

УДК 624.072.014

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ БІСТАЛЕВИХ СТЕРЖНІВ
ЗА МЕЖЕЮ ПРУЖНОСТІ**

І.І. Хилько, МДАА, м. Миколаїв.

Для успішного розв'язання задач науково-технічного прогресу необхідно передбачити подальше підвищення якості та забезпечення економічності споруд і конструкцій, які використовуються в капітальному будівництві. Одним із шляхів досягнення цього є зниження затрат металу в будівельних конструкціях на стадії проектування та удосконалення методів розрахунку інженерних споруд і конструкцій за граничними станами. Удосконалення методів розрахунку шляхом наближення розрахункових допущень до реальних умов роботи конструкцій підвищує їх надійність, дає допоміжні резерви, забезпечує значний економічний ефект.

Існуючі норми БНП II-23-81 рекомендують виконувати розрахунок сталевих конструкцій, як правило, з врахуванням непружних деформацій і дозволяють враховувати пластичні деформації тільки при дії статичних навантажень з деякими обмеженнями. Таким чином значна частина елементів конструкцій, що працюють під статичними навантаженнями розраховується тільки в межах пружності, а бісталеві конструкції взагалі нормами не передбачені. Крім того, у більшості з робіт це досягається за рахунок дослідження роботи конструкцій за першим граничним станом – за несучою здатністю (міцністю, стійкістю) і таким чином не враховуються резерви, які можуть бути при дослідженні конструкції за другим граничним станом – за розвитком надмірних прогинів.

Отже, тема роботи обумовлена необхідністю подальшого розвитку та удосконалення теорії розрахунку міцності та стійкості бісталевих стержнів за

деформаційним критерієм у вигляді обмеження пластичних деформацій у випадку стиску (розтягу) зі згином з урахуванням деформованої схеми.

Мета роботи є розробка теоретичних і експериментальних методів дослідження несучої здатності бісталевих стержнів в області обмежених пластичних деформацій при складному опорі з врахуванням деформованої схеми і впровадження в практику проектування методики розрахунку прогинів стержнів, які знаходяться під впливом різноманітних комбінацій навантажень.

Поставлена мета досягається вирішенням таких завдань:

- удосконалення методики одержання пружно-деформованого стану стиснуто-зігнутих бісталевих стержнів за критерієм обмежених пластичних деформацій;
- розробка методики розрахунку несучої здатності бісталевих стержнів в області обмежених пластичних деформацій при складному опорі;
- уточнення методики розрахунку прогинів бісталевих стержнів в області обмежених пластичних деформацій при складному опорі;
- розробка пропозицій для нормативних документів та програмного продукту, придатного для використання в практиці проектування по розрахунку бісталевих стержнів згідно запропонованої методики;
- проведення відповідних експериментальних досліджень несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності.

Об'єктами досліджень є бісталеві стержні, які працюють під статичними навантаженнями: балки перекриттів і покриттів, ригелі рам, ригелі фахверка, ригелі естакад, колони та інші стиснуто-зігнуті конструктивні елементи. Предметом дослідження є несуча здатність бісталевих стержнів за межею пружності. В основу розроблених методів розрахунку і проектування

покладено метод поновлення обмежених пластичних деформацій та експериментальні методи.

Розроблена методика дослідження несучої здатності бісталевих стержнів може бути використана при проектуванні металевих конструкцій для забезпечення їх економічності, а також для внесення відповідних змін у відомчі нормативні документи.

Початок дослідження роботи сталевих конструкцій за межею пружності було покладено Н.Д. Жудіним. Теоретичні дослідження по розвитку методики розрахунків за граничними станами були запропоновані М.С. Стрелецьким, який обґрунтував заміну силових критеріїв на деформаційні, що приймалися для граничних станів по втраті експлуатаційної придатності. Теоретичне обґрунтування пружно-пластичної роботи бісталевих конструкцій було дано тільки після початку їх практичного застосування. В 70-х роках, після освоєння сталей з межею пружності 600-700 МПа і вище, бісталеві конструкції отримують широке застосування в промислових спорудах, а пізніше і при побудові авто- і залізничних мостів. Подальше теоретичне і експериментальне дослідження даної проблеми розглядалося в роботах М.М. Стрелецького, А.Р. Ржаницина, В.А. Балдіна, М.Л. Чернова, В.С. Шибаніна, В.М. Вахуркіна і багатьох інших.

Практичне застосування сучасних методів розрахунку бісталевих стержнів при одночасному врахуванні фізичної та геометричної нелінійності досить складне. Але перехід на розрахунок міцності за обмеженими пластичними деформаціями дозволив запропонувати ефективний метод розрахунку поновленням величини граничної пластичної деформації $\epsilon_{ip,lim}$. Ідея даного методу полягає в максимальному наближенні пружно-деформованого стану стержня на кожному кроці ітераційного процесу до

кінцевого граничного стану. Для досягнення даної мети в кожному послідовному наближенні змінюються або величини навантажень, або розміри перерізу стержня, таким чином, щоб у найбільш навантаженому місці стержня досягалася гранична величина пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim} = 0.002$ [1].

