

Бобух О. С.
Вовк А. С.
Кузьміна О. М.
Андрєєв А. А.
Фролов Я. В.
Самсоненко А. А.

ВИПРОБУВАННЯ КІЛЬЦЕВИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГУВАННЯ

Оцінка рівня механічних властивостей металевих виробів є одним з актуальних та важливих завдань у машинобудуванні. Міцність конструкцій, вага виробу та їх вартість залежать, зокрема, й від значень характеристик цих властивостей. Основні параметри механічних властивостей отримують статичними випробуваннями на стискання, розтягування, вигин або крутіння стандартних зразків, а також динамічними (ударними) випробуваннями.

Усі ці типи випробувань також використовуються в тій чи іншій формі для визначення механічних властивостей та експлуатаційних характеристик труб, та можуть бути розділені на дві групи:

1. Методи випробувань для визначення якісних характеристик властивостей труб (згинання, розширення штифтів, фланцювання, плющення, випробування на гідростатичний тиск), які можна назвати технологічними випробуваннями.

Ці випробування використовуються для оцінки здатності труби витримувати певні навантаження без розтріскування.

2. Методи випробувань для кількісного вимірювання механічних властивостей труби (випробування на розтягування стандартних зразків, вирізаних зі стінки труби, кільцевих зразків тощо).

Серед вищезазначених методів тест на гідростатичний тиск є найвідповіднішим до сучасних умов використання труб, проте цей спосіб є дорогим і не підходить для швидкої оцінки властивостей труби. Випробування ж на розтягування із використанням як поздовжніх, так і поперечних зразків найчастіше застосовують для визначення механічних властивостей за допомогою кількісних характеристик, таких як межа плинності, межа міцності та відносне подовження (рис. 1).

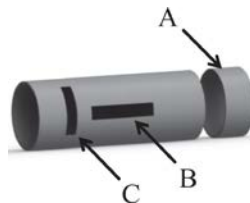


Рис. 1. Схематична ілюстрація відбору зразків труб для випробувань на розтягування:

А – випробувана секція труби вздовж осі (поздовжній напрямок), В – зразок зі стінки труби (поздовжній напрямок), С – зразок зі стінки труби (поперечний напрямок)

Ділянки і зразки труб для випробування на розтягування, вирізані в поздовжньому напрямку (див. рис. 1, зразки А і В), накладають багато обмежень на випробування. Під час таких випробувань сили діють на трубу у поздовжньому напрямку (паралельно осі труби). Однак, як добре відомо, під час використання труба зазнає найбільших навантажень у радіальному та тангенціальному напрямках. Крім того, під час виготовлення труб (особливо холодною прокаткою) процес деформації викликає значну анізотропію в металі, яка часто не може бути повністю усунена термічною обробкою. До того ж не враховується вплив прорізів та інших дефектів, які, як правило, розташовані вздовж осі труби та мають вирішальний вплив на міцність труби під час її використання.

Використання випробувань на розтягування стандартних зразків, вирізаних у поперечному напрямку (див. рис. 1, зразок В), обмежено номінальними розмірами труб (діаметром та товщиною стінки). З одного боку, складно отримати стандартний зразок для труб з товщиною стінки нижче 4 мм через малу товщину стінки труби [1]. З іншого боку, випробування труб із малим діаметром проблематичні через велику кривизну контуру труби [2]. Таким чином, випробування на розтягування в даний час застосовуються для вирізаних з труби кільцевих зразків. Наразі ряд випробувань, показаних дослідниками Arsene і Bai [3] та Link із співавторами [4], та визначених двома стандартами – ДСТУ 2528-94 [5] та EN ISO 8496-2002 [6] – описують процедури досліджень. Також відомі різні варіанти реалізації методів обох стандартів, які застосовують розтягування для суцільних кільцевих зразків, вирізаних з труб. Моделювання випробувань на розтягування кільцевих зразків було виконано колегами з Ченстоховської Політехніки за допомогою програми FORGE 3D [7]. Схеми випробувань та криві в осях напруження-деформації зображені на рис. 2.

