

УДК 624.12

**ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ
ПОПЕРЕДНЬО ПІДКРІПЛЕНИХ ПЛАСТИНЧАТИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*Л. Добрянська, к. е. н.
Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні, інженерній будівельній практиці нині надзвичайно поширені пластинчаті елементи, що мають підкріплення у вигляді тонких стрижнів, вкладишів, накладок і шайб. Різновидами таких конструкцій є куполи промислових та цивільних споруд, обшивки авіа-та гідротехнічних машин, корпуси суден, елементи гідротехнічних та мостових систем, більшість важливих деталей машин та механізмів, спроможних забезпечити необхідну довговічність роботи в межах не менше за заданий ресурс.

Підвищення несучої здатності м'якої сталі за рахунок самозміцнення у пластичній стадії в поєднанні з високоміцною сталлю та прийняття у граничній стадії для розрахунку несучої здатності межі міцності сталі дають змогу досягнути економії звичайної сталі. А це в підсумку виражається у підвищенні несучої здатності підкріплених елементів, що підтверджено як теоретично, так і експериментально [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Становлячи незначну частку загальної маси конструкції, підкріплювальні елементи істотно впливають на її міцність, стійкість, жорсткість. Здебільшого такі елементи використовують для усунення концентрації напружень як у проєктованих, так і в реконструкції споруд і технічних систем, з метою підвищення або відновлення їх працездатності.

Для конструкцій із помірно змінною картиною напружено-деформованого стану підкріплювальні елементи можна розглядати як однорідні стрижні або шайби, рівномічні в усіх перерізах. Таке припущення цілком прийнятне, оскільки ефективність таких елементів надзвичайно висока, а розрахункова схема контракції досить проста [4–8].

Однак постановка обернених задач і задач оптимального проєктування пластинчатих конструктивних елементів виявляє обмежені можливості рівномічних підкріплювальних елементів. Суть цього питання полягає у тому, що, маючи невиправдано завищену вагу, такі елементи не дають змоги досягнути бажаного розподілу напружень і переміщень у тих випадках, коли концентрація напружень має яскраво виражений дискретний характер. Таке явище спостерігають у задачах про концентрацію напружень

в околі отворів, вирізів, неоднорідностей пластин і оболонок. Під час проектування таких пластинчатих конструкцій першочерговим стає завдання підвищення ефективності й раціонального (мінімум ваги, вартості виготовлення, найбільшої міцності), вибору підкріплювального елемента [9–18].

Постановка завдання. У дослідженні наведено спосіб підвищення ефективності тонких підкріплювальних елементів створенням у них попередньої деформації, яка оптимальним чином знижує (або зовсім усуває) концентрацію напружень, зумовлена як зовнішнім навантаженням, так і наявністю отворів різної конфігурації або неоднорідностей.

Завдання нашого дослідження – розробка критерію розрахунку підвищення несучої здатності порівняно з існуючою нормативною методикою тонкостінних елементів з підкріпленнями по контуру для оцінки економічної ефективності таких конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Методика розрахунку несучої здатності підкріплених елементів конструкцій вказує на те, що теоретичні розрахунки забезпечують підвищення несучої здатності зразка у граничній стадії на 91,1кН, що відповідає 17,6% нормативної несучої здатності [17]. Результати економічної ефективності пластин з еквівалентно підкріплювальним круговим кільцем у граничному стані подані в таблиці.

Позначення: $\Delta N^T = N_u^t - N_n^t$ – теоретичне підвищення несучої здатності; $N_n^t = k_b A_s^{tr} R_{yn}^{tr} + A_s^{st} R_{yn}^{st}$ – теоретична несуча здатність, визначена за сучасними нормативними документами; $N_u^t = k_b A_s^{tr} R_{un}^{tr} + A_s^{st} R_{un}^{st}$ – теоретична несуча здатність, визначена за удосконаленою формулою; $\Delta N^{ek} = N_r^{ek} - N_{r\sigma\sigma}^{ek}$ – експериментальне підвищення несучої здатності за рахунок самозміцнення сталі; N_{cr}^{ek} – експериментальна несуча здатність за показами випробувальної машини-преса; $N_{cr,\varepsilon,\sigma}^{ek}$ – експериментальна несуча здатність, визначена за графіком деформації-напруження.

Із розрахунків, наведених у таблиці, випливає, що середнє теоретичне значення підвищення несучої здатності попередньо напружених зразків становить $\Delta N^t = 89,53$ кН, що відповідає 21,33% нормативного значення несучої здатності.

