsilon_c$  за [17, рис. 2.4].

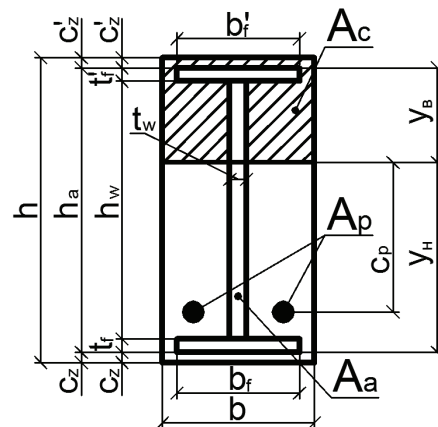


Рисунок 5. Загальний прямокутний приведений переріз ПНСББ.

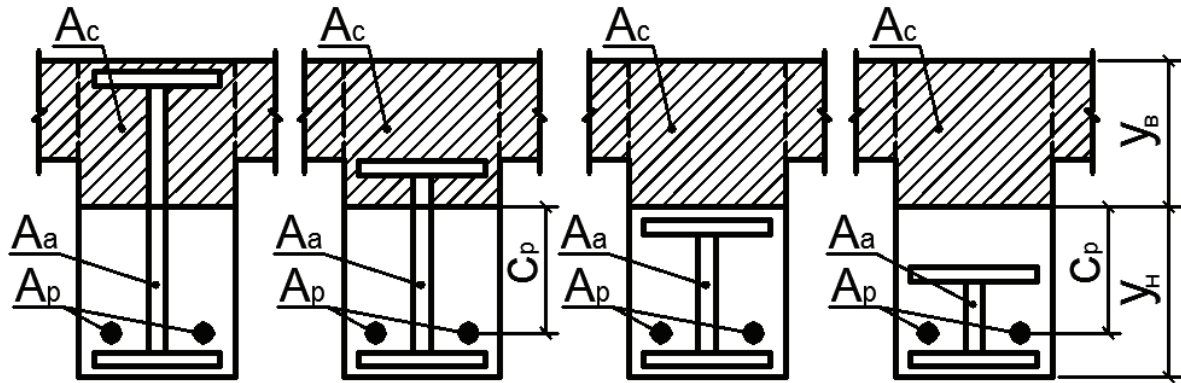


Рисунок 6. Характеристичний ряд приведених прямокутних перерізів ПНСББ.

оптимального перерізу КПСДП і площі попередньо напруженої арматури ПНСББ, при якому деформації в крайніх верхній (бетонній) і нижніх (сталей) фібрах КПСДП і арматурі її нормального перерізу одночасно досягають відповідно граничних значень  $\epsilon_{cu}$  і  $\epsilon_{au}$  чи  $\epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon_{au}$  і  $\epsilon_{pu}$ , чи  $\epsilon_{cu}$  і  $\epsilon_{pu}$ .

Оптимальну площу перерізу КПСДП ( $A_a$ ) і попередньо напруженої арматури ( $A_p$ ) ПНСББ пропонується визначати за наступними залежностями:

$$A_a + A_p = A_c \times \mu_{\text{опт}};$$

$$\mu_{\text{опт}} = (1 - \Delta_\epsilon) / \{ \alpha_{\text{сум}} \times [2 - (\Delta_h + \Delta_c) \times (1 + \Delta_\epsilon)] \}, \quad (11)$$

$$\mu_{\text{опт}} = (0,85 \times \beta_1 \times \Delta_\epsilon^2) / [ \alpha_{\text{сум}} \times (1 + \Delta_\epsilon) ], \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{опт}} &= \mu_p^{\text{опт}} + \mu_a^{\text{опт}} = A_p^{\text{опт}} / A_c + A_a^{\text{опт}} / A_c = \\ &= (1 + \Delta_p) \times A_a^{\text{опт}} / A_c, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\Delta_\epsilon = \epsilon_{cu} / \epsilon_{au}$  (при  $C_p < h - Y_B$ ) чи  $\Delta_\epsilon = \epsilon_{cu} / \epsilon_{pu}$  (при  $C_p > h - Y_B$ ) – коефіцієнт співвідношення величин граничних відносних деформацій відповідно бетону ( $\epsilon_{cu}$ ) і КПСДП ( $\epsilon_{au}$ ) чи бетону ( $\epsilon_{cu}$ ) і попередньо напруженої арматури ( $\epsilon_{pu}$ );

$\Delta_h = h_a / h$  – коефіцієнт співвідношення величин висоти КПСДП ( $h_a$ ) до загальної висоти ПНСББ ( $h$ );

$\Delta_c = C_z / h$  – коефіцієнт співвідношення величини висоти захисного шару бетону ( $C_z$ ) до загальної висоти ПНСББ ( $h$ ) при  $C_p < h - Y_B$ , або  $\Delta_c = 0$  при  $C_p > h - Y_B$ ;

$\mu_{\text{опт}} = (A_a + A_p) / A_c$  – оптимальний коефіцієнт армування конструктивним приведеним сталевим двотавровим профілем і попередньо напруженою арматурою нормального перерізу ПНСББ;

$A_c = h \times b$  – площа нормального перерізу ПНСББ;

$\alpha_{\text{сум}}$  – коефіцієнт співвідношення модулів пружності конструктивної ( $E_a$ ) і арматурної ( $E_p$ ) сталей та бетону ( $E_c$ ), який визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{сум}} &= \alpha_a + \alpha_p = E_a / E_c + E_p / E_c = \\ &= (\Delta_p \times E_p + E_a) / E_c, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\Delta_p = A_p / A_a$  – коефіцієнт співвідношення площі попередньо напруженої арматури до площі конструктивного приведенного сталевого двотаврового профілю;

$\alpha_a = E_a / E_c$  – коефіцієнт співвідношення модулів пружності конструктивної сталі і бетону;

$\alpha_p = E_p / E_c$  – коефіцієнт співвідношення модулів пружності арматурної сталі і бетону.