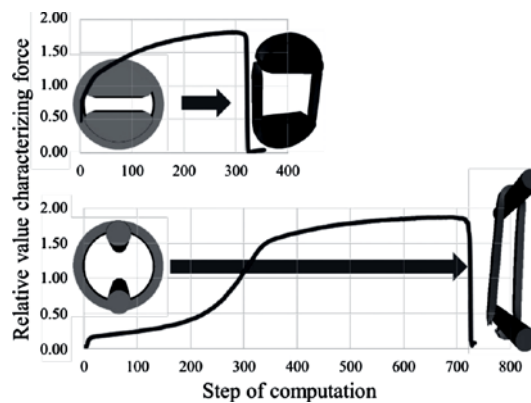


Рис. 2. Схематична ілюстрація випробувань на розтягування кільцевого зразка відповідно до умов ДСТУ 2528-94 (верхня схема) та EN ISO 8496-2002 (нижня схема)

Метод, описаний у стандарті ISO 8496 [6], передбачає використання двох циліндричних оправок при випробуваннях на розтягування для кільцевих зразків з внутрішнім діаметром більше 100 мм та зовнішнім діаметром більше 150 мм. Ширина зразка повинна дорівнювати 15 мм, а якщо товщина стінки більше 15 мм — дорівнювати їй. Таке співвідношення розмірів зразка не дозволяє передбачити місце розриву під час випробування. Таким чином, отримані результати проблематично перетворити на кількісні характеристики механічних властивостей.

Для випробування зразків згідно з ДСТУ 2528-94 [5] використовуються дві напівциліндричні оправки, зовнішній діаметр яких у закритому стані дорівнює внутрішньому діаметру досліджуваного зразка.

Ширина зразка обчислюється за рівнянням (1):

$$b = 4,83 \cdot 10^{-3} \cdot D_0 / s, \quad (1)$$

де b – ширина зразка, мм; D_0 – внутрішній діаметр труби, мм; s – товщина стінки труби, мм.

У цьому випадку товщина стінки зразка завжди менше його ширини. Це забезпечує довільний розрив зразка в одній з двох опорних секцій, розташованих у площині роз'єму напівциліндричних оправок. Перерахунок отриманих значень сили в межу міцності здійснюється за рівнянням (2):

$$R_m = F_m / S_0, \quad (2)$$

де R_m – межа міцності, МПа; F_m – максимальна сила, МН; S_0 – початкова площа перерізу двох опор, розташованих у площині роз’єму напівциліндричних оправок, мм², що розраховується за такою формулою:

$$S_0 = s_1 \cdot b_1 + s_2 \cdot b_2, \quad (3)$$

де s_1 та s_2 – товщина стінки зразка у перерізах двох протилежних опор, розташованих у площині роз’єму напівциліндричних оправок, мм; b_1 та b_2 – ширина зразка у тих же перерізах, мм.

Для визначення межі плинності у рівнянні (2) замість F_m підставляється сила, що відповідає конкретній залишковій деформації зразка (наприклад, деформації, що дорівнює 0,2 % від розрахункової довжини робочої частини зразка).

Використання суми площ поперечного перерізу двох протилежних опорних ділянок в якості початкової області в рівнянні (2) знижує рівень точності визначення напруження пружності та міцності, хоча спочатку в обох перерізах виникають як пружні, так і пластичні деформації. Однак після того, як деформація локалізується в одному перерізі, подальше збільшення навантаження призводить до деформації лише однієї опорної секції. Таким чином, значення напруження тим самим занижуються.

Частково це підтверджується кількісними розбіжностями показників механічних властивостей, які були отримані для однієї і тієї ж труби за випробуваннями на розтягування з використанням стандартних зразків (вирізаних у поздовжньому напрямку) та кільцевих зразків [8]. Результати цих випробувань наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань на розтягування кільцевих та стандартних зразків

Т, °С	Величини, які характеризують довговічність та пластичність	Кільцевий зразок	Стандартний зразок
20	$R_{p0.2}$, МПа	402,0	451,0
	R_m , МПа	637,0	745,0
	A, %	28,0	53,0

Відповідно до результатів (табл. 1) межа міцності та плинності для кільцевих зразків приблизно на 12–15 % менша від таких самих величин для стандартних зразків. Відносне подовження кільцевих зразків – приблизно половина значення такої ж величини для стандартних зразків.

