

УДК 624.072.002

Врахування пластичних деформацій для вант із прокатних профілів

Пічугін С.Ф., д.т.н., Бібік М.В., к.т.н.

Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка,
Україна

Анотація. Наведено результати проведених експериментальних досліджень пластичної роботи вант із прокатних профілів (згинально-жорстких ниток). Описані чисельні дослідження жорстких ниток у пружнопластичній стадії при значному розвитку пластичних деформацій.

Аннотация. Приведены результаты проведенных экспериментальных исследований пластичной работы вантов из прокатных профилей (изгибно-жестких нитей). Описаны численные исследования жестких нитей в упругопластичной стадии при значительном развитии пластических деформаций.

Abstract. In the first part of the article the results of the executed experimental researches of plastic behavior of guys made of rolled sections (bent and rigid tendons) are presented. The second part of the article is devoted to the numerical research of rigid tendons, at the elastically-plastic stage under considerable development of plastic deformations.

Ключові слова: згинально-жорсткі нитки, пластичні деформації, геометрична і конструктивна нелінійність, напружено-деформований стан.

Однією з актуальних проблем будівництва є питання вивчення роботи сталевих конструкцій, матеріал яких знаходиться в області пластичних деформацій. Перерозподіл зусиль внаслідок розвитку пластичних деформацій суттєво підвищує несучу здатність та сприяє більш ефективній роботі конструкції.

Останнім дослідженням пружнопластичної роботи згинально-жорстких ниток (з.ж.н.) присвячені роботи М.Л. Чернова, В.С. Шебаніна [1], Н.О. Чабан, О.В. Шимановського [2]. У цих працях досить широко висвітлені питання щодо роботи геометрично та фізично-нелінійних елементів, але певна кількість важливих задач ще вимагає вирішення. Так, розроблені методики розрахунку з.ж.н. у більшості випадків використовують ідеалізовані діаграми роботи матеріалу, недостатньо вивчено роботу елементів при значному розвитку пластичних деформацій, проблему розвантаження, а також питання конструктивної нелінійності з.ж.н. Тому розробка методики розрахунку, що більш точно описує дійсну роботу з.ж.н. у пружнопластичній стадії, є актуальною задачею.

Експериментальні дослідження. Метою експериментальних досліджень є перевірка характеру напружено-деформованого стану (НДС) вант із прокатних профілів при значному розвитку пластичних деформацій, який було отримано за допомогою розробленої інженерної методики розрахунку [3, 4]. Предметом досліджень є робота з.ж.н. у пластичній, процес переходу від пружної стадії до пластичної, а також поведінка елемента при розвантаженні та величина залишкових зусиль. Одним із завдань експерименту є аналіз впливу на НДС зміни прогону та повороту опорних перерізів з.ж.н.

У якості з.ж.н. розглядалася однопрогонова жорстко затиснута балка швелерного перерізу, завантажена зосередженою силою посередині прогону. Площина дії навантаження збігалася з площиною мінімальної жорсткості швелера. Для випробування були виготовлені стержні з прокатних швелерів № 6, 5 та 8 довжиною 4 м. Механічні характеристики сталі визначалися для кожного швелера шляхом випробування на розтяг коротких пропорційних зразків. У розрахунках отримані діаграми, представлені вузловими точками відповідними парами значень ε і σ (рис. 3–5).

Для випробування експериментальних зразків була розроблена спеціальна дослідна установка, яка дозволяла сприймати значне горизонтальне зусилля (розпір від з.ж.н.). Опорною частиною установки є залізобетонна база 1, на якій змонтовані металеві опорні обойми 2. Експериментальний зразок 3 приварювався до верхніх горизонтальних плит опорних обойм. Загальний вид установки наведено на рис. 1 та 2.

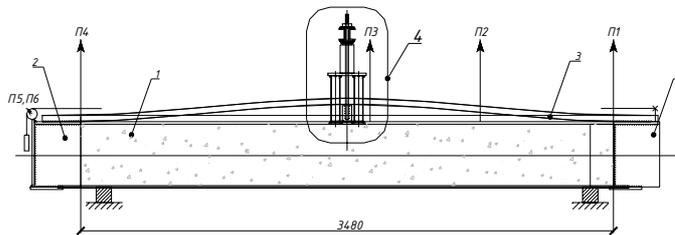


Рис. 1. Принципова схема установки для випробувань

Під час випробувань фіксувалися величина зосередженої сили, прогини в площині згину, зміна довжини елемента, кути повороту опорних перерізів, відносні фіброві деформації перерізів елемента. Фіброві деформації окремих волокон елемента вимірювалися за допомогою петлевих тензодатчиків типу 2ПКБ з базою 20 мм та автоматичного вимірювача деформацій АИД-4.

