

УДК 620.171.2; 620.171.34

Андрєєв А. К.  
Гридин О. Ю.  
Шишацький Д. В.  
Панюшкін М. Є.  
Шапер М.  
Фролов Я. В.

## КРИТЕРІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ТРУБ У ПОПЕРЕЧНОМУ ПЕРЕРІЗІ

Вимоги стандартів, які регламентують технічні умови постачання труб, що працюють під тиском, наприклад [1–5], передбачають проведення випробувань зразків для визначення здатності металу протистояти навантаженням як у поздовжньому, так і у поперечному напрямках. Ці випробування умовно можна розділити на дві групи:

1. Випробування, в результаті яких одержують кількісні значення абсолютних або відносних величин, що характеризують випробуваний зразок. До таких випробувань належать випробування на розтягання [6], заміри твердості [7], випробування на ударну в'язкість [8], тривалу прочність [9] та втомленість [10]. Усі методики проведення випробувань з групи 1 є стандартними та використовуються не тільки для оцінки властивостей труб.

2. Випробування, результатом яких є рішення про допустимість труби до експлуатації. Ці випробування зазвичай передбачають прийняття рішення щодо якості на основі візуального аналізу випробуваного зразка. До них належать такі специфічні випробування, що застосовуються для труб: вигин [11], бортовання [2], розвальцювання [12], відбортовку [3], випробування кільцевого зразка на розширення [4], випробування кільцевого зразка на розтягування [5], а також низка інших, які використовуються за узгодженням. До цієї групи також належать випробування на герметичність труб гідравлічним або пневматичним тиском.

Найбільш розповсюдженим критерієм для оцінки здатності металу протистояти навантаженням є дані, одержані в результаті випробувань поздовжніх зразків на розтягування [6]: межа міцності, межа текучості, відносне подовження/звуження. Одержати такі дані при випробуваннях уздовж твірної можливо для всіх розмірів труб. Однак використання випробувань на розтягання для оцінки властивостей металу у поперечному напрямку є утрудненим. Так, у [13] не є рекомендованим проводити такі випробування для труб із зовнішнім діаметром  $\leq 219$  мм. В разі необхідності після випробування потрібна термічна обробка – нормалізація зразків перед їх випрямленням (розгинанням). [6] не дозволяє вирівнювати зразки перед випробуванням. В той же час максимальні напруження, які діють в трубі під внутрішнім тиском є тангенціальними [14]. Таким чином, кількісне визначення показників механічних властивостей труб у тангенціальному напрямку досі не є розвинутим.

Метою роботи є розгляд існуючих вимог стандартів і методів оцінки властивостей металевих труб, які працюють під тиском, в поперечному напрямку. При цьому необхідно надати оцінку впливу форми інструменту і зразків, які використовуються при проведенні механічних випробувань, а також їх взаємного положення, на характеристики механічних властивостей, які одержують в результаті проведення іспитів.

Особливості механічних властивостей труб. Безшовні труби виробляють за технологіями, які передбачають коефіцієнти витяжки при гарячій обробці 10...40, а при холодній деформації – 1,5...8 [15]. При цьому деформація при прокатці труб відрізняється значною нерівномірністю. Так, при поздовжній прокатці можливість зменшення діаметра труби пов'язана з неминучою овалізацією поперечного перерізу у бокових частинах калібру [16].

Якщо розглядати поперечний переріз зони деформації при поздовжній прокатці труб, то стискаючі напруження, які переважають у вершині калібру в міру наближення до його краю поступово зменшуються і трансформуються у розтягуючі [17]. Якщо розглядати зону

деформації уздовж вісі прокатки, тут нерівномірність є обумовленою обтиском по діаметру і товщині стінки труби, а також різницею в умовах тертя на поверхнях «метал-валок» і «метал-оправка» [18]. Великі ступені деформації у поєднанні з її нерівномірністю є причиною анізотропії властивостей у безшовних трубах.

У зварених трубах анізотропія властивостей має менше причин деформаційного характеру. Найчастіше вона викликана різницею у напруженнях на внутрішній та зовнішній поверхнях, що виникає при формуванні труби, а також, що є головним, зоною термічного впливу звареного шву [19].

Окрім властивостей металу, на стійкість до тангенціальних напружень має вплив також топографія поверхні труб. При цьому, зовнішня поверхня зазвичай піддається механічній або електрохімічній обробці для покращення товарного вигляду труб. В той же час, більшість дефектів виникає саме на внутрішній поверхні. До таких дефектів належать сліди від налипання металу на інструмент, риски, складки та мікротріщини. Ці дефекти, здебільшого, орієнтовані уздовж твірної труби і мають співвідношення ширини до глибини  $\leq 1$  [20]. Така форма та орієнтація дефектів сприяє їх розвитку під дією внутрішнього тиску. Крім того, ці дефекти в процесі експлуатації труби мають тенденцію ставати небезпечними концентраторами корозії, особливо у сполученні з втомленістю матеріалу [21].