З огляду на результати, наведені вище, а також отримані Ковальовим та ін. [9], дане дослідження мало за мету розробку методу випробування на розтягування, а також пристрою для отримання кількісних значень механічних властивостей труб по осі, нормальній до напрямку деформації (схема, характерна для процесів прокатки, екструзії, волочіння тощо).

Відповідно до мети дослідження було запропоновано використовувати модифікований кільцевий зразок, що має концентратор напруження, – для виявлення пластичної деформації лише в одній секції кільця під час випробування на розтягування.

Підготовка випробування.

Для модифікованого випробування на розтягування кільцевих зразків було розроблено інструмент, що має дві змінні напівциліндричні оправки (див. рис. 3).

Розроблений інструмент забезпечує такі переваги.

1. Пристрій складається з двох симетричних частин. Це робить пристрій більш надійним, ніж існуючі аналоги.

2. Застосування змінних оправок дозволяє протестувати широкий діапазон розмірів труб за допомогою одного пристрою.

3. Здатність оправок обертатися всередині заготовки дозволяє силам тертя, що виникають при контакті інструменту та зразка під час випробування, врівноважуватись.

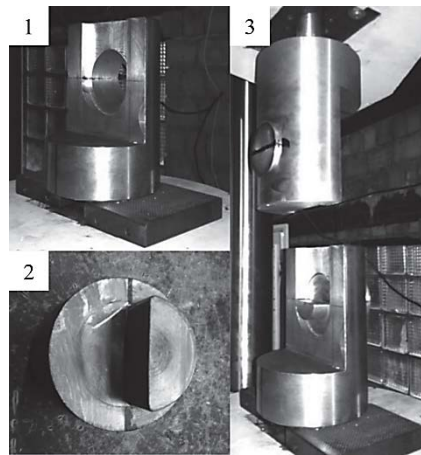


Рис. 3. Модифікований інструмент для випробувань на розтягування кільцевих зразків:
1 – напівоболонка, 2 – напівциліндрична оправка, 3 – зібраний пристрій

Відомо кілька типових форм кільцевих зразків з концентраторами напруження (див. рис. 4).

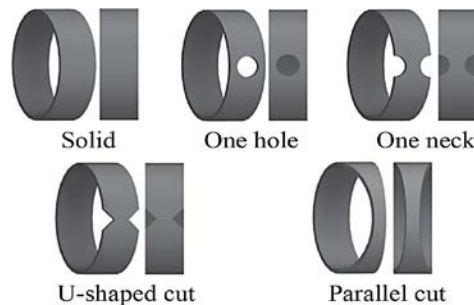


Рис. 4. Типові форми концентратора напруження в кільцевих зразках

Під час першого етапу досліджень було прийнято рішення використовувати кільцеві зразки із просвердленим отвором. Вибір цього типу концентраторів пов'язаний із порівняльною простотою його реалізації. Кільцеві зразки з концентратором напруження розташовані таким чином, що площина концентратора паралельна осі навантаження.

Для визначення необхідного мінімального розміру концентратора (діаметра отвору), який забезпечує пластичну деформацію лише однієї із навантажених опорних секцій, були проведені тести на розтягування з використанням кільцевих зразків з різним діаметром концентратора. Схематичне зображення зразка, що має концентратор напруження, наведено на рис. 5.

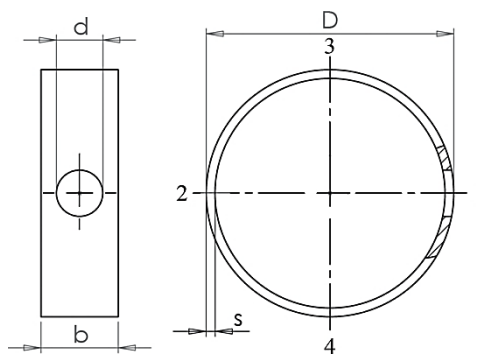


Рис. 5. Кільцевий зразок з концентратором напружень для випробування на розтягування:

D – зовнішній діаметр зразка, мм; s – товщина стінки зразка, мм; b – ширина зразка, мм; d – діаметр концентратора, мм; 1 – 4 – секція, в якій вимірювали b і s перед випробуванням, 2 – 4 – секція, в якій вимірювали b і s після випробування

Основні параметри випробувань представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні параметри випробувань на розтягування зразків, сталі 1.4401 та 1.0580

