

УДК [624.012.45+624.014.2]:691.792

Л.І. Стороженко, д.т.н., проф.
О.Г. Горб, асп.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕЙОВИМ З'ЄДНАННЯМ БЕТОНУ І СТАЛІ

Наведено методикку розрахунку несучої здатності сталезалізобетонних елементів, в яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується за допомогою склеювання. Виконано порівняння результатів експериментальних досліджень з теоретичним розрахунком та їх аналіз.

Ключові слова: сталезалізобетонний елемент, склеювання, розрахунок, навантаження, несуча здатність.

Постановка проблеми. Останнім часом будівництво потребує створення нових прогресивних несучих конструкцій чи раціоналізації вже відомих з метою зменшення вартості, зниження витрат матеріалів та трудомісткості зведення будівель і споруд. У наш час цим вимогам повною мірою відповідають сталезалізобетонні конструкції, в яких найбільш раціонально поєднуються сталь та бетон. Однак проектувальники цих конструкцій стикаються з проблемою забезпечення сумісної роботи складових. Усе частіше при реконструкції залізобетонних конструкцій і влаштуванні анкерних болтів для забезпечення сумісної роботи бетону й сталі стає поширеним застосування клеїв. Найефективнішими в цих випадках виявилися акрилові клеї. Таким чином в ряді традиційних сталезалізобетонних конструкцій було використано замість анкерувальних засобів клейові з'єднання на їх основі.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми був розрахунок конструктивних елементів, в яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується за допомогою склеювання, зокрема при врахуванні характеристик клейового з'єднання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченням та застосуванням клейових з'єднань у будівельній галузі займається наукова школа М.С. Золотова [2], створена в Харківській національній академії міського господарства, де було доведено суттєву перевагу серед усіх видів клеїв, що використовуються в будівництві, саме акрилових. На противагу паралельно розроблено ряд традиційних анкерувальних засобів [3, 4]. Однак вони є надто матеріалоемними, їх установа має високу трудомісткість та потребує високої кваліфікації робітників. Ці доробки використані для поєднання сталі й бетону в сталезалізобетонних плитах по профільованому настилу [5] та сталевих двотаврах з боковими порожнинами, заповненими бетоном [6]. Запропоновано використати замість традиційних анкерів клейові з'єднання на основі акрилових з урахуванням досвіду використання теорії складених стрижнів [1, 3], яка була розроблена А.Р. Ржаніциним у 30–40-х роках минулого століття, вирішено використати її для розроблення методики розрахунку конструкцій з клейовими з'єднаннями, що дасть змогу врахувати фізико-механічні характеристики матеріалу шва. Також потрібно перевірити можливість використання традиційних способів розрахунку конструкцій з клейовим з'єднанням [7].

Формулювання цілей статті. Метою написання статті є висвітлення та аналіз розроблених методик визначення несучої здатності сталезалізобетонних конструктивних елементів, у яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується за допомогою склеювання, з використанням теорії складених стрижнів та методу граничних станів.

Основний матеріал. Найпростішим інженерним методом визначення несучої здатності будівельних конструкцій є розрахунок за граничними станами з використанням двох умов рівноваги. Досліджувані стиснуті сталезалізобетонні елементи (сталеві двотаври з боковими порожнинами, заповненими бетоном; бетонні призми з обрамленням сталевими листами), поперечні перерізи яких зображено на рис. 1, можна розрахувати згідно з цим методом, дотримуючись основної передумови визначення граничних зусиль: опір сталі та бетону представляється напруженнями, що дорівнюють відповідним розрахунковим опорам, рівномірно розподіленим по висоті (прямокутна епюра напружень). При позациентровому стиску виникає розтягнута зона. Якщо бетонна складова потрапляє до цієї зони, то її розрахунковий опір не враховується при розрахунках, оскільки порівняно зі сталлю він досить незначний.

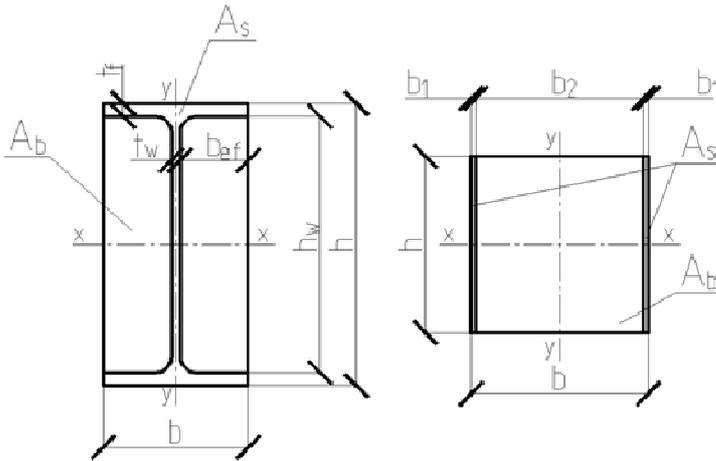


Рисунок 1 – Розрахункові схеми поперечних перерізів стиснутих елементів: а) двотавр з боковими порожнинами, заповненими бетоном; б) стиснутий елемент, армований сталевими листами