В результаті перетворень із залежності (11) можемо отримати залежності відносно величин  $\Delta_\epsilon$  і  $\Delta_h$ :

$$\begin{aligned} \Delta_\epsilon &= [1 + \alpha_{\text{сум}} \mu \times (2 - \Delta_h - 2\Delta_c)] / [1 + \alpha_{\text{сум}} \mu \times \\ &\quad \times (\Delta_h + 2\Delta_c)], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta_h &= (1 + 2\alpha_{\text{сум}} \mu - \Delta_\epsilon) / [ \alpha_{\text{сум}} \mu \times \\ &\quad \times (1 + \Delta_\epsilon) ] - 2\Delta_c. \end{aligned} \quad (16)$$

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

$$\begin{aligned} Y_B &= h \times \{ [1 + \alpha_{\text{сум}} \mu \times (2 - \Delta_h - 2\Delta_c)] / \\ &\quad / [2 \times (1 + \alpha_{\text{сум}} \mu)] \}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Y_H &= h \times \{ [1 + \alpha_{\text{сум}} \mu \times (\Delta_h + 2\Delta_c)] / \\ &\quad / [2 \times (1 + \alpha_{\text{сум}} \mu)] \}. \end{aligned} \quad (18)$$

В результаті розрахунків були отримані числові залежності між безрозмірними коефіцієнтами співвідношень  $\Delta_e$ ,  $\Delta_h$ ,  $\Delta_c$  і добутком  $\alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}}$ . Так, значення добутку  $\alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}}$  залежно від величин коефіцієнтів співвідношень  $\Delta_h$  та  $\Delta_e$  для нормального приведенного прямокутного перерізу ПНСББ при відсутності захисного шару бетону в його нижній розтягненій зоні, тобто коли  $C_z = 0$  і коефіцієнт  $\Delta_c = 0$ , наведені в табл. 4. Коригування величини добутку  $\alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}}$  при  $C_z > 0$ ,  $\Delta_c > 0$  залежно від висоти захисного шару бетону  $C_z$  здійснюється за допомогою коефіцієнта  $k_c$ , який наведений в табл. 5:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}} (\text{при } \Delta_c > 0) &= \\ &= k_c \times \alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}} (\text{при } \Delta_c = 0). \end{aligned} \quad (19)$$

Оптимальну площу перерізу КПСДП ( $A_a$ ) і попередньо напруженої арматури ( $A_p$ ) ПНСББ визначаємо за залежностями (11)–(13), (19), задавши вихідними величинами: розмірами перерізу балки  $h$ ,  $b$  і  $C_z$ ; міцнісними характеристиками бетону і сталей:  $E_c$ ,  $E_a$ ,  $E_p$ ,  $\varepsilon_{cu}$ ,  $\varepsilon_{au}$  і  $\varepsilon_{pu}$ ; співвідношенням висот перерізів КПСДП і балки:  $\Delta_h = h_a / h$ ; співвідношенням площі попередньо напруженої арматури до площі конструкційного приведенного сталювого двотаврового профілю:  $\Delta_p$ .

4. Розв'язання задачі: перевірка міцності нормального перерізу ПНСББ. Метою задачі є визначення граничного значення параметра згинального моменту ( $M_u$ ) заданого нормального прямокутного перерізу ПНСББ і порівняння його з

**Таблиця 4.** Значення добутку  $\alpha_{\text{сум}} \mu_{\text{опт}}$  при коефіцієнті співвідношення  $\Delta_c = 0$  залежно від величин коефіцієнтів співвідношень  $\Delta_h$  та  $\Delta_e$

$\Delta_e \backslash \Delta_h$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,05	0,501	0,531	0,564	0,601	0,644	0,693	0,751	0,819	0,900	1,00
0,06	0,496	0,526	0,559	0,596	0,639	0,689	0,747	0,816	0,899	1,00
0,07	0,491	0,521	0,554	0,592	0,635	0,685	0,743	0,813	0,897	1,00
0,08	0,486	0,516	0,549	0,587	0,630	0,680	0,740	0,810	0,895	1,00
0,09	0,481	0,511	0,544	0,582	0,625	0,676	0,736	0,807	0,893	1,00
0,10	0,476	0,506	0,539	0,577	0,621	0,672	0,732	0,804	0,891	1,00
0,11	0,471	0,501	0,534	0,572	0,616	0,667	0,728	0,800	0,889	1,00
0,12	0,466	0,495	0,529	0,567	0,611	0,663	0,724	0,797	0,887	1,00
0,13	0,461	0,490	0,524	0,562	0,606	0,658	0,720	0,794	0,885	1,00
0,14	0,456	0,485	0,519	0,557	0,601	0,653	0,715	0,790	0,883	1,00
0,15	0,451	0,480	0,514	0,552	0,596	0,649	0,711	0,787	0,881	1,00
0,16	0,446	0,475	0,508	0,547	0,592	0,644	0,707	0,784	0,879	1,00
0,17	0,441	0,470	0,503	0,542	0,587	0,639	0,703	0,780	0,876	1,00
0,18	0,436	0,465	0,498	0,537	0,582	0,635	0,698	0,777	0,874	1,00
0,19	0,431	0,460	0,493	0,531	0,577	0,630	0,694	0,773	0,872	1,00
0,20	0,426	0,455	0,488	0,526	0,571	0,625	0,690	0,769	0,870	1,00
0,21	0,420	0,449	0,483	0,521	0,566	0,620	0,685	0,766	0,867	1,00
0,22	0,415	0,444	0,477	0,516	0,561	0,615	0,681	0,762	0,865	1,00
0,23	0,410	0,439	0,472	0,511	0,556	0,610	0,676	0,758	0,862	1,00
0,24	0,405	0,434	0,467	0,505	0,551	0,605	0,671	0,754	0,860	1,00
0,25	0,400	0,429	0,462	0,500	0,545	0,600	0,667	0,750	0,857	1,00
0,26	0,395	0,423	0,456	0,495	0,540	0,595	0,662	0,746	0,855	1,00
0,27	0,390	0,418	0,451	0,489	0,535	0,590	0,657	0,742	0,852	1,00
0,28	0,385	0,413	0,446	0,484	0,529	0,584	0,652	0,738	0,849	1,00
0,29	0,379	0,408	0,440	0,478	0,524	0,579	0,647	0,733	0,846	1,00
0,30	0,374	0,402	0,435	0,473	0,519	0,574	0,642	0,729	0,843	1,00