Параметри	Характеристики	
	Випробування 1	Випробування 2
Тип машини для випробування на розтягування	FP 100, Heckert	Zwick Z250, Zwick
Швидкість переміщення пристрою захоплення, мм/хв	2,0	2,0
Температура, °С	20,0	20,0
Номінальні розміри зразка, мм	D = 48,0; s = 1,7; b = 15,0	D = 45,0; s = 1,5; b = 18,0
Номінальний діаметр концентратора напруження, мм	3,0; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,3; 11,0; 12,0	3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0
Кількість зразків з однаковим номінальним розміром концентратора	3	3
Матеріал зразка	Сталь 1.4401 (EN 10027)	Сталь 1.0580 (EN 10297 - 1)
Номінальні механічні властивості матеріалу: межа міцності, МПа; межа плинності, МПа; відносне подовження, % [10]	R _m = 515,0; R _{p0.2} = 205,0; A = 35,0	R _m = 490,0 – 630,0; R _{p0.2} = 355,0; A = 22,0

Фактор, що характеризує фактичне співвідношення розмірів поперечного перерізу опорних секцій 1 та 2 (див. рис. 5) до випробування, розраховується за формулою:

$$n = S_{02} / S_{01}, \quad (4)$$

де n – коефіцієнт, що характеризує співвідношення розмірів секцій 1 і 2 перед випробуванням; S_{02} – площа зразка в перерізі 2 до випробування, мм²; S_{01} – площа зразка в поперечному перерізі 1 до випробування, мм².

Значення S_{02} отримуємо за виразом:

$$S_{02} = S_{01} \cdot b_{02}, \quad (5)$$

де S_{02} – фактична товщина стінки зразка в секції 2 перед випробуванням, мм; b_{02} – фактична ширина зразка в секції 2 перед випробуванням, мм.

Значення S_{01} розраховується наступним чином:

$$S_{01} = s_{01} \cdot (b_{02} - d_{01}), \quad (6)$$

де s_{01} – фактична товщина стінки зразка в секції 1 до випробування, мм; b_{01} – фактична ширина зразка в секції 1 до випробування, мм; d_{01} – фактичний діаметр концентратора в секції 1 до випробування, мм.

Для характеристики потоншення стінки без концентратора під час випробувань, до і після них вводимо коефіцієнт k , який показує співвідношення між областями в перерізі 2:

$$k = S_{02} / S_{12}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт, що характеризує потоншення секції 2 під час випробування, S_{12} – площа зразка в перерізі 2 після випробування, мм^2 , яка розраховується за формулою:

$$S_{12} = s_{12} \cdot b_{12}, \quad (8)$$

де S_{12} – фактична товщина стінки зразка в секції 2 після випробування, мм ; b_{12} – фактична ширина зразка в секції 2 після випробування, мм .

Використання відносних значень для характеристики розмірів зразків до і після випробування дозволяє врахувати неточності під час підготовки зразка та відхилення товщини стінки труби (як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку).

Результати дослідження

Зображення зразків зі сталі 1.4401 [10] до і після випробувань представлені на рис. 6.

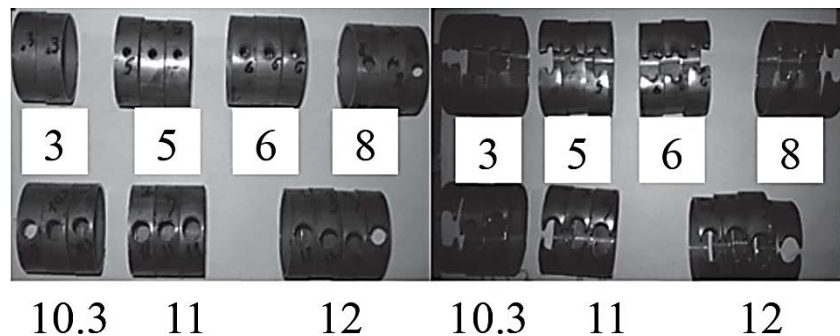


Рис. 6. Кільцеві зразки зі сталі 1.4401 до і після випробувань; цифри вказують на номінальний діаметр концентратора напружень

Зображення кільцевих зразків зі сталі 1.0580 [10] до і після випробувань представлені на рис. 7.