Навантаження прикладалося в три етапи з повним розвантаженням елемента. Після кожного етапу дослідний зразок отримував залишкові пластичні деформації, величина яких фіксувалася. Навантаження прикладалося ступенями 2 кН.



Рис. 2. Загальний вигляд установки зі зразком у процесі випробування

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3–5. На рис. 3 показано графіки прогинів серединних перерізів. Значення внутрішніх зусиль у пластичній стадії роботи визначалися через відносні деформації за спеціально розробленою комп'ютерною програмою. Отримані значення поздовжніх сил для кожного етапу завантаження представлені на рис. 4 (цифри в дужках біля зусиль N означають відносну координату перерізів по довжині елемента).

Теоретичні криві (пунктирні лінії) отримані в результаті чисельного розрахунку без врахування (крива 1) та з врахуванням зміни прогону (крива 2) і повороту опорних перерізів (крива 3). Для цього в розрахунках на кожному ступені завантаження за отриманими експериментальними даними уточнювалась довжина елемента та величина повороту опорних перерізів. Експериментальні графіки зближення опор та вигину опорних плит наведені на рис. 5.

Аналіз отриманих результатів. Графіки прогинів та зусиль мають нелінійний характер, що свідчить про пластичну роботу елемента, показують етапи завантаження-розвантаження та залишкові значення величин НДС після кожного етапу. За даного співвідношення геометричних параметрів зміна (зменшення) прогону елемента внаслідок податливості (зміщення) опор суттєво впливає на внутрішні зусилля та прогини. При зменшенні прогону лише на 1/500 довжини елемента прогини збільшуються на 20 %, а значення розпору зменшуються на 25 %. Поворот опорного перерізу на 1^0 призводить до збільшення прогинів на 3 % та до зниження розпору на 2 %.

Експериментальні дані підтверджують дані теоретичних розрахунків.

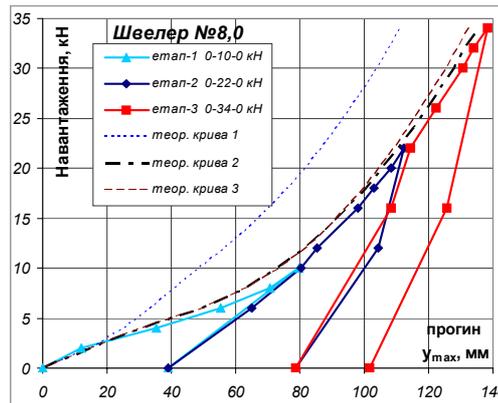


Рис. 3. Прогини швелера № 8,0

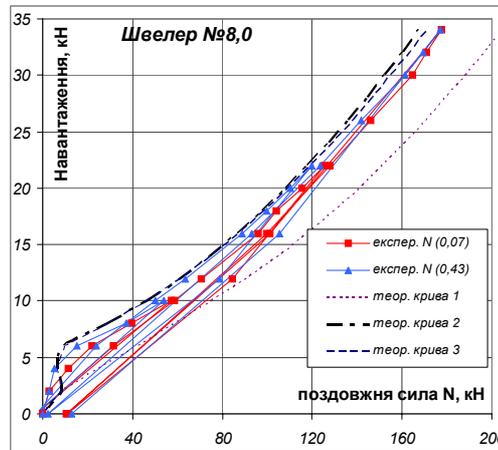


Рис. 4. Поздовжні сили для швелера № 8,0

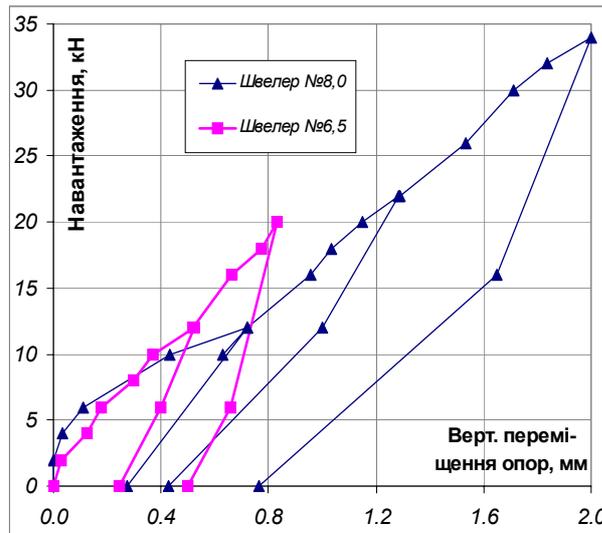


Рис. 5. Графіки зближення опор та вигину опорних плит

Чисельні дослідження проводилися щодо НДС згинально-жорсткої нитки при значному розвитку пластичних деформацій ($\epsilon_{max} > 30 \epsilon_{el}$), процесу переходу в стадію зміцнення матеріалу ниток із різними типами закріплення (шарнірним та жорстким), можливість виникнення текучості від дії поздовжньої сили та впливу цього явища на роботу елемента.