діючим у ньому моментом (М) від зовнішніх навантажень:

$$M_u \geq M. \quad (20)$$

В результаті узагальнення було виділено шість окремих випадків напружено-деформованого стану (НДС) прямокутного перерізу ПНСББ на стадії її руйнування чи при граничному стані залежно від положення нейтральної осі по відношенню до сталюого профілю (рис. 7 та 8). Так, у випадках «а» – «в» в попередньо напруженій арматурі виникають відносні деформації розтягу, які змінюються у межах  $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$ , тобто напруження переви-

щують розрахункове значення на границі текучості ( $f_{p0,1} = f_{pd} = f_{p0,1} / \gamma_s$ ), а у випадках «г» – «е» – у межах  $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$ , тобто напруження становлять  $\sigma_p < f_{p0,1}$ . Крім того, у перерізі ПНСББ граничні відносні деформації у стисненій (верхній) та у розтягненій (нижній) зонах змінюються у наступних межах (табл. 6):

- випадки «а» і «г»: у крайньому верхньому волокні стиснутої бетонної ділянки перерізу відносні деформації бетону досягають величини граничних деформацій стиску  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ , а в крайньому нижньому волокні, що розтягується, відносні деформації КПСДП змінюються

**Таблиця 5.** Значення коефіцієнта  $k_c$ , який коригує значення добутку  $\alpha_{сум} \mu_{opt}$  залежно від коефіцієнта співвідношення  $\Delta_c$  при коефіцієнтах співвідношень  $\Delta_h$  і  $\Delta_e$

$\Delta_e$	$\Delta_c$	$\Delta_h$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,05	0,03	1,034	1,036	1,039	1,042	1,045	1,048	1,052	1,057	1,064	1,071
	0,06	1,071	1,076	1,081	1,087	1,093	1,101	1,111	1,122	1,136	1,153
	0,1	1,125	1,133	1,142	1,153	1,166	1,181	1,199	1,221	1,249	1,284
	0,16	1,216	1,231	1,249	1,270	1,295	1,325	1,362	1,408	1,467	1,547
	0,2	1,285	1,307	1,332	1,362	1,398	1,442	1,497	1,568	1,661	1,792
0,1	0,03	1,036	1,039	1,041	1,044	1,048	1,052	1,057	1,063	1,070	1,079
	0,06	1,075	1,080	1,086	1,092	1,100	1,109	1,120	1,134	1,150	1,172
	0,1	1,132	1,141	1,152	1,164	1,179	1,196	1,218	1,244	1,278	1,324
	0,16	1,229	1,246	1,267	1,291	1,321	1,356	1,401	1,458	1,535	1,642
	0,2	1,303	1,328	1,358	1,393	1,436	1,489	1,557	1,647	1,772	1,957
0,15	0,03	1,038	1,041	1,044	1,047	1,051	1,056	1,061	1,068	1,077	1,088
	0,06	1,079	1,085	1,091	1,098	1,107	1,118	1,131	1,146	1,167	1,194
	0,1	1,139	1,149	1,161	1,176	1,192	1,213	1,238	1,271	1,313	1,371
	0,16	1,243	1,262	1,286	1,314	1,348	1,391	1,445	1,517	1,616	1,763
	0,2	1,323	1,351	1,385	1,426	1,477	1,541	1,626	1,742	1,911	2,179
0,2	0,03	1,040	1,043	1,046	1,050	1,054	1,060	1,066	1,074	1,085	1,099
	0,06	1,083	1,089	1,096	1,105	1,115	1,127	1,142	1,161	1,186	1,220
	0,1	1,146	1,158	1,171	1,188	1,207	1,231	1,261	1,300	1,353	1,429
	0,16	1,257	1,279	1,306	1,338	1,378	1,429	1,495	1,585	1,716	1,923
	0,2	1,343	1,375	1,414	1,462	1,522	1,600	1,706	1,857	2,091	2,500
0,25	0,03	1,042	1,045	1,048	1,053	1,058	1,064	1,071	1,081	1,094	1,111
	0,06	1,087	1,094	1,102	1,111	1,122	1,136	1,154	1,176	1,207	1,250
	0,1	1,154	1,167	1,182	1,200	1,222	1,250	1,286	1,333	1,400	1,500
	0,16	1,271	1,296	1,327	1,364	1,410	1,471	1,552	1,667	1,842	2,143
	0,2	1,364	1,400	1,444	1,500	1,571	1,667	1,800	2,000	2,333	3,000
0,3	0,03	1,044	1,047	1,051	1,056	1,061	1,068	1,077	1,088	1,104	1,125
	0,06	1,091	1,098	1,107	1,118	1,131	1,147	1,167	1,194	1,231	1,287
	0,1	1,161	1,176	1,193	1,213	1,239	1,271	1,313	1,371	1,456	1,591
	0,16	1,286	1,314	1,348	1,391	1,445	1,517	1,617	1,765	2,005	2,465
	0,2	1,385	1,426	1,477	1,542	1,627	1,743	1,912	2,182	2,677	3,889

