

УДК 624.016

**Ю. О. КУШНІР**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

**РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ПОПЕРЕДНЬО  
НАПРУЖЕНИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З БЕТОННОЮ  
ВЕРХНЬОЮ ПОЛИЦЕЮ БЕЗ ЕЛЕМЕНТІВ ЗЧЕПЛЕННЯ**

Наводиться метод розрахунку міцності попередньо напружених сталезалізобетонних балок з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення. Розроблена методика розрахунку оптимальної площі перерізу горизонтальної затяжки сталезалізобетонних балок з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення. Визначені значення розрахункового і контрольованого попереднього напруження в горизонтальній затяжці сталезалізобетонної балки з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення зі сталевим двотавровим профілем.

**сталь, бетон, балка, переріз, напруження, міцність, зчеплення, затяжка, попереднє напруження****ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ І ПРАКТИЧНИМИ  
ЗАВДАННЯМИ**

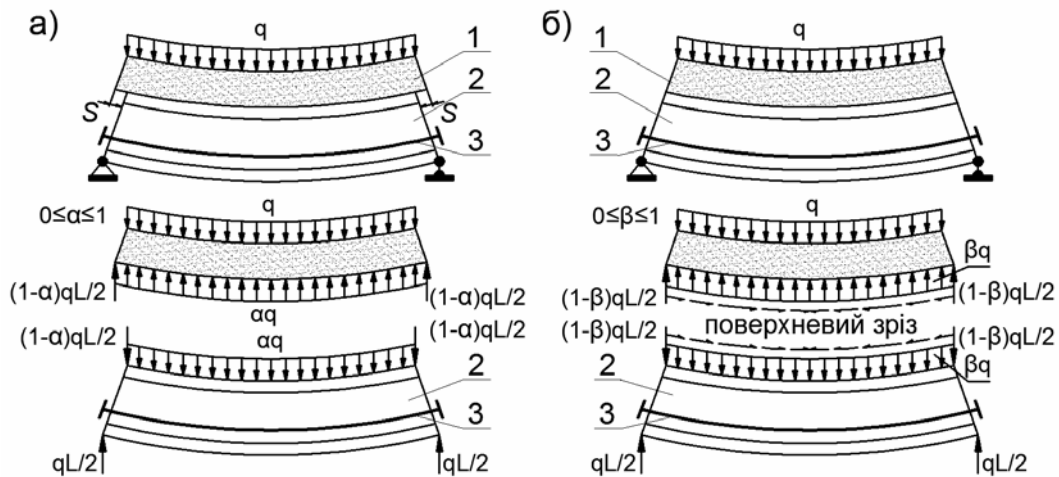
Провідні вітчизняні науковці Ю. Г. Аметов, А. М. Бамбура, Ю. С. Слюсаренко, О. В. Семко, Л. І. Стороженько, В. Г. Тарасюк, які є співавторами розробки нині чинних нормативних документів [1], в своїй роботі [2] відзначають необхідність подальшої роботи над редакцією ДБН «Сталезалізобетонні конструкції» [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 НЕВИРІШЕНИХ ПИТАНЬ**

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 гальмується 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.

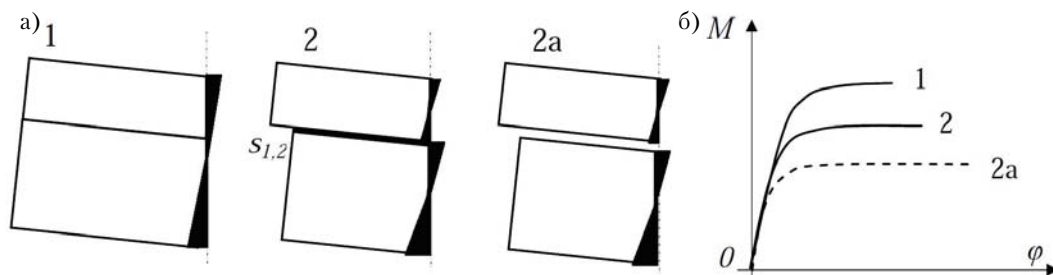
Одними з найбільш поширених композиційних конструкцій (елементів) є сталезалізобетонні (СЗБ) балки, в яких несуча здатність безпосередньо пов'язана з умовами зчеплення між бетоном і конструкційним сталевим профілем. Р. П. Джонсон в роботі [4] поділяє напружено-деформований стан композитних балок на три випадки: нелінійно-композитний, коли зчеплення між бетоном і сталевим профілем відсутнє; частково композитний, коли зв'язок між бетоном і профілем частковий; повністю композитний, коли між бетоном і конструкційним сталевим профілем існує повне зчеплення. На рис. 1 наведені пограничні випадки композитних властивостей СЗБ балок з попереднім напруженням.