Рис. 7. Кільцеві зразки зі сталі 1.0580 до і після випробувань

Первісний аналіз результатів випробувань на вимірювання геометричних розмірів не виявив геометричних змін у секторах 3 та 4 усіх зразків. Таким чином, далі порівнюватимуться лише поперечні перерізи 1 і 2.

Для порівняння характеристик кривих сила-переміщення на рис. 8 показано три графіка для зразків зі сталі 1.4401, що мають номінальний діаметр концентратора напружень 3 мм , 8 мм та 12 мм відповідно.

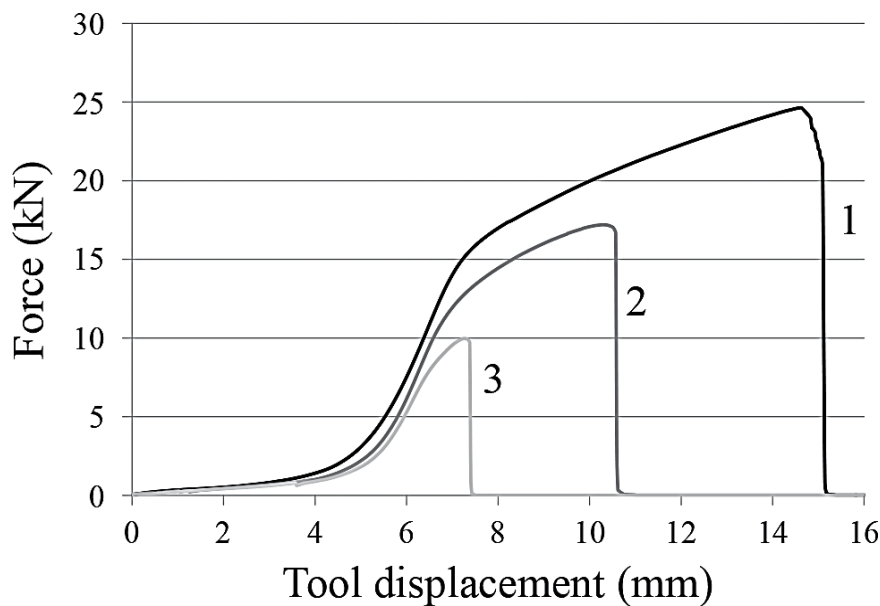


Рис. 8. Криві сила – переміщення інструменту при модифікованому тесті на розтягання зразків зі сталі 1.4401:

криві 1, 2, 3 відповідають зразкам з номінальним діаметром концентратора напружень 3, 8, 12 мм

На кривих сила-переміщення, представлених на рис. 8, спостерігається зона, де значення сили зростають приблизно від 1,5 кН до 2 кН. Ця зона може бути описана як деформація випрямлення зразка. Після цього етапу стінка зразка починає пружно-пластично деформуватися.

На рис. 9 зображено графік розкиду даних відношення між максимальними вимірними значеннями сили та коефіцієнтом n , а також поліноміальна лінія апроксимації цієї залежності при випробуванні зразків зі сталі 1.4401. Для апроксимації цих даних було вибрано поліном четвертого порядку, що має коефіцієнт детермінації (округлено) $R^2=0,97$:

$$F = 0,0476n^4 - 0,632n^3 + 3,0565n^2 - 6,6653n + 7,1842. \quad (9)$$

Як видно з рис. 9, лінія тренду має точку перегину в межах значень n , що дорівнюють 2,5–3.

Аналогічний графік розсіювання з поліноміальною лінією тренду для зразків зі сталі 1.0580 зображений на рис. 10. І в цьому випадку також для апроксимації було обрано поліном четвертого порядку, що має коефіцієнт детермінації (округлено) $R^2=0,96$:

$$F = 17,232n^4 - 76,498n^3 + 120,11n^2 - 88,344n + 55,877. \quad (10)$$

Графіки розсіювання для співвідношення між коефіцієнтом k (7) та коефіцієнтом n (4) разом з поліноміальними лініями тренду на основі отриманих даних для зразків сталі 1.4401 та 1.0580 показані на рис. 11 і 12 відповідно. Ці графіки зображують залежність потоншення опорної секції 2 від розміру концентратора. На рис. 11 видно, що коли коефіцієнт n з рівняння (4) наближається до значення 2,5, k наближається до значення 1,02. Це говорить про те, що коли співвідношення площ опорних секцій 1 і 2 перевищує 2,5, потоншення перерізу 2 практично відсутнє.

