

Спіранде К.В., Шемет Р.М., Шемет К.Д.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: spirande.karina@kstuca.kharkov.ua; shemetruslan@ukr.net;
k-shemet@ukr.net; orcid.org/0000-0002-5552-7817; orcid.org/0000-0003-4896-9702;

orcid.org/0000-0001-6058-1220)

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ДВОТАВРОВИХ МОДИФІКОВАНИХ БАЛОК

Запропоновано конструктивно-технологічне рішення сталезалізобетонної двотаврової балки із залізобетонною верхньою полицкою та сталевим тавровим елементом з перфорованою стінкою. Описано принципові відмінності такої конструкції. У роботі пропонується чисельне моделювання напружено-деформованого стану як в пружні постановці так і з врахуванням фізичної не лінійності. Розроблене конструктивне рішення дозволяє досягати значної економії матеріальних витрат як в новому будівництві так і при реконструкції.

Ключові слова: сталезалізобетонна балка, напружено-деформований стан, підвищення ефективності, несуча здатність

Вступ. Однією з основних завдань будівельної галузі в Україні є використання економічних і довговічних конструкцій. Це може бути досягнуто шляхом створення нових прогресивних конструктивних елементів, які б задовольняли вимогам зменшення витрат матеріалів при забезпеченні необхідної несучої здатності та деформативності. Для вирішення такого завдання зазвичай використовують високоміцні та ефективні матеріали, створюючи при цьому нові конструктивні форми перерізів та комплексні конструкції, в яких раціонально об'єднані для спільної роботи залізобетонні та сталеві елементи за рахунок використання переваг кожного з матеріалів.

Сталезалізобетонні конструкції знайшли широке застосування в будівельній практиці всього світу. Проектування та розрахунок сталезалізобетонних конструкцій являє досить складну та трудомістку задачу, для вирішення якої необхідно враховувати механічні властивості матеріалу, специфіку роботи елементів конструкції під навантаженням, наявність допоміжних елементів для забезпечення спільної роботи системи в цілому (ДБН В.2.6-160: 2010, Eurocode 4).

Одним із різновидів сталезалізобетонних балок із жорстким армуванням є сталезалізобетонні двотаврові балки із залізобетонним верхнім поясом (рис. 1), дослідженням яких, займалися Аметов Ю.Г. [1], Фабрика Ю.М. [2], Шагін О.Л. та Ізбаш М. Ю. [3], Стороженко Л.І. [6], Крупченко О. А. [7].

Аметов Ю.Г. проводив експериментально-теоретичні дослідження сталезалізобетонних балок (рис. 1,а) різних форм нормального перерізу при короткочасній і тривалій дії навантаження [1]. На основі цих досліджень було розроблено аналітичний апарат для оцінки напружено-деформованого стану нормальних перерізів згинальних сталезалізобетонних конструкцій при тривалій дії навантаження та розрахунку короткочасної і тривалої міцності таких конструкцій, а на основі аналізу отриманих теоретичних рішень виявлені закономірності деформування згинальних конструкцій в залежності від співвідношення міцнісних й деформативних властивостей бетону і сталі та геометричних характеристик перерізів.

Фабрика Ю.М. займався дослідженням сталезалізобетонних двотаврових балок із різною шириною та класом бетону залізобетонної плити-полички [2], а також різних типів зв'язків-анкерів і упорів для об'єднання сталеві двотаврової балки із залізобетонною плитою-поличкою. За результатами цих досліджень була розроблена інженерна методика визначення міцності і деформативності, як математичний алгоритм та програма розрахунку на ЕОМ, в основу якої покладена гіпотеза плоских перерізів та метод послідовних наближень з урахуванням реальних діаграм деформування матеріалів. На основі досліджень

міцності сталезалізобетонних балок з різною шириною залізобетонних полицок запропоновані найбільш раціональні розміри її ширини, які становлять для бетонів класу С16/20...С25/30 $(6...8)h_n$, де h_n – висота залізобетонної полицки.