у межах  $\epsilon_a > \epsilon_{au}$ , тобто існує зона пластичних деформацій;  
 • випадки «б» і «д»: відносні деформації бетону досягають величини  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ , а відносні деформації КПСДП – величини  $\epsilon_a = \epsilon_{au}$ ;  
 • випадки «в» і «е»: відносні деформації бетону досягають величини  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ , а відносні деформації КПСДП змінюються у межах  $\epsilon_a < \epsilon_{au}$ .  
 Загальні рівняння рівноваги для кожного із випадків НДС нормального прямокутного перерізу ПНСББ становлять:

• у випадках 1а, 2а:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 + F_p^{pl} \times C_p; \quad (21)$$

• у випадках 1б, 1в, 2б, 2в:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_p^{pl} \times C_p; \quad (22)$$

• у випадку 3а:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 + F_a' \times z_4 + F_p^{pl} \times C_p; \quad (23)$$

• у випадках 3б, 3в:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a' \times z_4 + F_p^{pl} \times C_p; \quad (24)$$

• у випадках 1г, 2г:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 + F_p \times C_p; \quad (25)$$

• у випадках 1д, 1е, 2д, 2е:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_p \times C_p; \quad (26)$$

• у випадку 3г:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a^{pl} \times z_3 + F_a' \times z_4 + F_p \times C_p; \quad (27)$$

• у випадках 3д, 3е:  

$$M_u = F_c \times z_1 + F_a \times z_2 + F_a' \times z_4 + F_p \times C_p; \quad (28)$$

де  $F_c$ ;  $F_a$ ;  $F_a'$ ;  $F_a^{pl}$ ;  $F_p$ ;  $F_p^{pl}$  – сумарні нормальні зусилля в перерізі балок відповідно до стиснених його ділянки бетону чи перерізу конструкційного сталевго профілю та розтягнених його ділянки конструкційного сталевго профілю чи попередньо-напруженої арматури, які працюють відповідно у пружній і пружно-пластичній стадіях;  
 $z_1, z_2, z_3, z_4, C_p$  – відстані по вертикалі від зусиль до нейтральної лінії перерізу (рис. 7, 8).  
 На першому етапі розрахунку несучої здатності нормального приведенного прямокутного перерізу ПНСББ при заданих параметрах ( $\epsilon_{cu}$ ;  $\epsilon_{au}$ ;  $\epsilon_{pu} = \epsilon_{ud}$ ;  $E_c$ ;  $E_a$ ;  $E_p$ ;  $f_{cd}$ ;  $f_y$ ;  $f_{pd} = f_{p0.1} / \gamma_S$ ;  $A_c = h \times b$ ;  $A_a = 2 \times h_f \times b_f + h_w \times t_w$ ;  $C_z$ ;  $A_p$ ;  $C_p$ ) перевіряємо умову:

$$\alpha_p \mu_p + \alpha_a \mu_a \geq k_C \times \alpha_{aум} \mu_{онт}. \quad (29)$$

Якщо умова задовольняється, то тоді НДС нормального прямокутного перерізу ПНСББ

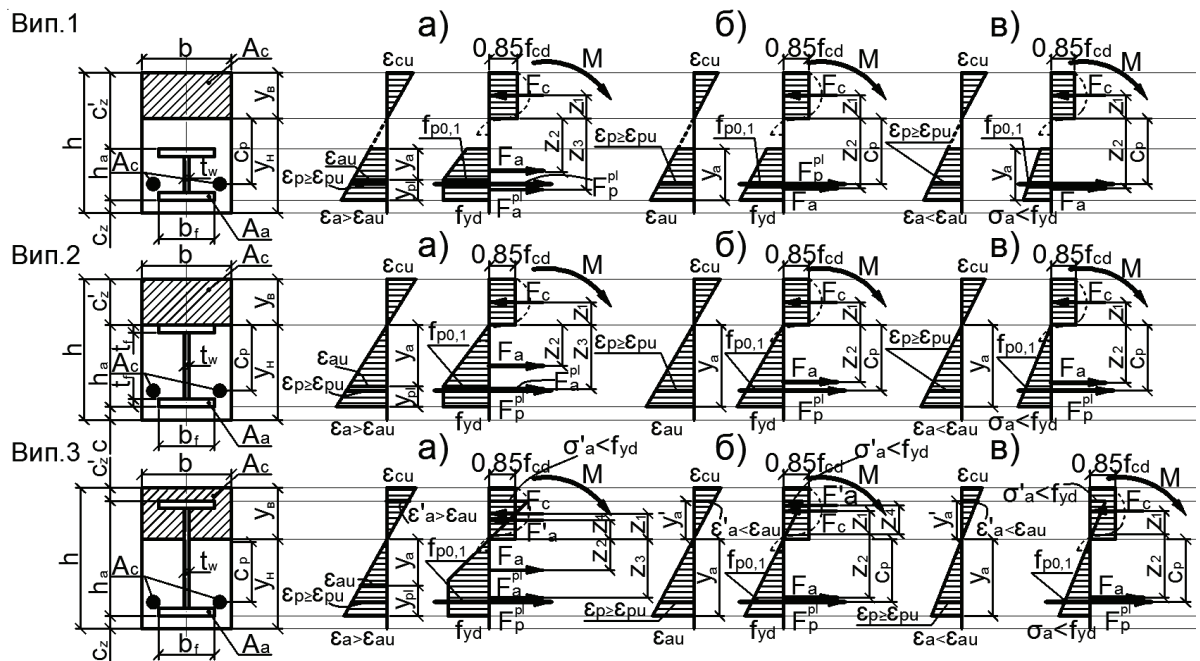


Рисунок 7. Випадки «а» – «в» напружено-деформованого стану нормального прямокутного перерізу попередньо напружених сталобетонних балок залежно від положення нейтральної осі.