Розрахунок міцності прямокутних перерізів стиснутих сталезалізобетонних елементів у загальному випадку виконується залежно від висоти стиснутої зони x , що визначається за формулою, отриманою з рівняння рівноваги, згідно з яким сума проєкцій усіх зусиль на вертикальну вісь повинна дорівнювати нулю,

Розрахунок міцності прямокутних перерізів стиснутих сталезалізобетонних елементів у загальному випадку виконується залежно від висоти стиснутої зони x , що визначається за формулою, отриманою з рівняння рівноваги, згідно з яким сума проєкцій усіх зусиль на вертикальну вісь повинна дорівнювати нулю,

$$N = R_b b x$$

$$x = \frac{N - R_s A_s - R_s A'_s}{R_b b} \quad (2)$$

Розрахунок за приведеним перерізом використовується для приблизного визначення несучої здатності досліджуваних конструкцій, може використовуватися для перевірки та порівняння з іншими методами розрахунку. Варіанти запропонованих поперечних перерізів у нашому випадку приводяться до сталі.

Несуча здатність сталезалізобетонних елементів, що працюють на позациентровий стиск з випадковими ексцентриситетами, за приведеним до сталі перерізом визначається згідно зі СНиП II-23-81*

$$\frac{N}{\varphi A_{red}} \leq R_y \gamma_c; A_{red} = A_s + n_b A_b; n_b = \frac{E_b}{E_s} \quad (3)$$

Для перерізу відповідно до 1-го варіанта A_{red} обчислюється за рівнянням

$$A_{red} = A_s + n_b (h \cdot b - A_s) \quad (4)$$

Для перерізу згідно з 2-м варіантом ця ж формула матиме вигляд

$$A_{red} = 2 \cdot h \cdot b_1 + n_b (h \cdot b_2) \quad (5)$$

Коефіцієнт поздовжнього згину φ визначається за відповідними таблицями СНиП II-23*-81 залежно від гнучкості λ :

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_{red}}; i_{red} = \sqrt{\frac{I_{red}}{A_{red}}} \quad (6)$$

Для 1-го варіанта

$$I_{red,x} = I_x + n_b \frac{(b-t_w)(h-2t_f)^3}{12}; I_{red,y} = I_y + n_b \frac{(h-2t_f)(b-t_w)^3}{12}. \quad (7)$$

Для 2-го варіанта

$$I_{red,x} = \frac{h^4 - b_2 \cdot h^3}{12} + n_b \frac{b_2 \cdot h^3}{12}; I_{red,y} = \frac{b^4 - b_2^3 \cdot h}{12} + n_b \frac{b_2^3 \cdot h}{12}. \quad (8)$$

Таблиця 1

Несуча здатність стиснутих дослідних елементів

Зразок	Несуча здатність, кН			Розбіжність, %		Коефіцієнт ефективності сталезалізобетону, η
	експериментальні значення	теоретичні значення за граничними станами	теоретичні значення за приведеним перерізом до сталі	значення за граничними станами	значення за приведеним перерізом до сталі	
Стійка 2 м	446	470	460,8 (232)*	+5,3	+3,3 (-48)	1,71
Стійка 0,63 м БК	290	667 (270)**	638,5	+130 (-6,9)	-	-
Стійка 0,63 м К1	440	667 (332)***	638,5	+51,5 (-24,5)	-	1,21
Стійка 0,63 м К2	660	667	638,5	+1,1	-3,3	2,49

Примітки: * – несуча здатність сталевих двотавра довжиною 2 м без заповнення бетоном; ** – несуча здатність елемента з урахуванням виникнення ексцентриситету величиною 10 см; *** – несуча здатність бетонної призми без урахування сталевих обрамлення.

Результати розрахунків (табл. 1), отримані згідно зі згаданими вище методиками, при порівнянні з експериментальними даними показали можливість застосування традиційних інженерних методів визначення несучої здатності стиснутих елементів щодо запропонованих зразків, у яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується за допомогою клейового з'єднання.

Одним із варіантів визначення несучої здатності сталезалізобетонних конструктивних елементів при дії згинальних моментів є розрахунок відповідно до теорії складених стрижнів. Складеним називається такий стрижень, поперечний переріз якого складається з кількох окремих частин. Зазвичай складові частини стрижнів з'єднуються між собою жорсткими в'язями по всій довжині, тому вони вважаються монолітними. Отримані таким чином складені стрижні розглядаються як єдине ціле, хоча їх складові можуть бути виготовлені з різних матеріалів. Проте в багатьох випадках не вдається достатньо жорстко з'єднати окремі стрижні, а отже, виникає необхідність урахувати податливість зв'язків. Такі стрижні не є монолітними і повинні розглядатися як окрема група, яка і називається складеними стрижнями.