У роботі [5, табл. 1] автором дана класифікація випадків деформування попередньо-напружених сталезалізобетонних (ПНСЗБ) балок з затяжками залежно від виду їх приведеного перерізу і умов зчеплення композитних матеріалів на стадії руйнування. У даній роботі розглядається випадок I-A, коли сталевий профіль сталезалізобетонної балки не має зчеплення із бетонною полицею [5, табл. 1].



**Рисунок 1** – Варіанти загального деформування ПНСЗБ балок на стадії руйнування [5] залежно від умов з'єднання матеріалів: а) без зчеплення; б) з повним зчепленням: 1 – бетонна плита; 2 – сталевий профіль; 3 – затяжка.

Дослідженню композитних конструкцій без зчеплення або з частковим зчепленням між компонентами присвячені роботи наступних авторів Р. П. Джонсона [4], А. Хана [6], Эйяда К. С. Аль-хачамі, К. Мустафи Аль-хеті [7], П. Алявдіна і К. Урбанської [8], Е. Ахмеда, Г. Р. Собуза та Н. М. Сутана [9], Халела І. Азіза [10], Хешама Абд Аль-Латеф Нумана [11] та ін. Так в роботі П. Алявдіна та К. Урбанської [8] проведений аналіз впливу зусиль зчеплення на несучу здатність нормального перерізу композитних балок, який наглядно показано на рис. 2.



**Рисунок 2** – Міцність нормального перерізу композитної балки із двох шарів [8, рис. 2]: а) механізм руйнування нормального перерізу композитної балки залежно від впливу зусиль зчеплення між її компонентами: 1 – зчеплення повне; 2 – зчеплення часткове; 2а – зчеплення відсутнє; б) несуча здатність нормального перерізу балки залежно від зусиль зчеплення.

У практиці будівництва композитні сталезалізобетонні балки без зчеплення між верхньою бетонною полицею та конструктивним приведеним сталевим двотавровим профілем (КПСДП) застосовують у наступних випадках:

- 1) проектування сталезалізобетонних перекриттів без елементів зчеплення;
- 2) при підсиленні плитних ділянок існуючих залізобетонних перекриттів.

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.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Загальна мета досліджень полягає у розробці інженерної методики розрахунку міцності попередньо напружених сталезалізобетонних (ПНСЗБ) балок з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення.

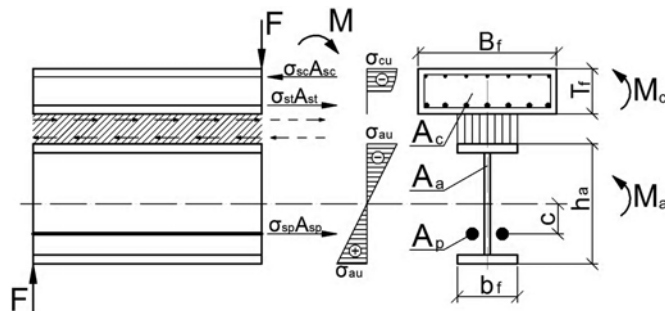
## ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Під впливом зовнішніх зусиль  $F$  і  $M$  в нормальному перерізі ПНСЗБ балки з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням в граничному стані виникають у кожному її компоненті нормальні зусилля і напруження, які наведені на рис. 3. Несуча здатність нормального перерізу ПНСЗБ балки з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням, що нехтується, становить:

$$M \leq M_c + M_a, \quad (1)$$

де  $M_c$  – несуча здатність верхньої бетонної чи залізобетонної полиці ПНСЗБ балки або плити перекриття, при його підсиленні;

$M_a$  – несуча здатність конструктивного приведеного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) балки або сталюого двотаврової балки при підсиленні плитних ділянок залізобетонних перекриттів.



**Рисунок 3** – Розподіл внутрішніх зусиль в нормальному перерізі ПНСЗБ балки з верхньою залізобетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням, що нехтується, при дії зовнішніх зусиль  $F$  і  $M$  в граничному стані її несучої здатності.