Таблиця

Економічна ефективність дослідних розтягнутих звичайних та попередньо напружених зразків

№	ε	σ	N ^{ek}	Граничний стан
---	---	---	-----------------	----------------

		теоретичні дані				експериментальні дані			
		ΔN^t , кН	Відсоток економічної ефективності	Економія сталі на кг/м.п.	Відсоток від загальної маси конструкції	ΔN^{ek} кН	Відсоток економічної ефективності	Економія сталі на кг/м.п.	Відсоток від загальної маси конструкції
I	зв	91,74	18,35	2,86	52,24	78,95	18,32	3,16	46,0
II	зв	97,50	26,15	3,04	56,50	72,90	18,65	2,27	37,0
III	зв	89,10	21,42	2,78	51,50	91,06	19,60	2,84	52,75
IV	зв	89,80	17,85	3,59	52,00	93,04	15,79	2,90	54,0
V	зв	80,38	26,48	3,21	56,00	71,26	22,59	2,22	58,3
сер. зн.	зв	89,70	22,05	3,59	52,00	81,44	19,09	2,54	47,1

Відповідно, середнє експериментальне значення підвищення несучої здатності попередньо напружених зразків становить $\Delta N^{ek} = 82,85$ кН, що відповідає 18,45% експериментального значення несучої здатності.

Стосовно середнього теоретичного значення підвищення несучої здатності звичайних, ненапружених зразків, то воно згідно з розрахунком становить $\Delta N^t = 89,70$ кН, і відповідає 22,05% нормативного значення несучої здатності.

Відповідно, середнє експериментальне значення підвищення несучої здатності звичайних зразків становить $\Delta N^{ek} = 81,44$ кН, що відповідає 19,09% експериментального значення несучої здатності.

У граничному стані різниця між теоретичними й експериментальними значеннями підвищення несучої здатності попередньо напружених і звичайних зразків має незначні відхилення, а саме не більше, ніж 3,0%. Це свідчить про те, що для визначення несучої здатності зразків запропонована методика не тільки забезпечує несучу здатність, а й дає змогу одержувати значну економічну ефективність у межах 18-22%.

Щодо економії сталі, то вона цілком залежить від розміру площі поперечного перерізу й розрахункових характеристик сталі пластин. Проте завжди повинна виконуватися умова – одноосібна несуча здатність

високоміцного підкріплювального елемента має бути більшою за несучу здатність основного елемента з'єднання, а саме пластини.

У дослідних розрахунках відповідно до сучасних вимог у граничному стані для сталі марки Ст-3 прийнята межа текучості $R_y^n = 250,0$ МПа, яка була визначена випробовуванням сталевих зразків. Враховуючи пластичні особливості самозміцнення м'якої сталі в умовах сумісних деформацій із високоміцною сталлю підкріплювальних елементів у граничному стані для м'якої сталі експериментально встановлено й запропоновано приймати в розрахунках характеристику межі міцності. За рахунок цієї особливості, як було відзначено, можна отримати підвищення загальної несучості здатності зразків, і, як наслідок, досягнути економії м'якої сталі (див. таблицю).

Для більшої виразності економія сталі приведена до 1 м.п. дослідного зразка. У теоретичних підрахунках економія становить 3,58-3,59 кг, що відповідає 51,0-52,0% загальної маси системи пластина-підкріплювальне кільце, а в експериментальних дослідженнях економія сталі становила 2,58-2,54 кг, що відповідає 47,9-47,1% загальної маси м'якої сталі.

Підвищення несучої здатності елементів складових з'єднання призводить у граничному стані до економії сталі, яка становить для дослідних взірців порядку 50% загальної маси системи пластина-підкріплювальне кільце.

Економічна ефективність розтягнутих елементів стає виразною лише тоді, коли несуча здатність високоміцної сталі превалює над сталеву складовою основного елемента з'єднання, і чим вона більша, тим показники ефективності відчутніші.

Для практичного застосування конструктивних рішень конструкції пластина-підкріплююча накладка, що працюють на розтяг, пропонують листові профілі із м'яких сталей (або дюралюмінію) та високоміцну сталь для підкріплення.

В інженерній практиці поширений сталевий прокат (вироби, які отримують на металургійних заводах обтиском заготовок між валками прокатних станків, які обертаються) різного профілю, тобто різної форми поперечного перерізу. Форму у цих поперечних перерізів, як і їх розміри, встановлюють державні стандарти. Таблиці нормального сортаменту прокатної сталі наводять для кожного калібру відповідного профілю всі необхідні дані, зокрема геометричні розміри профілю, площу перерізу, координати центра ваги тощо. Користуючись такими даними, можна визначати параметри складної конструкції, тобто конструкції, складеної з декількох складових стандартного типу завдяки їх сполученню.

Листові профілі (для марки сталі Вст3пс, причому сталь застосовують марки Ст-3 різновиду як «кп» – кипляча, так «пс» – напівспокійна), гарячодеформовані згідно з ГОСТ 8732-78 мають товщину 4,5-30 мм з розрахунковим опором $R_y = 225$ МПа.