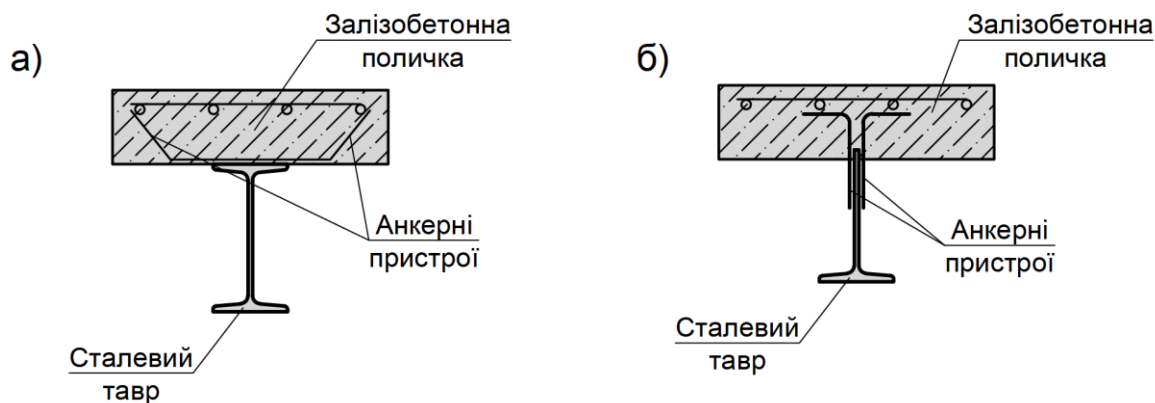


Рис. 1. Поперечний переріз сталезалізобетонної балки

Під керівництвом Ізбаша М.Ю. [3, 4] у Харківському державному технічному університеті будівництва і архітектури займалися нерозрізними сталезалізобетонними балками, підвищена ефективність яких досягалась за допомогою локального попереднього обтиснення в зонах дії максимальних згинальних моментів тільки на опорах, тільки у прольотах, на опорах і в прольотах одночасно [5]. Розроблена ним методика розрахунку несучої здатності нерозрізних сталезалізобетонних локально попередньо напружених балок дозволяє враховувати фізичну нелінійність та історію навантаження. В основу методики покладено поєднання методу граничної рівноваги і нелінійної розрахункової деформаційної моделі. При цьому враховувалась не тільки фізична, але і геометрична нелінійність.

Під керівництвом Стороженка Л. І. [6] у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Крупченко О. А. [7-9] було запропоновано новий тип сталезалізобетонної балки (рис. 1, б.) яка складається із залізобетонної полицки та сталевого таврового елемента. Особливістю таких балок є те, що при з'єднанні залізобетонної полицки зі сталевим тавровим елементом за відсутності верхньої металеві полицки повинна забезпечуватись їх надійна сумісна робота. Тобто балка має працювати як єдине ціле, сприймаючи згинаючі M_z та крутні $M_{кр}$ моменти, перерізуючи V сили, а також зсувні зусилля T , які виникають в контактній площині між шарами різних матеріалів. Експериментальні дослідження Крупченко О. А. показали, що сталезалізобетонні двотаврові балки із залізобетонним верхнім поясом працюють як єдина монолітна конструкція, а запропоновані анкерні пристрої повністю забезпечують сумісну роботу сталеві та бетонні складових [9], при цьому несуча здатність і жорсткість конструкцій практично не залежать від типів застосованих з'єднань залізобетонної полицки зі сталевим тавровим елементом.

На даний час науковцями багатьох країн проведено велику кількість експериментально-теоретичних досліджень вдосконалених прокатних профілів з перфорованою стінкою. Питанням конструювання та раціонального використання балок підвищеної ефективності з перфорованою стінкою та конструкцій на їх основі присвячені роботи Дроб'язко Л. Є. [17], Романюка В. В. [13, 14] та інших вчених. Найбільш повні вирішення задачі оптимізації перфорованих елементів представлені у працях Adeli Н. [18]. Експериментально-теоретичні дослідження роботи перфорованих елементів проводили також Даріпаско В. М. [10], Ільїна А. А [11], Притикін А. І. [12], Романюк В. В. [14, 16], Супрунюк В. В. [15] та ін.

Матеріали і методи досліджень. Мета наукового дослідження полягає в розробці ефективного конструктивного рішення сталезалізобетонних згинальних елементів яке б

дозволило максимально зменшити витрати сталі та оптимізувати напружено-деформований стан поперечного перерізу.

Класичні сталезалізобетонні згинальні елементи досить вивчені та доведена їх ефективність завдяки зрозумілій роботі і розподілу напружень в складових частинах їх перерізу. В одно прольотній сталезалізобетонній балці стандартного перерізу залізобетонна поличка сприймає стискаючі напруження, а сталевий елемент розтягуючи (рис.2).

Як видно з рисунка розподілу деформацій та напружень лінійно збільшуються до нижньої грані прокатної балки. Що показує не достатню ефективність роботи верхньої полички прокатного профілю. Тому доцільним є така оптимізація поперечного перерізу завдяки якій центр ваги сталевого елемента сталезалізобетонної балки буде максимально зміщений до нижньої розтягнутої зони.

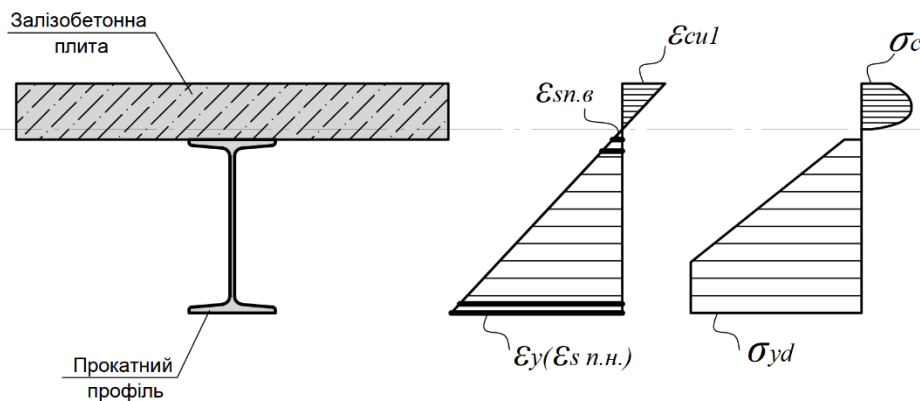


Рис. 2. Поперечний переріз класичної сталезалізобетонної балки

Авторами статті запропоновано нову конструкцію сталезалізобетонного згинального елемента до складу якого входить залізобетонна поличка-плита та модифікований прокатний профіль. Особливість запропонованого конструктивного рішення сталезалізобетонного згинального елемента полягає в тому, що в якості стиснутої частини перерізу використовується залізобетонна поличка, а в якості прокатного сталевого профілю тавровий елемент з перфорованою стінкою (рис. 3).