відповідає НДС за випадком «в» чи «е», а якщо ні – то НДС за випадком «а» чи «г».

При умові  $\alpha_p \mu_p + \alpha_a \mu_a = k_c \times \alpha_{\text{аум}} \mu_{\text{опт}}$  – НДС перерізу ПНСББ відповідає безпосередньо НДС за випадком «б» чи «д».

На другому етапі розрахунку визначаємо положення нейтральної осі по відношенню до КПСДП за умовою:

$$h - Y_B \leq h_a + C_z, \quad (30)$$

де величину  $Y_B$  знаходимо за залежністю (17), а величина  $h_a = 2 \times h_f + h_w$ .

Якщо умова (30) задовольняється, то нейтральна вісь проходить через переріз КПСДП (випадок 3), якщо ні – то нейтральна вісь проходить вище від перерізу КПСДП (випадок 1).

За умови  $h - Y_B = h_a + C_z$  нейтральна вісь в нормальному перерізі ПНСББ проходить по верхній грані перерізу КПСДП, тобто має місце випадок 2.

На третьому етапі розрахунку визначаємо випадок напружено-деформованого стану попередньо напруженої арматури в момент максимальної несучої спроможності нормального перерізу ПНСББ, перевіряючи умову:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} \times C_p / Y_B \geq \varepsilon_{pu} = \varepsilon_{ud}. \quad (31)$$

Якщо умова (31) задовольняється, то попередньо напружена арматура працює в пружно-плас-

тичній стадії, тобто мають місце випадки НДС ПНСББ «а» – «в», а якщо ні – то попередньо напружена арматура працює в пружній стадії, тобто мають місце випадки НДС ПНСББ «г» – «е».

На четвертому етапі розрахунку складаємо рівняння рівноваги згинальних моментів відповідно до визначеного випадку НДС нормально-го перерізу ПНСББ та перевіряємо за залежністю (20) дотримання умови його міцності.

### Висновок та перспективи подальших розробок

Викладені основні положення методики розрахунку несучої здатності нормального приведенного перерізу суцільних прямокутних ПНСББ залежно від НДС бетону, попередньо напруженої арматури і КПСДП. Запропоновані залежності дозволять розмежувати випадки розрахунку несучої здатності ПНСББ, що, в свою чергу, дасть можливість спростити і сам процес розрахунку за деформаційною моделлю.

Метою подальших досліджень є розробка аналітичних залежностей (рівнянь рівноваги згинальних моментів) розрахунку несучої здатності нормальних прямокутних перерізів згинальних ПНСББ залежно від варіантів його НДС.

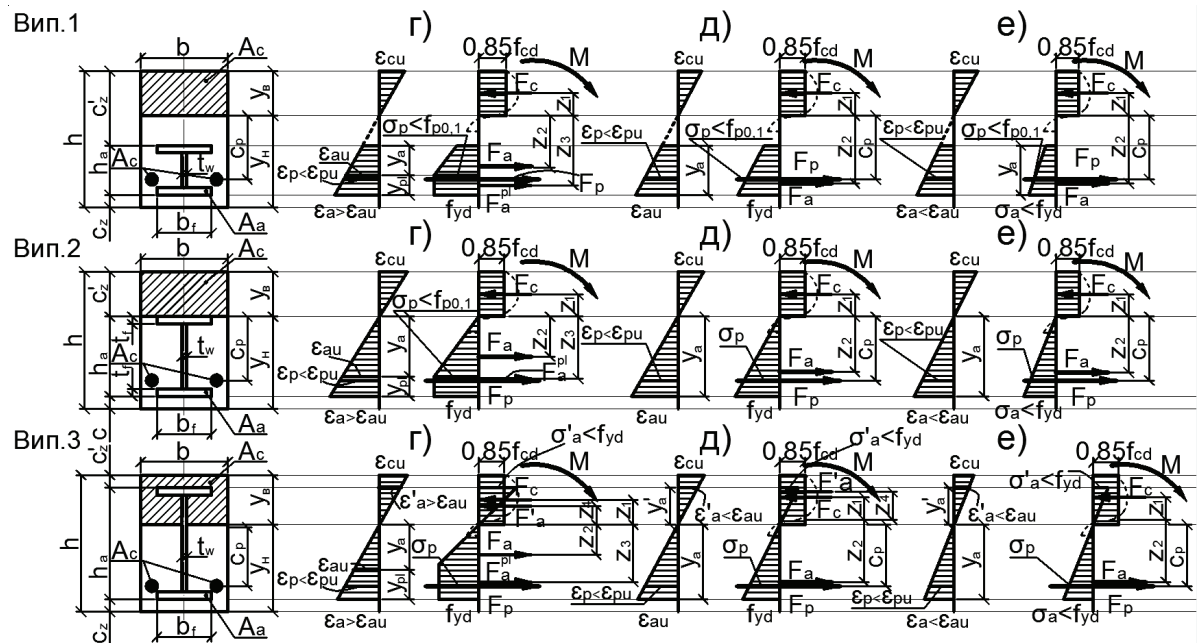


Рисунок 8. Випадки «г» – «е» напружено-деформованого стану нормального прямокутного перерізу попередньо напружених сталобетонних балок залежно від положення нейтральної осі.