У випадках, коли: товщина бетонної верхньої полиці незначна ( $T_f/h_a \leq 0,1$ ); армування перерізу залізобетонної полиці виконане в один ряд, який розташований по її висоті вище величини  $T_f/2 \dots T_f/3$ ; при підсиленні плитної ділянки залізобетонного перекриття, що має ушкодження бетону і арматури 50 % і більше, відповідно до вимог п. 2.5.6 [12], несучу здатність нормального перерізу ПНСЗБ балки з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням, що нехтується, необхідно визначати за залежністю:

$$M \leq M_a. \quad (2)$$

1. Площу перерізу КПСДП сталезалізобетонної балки з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення або з частковим зчепленням, що нехтується, визначаємо залежно від необхідного значення моменту опору його перерізу ( $W_a$ ):

$$W_a = M / (k_a \cdot f_y), \quad (3)$$

де  $W_a$  – момент опору перерізу КПСДП відносно горизонтальної осі X;  
 $f_y$  – розрахункові опори відповідно матеріалу затяжки і матеріалу КПСДП;  
 $k_a = 1,05 \dots 1,15$  – коефіцієнт.

2. Розрахунок оптимальної площі перерізу горизонтальної затяжки сталезалізобетонних балок з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення.

Розрахунок КПСДП з затяжкою ПНСЗБ балок з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням, яке нехтується, здійснюється на основі запропонованих автором в роботах [13, 14] методик розрахунку міцності і деформативності сталюих балок двотаврового перерізу, які підсилені попередньо-напруженими затяжками.

Критерієм раціонального підбору площі перерізу затяжки  $A_p$  при розрахунку міцності конструктивного приведеного сталюого двотаврового профілю (КПСДП) сталезалізобетонної балки з затяжкою в пружній стадії є напружено-деформований стан (НДС), при якому відбувається одночасне досягнення в її розрахунковому перерізі на середині прогону балки таких напружень: досягнення

в крайньому волокні стисненої зони КПСДП напружень  $\sigma_B$  значень, рівних розрахунковому значенню границі текучості матеріалу КПСДП  $f_y$ ; досягнення напружень  $\sigma_p$  в елементах (стрижнях) затяжки значень, рівних розрахунковому опору арматурної сталі на розтяг  $f_p$ .

Розрахунок площі перерізу горизонтальної затяжки ( $A_p$ ) визначаємо за формулою:

$$A_p = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (4)$$

де коефіцієнти  $A$ ,  $B$  і  $C$  визначаємо за формулами:

$$A = \frac{f_p m}{4\pi}; \quad B = c^2 f_p m; \quad C = I_a (f_y - \sigma_0) - M h_{0,red}, \quad (5)$$

де  $M$  – максимальне розрахункове значення згинального моменту від зовнішнього навантаження, яке діє в перерізі КПСДП на середині прогону сталезалізобетонної балки;  
 $f_p$ ,  $f_y$  – розрахункові опори відповідно матеріалу затяжки і матеріалу КПСДП;  
 $m = f_y / f_p$  – коефіцієнт приведення розрахункового опору матеріалу затяжки до розрахункового опору матеріалу КПСДП;  
 $c$  – відстань по перпендикуляру між геометричною віссю КПСДП та між геометричної віссю приведенного перерізу затяжки;  
 $h_{0,red}$  – відстань від верхньої стисненої грані КПСДП до горизонтальної геометричної вісі приведенного перерізу конструкції з затяжкою;  
 $I_a$  – момент інерції перерізу КПСДП відносно горизонтальної осі  $X$ ;  
 $\sigma_0$  – напруження в верхній та нижній гранях перерізу КПСДП, яке виникає від навантаження, яке діє під час введення затяжки та розраховується за формулою:

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{W_a}, \quad (6)$$

де  $M_0$  – значення згинального моменту від зовнішнього навантаження, яке діє на середині прогону балки у КПСДП під час введення затяжки.

Значення відстані від верхньої стисненої грані КПСДП до горизонтальної геометричної осі приведенного перерізу конструкції з затяжкою, визначаємо за формулою:

$$h_{0,red} = \frac{A_a h / 2 + A_p (h / 2 + c)}{A_a + A_p}, \quad (7)$$

де  $A_a$ ,  $h$  – відповідно площа і висота перерізу КПСДП.