В роботі розглядаються стержні, які працюють тільки під статичними навантаженнями. Під міцністю стержня будемо розуміти його здатність чинити опір розвитку пластичних деформацій. Питання дослідження несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності будемо розглядати при загальновідомих передумовах та припущеннях пружно-пластичного розрахунку сталевих конструкцій. З врахуванням основних передумов були дослідженні характерні випадки пружно-деформованого стану бісталевих перерізів в області обмежених пластичних деформацій при згині з поздовжньою силою, а також розв'язок прямої та оберненої задач. Аналіз 5 характерних випадків напружено-деформованого стану перерізу за межею пружності при одноосному згині з поздовжньою силою [2] свідчить про те, що необхідною умовою отримання максимального згинаючого моменту M_{lim} є умова того, що нейтральна лінія повинна проходити через середину стінки, що досягається за рахунок різниці верхньої та нижньої полок.

Обернена задача розв'язується вибором відповідного випадку пружно-деформованого стану в залежності від текучості чи пружної роботи перерізу стержня. Розв'язок прямої задачі виконувався за допомогою ітераційного процесу з використанням методу ділення відрізка пополам і одержанням кінцевих значень пластичних деформацій $\varepsilon_{ip} < \varepsilon_{ip,lim}$. Пряма задача відрізняється від оберненої тим, що по заданому згинаючому моменту M і поздовжній силі N шукається пружно-деформований стан перерізу стержня.

Як показали дослідження роботи стиснуто-зігнутих бісталевих стержнів за деформованою схемою у випадках дії на стержень поздовжньої та поперечної сил, врахування деформованої схеми впливає на несучу здатність стержня і враховується шляхом введення корегуючого коефіцієнта $\nu = \frac{M_d^{max}}{M^{max}}$

при розрахунку міцності стержня.

Згідно розробленої методики було розроблено алгоритм розрахунку міцності бісталевих стержнів, який потім був реалізований у вигляді програми на мові TURBO CI на ПЕОМ [3].

Для першої ітерації еюра згинаючих моментів за деформованою схемою $M_{d,i}$ бралася рівною граничній епюрі моментів M , що була визначена за недеформованою схемою, при умові, що $M_{max} = M_{lim}$. Далі визначалися ті перерізи, в яких значення згинаючого моменту $M_{d,i}$ було більше значення найбільшого моменту M_{SN} , обчисленого в межах пружної роботи стержня при врахуванні сили N . В кожному з перерізів, використовуючи метод ділення відрізка пополам, будувалася еюра нормальних напруг σ_i , знаходилися повні кривизни χ_i , за допомогою метода Мора знаходилися повні прогини Y_i і вносилися зміни в вид попередньої епюри згинаючих моментів $M_{d,k-1}$ з використанням методу послідовних наближень на кожному k -му кроці ітераційного процесу і як результат визначалася еюра згинаючих моментів $M_{d,i}$ з врахуванням деформованої схеми

$$M_{d,i} = M_{p,i} - N \cdot Y_i$$

поки не досягалася необхідна точність результату.

Використовуючи розроблену програму, були проведені розрахунки по дослідженню несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності симетричного та асиметричного перерізу різної довжини при навантаженні їх зосередженою поперечною силою P в поєднанні з поздовжньою силою N , які викликали досягнення граничної пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim} = 0.002$ у найбільш навантаженому перерізі.

В результаті розрахунку були одержані таблиці корегуючих коефіцієнтів ν для уточнення формули пружно-пластичного розрахунку міцності стержня за критерієм обмежених пластичних деформацій, отриманої раніше без врахування деформованої схеми та ряд аналітичних залежностей за результатами статистичної обробки одержаних даних.

Використання вищеприведеної методики дало можливість виконати розмежування областей по розрахунку міцності та жорсткості стиснуто-зігнутих бісталевих стержнів за межею пружності. Для цього визначався відносний прогин стержня $\frac{f}{l}$, який і порівнювався з заданим нормативним значенням в залежності від призначення стержня. Розрахунок проводився до одержання таких граничних навантажень, при яких відносний прогин $\frac{f}{l}$ не перевищував заданого значення нормативного прогину стержня, тобто до виконання умови

$$\frac{f}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right].$$

Це досягалося за рахунок пропорційної зміни поздовжньої сили N і поперечної сили P . Було виконано розрахунок стержнів середньої гнучкості λ в межах від 30 до 75, які найбільш широко використовуються. Розрахунок було проведено для трьох схем навантажень стержнів симетричного перерізу,

відносний прогин яких був обмежений нормативною величиною $\frac{1}{200}$.