Таблиця 6. Значення граничних деформацій і напружень композитних матеріалів ПНСББ залежно від варіанта напружено-деформованого стану (НДС) нормального перерізу

Робота арматури	Варіанти граничних значень деформацій і напружень	Значення граничних деформацій і напружень композитних матеріалів ПНСББ залежно від варіанта НДС нормального перерізу			
		деформації	напруження	деформації	напруження
		1а, 2а		1б, 2б	
1	Варіант НДС	$\epsilon_{cu}$	$0,85f_{cd}$	$\epsilon_{cu}$	$0,85f_{cd}$
	Стиснена зона перерізу				
	Розтягнена зона перерізу	$\epsilon_a > \epsilon_{au}$ $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $f_{p0,1}$	$\epsilon_a = \epsilon_{au}$ $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $f_{p0,1}$
	Варіант НДС	3а		3б	
2	Стиснена зона перерізу	$\epsilon_{cu}$ $\epsilon'_a < \epsilon_{au}$	$0,85f_{cd}$ $\sigma'_a < f_{yd}$	$\epsilon_{cu}$ $\epsilon'_a < \epsilon_{au}$	$0,85f_{cd}$ $\sigma'_a < f_{yd}$
	Розтягнена зона перерізу	$\epsilon_a > \epsilon_{au}$ $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $f_{p0,1}$	$\epsilon_a = \epsilon_{au}$ $\epsilon_p \geq \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $f_{p0,1}$
	Варіант НДС	1г, 2г		1д, 2д	
	Варіант НДС	3г		3д	
3	Стиснена зона перерізу	$\epsilon_{cu}$	$0,85f_{cd}$	$\epsilon_{cu}$	$0,85f_{cd}$
	Розтягнена зона перерізу	$\epsilon_a > \epsilon_{au}$ $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $\sigma_p < f_{p0,1}$	$\epsilon_a = \epsilon_{au}$ $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $\sigma_p < f_{p0,1}$
	Варіант НДС	3е		3е	
	Варіант НДС	1е, 2е		1е, 2е	
4	Стиснена зона перерізу	$\epsilon_{cu}$ $\epsilon'_a < \epsilon_{au}$	$0,85f_{cd}$ $\sigma'_a < f_{yd}$	$\epsilon_{cu}$ $\epsilon'_a < \epsilon_{au}$	$0,85f_{cd}$ $\sigma'_a < f_{yd}$
	Розтягнена зона перерізу	$\epsilon_a > \epsilon_{au}$ $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $\sigma_p < f_{p0,1}$	$\epsilon_a = \epsilon_{au}$ $\epsilon_p < \epsilon_{pu}$	$f_{yd}$ $\sigma_p < f_{p0,1}$
	Варіант НДС	3е		3е	
	Варіант НДС	1е, 2е		1е, 2е	

## Литература

1. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – Уведено вперше ; чинні 2011-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 81 с.
2. Проблеми розробки національного нормативного документа «Сталезалізобетонні конструкції» [Текст] / Ю. Г. Аметов, А. Н. Бамбура, О. В. Семко [та ін.] // Будівельні конструкції : Зб. наук. праць / Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. – Київ : НДІБК, 2008. – Вип. 70. – С. 10–14.
3. Єврокод 4: Проектування комбінованих сталезалізобетонних конструкцій – Частина 1-1: Загальні норми і правила для будівель [Текст] : Український переклад англомовної версії. – Київ : НДІБК, 2007. – 118 с.
4. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой [Текст] / НИИЖБ, ЦНИИПромзданий. – М.: Стройиздат, 1978. – 55 с.
5. Бамбура, А. М. До оцінки здатності сталобетонних елементів, що згинаються, на основі деформаційного методу і реальних діаграм деформації матеріалів [Текст] / А. М. Бамбура, Ю. Г. Аметов // Сталезалізобетонні конструкції. – Кривий Ріг : КТУ, 2004. – Вип. 6. – С. 71–76.
6. Бабич, Є. М. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із використанням деформаційної моделі [Текст] : Рекомендації / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич, В. В. Савицький. – Рівне : Вид-во НУВГП, 2005. – 37 с.
7. Бабич, Є. М. Напружено-деформований стан нормальних перерізів залізобетонних балок з урахуванням нелінійності деформування бетону [Текст] / Є. М. Бабич, Ю. О. Крусь, В. Є. Бабич // Вісник РДТУ : Збірник наукових праць. – Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. – Випуск 2, Частина 3. – С. 13–20.
8. Барашиков, А. Я. Спрощені розрахунки несучої здатності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів за деформаційною моделлю [Текст] / А. Я. Барашиков, І. В. Задорожнікова // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі і споруди : збірник наукових праць / Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 109–115.
9. Барашиков, А. Я. Методика розрахунку залізобетонних конструкцій за деформаційною моделлю згідно з проектом нових норм України [Текст] / А. Я. Барашиков // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2005. – Том 1, № 1. – С. 13–18.
10. Бамбура, А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А. М. Бамбура. – Харків, 2006. – 49 с.