Дослідження проводилися за спеціально розробленою методикою чисельного розрахунку згинально-жорстких ниток [3, 4], яка дозволяє враховувати фізичну, геометричну та конструктивну нелінійність елементів.

Досліджувалися ванті із прокатних профілів з опорами, розташованими на одному рівні, які утворюються зі звичайних вільно обпертих балок шляхом закріплення їх шарнірно чи жорстко на опорах. У ході досліджень вважалося, що значення початкових прогинів та кутів виходу ниток на опорах дорівнюють прогинам та кутам повороту звичайних балок від власної ваги. Досліджувалась дія рівномірно розподіленого по всьому прогону навантаження. Розглядалися 2 типи поперечних перерізів з.ж.н. – двотавровий переріз № 10 та швелерний переріз № 12, зорієнтований в площині найменшої жорсткості. Площа поперечного перерізу приймалася постійною. Для кожного перерізу розглядалися 3 прогони – (1; 1,5; 2) L . В якості базового прогону для першого перерізу було прийнято прогін $L_1 = 12$ м, а для другого – $L_2 = 6$ м. Елементи, що мали один прогін, відрізнялися лише згинальною жорсткістю, початковим прогином та кутом виходу при жорсткому закріпленні, а елементи, що мали однаковий

переріз, – початковим прогином та кутом виходу. В якості матеріалу для всіх елементів обрано маловуглецеву сталь Ст3, а в якості критерію обмеження пластичних деформацій для визначення граничної несучої здатності – досягнення в крайньому волокні найбільш напруженого перерізу величини "граничних" відносних деформацій

$$\varepsilon_{lim} = 40 \cdot 10^{-3} \approx 0,25 \varepsilon_u \approx 35 \varepsilon_{el} \approx 1,35 \varepsilon_y'',$$

де ε_{el} – пружна деформація; ε_y'' – деформація кінця площадки текучості; ε_u – деформація межі міцності.

Для порівняння отриманих результатів прийняті наступні відносні одиниці:

$$\eta = p / p_{lim}; \quad \xi = x / L; \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_{el},$$

де p – величина додаткового навантаження, кН/м; p_{lim} – додаткове навантаження, що викликає "граничну" деформацію ε_{lim} , кН/м; ξ – відносна координата.

Результати розрахунків елемента із швелера № 12 ($L = 9$ м) для різних типів закріплення наведені на рис. 6–7. Епюри поздовжніх сил та відносних деформацій побудовані на половині прогону у координатах $\xi \in [0, 0; 0, 5]$ для навантажень $\eta = 0, 0; 0, 25; 0, 50; 0, 75$ та $1, 0$. Також наведені графіки розподілення напружень по висоті та довжині елемента.

Аналіз одержаних результатів. Для шарнірних з.ж.н. процес переходу в стадію зміцнення відбувається з виникненням поблизу опор елемента фронту пластичної течії (текучості від дії поздовжньої сили) із наступним його просуванням всередину прогону при збільшенні додаткового навантаження. Це явище добре видно на графіках $\varepsilon_N - \xi$ та $\sigma = f(\ell, h)$.

У перерізі, де відбувається текучість від дії поздовжньої сили, тобто де $N = \sigma_y \cdot A$, значення моменту падає до нуля, а на епюрі $\varepsilon_N - \xi$ відбувається збільшення деформацій на величину $(\Delta\varepsilon_y - kh)$, де $\Delta\varepsilon_y = \varepsilon_y' - \varepsilon_y''$ – довжина площадки текучості; k, h – кривина та висота перерізу.

Порівнюючи між собою графіки $\sigma = f(\ell, h)$ для обох варіантів закріплення опор, слід відзначити, що елемент із шарнірними опорами більш раціонально сприймає навантаження внаслідок ефективного перерозподілу напружень по своїй довжині та висоті. При навантаженнях $\eta > 0, 5$ пластичні деформації охоплюють майже весь об'єм з.ж.н. із шарнірними опорами, тоді як з.ж.н. із жорсткими опорами має лише незначні локальні,

розташовані поблизу опор та всередині прогону, пластичні зони, коли більша частина елемента має напруження, значно менші за $\sigma_y = 240 \text{ МПа}$. Те саме відбувається і при "граничному" навантаженні $\eta = 1,0$.