Найбільш поширеними є металеві та дерев'яні складені стрижні, а саме складені металеві колони, розтягнуті й стиснуті стиковані по довжині внапусток сталеві пакети, клеєні фанерні і дощаті конструкції тощо. Залізобетонні та сталезалізобетонні конструкції також не важко розділити на складені стрижні. Розрізняють також плоскі, тобто сили, що діють на систему й переміщення, які вони викликають, знаходяться в одній площині, та просторові складені стрижні. Проміжок між складовими частинами стрижня, де розташовані в'язі, називається швом. Серед сталезалізобетонних конструкцій найбільш

характерними прикладами складених стрижнів є елементи із зовнішнім жорстким армуванням (балки та стійки з обрамленням сталевими листами, плити по профільованому настилу тощо) й сталезалізобетонні двотаврові елементи з боковими порожнинами, заповненими бетоном. Оскільки останнім часом усе частіше для забезпечення сумісної роботи бетону і сталі використовують клейові з'єднання, зокрема на основі акрилового клею, виникає проблема визначення достовірних особливостей роботи таких конструкцій та врахування фізико-механічних характеристик матеріалу шва під час проведення їх розрахунку. Якщо теорія складених стрижнів дає можливість ретельно розглянути кожен складову композитних конструкцій, а особливо клейового з'єднання, то варто використати її положення при розрахунку вищезгаданих елементів.

Розглянемо плоскі складені стрижні. Припускаємо, що робота кожного окремого стрижня відбувається згідно з традиційними законами опору матеріалів, зокрема закону плоских перерізів. Тому внутрішній напружений стан кожного стрижня вважаємо визначеним, оскільки можна розрахувати величини моментів, нормальних і поперечних сил у кожному перерізі. Деформації стрижнів вважаємо надто малими порівняно з їх довжиною, тому поставлене завдання можна вирішити за допомогою лінійних рівнянь відповідно до закону незалежності дії сил. Вважаємо, що стрижні з'єднані безперервно розподіленими зв'язками, деформації яких вважаємо лінійними.

За призначенням зв'язки в складених стрижнях поділяються на два види: зв'язки зсуву і поперечні зв'язки. Основна характеристика зв'язків визначається залежністю між деформаціями, що виникають усередині складеного стрижня, і внутрішніми зусиллями, викликаними цими деформаціями. У більшості випадків при невеликих деформаціях ця залежність вважається лінійною, тобто для роботи зв'язків справедливий закон Гука. Ця стадія роботи зв'язків характеризується коефіцієнтом жорсткості, що виражає відношення зусиль у зв'язках до відповідних їм деформацій.

Для зв'язків зсуву коефіцієнт жорсткості ϵ визначається

$$\epsilon = \frac{T_3 m}{\delta_3}, \quad (9)$$

де T_3 – зсувне зусилля, що припадає на один зв'язок; m – число зв'язків, які припадають на одиницю довжини шва; δ_3 – деформації зсуву суміжних волокон двох сусідніх стрижнів, з'єднаних зв'язками зсуву.

Для нашого випадку

$$\epsilon = \frac{b E_{ш}}{\nu}, \quad (10)$$

де b – ширина поперечного перерізу зразка; $E_{ш}$ – модуль пружності матеріалу шва; ν – відстань між центрами ваги окремих стрижнів. Розмірність коефіцієнтів жорсткості зв'язків ϵ і η – [Па].

Розглянемо стрижні з рівномірно розподіленими зв'язками по довжині кожного шва та зі зміною товщини з'єднання по довжині шва лише ступенево. Рівномірним розподіленням зв'язків вважається також розміщення окремих однакових зв'язків по довжині шва на рівній відстані один від одного.

Для випадку, що розглядається (балка на двох опорах, навантажена рівномірно розподіленим навантаженням, складена з бетонного та сталевих стрижнів, склеєних між собою акриловим клеєм), наближено зусилля визначається як

$$T = \left(\frac{M^o}{\nu} \right) \left(1 - \frac{K_{жс} M}{M^o} \right). \quad (11)$$

Згідно з теорією складених стрижнів було виконано розрахунок згинальних елементів (плит по профільованому настилу та двотаврових балок з боковими порожнинами, заповненими бетоном), наведений у роботах [5, 6] (табл. 2).

