

УДК 624.072.014

**МІЦНІСТЬ СТАЛЕВИХ СТЕРЖНІВ
В ОБЛАСТІ ОБМЕЖЕНИХ ПЛАСТИЧНИХ
ДЕФОРМАЦІЙ ПІД ВПЛИВОМ РІЗНИХ
КОМБІНАЦІЙ ЗОВНІШНІХ ЗУСИЛЬ**

В.С.Шебанін, доктор технічних наук

О.В.Цепурін, здобувач

У статті розглянуто питання теоретичних та експериментальних досліджень міцності сталевих стержнів в області обмежених пластичних деформацій при навантаженні різними комбінаціями поздовжньої та зосередженої сил та їх застосування в типових металевих конструкціях.

В статье рассмотрен вопрос теоретического и экспериментального исследования прочности стальных стержней в области ограниченных пластических деформаций при воздействии различных комбинаций внешних сил и их применение в типовых металлических конструкциях.

В умовах необхідності постійного підвищення рівня національної економіки найважливішими завданнями в області будівництва є забезпечення високої економічності споруд і конструкцій та надійності при експлуатації. Одним з головних напрямків для досягнення цієї мети є передбачення зниження витрат металу у будівельних конструкціях на стадії проектування та удосконалення методів розрахунку інженерних споруд за граничним станом.

Уперше використання деформаційного критерію граничного стану було запропоновано М.С. Стрелецьким. Деформаційну сутність граничного стану за міцністю було визнано основними положеннями проектування будівельних конструкцій. Перегляду норм проектування сталевих конструкцій у зв'язку з переходом на новий критерій міцності попереджала робота з удосконалення глави БНіП П-23-81 у частині розрахунків за критерієм обмежених пластичних деформацій.

Метою подальших досліджень в цьому напрямі є теоретичне та експериментальне обґрунтування розрахунку міцності стиснуто-зігнутих та розтягнуто-зігнутих сталевих стержнів з урахуванням деформованої схеми за критерієм обмежених пластичних деформацій, а також розробка для використання у практиці проектування методики розрахунку стержневих елементів моно-і бісталевих конструкцій при пружно-пластичній роботі.

Для реалізації поставленої мети проводилося теоретичне дослідження напружено-деформованого стану перерізів типових елементів сталевих конструкцій при складному опорі в області обмежених пластичних деформацій під впливом різних комбінацій зовнішніх зусиль, у тому числі при повторно-змінному навантаженні.

Предметом дослідження є напружено-деформований (з урахуванням залишкових напружень) стан перерізів стержневих елементів в області обмежених пластичних деформацій, а також міцність стержневих елементів при складному опорі та повторно-змінних навантаженнях з урахуванням залишкових напружень та деформованої схеми.

Методика розрахунку міцності, що пропонується, напрямлена на використання при проектуванні та реконструкції будівель та споруд в наступних конструкціях: прогони по балкам і фермам покриття, допоміжні балки робочих майданчиків промислових будівель, балки покриття багатопверхових промислових будівель, ригелі естакад під трубопроводи. В зв'язку з цим проводився розрахунок міцності наступних елементів вказаних конструкцій під впливом відповідних комбінацій навантажень: стержні асиметричного перерізу на одноосний згин, стержні асиметричного перерізу на згин з поздовжньою силою, бісталеві стержні асиметричного перерізу при дії двох поперечних сил та центрально прикладеної сили, сталеві стиснуто-зігнуті зварні колони двотаврового симетричного перерізу, бісталеві стиснуто-зігнуті зварні колони двотаврового асиметричного перерізу, двохпрольотна балка, навантажена зосередженою силою, двохпрольотна балка, навантажена рівномірно по усій довжині, двохпрольотна балка, навантажена рівномірно по усій довжині, двохпрольотна балка, навантажена рівномірно в одному прольоті, двохпрольотна балка, навантажена двома зосередженими

силами в середині прольотів, чотирьох прольотна балка, під впливом комбінації рівномірно розподілених навантажень та зосередженої сили.

Задача розрахунку стержневих елементів при повторному навантаженні розглядається в зв'язку з питанням реконструкції відносно конструкцій третьої групи. Окреме теоретичне дослідження роботи підкранової балки, як конструкції, що підлягає одному з найбільш несприятливих сполучень повторно-змінного навантаження показало, що, не зважаючи на достатньо великий (понад 20%) запас міцності, стійкість конструкції втрачається, в зв'язку з цим дана методика не використовується у випадку динамічних навантажень.