Прямий розрахунок значення необхідної площі затяжки  $A_p$  виконати за один раз не маємо можливості, тому на попередньому етапі необхідно методом послідовних наближень обчислити значення висоти приведенного перерізу конструкції  $h_{0,red}$ , яке б задовольняло умову (7). Для проведення послідовних розрахунків висоти  $h_{0,red}$  вводимо наступні коефіцієнти відношень ( $\eta$ ,  $\alpha$  і  $k$ ):

$$\eta = \frac{A_p}{A}; \quad \alpha = \frac{2c}{h}; \quad k = \frac{2h_{0,red}}{h}. \quad (8)$$

Після підстановки в формулу (4) значень коефіцієнтів  $\eta$ ,  $\alpha$  і  $k$  отримали наступні між ними залежності:

$$k = \frac{1 + \eta + \eta\alpha}{1 + \eta}, \quad \text{або} \quad \alpha = \frac{(k-1)(1+\eta)}{\eta}, \quad \text{або} \quad \eta = \frac{k-1}{1+\alpha-k}. \quad (9)$$

При послідовних розрахунках висоти  $h_{0,red}$  попереднє значення площі затяжки  $A_p$  рекомендується визначати за наближеною формулою:

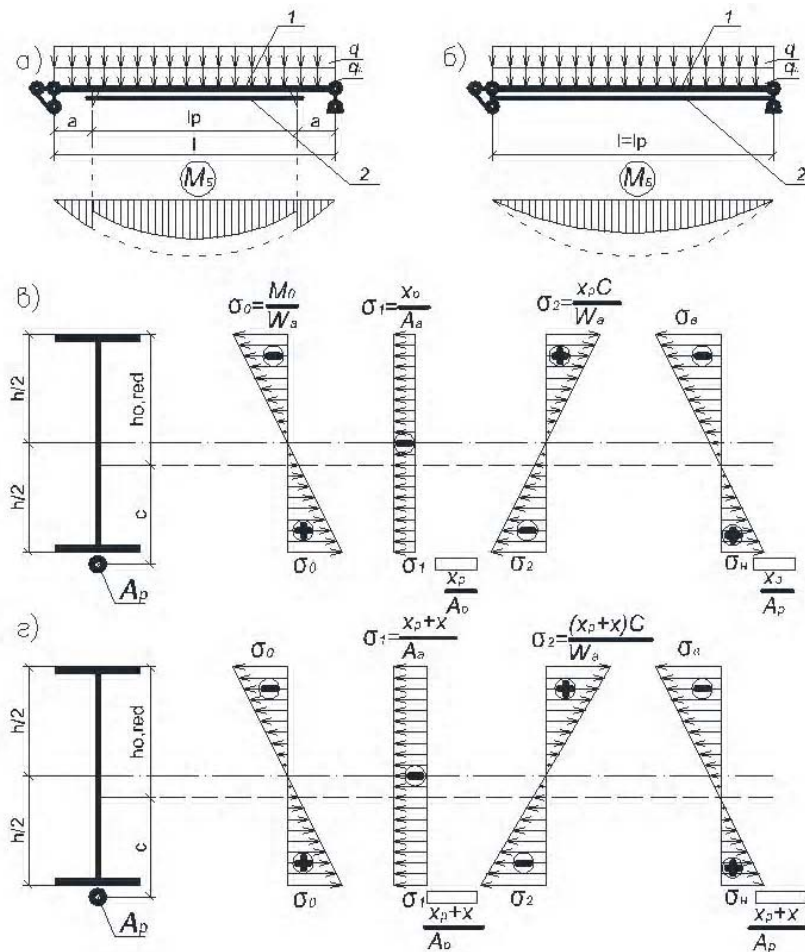
$$A_p = \frac{M \cdot h_{0,red} - I_x (f_y - \sigma_0)}{h_{0,red} \cdot f_p \cdot c \cdot m}. \quad (10)$$

3. Визначення значення розрахункового і контрольованого попереднього напруження в горизонтальній затяжці КПСДП сталезалізобетонної балки з верхньою бетонною полицею без елементів зчеплення.

Особливістю розрахунку СЗБ балки з попередньо напруженою горизонтальною затяжкою є вибір розрахункової величини її попереднього напруження. При раціональному (оптимальному)

розрахунковому значенні величини попереднього напруження зтяжки маємо можливість отримати значний запас у зоні пружної роботи КПСДП сталезалізобетонної балки.

Схема введення горизонтальної зтяжки та епюри нормальних напружень в розрахунковому перерізі КПСДП наведені на рис. 4.