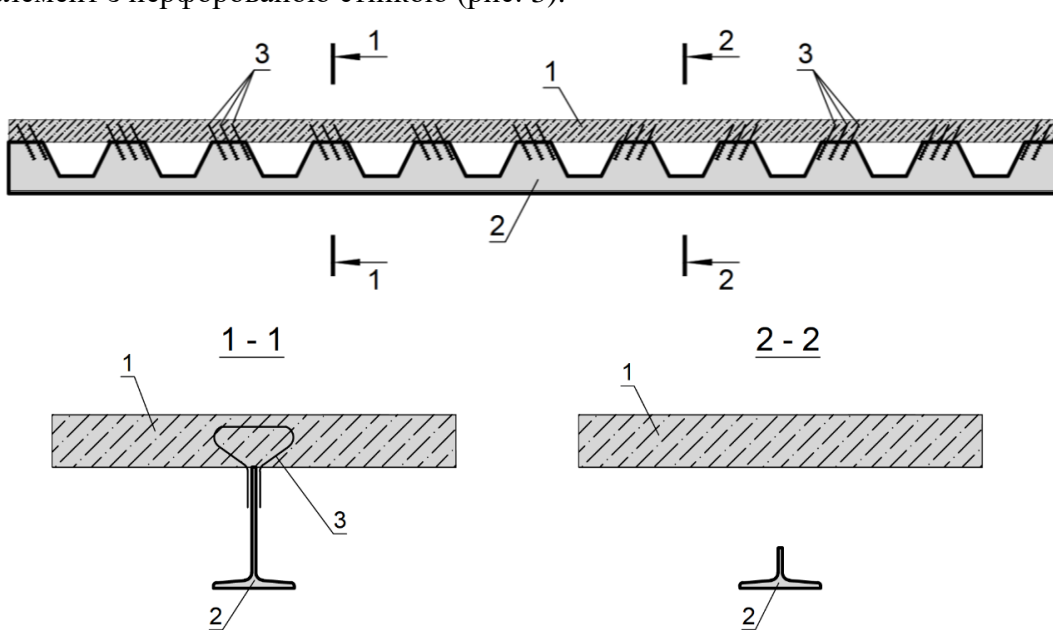


Рис. 3. Сталезалізобетонна балка з перфорованою стінкою: 1 - залізобетонна плита; 2 - модифікований прокатний профіль з перфорованою стінкою; 3 - протизсувний анкер

Сталевий прокатний профіль з перфорованою стінкою отримують шляхом розрізання стінки балки по зигзагоподібній ломаній лінії. Таке розрізання можливе за допомогою газового або іншого різання або на потужних пресах. Особливість та позитивні якості таких елементів полягають у тому, що вони досить компактні, транспортабельні і дають можливість використання високоавтоматизованого способу виготовлення, що зменшує їх собівартість.

Найбільш придатними для виготовлення перфорованих елементів є широкополичкові двотаври. Оскільки у них полички ширше ніж в звичайних двотаврових балок, це дозволяє використовувати менший початковий переріз широкополичкового двотавра в порівнянні з початковим перерізом звичайного двотавру зі значною економією сталі. У разі відповідного обґрунтування як початкові профілі для перфорованих сталевих складових сталезалізобетонних елементів можна використовувати швелери або інші прокатні профілі.

Отже, ідея використання перфорованих елементів на основі прокатних профілів в сталезалізобетонних перерізах виникла завдяки таким факторам:

- прокатні профілі через особливості умов прокатування мають товщину стінки, яка значно перевищує необхідну для забезпечення місцевої стійкості без підкріплення ребрами жорсткості;

- бажання уникнути використання металу в зонах, де він використовується не ефективно або зовсім не використовується.

Для використання сталевих елементів з перфорованою стінкою можливі декілька найбільш типових варіантів розрізання початкового профілю. Це симетричне розрізання вихідного профілю, або розрізання з подальшими додатковими вставками. У разі використання останнього способу перфорована стінка утворюється прямокутними, Х- або трапецієподібними вставками з зазорами між ними.

Для зниження концентрації місцевих напружень в кутах отворів доцільно під час розрізання виконувати заокруглення, які не підвищують витрат праці зигзагоподібного різку на станках лазерної або водоструминної (гідроабразивної) різки, але можуть значно збільшити ресурс втомної та крихкої міцності перфорованої стінки елемента.

