

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОВАЛІЗАЦІЇ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ ЗГИН ТРУБ

© Білобран Б.С., Мельник Н.Б., 2006

Наведено результати експериментальних досліджень чистого згину труб діаметром 57 мм за границею пружності. За результатами їхнього порівняння з розрахунковими даними, одержаними на підставі деформаційної теорії пластичності і теорії циліндричних оболонок, розбіжність не перевищує 10 %.

The results of experimental researches of pure elasto-plastic bending with 57 mm in diameter are presented. Their comparison with calculating data get on the basis of the deformational theory of plasticity and theory of cylindrical shells are made. The discrepancy does not exceed 10 %.

Постановка задачі та аналіз відомих досліджень. Пластичний згин труб застосовують у технологічних процесах з виготовлення криволінійних елементів трубопроводів різноманітного призначення. Під час розроблення технології гнуття труб та конструювання відповідної оснастки [1] виникають задачі, пов'язані з визначенням овальності поперечного перерізу, величини згинального моменту та параметрів відпружинення залежно від заданого радіуса кривини, правильність розв'язання яких істотно може вплинути на розміри виготовленої деталі. Тому теоретичні й експериментальні дослідження питань пластичного згину труб стосовно розробки технологічних процесів гнуття мають важливе практичне значення.

Задачі пружно-пластичного згину тонкостінних труб у межах деформаційної теорії пластичності розглядалися у роботах [2–4, 6].

Стаття є продовженням робіт [5, 6] і містить результати експериментальних досліджень впливу ефекту сплюснення на основні параметри пластичного згину труб та їхнього порівняння з розрахунковими даними, одержаними у роботі [6].

Методика експериментальних досліджень. Труби випробовували за схемою чистого згину на універсальній гідравлічній машині УИМ-50м, дообладнаної спеціальним роликівим пристроєм (рис. 1).

Поздовжні деформації вимірювали механічними індикаторними тензографами з базою 25 мм і ціною поділки шкали 0.002 мм. Тензографи прикріплювали до труби попарно на діаметрально протилежних твірних за допомогою пружинного хомутика. Таке кріплення давало змогу надійно притискувати призми тензографів навіть за значної овалізації поперечного перерізу труби.

Одночасно з визначенням деформацій, розташованих у площині згину крайніх волокон, вимірювали радіальні переміщення чотирьох характерних точок зовнішнього контуру поперечного перерізу труби. З цією метою використовували індикаторний прилад, який встановлювали поряд з тензографами з таким розрахунком, щоб одна з його осей збігалася з площиною згину. Розміщення встановлених на трубі приладів видно з рис. 1.

Для дослідів використовували сталеві безшовні та зварні з поздовжнім швом труб із зовнішнім діаметром 57 мм і товщиною стінки 3, 3,5 мм. З метою зменшення товщини стінки окремі зразки труб обточували ззовні, що давало змогу розширити під час досліджень діапазон відносної товщини стінки. Загальна довжина зразків дорівнювала 1300–1500 мм, довжина випробувальної ділянки на чистий згин – 450 мм, а довжина досліджуваної частини, де велись вимірювання, – 60–80 мм.

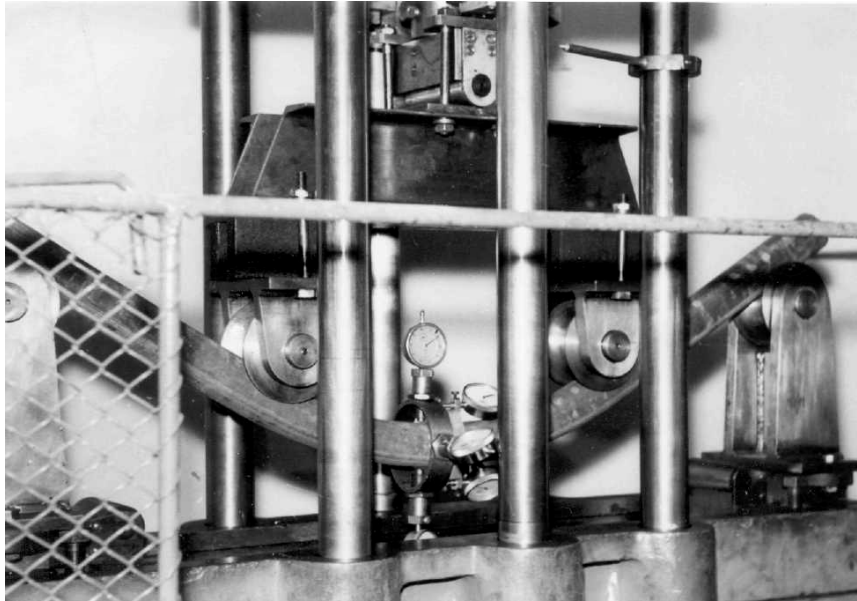


Рис. 1. Загальний вигляд пристрою для чистого згину труб на випробувальній машині УИМ-50 м