**Рисунок 4** – Схема КПСДП балки з горизонтальною зтяжкою та епюри нормальних напружень в розрахунковому перерізі: а) схема КПСДП балки при  $l_p < l$ ; б) схема КПСДП балки при  $l_p = l$ ; в) нормальні напруження в розрахунковому перерізі КПСДП балки без попереднього напруження; г) нормальні напруження в розрахунковому перерізі КПСДП балки з попереднім напруженням; 1 – КПСДП; 2 – горизонтальна зтяжка.

Необхідну розрахункову величину попереднього напруження ( $\sigma_{sp0}$ ) в горизонтальній зтяжці балки, що попередньо розвантажена, можемо розрахувати за формулою:

$$\sigma_{sp0} = \frac{M}{A_p} [D - G], \quad (11)$$

де коефіцієнти  $D$  і  $G$  визначаємо за залежностями:

$$D = \frac{l_p / l^2}{c - W_a / A_a}, \quad (12)$$

$$G = \frac{c \cdot (1 - l_p^2 / 3l^2)}{c^2 + I_a / A_a + I_a / A_p}, \quad (13)$$

де  $M$  – максимальне розрахункове значення згинального моменту від зовнішнього навантаження, яке діє в перерізі КПСДП на середині прогону сталезалізобетонної балки;

$l_p$  і  $l$  – відповідно довжини зтяжки і розрахункового прогону балки;

$A_a$ ,  $I_a$ ,  $W_a$  – площа, моменти інерції і опору відповідно горизонтальної осі перерізу КПСДП сталезалізобетонної балки;

$c$  – відстань по перпендикуляру від геометричної осі КПСДП до геометричної осі зтяжки;  
 $A_p$  – оптимальна площа перерізу зтяжки, яка розраховується в результаті вирішення задачі послідовного її підбору з використанням формул (4)–(10).

Необхідну величину попереднього напруження ( $\sigma_{sp0}$ ) в горизонтальній зтяжці сталезалізобетонної балки без попереднього її розвантаження можемо розрахувати за формулою:

$$\sigma_{sp0} = \frac{M_0}{A_p} \cdot D - \frac{M - M_0}{A_p} \cdot [D - G], \quad (14)$$

де  $M_0$  – значення згинального моменту від зовнішнього навантаження в розрахунковому перерізі КПСДП сталезалізобетонної балки, яке діє під час введення зтяжки.

Величину попереднього напруження ( $\sigma_{sp}$ ), яке контролюється, визначаємо за формулою:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{sp0} + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (15)$$

де  $\sigma_1$  – втрати напруження в елементах зтяжки від релаксації при механічному способі натягу:

$$\sigma_1 = \left( 0,22 \cdot \frac{\sigma_{sp0}}{f_p} - 0,1 \right) \cdot \sigma_{sp0}; \quad \sigma_1 = 0,1 \cdot \sigma_{sp0} - 20; \quad (16)$$

$\sigma_2$  – втрати напруження в елементах зтяжки від температурного перепаду:

$$\sigma_2 = 1,25 \cdot \Delta t; \quad (17)$$

$\sigma_3$  – втрати напруження в елементах зтяжки від деформації їх анкерів при натягненні на жорсткі упорні елементи:

$$\sigma_3 = E_p \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (18)$$

Величина попереднього напруження ( $\sigma_{sp}$ ), яке контролюється, в горизонтальній зтяжці обмежується значеннями розрахункових опорів матеріалу зтяжки ( $f_p$ ) і матеріалу КПСДП ( $f_y$ ):

$$\sigma_{sp} \leq f_p; \quad \sigma_{sp} \leq f_y. \quad (19)$$

4. Перевірку несучої здатності нормального перерізу ПНСЗБ балки з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням, що нехтується, здійснюємо за залежністю:

$$M \leq M_a = f_y \cdot W_a^{np}, \quad (20)$$

де  $W_a^{np}$  – приведений момент опору нормального перерізу КПСДП ПНСЗБ балки без зусиль зчеплення між її компонентами відповідно до його горизонтальної осі з урахуванням площ КПСДП ( $A_a$ ) та зтяжки ( $A_p$ ).

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволили зробити такий висновок: запропонована методика дозволяє розрахувати та запроектувати горизонтальну зтяжку для попередньо напружених сталезалізобетонних балок з верхньою бетонною полицею без зчеплення або з частковим зчепленням між конструктивним приведеним сталевим двотавровим профілем і бетонною полицею.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – Уведено вперше ; чинні з 01.09.2011 р. – К. : ДП «Укравхбудінформ», 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. – Київ, 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. Johnson, R. P. Composite Structures of Steel and Concrete. Volume 1: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings [Текст] / R. P. Johnson. – Oxford and Northampton: Alden Press Limited, 1994. – 188 p.