Порівнюючи між собою абсолютні значення "граничних" навантажень для шарнірно та жорстко закріплених з.ж.н., слід зазначити, що при шарнірному закріпленні вони в 3–4 рази більші. Це свідчить про те, що шарнірне закріплення кінців з.ж.н. (жорсткої нитки) дозволяє використати його матеріал більш раціонально. Текучість від дії поздовжньої сили суттєво знижує вплив згинального моменту на величину сумарних напружень, робить жорстку нитку майже гнучкою та суттєво збільшує інтенсивність росту прогинів елемента. Цей стан можна рекомендувати як критерій для обмеження розвитку пластичних деформацій в розрахунках конструкцій, для яких суттєвим є обмеження прогинів.

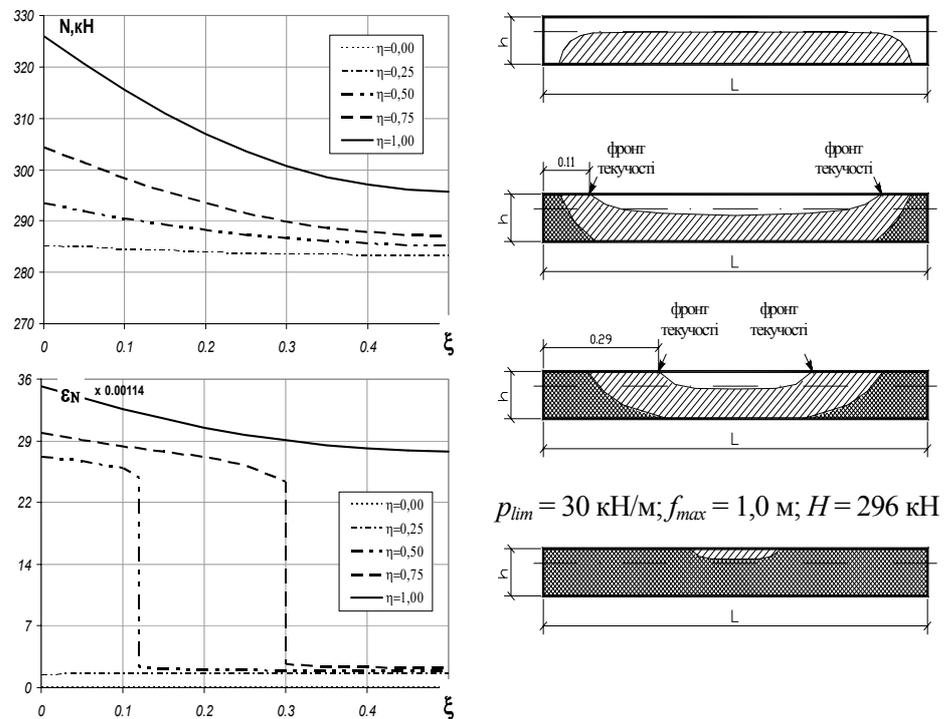


Рис. 6. Епюри поздовжніх сил, відносних деформацій та зони пластичності по довжині для з.ж.н. перерізом $\square 12$ прогоном 9 м при шарнірному закріпленні опор