Згідно з роботою [7] працюючи на чистий згин ділянку зразка можна віднести до “довгих” труб, для яких параметр довжини $L^0 = 8l^2h/r^3 \geq 100$. Для випробовуваних нами труб параметр $L^0 > 200$. Тому можна вважати, що розташована посередині вказаної ділянки досліджувана частина знаходилася за межами впливу способу закріплення та навантаження цієї ділянки на кінцях.

Основні механічні характеристики матеріалу труб визначали з діаграми розтягу, отриманої під час випробування зразків сегментного поперечного перерізу шириною 20 мм, які вирізали з кожної труби-заготовки у поздовжньому напрямі механічним способом зі збереженням товщини. Поздовжні деформації вимірювали також механічними індикаторними тензометрами з базою 25 мм, які закріплювали посередині робочої довжини зразка на бокових паралельних поверхнях. Видовження за тензометрами реєстрували до деформацій, що приблизно дорівнювали 3–4 %. За отриманими результатами будували дійсну діаграму напружень, яку описували трьома залежностями: рівняннями прямої у межах пружності і в межах площадки текучості та степеневі функції у зоні зміцнення (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики зразків труб (ε_T^* – деформація, що відповідає кінцю площадки текучості)

| № з/п | Розміри труби, мм | σ_T МПа | ε_T^* | m | Примітка |
|-------|----------------------|-------------------|-------------------|-------|----------|
| 1 | 57×3.0 | 430 | – | 0.065 | Зварна |
| 2 | 57×3.5 | 370 | 0.0145 | 0.197 | Безшовна |

Для порівняння було випробувано також відрізки труб на стиск висотою $H = (2.5 \div 3)D_{зов}$. Під час цих випробувань з метою зменшення впливу на напружений стан сил тертя між плитами машини і торцями труби-зразка використано свинцеві підкладки.

Порівняння експериментальних і теоретичних даних для стиснутого зразка труби розмірами 57×3.5 мм наведено у табл. 2. Теоретичні значення напружень у зоні зміцнення обчислювали за степеневі функцією, параметри якої встановлено за результатами випробування сегментних зразків на розтяг (табл. 1).

Порівняння дослідних даних з розрахунковими для стискуваного зразка труби 57×3.5 мм

| $\varepsilon \cdot 10^4$ | | 018 | 150 | 204 | 247 | 286 | 346 | 387 | 430 | 470 |
|--------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| σ , МПа | Досл. | 382 | 384 | 406 | 426 | 439 | 453 | 464 | 471 | 475 |
| | Розр. | 370 | 370 | 396 | 410 | 423 | 439 | 449 | 458 | 466 |

Аналіз наведених в таблицях результатів показує, що степенева функція з достатньою для інженерних розрахунків точністю описує зону зміцнення сталевих труб.

Результати порівняння відповідних експериментальних даних під час розтягу і стиску підтвердили правомірність застосування для дослідження пластичного згину труб із вуглецевих сталей “єдиної” кривої деформування, зокрема і для труб у стані поставки, які одержали істотний наклеп у процесі виготовлення. Результати випробування зразків труб на розтяг і на стиск також показали, що значення модулів пружності під час навантаження і розвантаження відрізняються неістотно.

Дослідження пружно-пластичного деформування під час чистого згину виконували, навантажуючи зразки ступенями з подальшим повним розвантаженням на кожному ступені. Декілька зразків згинали до кінцевого значення кривини безперервним навантаженням.

Безрозмірну кривину поздовжньої осі труби знаходили відповідно до гіпотези плоских перерізів за формулою

$$\tilde{\kappa}_z = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_c}{D_{\min}} r = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_c}{2 - \tilde{w}_p - \tilde{w}_c + \tilde{h}}, \quad (1)$$

де D_{\min} – мала вісь середнього контуру сплюснутого поперечного перерізу труби, ε_p , ε_c – поздовжні деформації розтягу і стиску крайніх волокон, розміщених в площині згину; \tilde{w}_p , \tilde{w}_c – відносні радіальні переміщення (віднесені до середнього радіуса r) відповідних крайніх точок; $\tilde{h} = h/r$ – відносна товщина стінки.