Зварні профілі холоднотягнуті квадратного перерізу за ТУ 36-2287-80 мають такі основні характеристики: товщина – від 3,0 до 6,8 мм для марки сталі ВСт-3пс, розрахунковий опір – $R_y = 235$ МПа, $R_u = 350,0$ МПа.

Профілі з гнутозварних замкнутих квадратних і прямокутних листів за ТУ 14-2-361-79 можуть поставляти за такими основними характеристиками: товщина – від 3 до 8 мм із градацією 1,0 мм.

До конструктивних рішень системи пластина-підкріплювальний елемент, крім профільних листів, входять високоміцні катані стрижні; пропонують для використання високоміцні стрижні діаметром 18, 22, 25, 28, 32 мм, сталь гарячекатана періодичного профілю класу А-III з розрахунковим опором $R_y = 340$ МПа, класу А-IIIв із $R_y = 450$ МПа, класу А-IV із $R_y = 540$ МПа, класу А-V із $R_y = 640$ МПа. Крім зазначеної сталі, можна застосовувати термічно зміцнену сталь періодичного профілю класу Ат-IV із $R_y = 510$ МПа; класу Ат-V із $R_y = 640$ МПа; Ат-VI із $R_y = 760$ МПа.

Наявність стандартних розмірів листових профілів та високоміцних сталей за різними класами й міцностями дають змогу конструювати розтягнуто-стиснуті конструкції типу пластина-підкріплювальне кільце заданої несучої здатності та подавати їх у вигляді готових таблиць для використання у практиці проектування. У таблицях для кожного розтягнутого елемента системи пластина-підкріплювальне кільце можна передбачити відображення несучої здатності за сучасними нормативними вимогами і за результатами чисельного експерименту згідно з розробленим алгоритмом, що охоплює й економічну ефективність.

В основу формування таблиць несучої здатності пластинок із підкріплювальними накладками можна закладати такі формули:

а) несучу здатність визначають за формулою сучасних нормативних документів, а саме:

$$N_n^t = k_b \cdot A_s^r \cdot R_{yn}^r + A_s^{st} \cdot R_{yn}^{st}, \quad (1)$$

де N_n^t – розрахункова нормативна несуча здатність системи пластина-підкріплювальне кільце; A_s^r, R_{yn}^r – площа поперечного перерізу листового

профілю та розрахунковий опір сталі; A_s^{st}, R_{yn}^{st} – площа поперечного перерізу підкріплювального елемента умовний розрахунковий опір сталі; k_b – коефіцієнт впливу на міцність кільця на розтяг в об'ємі підкріплення (у граничній стадії $k_b = 1$, оскільки у перерізі можуть з'явитися тріщини);

б) несуча здатність визначення на основі розробленого алгоритму згідно з критерієм оптимальності

$$N_u^t = k_b \cdot A_s^{tr} \cdot R_{un}^{tr} + A_s^{st} \cdot R_{yn}^{st}, \quad (2)$$

де N_u^t – розрахункова здатність конструкції у граничному стані; A_s^{tr}, R_{un}^{tr} – площа поперечного перерізу листового профілю та межа міцності сталі; A_s^{st}, R_{yn}^{st} – площа поперечного перерізу підкріплювального кільця та умовний розрахунковий опір сталі;

в) підвищення несучої здатності проєктованих інженерних елементів визначають, як різницю між несучими здатностями за удосконаленою формулою згідно з розробленим алгоритмом та формулою сучасних нормативних документів.

Згідно з підвищенням несучої здатності проєктованих систем на основі залежностей (1), (2) визначають економію матеріалу за пропонуваним критерієм і урахуванням сучасних нормативних документів.

Алгоритм розрахунку і проєктування пластин з еквівалентно підкріплювальним кільцем мінімальної ваги передбачає двоосний розтяг, що висуває вимогу щодо способу кріплення накладки до листового профілю, який має забезпечити їх сумісну роботу.

Однак, якщо для випадку стиску достатньо виконати приварювання до країв накладки відповідних розмірів, щоб забезпечити сумісну роботу накладки й матеріалу листа, то за умови дії сил, направлених від осі основного складового елемента (пластини), треба передбачити додаткові заходи, оскільки при цьому накладка вже не притискатиметься до основного елемента конструкції, ба навіть можливе відривання від нього.

Висновки. Запропонована методика розрахунку, що приводить до підвищення несучої здатності порівняно з існуючою нормативною методикою визначення несучої здатності тонкостінних елементів з підкріпленнями по контуру, є основою для оцінки економічної ефективності таких конструкцій. Загалом оптимальність конструкційних з'єднань полягає у комплексі критеріїв: найбільша міцність - за мінімальної ваги, найбільша міцність - за найсприятливішої стійкості тощо.