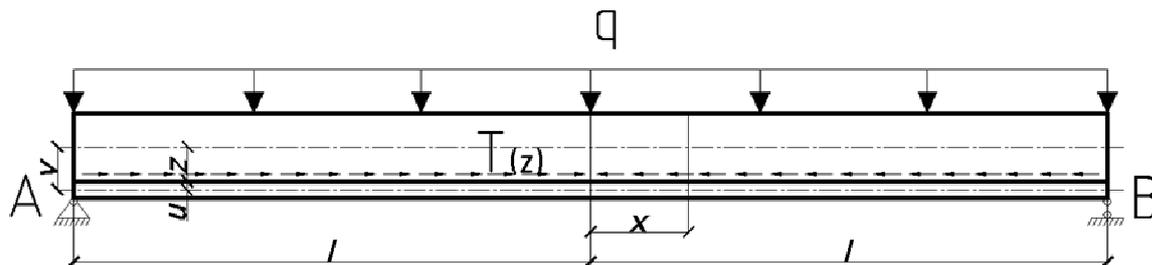


Рисунок 2 – Схема балки, складеної з двох стрижнів на двох опорах, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням

Таблиця 2

Несуча здатність дослідних елементів

Зразок	Несуча здатність M, кНм			Розходження, %	
	експериментальні значення	теоретичні значення без урахування матеріалу шва	теоретичні значення з урахуванням матеріалу шва	значення без урахування матеріалу шва	значення з урахуванням матеріалу шва
П1	10,50	11,62	—	9,64	—
П2	18,00	18,75	18,45	4,00	2,17
Б1	32,22	35,16	—	8,36	—
Б2	33,10	35,93	34,18	7,88	3,16

Висновок. Запропоновані методики визначення несучої здатності згинальних сталезалізобетонних елементів, у яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується за допомогою склеювання, за відповідних умов показали досить прийнятну точність для інженерних розрахунків. Розбіжність результатів експериментальних досліджень з теоретичними значеннями не перевищила 10%. Ще однією істотною перевагою цих методик є їх простота і доступність для інженерів-проектувальників. Отже, можна говорити про можливість застосування запропонованих методик при розрахунку конструкцій, у яких сумісна робота сталі та бетону забезпечується з допомогою клейового з'єднання.

Література

1. Горб, О.Г. Розрахунок згинальних сталезалізобетонних елементів із клейовим з'єднанням бетону і сталі згідно з теорією складених стержнів / О.Г. Горб // Збірник наукових праць Сер.: (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – Вип. 2(30). – С. 67 – 74.
2. Золотов, М.С. Анкерні болти: конструкція, розрахунок, проектування / М.С. Золотов. – Харків: ХНАМГ, 2005. – 121 с.
3. Козарь, В.І. Монолітні залізобетонні плити по сталевому профільованому настилу: автореф. дис. канд. техн. наук / В.І. Козарь. – Полтава, 1999. – 19 с.
4. Стороженко, Л.І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці / Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко. – Полтава: АСМІ, 2008. – 312 с.
5. Стороженко, Л.І. Конструкції залізобетонних перекриттів по профільному настилу із забезпеченням сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання /

- Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко, О.Г. Горб // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – № 662. – С. 360 – 365.*
6. *Стороженко, Л.І. Конструкції зі сталевих двотаврів із боковими порожнинами, заповненими бетоном / Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко, О.Г. Горб // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. – Одесса: ОГАСА, 2010. – №14, ч. 2. – С. 150 – 155.*
7. *Стороженко, Л.І. Розрахунок стиснутих сталезалізобетонних елементів із клейовим з'єднанням бетону і сталі / Л.І. Стороженко, О.Г. Горб // Сб. мат. III Международной науч.-тех. интернет-конф. «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства». – Х.: ХНАМГ, 2012. – С. 151 – 160.*

Л.И. Стороженко, д.т.н., проф., А.Г. Горб, асп.
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КЛЕЕВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ БЕТОНА И СТАЛИ

Приведена методика расчета несущей способности сталежелезобетонных элементов, в которых совместная работа стали и бетона обеспечивается посредством склеивания. Выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований с теоретическим расчетом и их анализ.

Ключевые слова: *сталежелезобетонный элемент, склеивание, расчет, нагрузка, несущая способность.*

*L.I. Storozhenko, Dr. Tech. Sc., Prof., O.G. Gorb, Post graduate st.
Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk*

ANALYSIS OF CALCULATION RESULTS OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE ELEMENTS WITH GLUTINOUS CONNECTION OF CONCRETE AND STEEL

The article describes methods of calculation of the bearing capacity of composite elements in which the joint work of steel and concrete is provided through bonding, according to the theory of compound rods. We compare experimental results with theoretical calculation.

Keywords: *composite steel and concrete element, bonding, calculation, loading, bearing capacity.*

Надійшла до редакції 15.09.2012

© Л.І. Стороженко, О.Г. Горб