Поряд з вивченням залежності між поздовжніми деформаціями і кривиною особливу увагу приділяли дослідженню характеру сплющування (овалізації) поперечного перерізу труби. Для цього використовували покази індикаторного приладу, що вимірював радіальні переміщення чотирьох точок зовнішньої поверхні труби: двох точок, розміщених в площині згину, і двох – на діаметрі, перпендикулярному до цієї площини.

Обговорення результатів. Результати вимірювань свідчать, що сплюснутий пластичним згином поперечний переріз труби має тільки одну вісь симетрії, яка збігається з площиною згину. Сплюснуту середню лінію поперечного перерізу відносно центральної осі, перпендикулярної до площини згину, можна умовно розділити на два півовали з однаковою великою віссю. Мала піввісь півовалу розтягнутої в поздовжньому напрямку зони завжди менша від півосі півовалу стиснутої в цьому напрямку зони.

Результати радіальних переміщень контуру поперечного перерізу труби також свідчать, що спричинене явищем сплющування зменшення діаметра, розташованого в площині згину (D_{\min}), завжди випереджує збільшення діаметра, перпендикулярного до цієї площини (D_{\max}). Так, наприклад, під час згину труби розміром 57×3 мм до відносної кривини $\tilde{\kappa}_z = 0.0417$ діаметр D_{\min} зменшився на 10.6 %, а діаметр D_{\max} збільшився лише на 7.9 %.

На рис. 3 зображено залежності відносного згинального моменту $\bar{M} = M/4\sigma_T r^2 h$ та овальності поперечного перерізу θ від параметра кривини $\bar{\kappa}_z$ для безшовної труби.

Суцільні лінії побудовано згідно з роботою [6]. Результати експериментів нанесено у вигляді хрестиків і точок. Хрестики відповідають значенням згинального моменту, а точки – зміні овальності.

Зіставленням доходимо висновку, що теоретичні криві добре узгоджується з експериментом на всьому проміжку кривини від 0 аж до $\tilde{K}_{кр}$ – кривини, за якої настає втрата несучої здатності під час згину труби (втрата стійкості типу Браз'є).

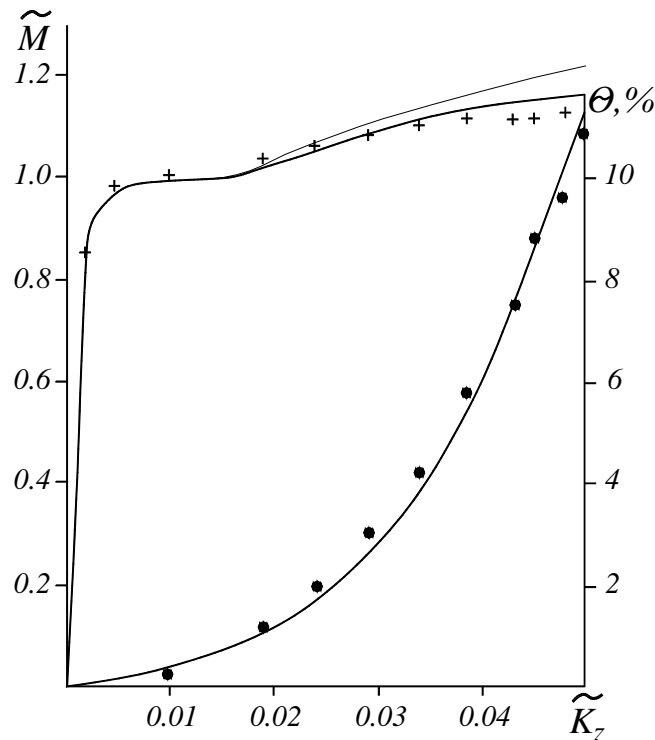


Рис. 2. Порівняння результатів теорії [6] (суцільні лінії) з дослідними даними (точки) при чистому згині труби (57x3.5мм)

Для безшовної труби, обточеної до товщини стінки 2.75 мм із заготовки № 2 (табл. 1) теоретичне і експериментальне значення параметра критичної кривини $\tilde{K}_{кр}$ відповідно дорівнюють 0.0405 і 0.039.

Розрахункова критична кривина більша від експериментальної на 3.8%. Зазначимо, що під час випробувань необточених труб цього типу, згинаючи їх до параметра кривизни $\tilde{K}_z = 0.05$, втрати несучої здатності не спостерігали. Достатньо добре корелюють між собою теоретичні та дослідні дані також для овальності.

Розбіжність між розрахунковими значеннями згинальних моментів за спрощеною методикою, що не враховує ефекту сплющування (рис. 3, верхня тонка лінія) і експериментальними даними залежить від величини овальності поперечного перерізу і зі збільшенням кривини зростає.