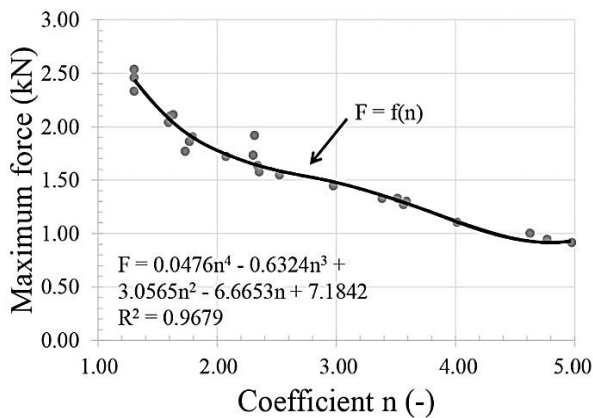


Рис. 9. Розкид даних і графік залежності максимальна сила переміщення як функції коефіцієнта n , з апроксимацією поліномом четвертого порядку для зразків зі сталі 1.0580

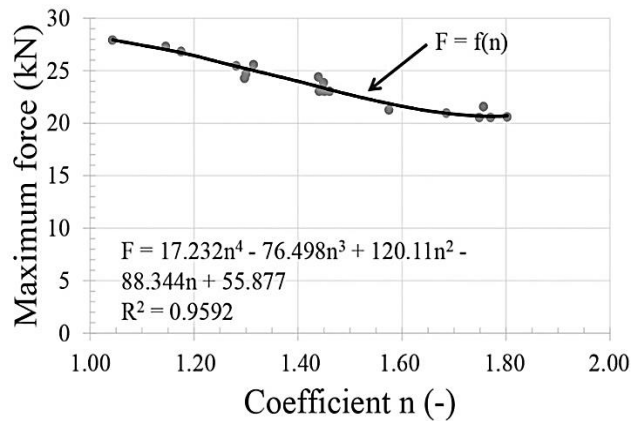


Рис. 10. Графік залежності максимальна сила – переміщення як функції коефіцієнта n , з апроксимацією поліномом четвертого порядку (зразки зі сталі 1.0580)

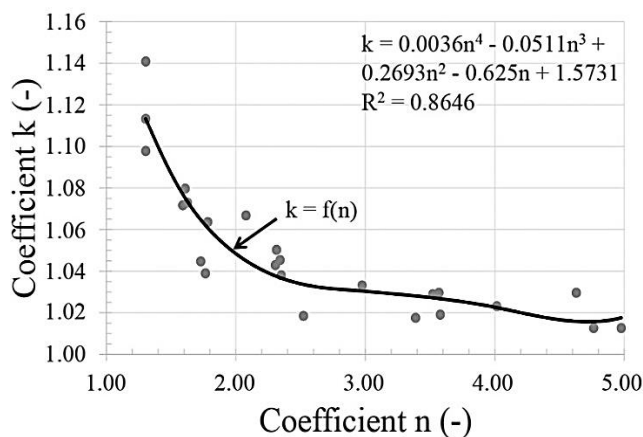


Рис. 11. Діаграма коефіцієнта k як функції коефіцієнта n , зразки зі сталі 1.4401

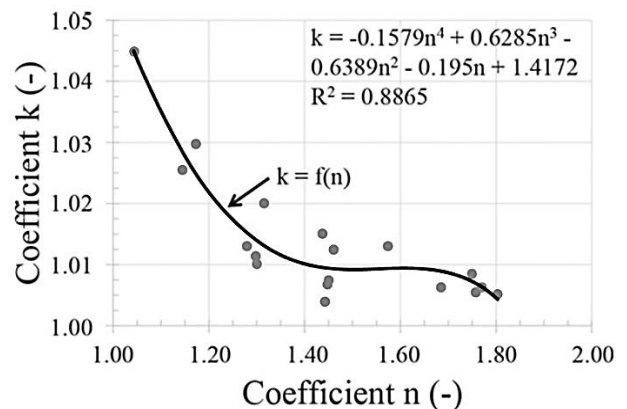


Рис. 12. Діаграма коефіцієнта k як функції коефіцієнта n , зразки зі сталі 1.0580

Для сталі 1.0580 (див. рис. 12) зі збільшенням значення коефіцієнта n до 1,5 коефіцієнт k наближається до значення 1,01. Це говорить про те, що коли співвідношення площ опорних секцій 2 і 1 перевищує 1,5, потоншення перерізу 2 практично відсутнє.