Вельми важливим для побудови розрахункового апарату згинальної конструкції, що об'єднує в сумісній роботі залізобетонну плиту і сталеву модифіковану балку, є справедливості для неї гіпотези плоских перерізів. Її дотримання забезпечується спільністю деформування залізобетонної плити і сталевих прокатних елементів по площині зсуву. Зазначене може досягатися встановленням уздовж площини їх контакту різного типу спеціальних об'єднуючих елементів-пристроїв, що сприймають зсув, а в деяких випадках і відрив. Існує багато різноманітних варіантів протизсувних з'єднань. Найбільш ефективними для даного типу конструкції авторами статті вважаються похилі стрижневі та петлеві арматурні анкери.

Опис методології досліджень. Останнім часом в більшості випадків все частіше для дослідження поведінки під навантаженням нових конструкцій з різних матеріалів застосовують кінцево-елементне моделювання. В першу чергу це торкнулося моделювання залізобетонних та сталезалізобетонних елементів, що дозволило не тільки компенсувати недоліки використання спрощених методів розрахунку міцності таких конструкцій, а й спростити програми експериментальних досліджень.

Авторами виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану сталезалізобетонних двотаврових балок з перфорованою стінкою в програмному комплексі ЛПА-САПР (рис. 4). Розроблено розрахункову модель балки прольотом 3,0 м та висотою поперечного перерізу 215 мм (рис. 5).

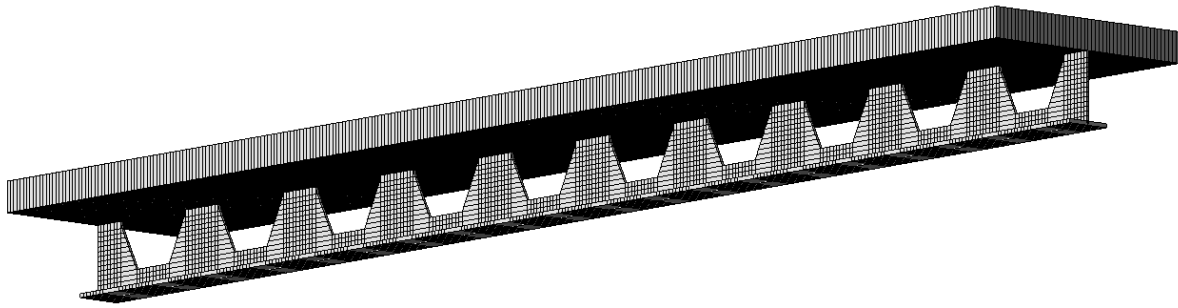


Рис. 4. Розрахункова 3D-модель сталезалізобетонної балки з перфорованою стінкою

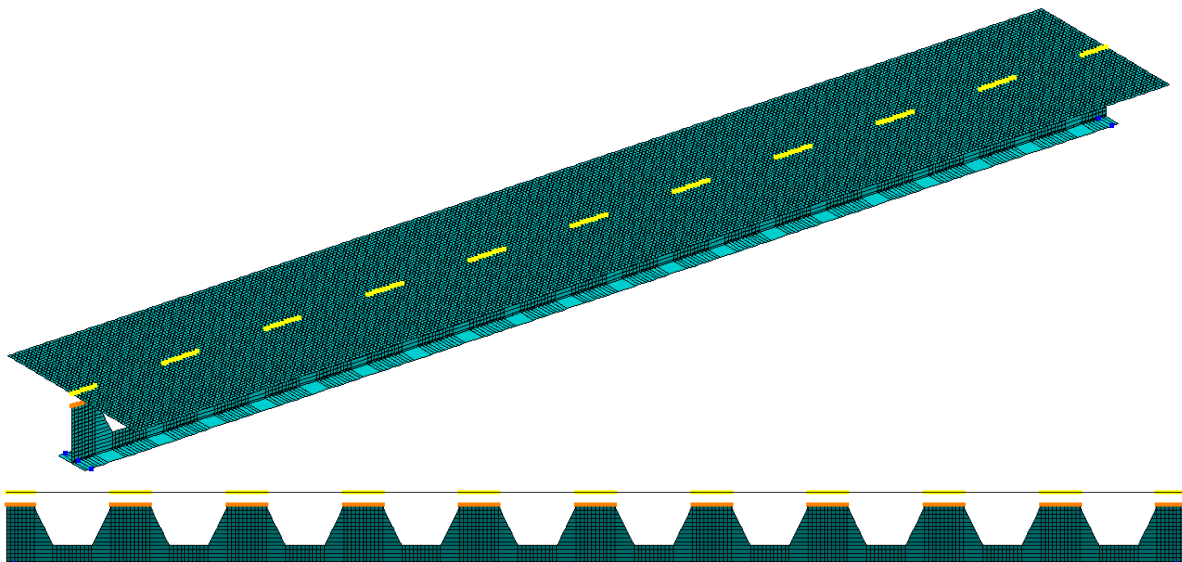


Рис. 5. Скінчено-елементна модель сталезалізобетонної модифікованої балки

Сталезалізобетонний переріз складається зі стиснутої залізобетонної полицки шириною 500 мм та висотою – 65 мм з бетону класу С16/20, сталевого прокатного профілю з перфорованою стінкою. Таврова сталеві частини елемента створена з прокатних двотаврових балок № 20 з маркою сталі С245. Для моделювання залізобетонної та металеві полицки використовувалися універсальні прямокутні кінцеві елементи (КЕ) оболонки типу № 41, моделювання сталеві стінки відбувалося універсальними трикутними (КЕ42) та чотирикутними (КЕ44) кінцевими елементами оболонки. Середина площина залізобетонної полицки і стінка сталеві балки об'єднані в спільну роботу за допомогою абсолютно жорстких тіл.