Однак сьогодні концепція зменшення ваги машин вимагає надійних критеріїв оцінки анізотропії властивостей металу і впливу поверхневих дефектів на здатність труб протистояти внутрішньому тиску [22, 23]. Крім того, на основі таких критеріїв оцінки властивостей можуть бути одержані дані для зміни умов прийому труб та коректування технологічних режимів з метою зменшення анізотропії та покращення якості поверхні [24]. Такі критерії можуть бути вироблені на підставі досліджень властивостей труб у поперечному напрямку.

Способи оцінки властивостей труб у поперечному напрямку. Дослідження властивостей труб у поперечному напрямку за допомогою випробувань кільцевих зразків на розтягання проводиться вченими різних країн, починаючи з середини двадцятого століття. Серед них можна виділити 2 групи випробувань:

1) розтягування кільцевого зразка двома опорами шляхом переміщення цих опор у протилежних напрямках (рис. 1, а) [25–28];

2) роздача кільцевого зразка зсередини набором клинів, які, розсуваючись при введенні у зазор між ними пуансону, створюють у трубі напружений стан, подібний до гідростатичного тиску (рис. 1, б) [29–31].

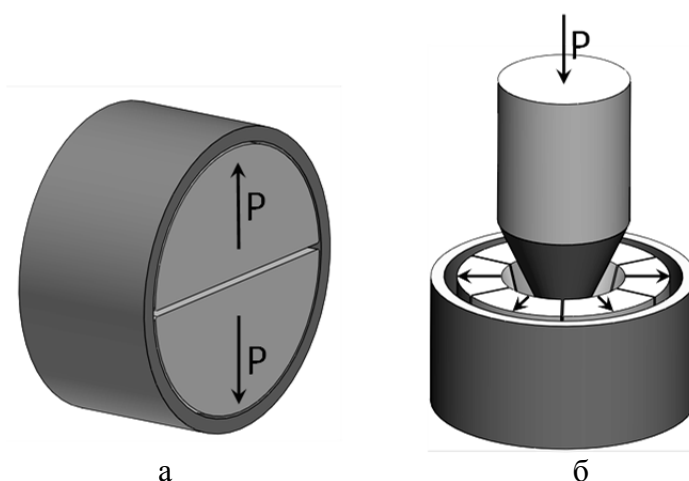


Рис. 1. Пристрій для випробування кільцевого зразка:

а – на розтягування за допомогою двох опор; б – роздачою за допомогою введення пуансону між набором клинів

Використання групи випробувань на придатність матеріалу труб [2–5, 11, 12] є простим способом для якісного визначення властивостей металу у поперечному напрямку. У [32] запропоновано кількісно характеризувати матеріал за результатами випробувань на випробувань

кільцевого зразка на бортовання [2]. Однак такий спосіб випробувань не дозволяє оцінити властивості труби у поперечному напрямку з достатньою точністю.

Для одержання кількісних даних, що характеризують властивості труби у тангенціальному напрямку, можуть бути використані методи, подібні до випробування кільцевого зразка на розтягування [5], з подальшим перерахуванням сил у напруження.

Застосування результатів випробувань кільцевих зразків на розтягування. На сьогодні випробування труб у поперечному напрямку із визначенням кількісних значень одержаних характеристик найчастіше застосовується у двох галузях:

- 1) для труб з полімерів та армованих труб [33–35];
- 2) для оцінки властивостей металевих трубопроводів для атомних реакторів як у стані постачання, так і після певного часу роботи [36–42].

Висока небезпека, яку несе пошкодження паливних елементів та гідравлічних контурів атомних реакторів мотивувала наукові дослідження, спрямовані на оцінку якостей труб у тангенціальному напрямку. Так, у [36, 43, 44] застосовувалось розтягання кільця для отримання властивостей порошкової мартенситної сталі. При цьому поздовжні та поперечні зразки були виготовлені у відповідності до [45].

Використання випробувань кільцевих зразків на розтягування сумісно з аналізом мікроструктури проводилося у [44], для зміцнених оксидами ітрію ( $Y_2O_3$ ) мартенситних та феритних сталей. Автори показали, що режими деформації і термічної обробки, використані при виробництві труб, мають вплив на анізотропію властивостей, і підтвердили це аналізом мікроструктури.

У [37] для труб, що піддаються радіаційному випромінюванню, було проведено спільне вивчення мікроструктури та властивостей аустенітної сталі, яке показало, що опромінення впливає на розподіл фаз, що зміцнюють, у кристалічній решітці, і це відбивається на зміні властивостей металу при різних температурах. Також у цій роботі був зроблений висновок, що значення межі текучості та відносного подовження, одержані в результаті випробування кільцевих зразків, значно відрізняються від аналогічних значень, одержаних для поздовжніх зразків, і немає можливості будь-яким чином систематизувати ці відхилення. Найменші відхилення при порівнянні кільцевих та поздовжніх зразків показує межа міцності, яка у поперечних зразків є більшою, ніж у поздовжніх. Абсолютні значення напружень для поздовжніх зразків в роботі не вказані, що робить неможливим проведення самостійного порівняння результатів. При цьому автор використовував інструмент, який передбачає розгинання зразку під час випробувань.