Поліном четвертого ступеня був апробований для кожної ділянки розсіювання.

Для сталі 1.4401 (див. рис. 11):

$$k = 0,0036n^4 - 0,0511n^3 + 0,2693n^2 - 0,625n + 1,5731; \quad (11)$$

Для сталі 1.0580 (див. рис. 12):

$$k = -0,1579n^4 + 0,6285n^3 - 0,6389n^2 - 0,195n + 1,4172. \quad (12)$$

Коефіцієнти детермінації R^2 для сталей 1.4401 та 1.0580 склали 0,8646 та 0,8865 відповідно. Ці многочлени також мають точки перегину, що перебувають у діапазоні 2,5–3 для першого з них та 1,5–1,7 для другого. Загалом можна відзначити, що обидва многочлени мають подібний характер. Низьке значення коефіцієнту детермінації для другого наближення (рис. 11, 12) порівняно з першим (рис. 9, 10) можна пояснити наступним чином.

Взаємозв'язки $F = f(n)$ засновані на значеннях, отриманих за допомогою каліброваної машини для випробування на розтягування. Таким чином, ці значення мають високу точність. З іншого боку, наближення було сформовано за допомогою значень, отриманих цифровим вимірювальним приладом з точністю вимірювання 0,1 мм та трубчастим мікрометром з похибкою вимірювання 0,05 мм. Отже, результати, отримані за допомогою останнього методу, мають відносно нижчий рівень точності порівняно з результатами, отриманими з машини випробування на розтягування.

Таким чином, під час випробування на розтягування зразків із концентратором напруження за допомогою інструменту, показаного на рис. 4, графіки коефіцієнта k як функції коефіцієнта n (див. рис. 11) складаються з двох частини: спадаючої криволінійної і прямої горизонтальної. Остання вказує на наявність співвідношення між розмірами секцій 1 і 2 (див. рис. 5), що забезпечує перехід від пружної деформації до пластичної лише в опорному перерізі 1 (поперечний переріз із концентратором, див. рис. 5).

Це співвідношення варіюється для різних матеріалів; наприклад, для сталі 1.4401 воно знаходиться в діапазоні $2,5 \pm 0,1$, а для сталі 1,0580 — в діапазоні $1,6 \pm 0,1$. Для випробувань на розтягування потрібно визначити розміри концентратора таким чином, щоб коефіцієнт k був прямою горизонтальною зоною (див. рис. 11, 12). Це забезпечує відсутність пластичної деформації в опорній секції 2 (див. рис. 5). У цьому випадку гарантується, що вся пластична деформація до руйнування зразка концентрується в одній опорній секції, а саме секції з концентратором.

Метод перерахунку показників міцності за результатами наведених випробувань на розтягування, а також побудови графіку «напруження-деформація» потребує подальших досліджень. Крім того, у вищезгаданій процедурі не враховується ефект армування металу за рахунок випрямлення кільцевих зразків під час випробування. Однак вплив цього випрямлення можна звести до мінімуму шляхом наближення зовнішніх діаметрів оправок до внутрішнього діаметра труби. Розгляд цього впливу також вимагає подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

Аналіз існуючих методів випробування для визначення механічних властивостей труб показує, що випробування на розтягування зразків, вирізаних з труби, прості та порівняно точні, а серед усіх видів зразків кільцевий зразок є найбільш універсальним. Для оцінки рівня точності методу було розроблено пристрій для випробувань на розтягування кільцевих зразків. Для усунення пластичної деформації в одному з опорних перерізів запропоновано використання концентратора напружень, що дозволяє відносити прикладені сили лише до однієї опорної секції пластичної деформації. Було запропоновано концентратор напружень у вигляді наскрізного отвору в стінці зразка; основною перевагою такого рішення є відносна простота його реалізації порівняно з іншими технічними рішеннями.