При вивченні та аналізі предмета дослідження проводилася класифікація можливих видів напружено-деформованого стану моно-та бісталевих перерізів, а також розв'язок прямої та оберненої задач. Обернена задача розв'язується за допомогою вибору відповідного випадку напружено-деформованого стану залежно від текучості або пружної роботи окремих елементів перерізів та з використанням метода поновлення обмежених пластичних деформацій. Розв'язок прямої задачі потребує організації ітераційного процесу з використанням метода поновлення обмежених пластичних деформацій на кожному кроці для знаходження напружено-деформованого стану перерізів стержнів з урахуванням залишкових напружень.

З урахуванням теореми про пружний характер розвантаження розглянуто характерні випадки залишкового напружено-деформованого стану перерізу при дії різних комбінацій зовнішніх зусиль та наступному розвантаженні.

Для дослідження міцності стержневих елементів використовувалась методика врахування фізичної та геометричної нелінійності та побудова матриць жорсткості моно-і бісталевих стержнів з використанням метода змінних параметрів, а також методи апроксимації при знаходженні аналітичних залежностей, які характеризують величину прогинів відповідно до точки прикладення зосередженої сили. При знаходженні залишкових прогинів у стержні після розвантаження використовувалися значення прогинів,

які було обчислено за припущенням досягнення у найбільш навантаженому перерізі стержня граничної пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim}$, а також відомі формули знаходження прогинів при пружній роботі, які використано за припущенням необмежено пружної роботи матеріалу.

Практична методика розрахунку міцності моно-та бісталевих стержнів реалізує принцип зберігання традиційного виду розрахункових формул пружної стадії роботи з доповненням системою корегування розрахункових коефіцієнтів при взаємодії різних комбінацій згинального моменту та поздовжнього зусилля. Здійснюється також перевірка умовних напружень у певних точках моно-та бісталевих перерізів, що забезпечує побудування точних кривих взаємодії. Розрахунок міцності стержневих елементів конструкцій при роботі в області обмежених пластичних деформацій потребує розв'язку питання про пристосування перерізів до навантаження різними комбінаціями згинального моменту та поздовжньої сили. Границі змінення зовнішніх зусиль, до яких пристосується найбільш навантажений переріз при повторному прикладенні зусиль можуть бути знайденими за умови, що деформації у перерізі не перевищують граничних. За обмеження величини граничної пластичної деформації на першому етапі навантаження прийнято значення $\varepsilon_{ip,lim} = 0,002$ за наступними твердженнями: пластичні складові деформації не більше 0,002 не впливають помітно на ударну в'язкість та не погіршують властивості тривкості сталі; незначна величина пластичної складової деформації $\varepsilon_{ip,lim}$ забезпечує можливість пристосування конструкцій, величина пластичної складової деформації 0,002 дає підвищення тривалої тримкості, яке наближається до підвищення при пластичному шарнірі.

Область взаємодії поздовжньої сили N та згинального моменту M , які забезпечують пристосування переріза відображаються нерівностями $N_{GP}^S \leq N \leq N_{GP}^R$, $0 \leq M \leq M_{GP}$, де N_{GP}^S, N_{GP}^R – гранична стискувальна та гранична розтягувальна поздовжні сили, M_{GP} – граничний згинальний момент.

Як найбільш типовий розглядався випадок, коли на першому етапі навантаження задана величина пластичної деформації досягається у верхніх волокнах найбільш навантаженого перерізу і викликана дією стискувальної поздовжньої сили та зосередженою силою. При розрахунку для першого етапу навантаження значень граничних стискувальної та розтягувальної сил знаходились безпосередньо за заданими площами верхньої полки, стінки та нижньої полки, розрахунковий опором матеріалу полок та стінки перерізу, при цьому розглядались окремо як сталеві, так і бісталеві перерізи. Значення граничного моменту M_{GP} на першому етапі навантаження знаходиться відповідно методики, що викладена в роботі [1], тобто визначається за епюрою напружено-деформованого стану перерізу з урахуванням можливих випадків перевищення меж пружності у різних точках перерізу. На відміну від області взаємодії, яка забезпечує пружну роботу і має лінійний вигляд, область взаємодії за припущенням досягнення граничної пластичної деформації має криволінійні межі та поширюється відповідно збільшення допустимого граничного моменту. Значення M_{GP} визначались за епюрами напружено-деформованого стану, які будувались для значень поздовжньої сили N , де $N/N_{GP}=0; \pm 0,1; \pm 0,2; \dots; \pm 0,9$. При прикладенні на другому етапі навантаження заданої стискувальної (розтягуючої) поздовжньої сили та згинального моменту для пристосування перерізу необхідно, щоб відповідно до статичної теореми про пристосування сумарні напруження у волокнах перерізу не перевищували різниці між розрахунковим опором та залишковими напруженнями, тому для визначення значень граничних зовнішніх зусиль попередньо було побудовано епюри залишкових напружень згідно з методикою, що викладено в роботі [2].