## References

1. DBN B.2.6-160:2010. Buildings and constructions structures. Composite steel and concrete structures. General rules. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 81 p. (in Ukrainian)
2. Ametov, Yu. G.; Bambura, A. N.; Semko, O. V.; Sliusarenko, Yu. S.; Storozhenko, L. I.; Tarasiuk, V. G. The problem of the National governing document development «Steel and concrete structures». In: *Edited volume «Building constructions»*. Kyiv, 2008, Issue 70, p. 10–14. (in Ukrainian)
3. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings. Kyiv: NDIBK, 2007. 118 p. (in Ukrainian)
4. Guide on design of concrete structures with rigid reinforcement. Moscow: Stroiizdat, 1978. 55 p. (in Russian)
5. Bambura, A. M.; Ametov, Yu. G. To Evaluation of properties which bend based on deformation method and real trends of material displacement. In: *Steel and concrete structures*. Kryvyi Rih: KTU, 2004, Issue 6, p. 71–76. (in Ukrainian)
6. Babich, E. M.; Babich, V. E.; Savitskii, V. V. Analysis of uncut concrete beams using strain model: Recommended guideline. Rivne: NUVGP, 2005. 37 p. (in Ukrainian)
7. Babich, E. M.; Krus, Yu. O.; Babich, V. E. Strain-stress state of usual overcuts of concrete beams calculatingly nonlinearity of concrete straining. In: *Vestnic RDTU: Edited volume*. Rivne: RDTU, 1999, Issue 2, part 3, p. 13–20. (in Ukrainian)
8. Barashikov, A. Ya.; Zadorozhnikova, I. V. Shot-cut calculations of load-carrying ability of usual overcuts of curved concrete elements using strain model. In: *collections of scientific works «Resource-intensive materials, constructions, buildings and structures»*. Rivne: NUWMNRU, 2005. Issue 12, p. 109–115. (in Ukrainian)
9. Barashykov, A. Ya. Design procedure of reinforced concrete designs on deformation model according to the project of new norms of Ukraine. In: *Modern Industrial And Civil Construction*, 2005, Tom 1, No. 1, p. 13–18. (in Ukrainian)
10. Bambura, A. M. Experimental basis of applied deformation theory of concrete: Authors abstract doctoral thesis in engineering: speciality 05.23.01 «Building constructions, buildings and structures». Kharkiv, 2006. 49 p. (in Ukrainian)
11. Dorofeev, V. S.; Bardanov, V. Yu. Analysis of bending elements with account for complete diadram of concrete straining. Monograph. Odessa: OGASA, 2003. 210 p. (in Russian)
12. Lazarev, D. M. Power calculation of intensely bending concrete elements based on strain model with extremal criteria: Authors abstract Ph.D. thesis in Engineering Science: speciality 05.23.01 «Building constructions, buildings and structures». Poltava, 2008. 20 p. (in Ukrainian)

11. Дорофеев, В. С. Расчёт изгибаемых элементов с учётом полной диаграммы деформирования бетона [Текст] : Монография / В. С. Дорофеев, В. Ю. Барданов. – Одесса : ОГАСА, 2003. – 210 с.
12. Лазарев, Д. М. Розрахунок міцності стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Д. М. Лазарев. – Полтава, 2008. – 20 с.
13. Митрофанов, В. П. До розрахунку граничних значень деформацій бетону в розв'язанні задач міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів [Текст] / В. П. Митрофанов, А. М. Павліков // Збірник наукових праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава : ПолНТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 28–33.
14. Митрофанов, В. П. О предельной сжимаемости бетона в деформационных моделях железобетонных элементов [Текст] / В. П. Митрофанов, А. А. Шкурупий, Д. Н. Лазарев // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, будівлі і споруди : збірник наукових праць / Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2008. – Вип. 16, Ч. 2. – С. 264–271.
15. Митрофанов, В. П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов [Текст] / В. П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов : научн.-техн. сборник. – 2004. – Вип. 60. – С. 29–48.
16. Митрофанов, В. П. Про граничну деформацію стиснутої грані бетону в нормальному перерізі залізобетонних елементів [Текст] / В. П. Митрофанов, А. М. Павліков, Б. П. Митрофанов, О. А. Шкурупий // Збірник наукових праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава : ПолНТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 95–102.
17. Павліков, А. М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косо завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії [Текст] : Монографія / А. М. Павліков. – Полтава : ПолНТУ імені Юрія Кондратюка, 2007. – 259 с.
18. Роговой, С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчёт прочности сечений [Текст] : Монография / С. И. Роговой. – Полтава : ПолНТУ імені Юрія Кондратюка, 2002. – 183 с. – ISBN 966-616-018-8.
19. Wight, James K. Reinforced Concrete: Mechanics and Design [Текст] / James K. Wight, F. E. Richart, Jr., James G. Macgregor. – 6th ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2011. – 1157 p.
20. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – На зміну СНиП 2.03.01-84\* ; чинні від 2011-07-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
21. Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications: 13. Mitrofanov, V. P.; Pavlikov A. M. To the analysis of limit value of concrete straining in problem solving of power of usual overcuts of concrete elements. In: *Edited volume. Series «Machine industry, building»*. Poltava: PNTU, 2003, Issue 13, p.28–33. (in Ukrainian)
14. Mitrofanov, V. P.; Shkurupii, A. A.; Lazarev, D. N. About maximum permissible compressibility of concrete in strain model of concrete elements. In: *collections of scientific works «Resource-intensive materials, constructions, buildings and structures»*. Rivne: NUWMNRU, 2008. Issue 16, part 2, p. 264–271. (in Russian)
15. Mitrofanov, V. P. Practical use of strain model with extremal criteria of concrete elements power. In: *Municipal economy of cities*, 2004, Issue 60, p. 29–48. (in Russian)
16. Mitrofanov, V. P.; Pavlikov, A. M.; Mitrofanov, B. P.; Shkurupii, O. A. About limit strain of compressed side plane of concrete in usual overcut of concrete elements. In: *Edited volume. Series «Mechine engineering, building»*. Poltava: PNTU, 2004, Issue 14, p. 95–102. (in Ukrainian)
17. Pavlikov, A. M. Non-linear model of strain-stress state of loaded concrete elements in postcritical process. Monograph. Poltava: PNTU, 2007. 259 p. (in Ukrainian)
18. Rogovoi, S. I. Non-linear strain in concrete theory and analysis of profile resistance. Monograph. Poltava: PNTU, 2002. 183 p. (in Russian)
19. Wight, James K.; Richart, F. E.; Jr., James, G. Macgregor Reinforced Concrete: Mechanics and Design. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011. 1157 p.
20. DBN B.2.6-98:2009. Building structures and constructions. Concrete structures. Fundamental principles. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 71 p. (in Ukrainian)
21. Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications: ACI Innovation Task Group 4 (ACI ITG 4.3-07) / American Concrete Institute. Farmington Hills: MI, 2007. 202 p.
22. Kaar, Paul H.; Hanson, Norman W.; Capell, H. T. Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete. In: *Douglas McHenry International Symposium on Concrete Structures, ACI Publication SP-55*. Detroit: MI, 1978, p. 161–185.
23. Ilin, O. F. General calculation procedure of resistance of normal profiles with account for properties of different concrete. In: *Edited volume. Concrete and concrete elements behavior during forcing of diferent work*. Moscow: PEM VNIIS Gosstroia USSR, 1980, p. 47–54. (in Russian)
24. Kushnir, Iu. O. Classification of kinds of reinforcement of rectangular section of overcuts of concrete beams, made during energizing. In: *The third international scientific and technical internet conference «Building, reconstruction and recovery of municipal engineering buildings»* Kharkiv: KhNAMG, 2012. Accessed at: <http://eprints.kname.edu.ua/25229/>. (in Ukrainian)