Розглядалась сталезалізобетонна однопрольотна балка завантажена рівномірно розподіленим навантаженням від власної ваги та зосередженими силами в середині прольоту інтенсивністю від 5 кН до 100 кН кроком 5 кН. Чисельне дослідження виконувалося в лінійній постановці та з врахуванням фізичної нелінійності.

Обговорення результатів. За результатами розрахунку в програмному комплексі ЛІРА-САПР в лінійній постановці отримані деформовані схеми конструкції (рис. 6) і ізополя нормальних напружень від прикладеного навантаження (рис. 7).

Деформована схема при максимальному навантаженні, що наведена на рис. 6, демонструє, як зменшення жорсткості перерізу впливає на характер та величину переміщення по довжині сталезалізобетонної балки з перфорованою стінкою. Ізополя нормальних напружень (рис. 7) свідчать про наявність концентраторів напружень в місцях отворів та в місцях поєднання різних матеріалів, а саме, залізобетонної полицки та сталеві стінки. Що зайвий раз підкреслює про необхідність виконання заокруглення під час розрізання

прокатного профілю та звернути особливу увагу на забезпечення в сумісній роботі залізобетонної плити та сталеві модифікованої балки під час виготовлення конструкції та її чисельного моделювання.

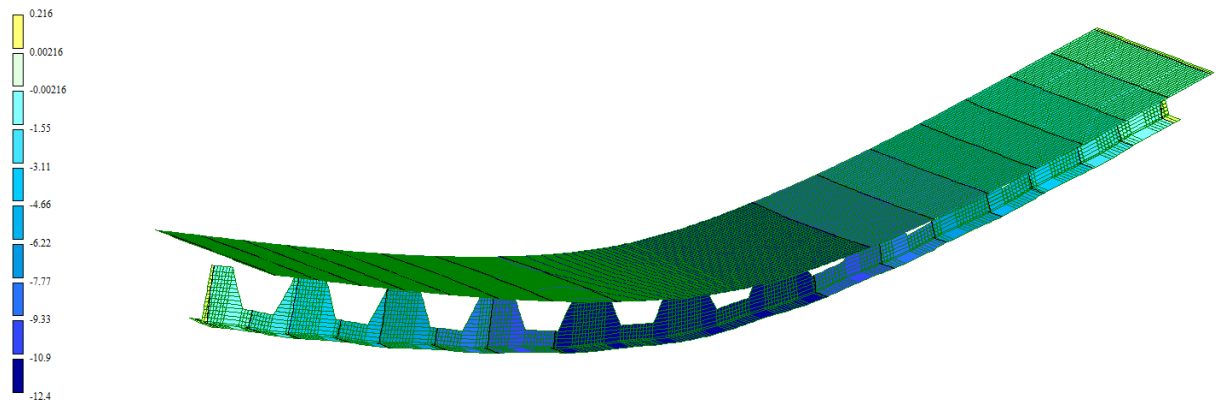


Рис. 6. Ізополя переміщень та деформована схема сталі залізобетонної модифікованої балки при максимальному навантаженні