Бібліографічний список

1. Амиро И. Я. Об исследованиях по строительной механике в АН УССР /

- И. Я. Амиро, Я. М. Григоренко // Прикладная механика. – 1978. – Т. XIV, № 9. – С. 3-14.
- Бельский М. Р. Усиление стальных конструкций / М. Р. Бельский, А. Н. Лебедев. – К. : Будівельник, 1961. – 120 с.
- Вайнберг Г. Н. Напряженное состояние дисков и пластин / Г. Н. Вайнберг. – К. : Изд-во АН УССР, 1952. – 420 с.
- Вайнберг Г. Н. Концентрация напряжений в пластинках около отверстий и выкружек : справ. пособие / Г. Н. Вайнберг. – К. : Техника, 1969. – 219 с.
- Ворович И. И. Некоторые проблемы концентрации напряжений / И. И. Ворович // В кн. : Концентрация напряжений. – К. : Наук. думка, 1968. – Вып. 2. – С. 45–53 с.
- Гайдаров Ю. В. Предварительно напряженные металлические конструкции / Ю. В. Гайдаров. – Л. : Стройиздат, 1971. – 146 с.
- Галеркин Б. Г. Упругие тонкие плиты / Б. Г. Галеркин. – М. : Гостехиздат, 1933. – 164 с.
- Гречишев Е. С. Соединения с натягом / Е. С. Гречишев, А. А. Ильяшенко. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.
- Григолюк Э. И. Перфорированные пластинки и оболочки / Э. И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. – М. : Наука, 1970. – 554 с.
- Гольденблатт И. И. Нелинейные проблемы теории упругости / И. И. Гольденблатт. – М. : Наука, 1969. – 486 с.
- Гузь А. Н. Об исследованиях по механике деформируемого твердого тела в Академии наук УССР / А. Н. Гузь // Прикладная механика. – 1978. – Т. XIV, № 9. – С. 15–19.
- ДБН В.1.2-9-2008. Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека експлуатації.
- Дзюба А. П. Оптимальное проектирование силовых колец на основе принципа максимума / А. П. Дзюба, Т. В. Ткачева // В кн. : Прочность, долговечность конструкций. – К. : Наук. думка, 1970. – С. 121–127.
- Корнишин М. С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения / М. С. Корнишин. – М. : Наука, 1964. – 282 с.
- Крысько В. А. Нелинейная статика и динамика неоднородных оболочек / В. А. Крысько. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1976. – 214 с.
- Лебедев Л. П. Об обобщенной постановке задачи равновесия упругой полосы / Л. П. Лебедев // ПММ. – 1980. – Т. 44, вып. 6. – С. 1071–1075.
- Лихтарников Н. М. Технично-економічні основи проектування будівельних конструкцій / Н. М. Лихтарников, Н. С. Летников, В. Н. Левченко. – Киев-Донецк : Вища шк., 1980. – 240 с.
- Лукаш П. А. Основы нелинейной строительной механики / Лукаш П. А. – М. : Стройиздат, 1978. – 208 с.

Добрянська Л. Економічна ефективність та практичне застосування попередньо підкріплених пластинчатих конструктивних елементів

Наведено приклади методики розрахунку несучої здатності дослідних зразків пластин з підкріпленням. Показано, що теоретичні розрахунки забезпечують підвищення несучої здатності зразка у граничній стадії на 91,1 кН,

що відповідає 17,6% нормативної несучої здатності; експериментальні дослідження свідчать, що підвищення несучої здатності зразка в граничному стані становить 91,08 кН, що відповідає 16,29% експериментальної несучої здатності.

Ключові слова: міцність, попередньо підкріплені пластини, економічна ефективність, оптимальність конструкцій.

Dobryanska L. Economic effectiveness and practical applyinitial support plate construcyive elements

Is given the examples of the methods calculating the carry ability investigates samples plates with support. Iss hown that the oretical calculating iverise the carry abilitysample in maximum stadieson 91,1 кN, it saccording 17,6% of normative carry abilitysamples; the experimental in vestigation indicate that rise carry abilitysamples in maximum state be 91,08 кN, what corresponding 16,29% to experimental value carry ability.

Key words: strength, initial support plates, economic effectiveness, optimal of construction.

Добрянская Л. Экономическая эффективность и практическое использование предварительно подкрепленных пластинчатых конструктивных элементов

Приведены примеры методики расчета несущей способности испытуемых образцов пластин с подкреплением. Показано, что теоретические расчеты дают повышение несущей способности образца в граничной стадии на 91,1 кН, что соответствует 17,6% нормативной несущей способности; экспериментальные исследования указывают, что повышение несущей способности образца в граничном состоянии составляет 91,08 кН, что соответствует 16,29% экспериментально установленной несущей способности.

Ключевые слова: прочность, предварительно подкрепленные пластини, экономическая эффективность, оптимальность конструкций.