5. Кушнір, Ю. О. Методичні основи розрахунку несучої здатності нормального прямокутного приведенного перерізу сталезалізобетонних балок на основі розрахункової деформаційної моделі [Текст] / Ю. О. Кушнір, В. Ф. Пенц, М. О. Овсій // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2012. – Том 8, № 3. – С. 107–122.
6. Khan, A. Composite Behavior of Normal weight and Lightweight concrete Panels With Partially Embedded Light-Gauge Steel Channels [Текст] : A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering in the Graduate Academic Unit of Civil Engineering / Akram Khan. – New Brunswick, 2010. – 268 p.
7. Al-hachamee, Eyad K. S. Behaviour of Composite Slim Floor Beam with Partial Interaction [Текст] / Eyad K.S. Al-hachamee, Mustafa K. Al-heety // Eng. & Technology. – 2007. – Vol. 25, Suppl. of No. 3. – P. 495–511.
8. Aliawdin, P. Limit analysis of steel-concrete composite structures with slip [Текст] / P. Aliawdin, K. Urbanska // Civil and Environmental Engineering Reports. – 2011. – No. 7. – P. 19–34.
9. Ahmed, E. Flexural performance of CFRP strengthened RC beams with different degrees of strengthening schemes [Текст] / E. Ahmed, H. R. Sobuz, N. M. Sutan // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – Vol. 6(9). – P. 2229–2238.
10. Khalel, I. Aziz. Behavior of multi-layer composite continuous beams with partial interaction [Текст] / Khalel I. Aziz // Anbar Journal for Engineering Sciences. – 2008. – Vol. 1, No. 2. – P. 51–68.
11. Hesham Abd AL-Latef Numan. Linear Analysis of Continuous Composite Concrete-Steel Beam with Partial Connection [Текст] / Hesham Abd AL-Latef Numan // Journal of Engineering and Development. – 2009. – Vol. 13, No. 2. – P. 51–69.
12. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт і підсилення несучих і огорожуючих будівельних конструкцій і основ промислових будинків і споруд [Текст]. – Вводяться вперше ; введені в дію з 01.07.2003. – К. : НДІБК, 2003. – 82 с.
13. Пенц, В. Ф. Розрахунок міцності металевих балок, які підсилені горизонтальною затяжкою [Текст] / В. Ф. Пенц, Ю. О. Кушнір // Ресурсоекономні матеріали, конструкції та будівлі : Зб. наук. праць. – Рівне, 2009. – Вип. 18. – С. 514–520.
14. Кушнір, Ю. О. Теоретико-експериментальні дослідження деформативності сталевих балок, що підсилені горизонтальними затяжками [Текст] / Ю. О. Кушнір // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2012. – Том 8, № 2. – С. 71–80.

Отримано 01.04.2013

Ю. А. КУШНИР  
РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО  
НАПРЯЖЁННЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С БЕТОННОЙ  
ВЕРХНЕЙ ПОЛКОЙ БЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ  
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

Приводится метод расчета прочности предварительно напряженных сталезалезобетонных балок с верхней бетонной полкой без элементов сцепления. Разработана методика расчета оптимальной площади сечения горизонтальной затяжки сталезалезобетонных балок с верхней бетонной полкой без элементов сцепления. Определены значения расчетного и контролируемого предварительного напряжения в горизонтальной затяжке сталезалезобетонной балки с верхней бетонной полкой без элементов сцепления со стальным двутавровым профилем.

**сталь, бетон, балка, сечение, напряжения, прочность, сцепление, затяжка, предварительное напряжение**

JULIA KUSHNIR  
STRENGTH CALCULATION OF NORMAL SECTION PRESTRESSED  
COMPOSITE BEAMS WITH THE UPPER CONCRETE FLANGE WITHOUT  
BOND ELEMENTS  
Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk

We give a method of calculating the strength of prestressed composite steel-concrete beams with upper concrete flange without bond elements. The method of calculation of optimal area of cross section horizontal tendon composite steel and concrete beams with upper concrete flange without bond elements has been developed. The values of the design and controlled pre-stressing in the horizontal tightening composite steel and concrete beams with concrete upper flange without coupling elements with steel I-section have been determined.

**steel, concrete, beam, cross-section, stress, strength, bond, tendon, pre-stress**