Результати розрахунку дали можливість побудувати криві по розмежуванню областей. Одержані теоретичні результати по дослідженню несучої здатності стержнів вимагали проведення експериментальних досліджень дійсної роботи стиснуто-зігнутих бісталевих стержнів за межею пружності. Дослідження стержнів двотаврового перерізу виконувалося в лабораторії МДАА на установці "ИССС - 1", конструкція якої визнана винаходом [4]. Було досліджено 12 моделей бісталевих стержнів по 3 моделі в кожній серії. Моделі були виготовлені у вигляді двотаврів довжиною 1м з симетричними перерізами (верхня і нижня полка – 50x4 мм, стінка – 50x2 мм) та асиметричними перерізами (верхня полка – 50x4 мм, нижня полка – 25x4 мм, стінка – 50x2 мм). Розрахункові опори сталі $R_w = 2400$ кгс/см², $R_F = 3400$ кгс/см² - визначалися випробуванням стандартних зразків і приймалися рівними границі текучості.

Стійкість моделей та елементів була забезпечена у відповідності з вимогами БНП II -23-81 . Перед експериментальними дослідженнями кожної моделі проводився розрахунок згідно відповідної програми на ПЕОМ, в результаті якого були одержані теоретичні значення згинаючих моментів, величини поперечних навантажень та величини прогинів по всій довжині стержня при заданих геометричних розмірах стержня, заданої величини поздовжньої сили при умові досягнення граничної величини пластичної деформації $\epsilon_{ip,lim} = 0,002$.

Після опрацювання результатів експериментального дослідження, одержаних на кожному етапі навантаження будувати наступні графіки: залежність деформації в найбільш напруженому перерізі стержня від величини згинаючих моментів, епюри деформацій в найбільш напруженому

перерізі стержня, епюри згинаючих моментів в стержні, залежність прогинів стержня від величини згинаючих моментів.

Порівняння теоретичних граничних моментів M_{lim} та дослідних граничних згинаючих моментів M_{lim}^d , коли в найбільш напруженому перерізі стержня досягалася задана величина пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim}$, показало наявність в перерізі стержня запас міцності до 9 %.

Аналіз залежності прогинів стержня від величини згинаючих моментів свідчить про те, що експериментальна крива прогинів розміщена вище теоретичної кривої прогинів, тобто дослідні значення прогинів менші теоретичних. Отже, експериментальна модель крім запаса міцності, має й запас жорсткості.

Характер експериментальних графіків деформацій і прогинів аналогічний як для симетричних так і для асиметричних перерізів. Таким чином проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичні результати по дослідженню несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності.

Основні висновки.

1. Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності показав, що з врахуванням фізичної та геометричної нелінійності за критерієм граничних пластичних деформацій необхідно враховувати вплив деформованої схеми.

2. Дослідження роботи бісталевих стержнів за межею пружності з врахуванням як першого граничного стану - за несучою здатністю (міцністю, стійкістю), так і другого граничного стану - за розвитком надмірних прогинів дозволили виявити додаткові резерви несучої здатності стержнів.

3. Застосування для розрахунку міцності бісталевих стержнів з врахуванням фізичної та геометричної нелінійності методу поновлення граничної величини пластичних деформацій в найбільш напруженому перерізі на кожному кроці послідовних наближень дозволяє забезпечити збіжність ітераційного процесу на 3...5 ітерації, одержати пружно-деформований стан і значення прогинів по всій довжині стержня.

4. Розроблена практична методика розрахунку міцності бісталевих стержнів при їх поздовжньо-поперечному згині в області обмежених пластичних деформацій у вигляді перевірки умовних напруг при зберіганні загальноприйнятого виду формул розрахунку в межах пружності дозволяє врахувати вплив деформованої схеми корегуючими коефіцієнтами, для яких складені спеціальні таблиці.

5. Використання одержаних результатів, згідно запропонованої методики дало можливість виконати розмежування областей по розрахунку міцності та жорсткості стиснуто-зігнутих стержнів за межею пружності та одержати ряд апроксимуючих залежностей.

6. Експериментальні дослідження несучої здатності бісталевих стержнів за межею пружності з врахуванням умов першого та другого граничних станів підтвердили теоретичні результати і припущення, покладені в основу розробленого методу розрахунку.

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. Шебанин В.С. Прочность изгибаемых стальных стержневых конструкций при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций. Докторская диссертация. –Одесса, - 1993.

3. Шебанін В.С., Хилько І.І. Міцність бісталевих стержнів при згині з поздовжньою силою з врахуванням деформованої схеми в області обмежених пластичних деформацій. // Вісник аграрної науки Причорномор'я. -1998.- вип.2.- с.123-128.

4. Богза В.Г., Чернов Н.Л., Шебанін В.С., Веремеенко Н.А. Установка для испытаний. – А.С. № 1146572, БН № 11, 1985.