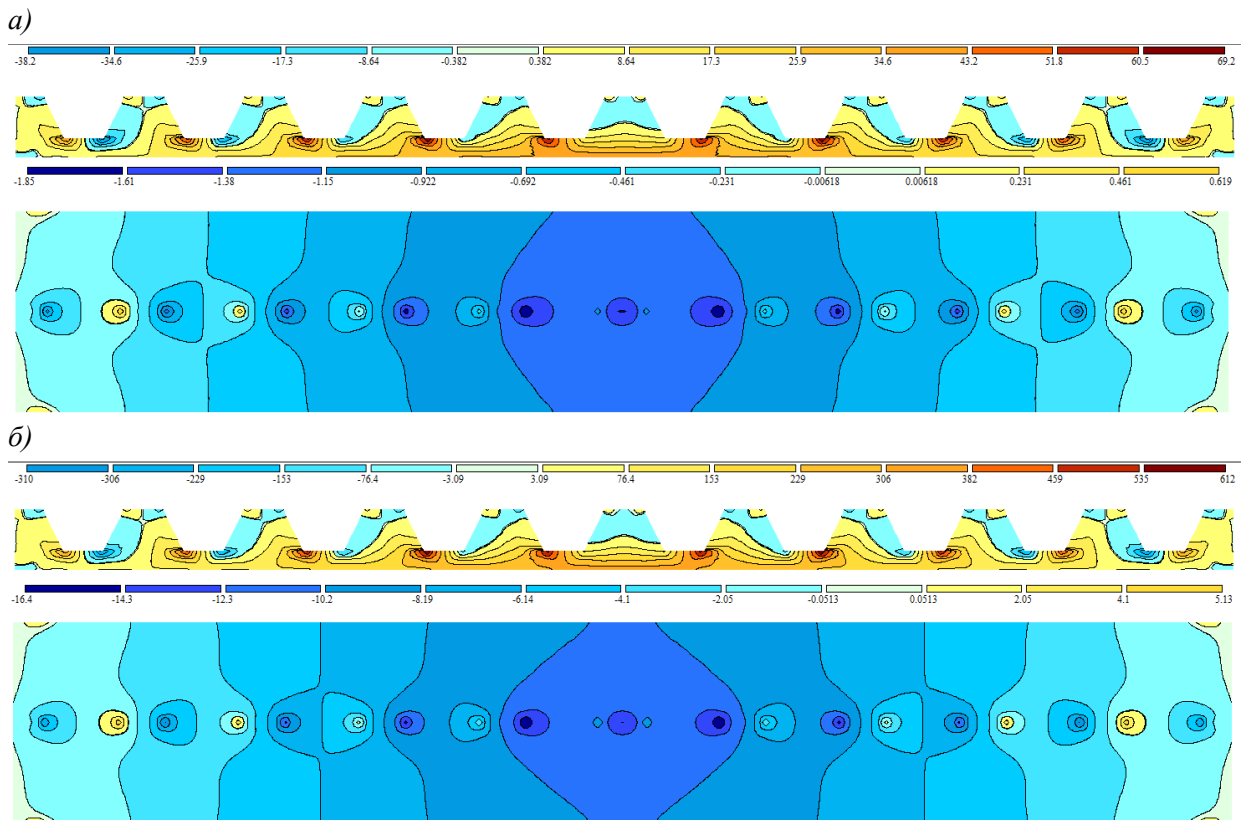


Рис. 6. Ізополя нормальних напружень: а – на першому кроці навантаження; б - при максимальному навантаженні

Авторами також виконано дослідження впливу ширини залізобетонної полицки на напруження в максимально стиснутих волокнах залізобетонної частини перерізу та максимально розтягнутих волокнах сталеві модифікованої полицки. Ширина полицки змінювалась від 100 до 500 мм кроком 40 мм, що складало від 1,5 до 7,7 висоти поперечного перерізу залізобетонної полицки. Результати чисельних досліджень показали, що при ширині полицки 180...500 мм та однаковому рівні навантаження суттєвої різниці між напруженнями в бетоні (≈ 30 МПа) та сталі (≈ 260 МПа) не спостерігалось. При ширині полицки 100 та 140 мм суттєво збільшувалися напруження в бетоні 107 та 60,7 МПа, відповідно.

Розрахунок виконувався також за деформаційною моделлю з врахуванням фізичної нелінійності властивостей бетону та сталі. Для моделювання матеріалу сталі були використана спрощена діаграма деформування з двома лінійними ділянками - зоною пружною роботи до нормативного значення межі текучості і пластичної роботи з незначним зміцненням після досягнення межі текучості. Аналогічна спрощена білінійна діаграма використовувалась для моделювання діаграми стану бетону.

При аналізі напружено-деформованого стану конструкцій методом кінцевих елементів з врахуванням реальних діаграм деформування матеріалів дуже важливо виділити критерії руйнування, іншими словами, умовно призначити такі стани системи, при досягненні яких можна вважати, що система вийшла з рівноважного стану, тобто відбулося руйнування. В якості таких критеріїв руйнування можуть бути прийняті: досягнення бетоном стиснутої (розтягнутої) зони граничних деформацій, досягнення сталлю межі текучості.

За результатами розрахунку встановлено що перші тріщини утворюються в кінцевих елементах поблизу з'єднання залізобетонної полиці і сталевий стінки і проходять нормально до осі балки біля опор та вздовж осі на під кутом приблизно в 45° до неї в прольоті (рис. 8.)

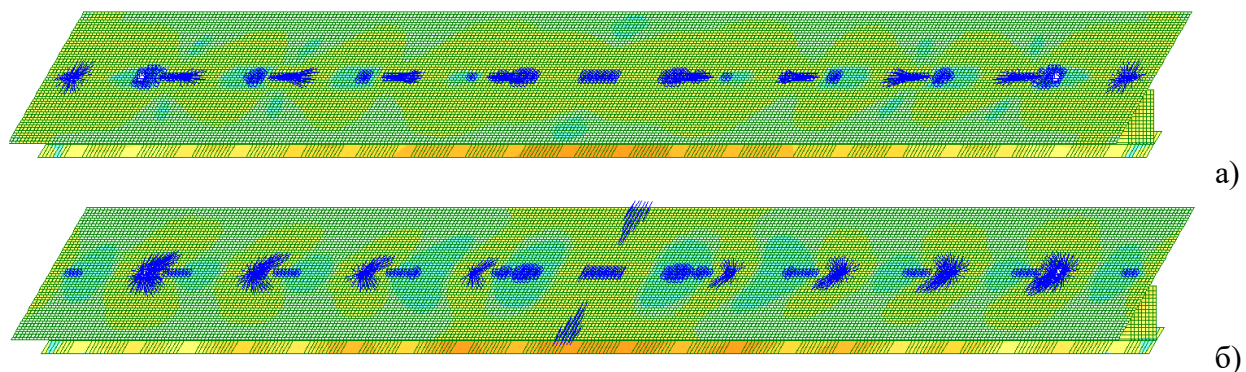


Рис. 8 Картина руйнування на ізополях головних напружень: а - верхній шар; б – нижній шар