- ACI Innovation Task Group 4 (ACI ITG 4.3-07) / American Concrete Institute. – Farmington Hills : MI, 2007. – 202 p.
22. Kaar, Paul H. Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete [Текст] / Paul H. Kaar, Norman W. Hanson, H. T. Capell // Douglas McHenry International Symposium on Concrete Structures, ACI Publication SP-55 / American Concrete Institute. – Detroit : MI, 1978. – P. 161–185.
23. Ильин, О. Ф. Обобщённая методика расчёта прочности нормальных сечений с учётом особенностей свойств различных бетонов [Текст] / О. Ф. Ильин // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности : Сб. науч. тр. / НИИ бетона и железобетона; под. ред. А. А. Гвоздева, С. М. Крылова. – М. : НИИЖБ, 1980. – С. 47–54.
24. Кушнір, Ю. О. Класифікація типів армування прямокутних перерізів сталобетонних балок, які утворюються при підсиленні [Електронний ресурс] / Ю. О. Кушнір // III міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства», 15.04-15.05.2012, г. Харьков / Харьковская национальная академия городского хозяйства. – Харків : ХНАМГ, 2012. – Режим доступу до статті : <http://eprints.kname.edu.ua/25229/>

**Кушнір Юлія Олександрівна** – аспірант кафедри конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану сталевих та сталобетонних попередньо напружених балок; розробка й удосконалення методів розрахунку сталобетонних попередньо напружених балок.

**Пенц Володимир Федорович** – к. т. н., доцент; кафедра конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: розробка й удосконалення методів розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонних конструкцій і елементів.

**Овсій Микола Олексійович** – начальник відділу Приватного підприємства «Будекспертиза». Наукові інтереси: розробка і удосконалення методик розрахунку кам'яних, залізобетонних і сталезалізобетонних конструкцій (елементів) на етапах проектування та їх підсилення; удосконалення методик оцінки технічного стану і експлуатаційної надійності конструкцій (елементів) будівель і споруд; удосконалення методик розрахунку і проектування природного освітлення приміщень будівель.

**Кушнір Юлія Александровна** – аспірант кафедри конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния стальных и сталобетонных предварительно напряжённых балок; разработка и усовершенствование методов расчёта сталобетонных предварительно напряжённых балок.

**Пенц Владимир Фёдорович** – к. т. н., доцент; кафедра конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Научные интересы: разработка и усовершенствование методов расчёта и исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций и элементов.

**Овсий Николай Алексеевич** – начальник отдела Частного предприятия «Стройэкспертиза». Научные интересы: разработка и усовершенствование методик расчёта каменных, железобетонных и сталежелезобетонных конструкций (элементов) на этапах проектирования и их усиления; усовершенствование методик оценки технического состояния и эксплуатационной надёжности конструкций (элементов) зданий и сооружений; усовершенствование методик расчёта и проектирования естественного освещения помещений зданий.

**Iuliia Kushnir** – postgraduate student Department of Metal, Timber and Plastic Structures of the Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk. Research interests: study of the stress-strain state of the steel and composite steel-concrete prestressed beams; the development and improvement of methods for calculating the prestressed composite steel-concrete beams.

**Volodumir Pents** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Department of Metal, Timber and Plastic Structures of the Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk. Research interests: design and improvement of methods of calculation and study of the stress-strain state of composite structures and components.

**Mukola Ovsyiy** – Department head PE «Building expertise». Research interests: design and improvement of methods for calculating the stone, concrete and composite structures (elements) during the design and strengthening; improvement of methods assessment of technical condition and serviceability of structures (elements) of buildings and structures; improvement of methods of calculating and design of natural lighting of the building.