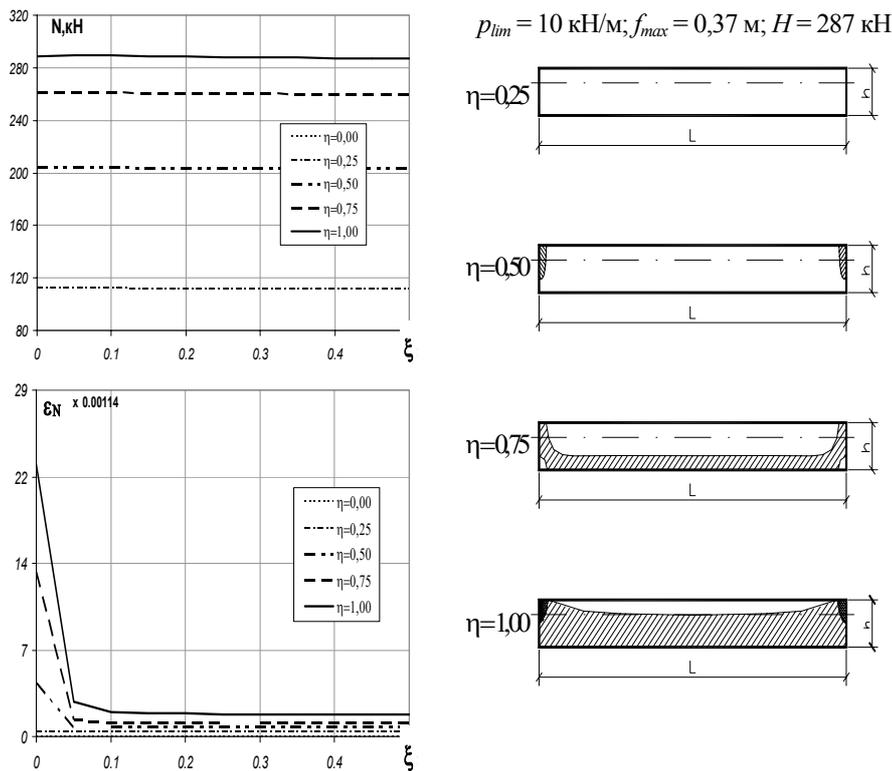


Рис. 7. Епюри поздовжніх сил, відносних деформацій та зони пластичності по довжині для з.ж.н. перерізом $\square 12$ прогоном 9 м при жорсткому закріпленні опор

Висновки

1. Експериментально досліджено роботу з.ж.н. у пружнопластичній стадії, отримано експериментальні дані щодо напружено-деформованого стану елемента з урахуванням зближення та повороту його опорних перерізів. Зменшення прогону внаслідок зміщення опор елемента суттєво впливає на внутрішні зусилля та прогини.
2. Співставлення експериментальних даних із даними теоретичних розрахунків дає підстави стверджувати, що розроблена методика чисельного дослідження достатньо добре описує дійсну роботу згинально-жорсткої нитки в пружнопластичній стадії.

3. Чисельно досліджено міцність та деформативність з.ж.н. із низько-вуглецевої сталі Ст3 у пружнопластичній стадії ($\varepsilon_{max} < 10 \varepsilon_{el}$) та при значному розвитку пластичних деформацій ($\varepsilon_{max} > 30 \varepsilon_{el}$).

4. Перехід із пружнопластичної стадії до стадії зміцнення для шарнірно та жорстко закріплених з.ж.н. відбувається по-різному. Для шарнірно закріплених ниток процес переходу в стадію зміцнення відбувається з виникненням поблизу опор елемента фронту пластичної течії (текучості від дії поздовжньої сили). Це явище суттєво знижує вплив згинального моменту на величину сумарних напружень, робить жорстку нитку майже гнучкою та вдвічі збільшує інтенсивність росту прогинів елемента. Появу текучості від дії поздовжньої сили рекомендується вважати критерієм для обмеження розвитку пластичних деформацій.

5. Вузли кріплення з.ж.н., що працюють у пластичній стадії, а матеріал яких має видовжену площадку текучості на діаграмі роботи, рекомендується виконувати шарнірними. Встановлено, що при розвитку пластичних деформацій ($\varepsilon_{max} > 15 \varepsilon_{el}$) в елементі з шарнірними опорами об'єм матеріалу використовується раціональніше, а пластичні деформації за його висотою та довжиною розповсюджуються більш рівномірно, ніж в елементі з жорсткими опорами, де пластичні деформації (деформації зміцнення) охоплюють лише припорні ділянки, тобто шарнірне закріплення робить жорстку нитку більш рівномірною в пластичній стадії.

Література

- [1] *Шебанін В.С., Хілько І.І.* Теоретико-експериментальне дослідження величини прогинів бісталевих стержнів при складному опорі за межею пружності. // Вісник ДонДАБА. Сер. "Будівельні конструкції, будівлі та споруди". Т. 2. – 2003. – С. 175–179.
- [2] *Шимановський О.В., Чабан Н.О.* Пружнопластичний розрахунок несучих елементів висячих систем підвищеної жорсткості при довільних навантаженнях. // Будівництво України. – 2003. – № 5. – С. 16–17.
- [3] *Пічугін С.Ф., Бібік М.В.* Чисельний розрахунок розтягнуто-зігнутих сталевих елементів у пружнопластичній стадії. // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: Зб. наук. праць. – Одеса. – 2003. – С. 196–200.
- [4] *Пічугін С.Ф., Бібік М.В.* Розрахунок сталевих елементів покриття із залишковими прогинами. // Будівництво та техногенна безпека. Зб. наук. праць. – Вип. № 6. – Сімферополь. – 2002. – С. 188–190.

Надійшла до редколегії 24.07.2008 р.