Максимальне значення граничного згинального моменту, до якого пристосується переріз при заданому значенні поздовжньої сили, знаходилося за ітераційним алгоритмом. На першому кроці наближене значення моменту, що шукався, бралось за умовою рівності сумарних напружень у верхніх волокнах перерізу границі

текучості. За знайденим згинальним моментом M_2 знаходяться сумарні напруження у точках перерізу, і у випадку перевищення у цій точці границі текучості зменшене значення моменту визначається методом поділу навпіл, тобто має місце зменшення згинального моменту на величину $M_2/2^k$, де k — номер кроку ітераційного процесу, при перевищенні сумарними напруженнями границі текучості, або збільшення на $M_2/2^k$ за наявності запасу. Ітераційний процес припиняється при досягненні заданої точності. При перевірці умови пристосування у випадку двосторонньої текучості та у нижній частині стінки перерізу корегування значення M_2 проводиться аналогічно. В результаті врахування напружень від повторного навантаження у кожній точці перерізу може бути побудована еюра сумарних напружень.

Результатом використання цієї методики є встановлення області взаємодії згинального моменту та поздовжньої сили, які забезпечують пристосування перерізу на другому етапі навантаження. Викладена методика побудування еюр напружено-деформованого стану перерізів використовувалася для дослідження пристосування перерізів на наступних циклах навантаження. На основі розрахунків для різних видів навантаження одержано результати, які показують на формування незмінного поля самоврівноважених залишкових напружень на 3-4 етапах навантаження, тобто область взаємодії згинального моменту та поздовжньої сили, яка забезпечує пристосування перерізів, залишається далі незмінною для усіх подальших циклів навантаження.

Для перевірки та удосконалення методики розрахунку міцності стержневих елементів металевих конструкцій в області обмежених пластичних деформацій з урахуванням деформованої схеми виконано експериментальні дослідження дійсної роботи стержнів за межею пружності з метою з'ясування можливості підвищення навантажень, які сприймаються, і зниження витрати сталі.

При порівнянні теоретичних результатів та дійсної роботи стержневих елементів конструкцій проводився розрахунок та

експериментальні випробування на устаткованні, що призначено для визначення напружено-деформованого стану при дії поздовжньої та зосередженої поперечної сил зразків моно-та бісталевих стержнів. У відповідності з цілями, які було поставлено перед експериментальним дослідженням, було спроектовано та виготовлено наступні моделі стержнів довжиною 900мм:

- а) сталеві зварні стержні асиметричного двотаврового перерізу з висотою стінки 50мм для випробувань на стиск з поперечним згином — серія АС;
- б) сталеві зварні стержні асиметричного двотаврового перерізу з висотою стінки 50мм для випробувань на розтягування з поперечним згином — серія АС;
- в) сталеві зварні стержні симетричного двотаврового перерізу з висотою стінки 50мм для випробувань на стиск з поперечним згином — серія СС;
- г) сталеві зварні стержні симетричного двотаврового перерізу з висотою стінки 50мм для випробувань на розтягування з поперечним згином — серія СС.

Усього було випробувано 28 моделей стержнів. Потужність експериментальної устатковини дозволяє випробувати конструкції зі зварних складних перерізів та прокатних профілів висотою до 350мм. Після оброблення результатів експериментального дослідження, одержаних на кожному етапі навантаження, будувались наступні графіки: а) епюри деформацій в найбільш навантаженому перерізі; б) залежність деформацій по краях полук від поздовжньої та поперечної сил; в) залежність значень максимальних прогинів від діючих поздовжніх та поперечних сил.

Проведені дослідження показали, що теоретичні та експериментальні лінії в пружно-пластичній області незначно відрізняються у бік запасу міцності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чернов Н.Л., Стрелецкий Н.Н., Любаров Б.И. Расчеты стальных конструкций на прочность по критерию ограниченных пластических деформаций //Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1984. – №7. – С.1-9.

2. Шибанин В.С. Прочность изгибаемых стальных стержневых конструкций при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций. Дис...докт.наук: 05.23.01. – Одесса, 1993.

3. Шибанин В.С., Богза В.Г., Цепурит О.В. Теоретико-експериментальне дослідження роботи бісталевих стержнів симетричного перерізу при повторно-змінних навантаженнях за межею пружності //Металеві конструкції. – Т.2. – 1999. – №1. – С.39-43.

4. Цепурит О.В. Пристосування моносталевих стержнів симетричного перерізу при повторно-змінних навантаженнях в області обмежених пластичних деформацій //Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 1999. – Вип 1(6). – С.162-166.