Для зразків, виготовлених з аустенітної сталі 1.4401 (EN 10027) та сталі 1,0580 (EN 10297-1), були визначені мінімально необхідні співвідношення площ у діаметрально протилежних опорних перерізах, які забезпечують пластичну деформацію лише в одному з них.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3365-96. Труби металеві. Методи відбору проб, заготовок та зразків для механічних та технологічних випробувань. Державний стандарт України. 1998.
2. Дехтярев В. С., Фролов Я. В., Бобух А. С., Кулак О. В., Святына Т. О. Анализ напряжений при испытаниях кольцевых образцов из труб на растяжение. *Металлург. и горноруд. пром-сть*. 2012. 5. С. 44-46.
3. Arsene S., Bai J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test. *Journal of Testing and Evaluation*. 1996. 24. 6, pp. 386-391. DOI:10.1520/JTE11461J
4. Link T. M., Koss D. A., Motta A.T. Failure of zircaloy cladding under transverse plane- strain deformation, *Nuclear Engineering and Design*. 1998. 186, pp. 379-394. DOI:10.1016/S0029-5493(98)00284-2
5. ДСТУ 2528-94. Розрахунки та випробування на міцність. Метод випробування розтягуванням кільцевих зразків в умовах нагрівання. Державний стандарт України. 1995.

6. ISO 8496: Metallic Materials, Tube, Ring Tensile Test. 2013.
7. Transvalor Forge v2008 2D and 3D Forging. Data File – Users Guide.
8. Крайнюк Е. А., Митрофанов А. С., Ожигов Л. С., Савченко В. И. Прочность и пластичность металла теплообменных труб парогенераторов энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. *Вопросы атомной науки и техники*. 2012. 2. С. 52-55.
9. Kovalev V. V., Kiselevskii V. N., Borisenko V. A., Bukhanovskii V. High-temperature strength of KTTs-110 zirconium alloy. *Strength of Materials*. 2004. 36. 3, pp. 314-320. DOI:10.1023/B:STOM.0000035765.22963.ad
10. Bringas J. E. Handbook of Comparative World Steel Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. 2004. DOI:10.3139/120.110759.

REFERENCES

1. DSTU 3365-96: Metal Tubes: Selection of Testings, Tube Stocks and Specimens for Mechanic and Technological Tests. Ukrainian National Standard. 1998. (in Ukrainian).
2. Dehtjarev V., Frolov I., Bobuh A., Kulak O., Svjatyna T. Stress analysis at tensile testing of ring samples, Metallurgical and mining industry. 2012. 7, pp. 227-233. (in Russian).
3. Arsene S., Bai J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test. *Journal of Testing and Evaluation*. 1996. 24. 6, pp. 386-391. DOI:10.1520/JTE11461J
4. Link T.M., Koss D.A., Motta A.T. Failure of zircaloy cladding under transverse plane- strain deformation. *Nuclear Engineering and Design*. 1998. 186, pp. 379-394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00284-2](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00284-2)
5. DSTU 2528-94: A Method for Tensile Testing of Annular Specimens under Conditions of Heating. Ukrainian National Standard. 1995.
6. ISO 8496: Metallic Materials, Tube, Ring Tensile Test. 2013.
7. Transvalor Forge v2008 2D and 3D Forging Data File – Users Guide.
8. Krajnyuk E.A., Mitrofanov A.S., Ozhigov L.S., Savchenko V.I. Strength and ductility of metal of heat-exchanging tubes of steam generator of power units with reactors WWER- 1000. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2012. 2, pp. 52-55. (in Russian).
9. Kovalev V.V., Kiselevskii V.N., Borisenko V.A., Bukhanovskii V. High-temperature strength of KTTs-110 zirconium alloy. *Strength of Materials*. 2004. 36. 3, pp. 314-320 DOI:10.1023/B:STOM.0000035765.22963.ad
10. Bringas J.E. Handbook of Comparative World Steel Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. 2004. DOI:10.3139/120.110759

Бобух О. С. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

Вовк А. С. – аспірантка НМетАУ.

Кузьміна О. М. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

Андрєєв А. А. – доктор-інженер, Університет Падерборну (Німеччина).

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ.

Самсоненко А. А. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

E-mail: kuzmina@metal-forming.org

Стаття надійшла до редакції 21.01.2020 р.