Висновки. Аналіз напружено-деформованого стану дозволив виконати оптимізацію поперечного перерізу, завдяки якій центр ваги сталезалізобетонні балки буде максимально зміщений до нижньої розтягнутої грані, що дає змогу забезпечити ефективність розподілу напружень в складових частинах перерізу. При аналізі роботи конструкції особливу увагу при чисельному моделюванні необхідно приділити розподілу дотичних напружень в зоні контакту бетонної полиці і сталевий стінки.

Чисельне моделювання у вигляді кінцево-елементного об'єкта нової конструкції дозволить істотно скоротити тривалість досліджень, однак вимагає верифікації прийнятої моделі на основі експериментальних даних, але вже з меншими витратами матеріальних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Аметов Ю.Г. Вплив режиму навантаження і тривалого витримування під навантаженням на несучу здатність сталезалізобетонних балок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. К., 2003. 20 с.
2. Фабрика Ю.М. Міцність та деформативність сталезалізобетонних балкових конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2005. 17 с.
3. Шагин А.Л., Избаш М.Ю., Шемет Р.Н. Повышение несущей способности сталежелезобетонных балочных конструкций. Науковий

REFERENCES:

1. Ametov Ju.Gh. Vplyv rezhymu navantazhennja i tryvalogho vytrymuwannja pid navantazhennjam na nesuchu zdatnistj stalezalizobetonnykh balok: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. K., 2003. 20 s.
2. Fabryka Ju.M. Micnistj ta deformatyvnistj stalezalizobetonnykh balkovykh konstrukcij: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Lviv, 2005. 17 s.
3. Shagin A.L., Izbash M.Yu., Shemet R.N. Povyshenie nesuschey sposobnosti stalezhele-zobetonnyih balochnyih konstruktsiy. Naukoviy visnik

- вісник будівництва. Харків: ХДТБА ХОТВ АБУ, 2005. Вип. 33. С.85-90.
4. Шагин А. Л. Избаш М.Ю., Шемет Р.Н. Оценка несущей способности двухпролетных сталежелезобетонных локально предварительно напряженных балок. Науковий вісник будівництва. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2006. Вип. 38. С. 81-89.
 5. Шемет Р.М. Сталезалізобетонні нерозрізні локально попередньо напружені балки. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків. 2007. 19 с.
 6. Стороженко Л. І., Чередніков В. М., Крупченко О. А. Розрахунок сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом. Ресурсоекономні матеріали та конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2008. Вип. 16. Ч.2. С. 358-364.
 7. Крупченко О. А. Напружено-деформований стан та міцність сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2008. 181 с.
 8. Крупченко О.А. Результати експериментальних досліджень сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Будівництво. Суми, 2006. Вип. 9 (11). С. 55-60.
 9. Стороженко Л.І., Крупченко О.А. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Львів, 2010. Вип. 662. С. 354-360.
 10. Дарипаско В. М. Прочность и устойчивость двутавровых элементов с перфорированной стенкой при общем случае загрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения». Санкт-Петербург, 2000. 23 с
 11. Ильина А. А. Прочность и устойчивость стальных изгибаемых элементов с регулярной и нерегулярной шахматной перфорацией стенки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»/ А. А. Ильина. Нижний Новгород, 2004. 25 с
 12. Притыкин А. И. Разработка методов расчета и конструктивных решений балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки: автореф. дис. ... док. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения». Калининград, 2011. 44 с.
 13. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану сталевієї попередньо-напруженої перфорованої арки. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Рівне, 2006. Випуск 14. С. 309-317.
 14. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Перевірка міцності перфорованих згинальних та стиснуто-будівництва. Харків: HDTBA HOTV ABU, 2005. Vip. 33. S.85-90.
 4. Shagin A. L. Izbash M.Yu., Shemet R.N. Otsenka nesuschey sposobnosti dvuhproletnykh stalezhelezobetonnykh lokalno predvaritelno napryazhennykh balok. Naukoviy visnik budivnitsva. Harkiv: HDTUBA HOTV ABU, 2006. Vip.38. S.81-89.
 5. Shemet R.M. Stalezalizobetonni nerozrizni lokaljno poperednjo napruzheni balky. Avtooref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kharkiv. 2007. 19 s.
 6. Storozhenko L. I., Cherednikov V. M., Krupchenko O. A. Rozrakhunok stalezalizobetonnykh dvotavrovyykh balok iz zalizobetonnykh verkhnim pojansom. Resursoekonomni materialy ta konstrukciji, budivli ta sporudy. Rivne: NUVGhP, 2008. Vyp. 16. Ch.2. S. 358-364.
 7. Krupchenko O. A. Napruzheno-deformovanyj stan ta micnistj stalezalizobetonnykh dvotavrovyykh balok iz zalizobetonnykh verkhnim pojansom: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 2008. 181 s.
 8. Krupchenko O.A. Rezuljtaty eksperymentalnykh doslidzhenj stalezalizobetonnykh dvotavrovyykh balok iz zalizobetonnykh verkhnim pojansom. Visnyk Sumsjkogho nacionalnogho aghrarnogho universytetu. Serija: Budivnyctvo. Sumy, 2006. Vyp. 9 (11). S. 55-60.
 9. Storozhenko L.I., Krupchenko O.A. Stalezalizobetonni balky iz zalizobetonnykh verkhnim pojansom. Visnyk Nacionalnogho universytetu «Ljvivsjska politekhnika». Ljviv, 2010. Vyp. 662 (2010). S. 354-360.
 10. Daripasko V. M. Prochnost i ustoychivost dvutavrovyykh elementov s perforirovannoy stenкой pri obschem sluchae zagruzheniya : avtooref. dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.23.01 «Stroitelnyie konstruksii, zdaniya i sooruzheniya». Sankt-Peterburg, 2000. 23 s
 11. Pina A. A. Prochnost i ustoychivost stalnykh izgibaemykh elementov s reguljarnoy i nereguljarnoy shahmatnoy perforatsiey stenki : avtooref. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.23.01 «Stroitelnyie konstruksii, zdaniya i sooruzheniya». Nizhniy Novgorod, 2004. 25 s
 12. Prityikin A. I. Razrabotka metodov rascheta i konstruktivnykh resheniy balok s odnoryadnoy i dvuhryadnoy perforatsiey stenki: avtooref. dis. ... dok. tehn. nauk: spets. 05.23.01 «Stroitelnyie konstruksii, zdaniya i sooruzheniya». Kaliningrad, 2011. 44 s.
 13. Romanjuk V. V., Suprunjuk V. V. Eksperymentaljni doslidzhennja napruzheno-deformovanogho stanu stalevoji poperednjo-napruzhenoji perforovanoji arky. Resursoekonomni materialy, konstrukciji, budivli ta sporudy: Zb. nauk. pracj. Rivne, 2006. Vypusk 14. S. 309-317.
 14. Romanjuk V. V., Suprunjuk V. V. Pervirka micnosti perforovanykh zghynalnykh ta stysnuto-zghynalnykh stalnykh elementiv za