Результати досліджень свідчать, що для розв'язування практичних задач, пов'язаних з визначенням згинального моменту і відповідно характеристики жорсткості під час згину тонкостінних труб, для яких спричинена згином овальність поперечного перерізу не перевищує 8..10 %, ефект сплющування можна не враховувати.

Теоретичні криві зміни кривини поздовжньої осі у разі повного розвантаження порівняно з дослідними даними на рис. 4. Експериментальні точки нанесено за результатами вимірювання поздовжніх деформацій крайніх волокон на кожному ступені після навантаження і повного

розвантаження. Теоретичні залежності побудовано на підставі закону про розвантаження [8] згідно з [6] з урахуванням сплющування (суцільна лінія) та без його урахування (штрихова лінія).

Як видно з рис. 4, обидві теоретичні криві відпружинення добре узгоджуються з експериментальними даними для всього інтервалу відносної кривини \tilde{K}_z , хоча з її збільшенням зростає овальність, яка для розрахунків, за результатами яких побудовано штрихову лінію, не враховувалася.

Пояснюється це тим, що обумовлена згином овальність одночасно зі зменшенням згинального моменту M також зменшує момент інерції поперечного перерізу зігнутої труби відносно нейтральної осі I_x і тому відношення M/I_x , від якого здебільшого залежить зміна кривини за розвантаження, змінюється неістотно. Результати досліджень свідчать, що у межах точності до 5% за розрахунків параметрів відпружинення труб, овальність яких під час згину не перевищує 12...15%, можна застосовувати простіші формули, одержані без урахування явища сплющування.

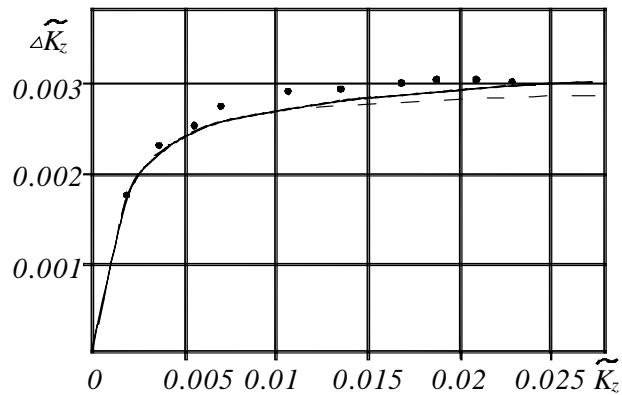


Рис. 3. Діаграми відпружинення зварної труби 57×3мм

Висновки. 1. Встановлено, що овалізований пластичним згином поперечний переріз труби має тільки одну вісь симетрії, яка збігається з площиною згину. Мала піввісь півовалу розтягнутої у поздовжньому напрямку зони завжди менша від півосі півовалу стиснутої у цьому напрямку зони.

2. Математична модель, побудована на деформаційній теорії пластичності та напівбезмоментній теорії циліндричних оболонок [6], задовільно узгоджується з експериментом на всьому проміжку кривини від 0 до $K_{z,кр}$ – кривини, за якої вичерпується несуча здатність труби під час згину.

3. Під час інженерних розрахунків параметрів пластичного згину труб, для яких спричинена згином овальність поперечного перерізу не перевищує 10%, ефект сплющування можна не враховувати.

1. Гальперин А.И. *Машины и оборудование для гнутья труб*. – М.: Машиностроение, 1967. – 180 с. 2. Афендик Л.Г. *Изгиб тонкостенных труб за пределом упругости с немалой кривизной* // *Прикладная механика*. – 1968. – Т. IV, вып. 6. – С. 45–51; С. 135–141. 3. Білобран Б.С. *Сплющивание тонкостенных труб при свободном пластическом изгибе* // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1968. – № 7. – С. 20–23. 4. Білобран Б.С. *Влияние сплющивания на основные параметры свободного пластического изгиба тонкостенных труб* // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1969. – № 6. – С. 18–20. 5. Білобран Б.С. *Экспериментальные исследования чистого изгиба труб за пределом упругости* // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 1984. – № 4. – С. 3–6. 6. Білобран Б.С., Мельник Н.Б. *Вплив сплющування на несуча здатність тонкостінних труб під тиском при згині з розтягом (стиском)* // *Машинознавство*. – 2002. – № 5. – С. 17–21. 7. Аксельрад Э.Л., Ильин В.П. *Расчет трубопроводов*. – М: Машиностроение, 1972. – 240 с. 8. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.