- згинальних сталевих елементів за деформованою та недеформованою схемами. Вісник НУВГП. Рівне, 2004. Вип. 3 (27). С. 186-191.
15. Супрунюк В. В. Сталеві попередньо напружені перфоровані арки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». Рівне, 2007. 20 с.
 16. Романюк В. В., Василенко В. Б. Методика проведення експериментальних досліджень перфорованих прогонів в умовах косоного згину. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Рівне, 2013. Вип. 25. С. 405-411.
 17. Дробязко Л. Е. Прогрессивные металлические конструкции зданий сельскохозяйственного назначения. Совершенствование сварных металлических конструкций / Под ред. М. М. Жербина. К.: Наукова думка, 1992. с. 104-110.
 18. Adeli H., Chang Nai-Tsang Integrated genetic algorithm for optimization of space structures. Journal of aerospace engineering, ASCE. 1993. v. 6(4). p. 315-327.
 15. Супрунюк В. В. Сталеві попередньо напружені перфоровані арки: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». Рівне, 2007. 20 с.
 16. Romanjuk V. V., Vasylenko V. B. Metodyka provedennja eksperymentalnykh doslidzhenj perforovanykh proghoniv v umovakh kosogho zghynu. Resursoekonomni materialy, konstrukciji, budivli ta sporudy: Zb. nauk. pracj. Rivne, 2013. Vyp. 25. S. 405-411.
 17. Drobjazko L. E. Progressivnyie metallicheskie konstruktсии zdaniy selskohozyaystvennogo naznacheniya. Sovershenstvovanie svarnyih metallicheskih konstruktсий / Pod red. M. M. Zherbina. K.: Naukova dumka, 1992. s. 104-110.
 18. Adeli H., Chang Nai-Tsang Integrated genetic algorithm for optimization of space structures. Journal of aerospace engineering, ASCE. 1993. v. 6(4). p. 315-327.

Spirande K.V., Shemet R.M., Shemet K.D. NUMERICAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE BEAMS MODIFIED. A constructive and technological solution is proposed for a steel-reinforced concrete I-beam with a reinforced concrete top flange and a steel T-element with a perforated wall. The fundamental differences of this design are described. The paper proposes a numerical simulation of the stress-strain state both in the elastic formulation and taking into account physical nonlinearity. The developed constructive solution allows achieving significant savings in material costs both in new construction and during reconstruction.

Keywords: composite steel and concrete beams, stress-strain state, efficiency increase, bearing capacity.