У роботі [46] за допомогою випробувань кільцевих зразків, досліджень текстури та мікроструктури цирконієвого сплаву встановлено залежність крихкості металу від вмісту водню. На жаль, випробування поздовжніх зразків у цій роботі не проводилися, що не дозволяє порівняти одержані результати з механічними характеристиками у поздовжньому напрямку.

Використання випробувань кільцевих зразків на розтягування є єдиним способом оцінити механічні властивості в трубах, які були піддані частковому гартуванню для машинобудування або в трубах з деформованими кінцями, наприклад, у трубах-заготівках під нарізку різьби за [47]. Крім того, цей вид випробувань є необхідним для оцінки властивостей коротких трубчастих виробів.

Інструмент для випробувань кільцевих зразків на розтягування. Таким чином, у розглянутих роботах із характеру властивостей труб у тангенціальному напрямку за допомогою випробувань на розтягування кільцевих зразків використовуються три типи опор.

1. Так звані вузькі опори з діаметром або діаметрами зовнішнього контуру значно меншими за внутрішній діаметр труби, що випробовується [5] (рис. 2, а).
2. Так звані повні опори – опори з діаметром зовнішнього контуру, який приблизно дорівнює унутрішньому діаметру труби [45, 48] (рис. 3, б).
3. Так звані широкі опори – опори, зовнішній діаметр яких може бути рівним або на 10...20% меншим за внутрішній діаметр труби, при цьому у місці роз'єму вони можуть мати закруглення для попередження «розрізання» зразку при випробуваннях [49] (рис. 2, б).

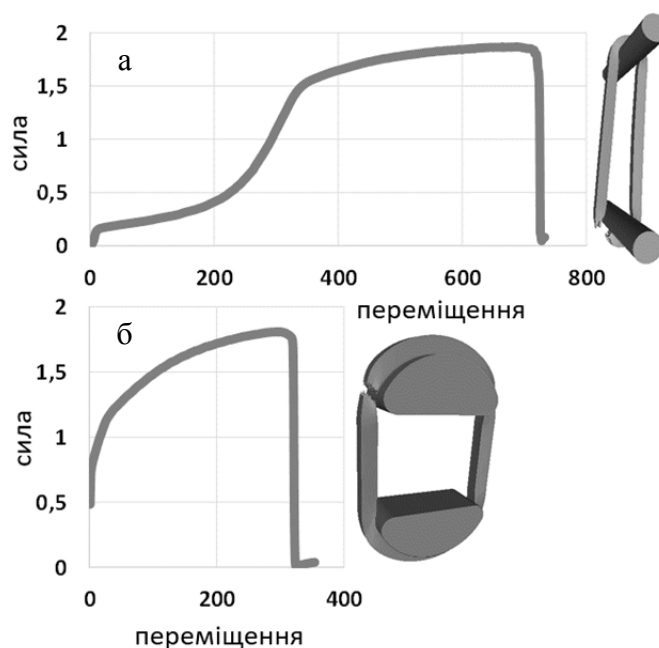


Рис. 2. Порівняння кривих розтягування при випробуванні кільцевих зразків на опорах різного діаметра:

а – вузькі опори з діаметром зовнішнього контуру, меншим за внутрішній діаметр труби; б – широкі опори з діаметром зовнішнього контуру, що дорівнює діаметру труби за [49]



Рис. 3. Кільцеві зразки після випробування на розтягування:

а – з використанням опор з діаметром зовнішнього контуру, меншим за внутрішній діаметр зразка; б – з використанням опор з діаметром зовнішнього контуру, що дорівнює внутрішньому діаметру зразка за [50]

У роботі [49] показано, що при випробуваннях на вузьких опорах до початку розтягування має місце сильна деформація розгинання, яка відбувається на ділянці 0...230 переміщення (рис. 2, а). При розгинанні деформація і напруження залежать не тільки від різниці діаметрів зовнішнього контуру опори та внутрішнього діаметра зразка, але ще й від співвідношення діаметра і товщини стінки зразка. Вплив розгинання на властивості металу труби досі вивчений недостатньо. Тому випробування на вузьких опорах не передбачають одержання кількісних даних щодо властивостей металу.

Повні або широкі опори зменшують величину розгинання (розгину), але збільшують нерівномірність деформації [22, 50] через сили тертя (рис. 2, б). У роботі [50] зроблено висновок про те, що нерівномірність деформації при випробуваннях у широких опорах призводить до руйнування зразка без концентратора напружень на межі опори. Руйнування при цьому відбувається не в місці максимального стоншення зразка (рис. 3, а). Застосування повних опор забезпечує руйнування зразка на ділянці між опорами (рис. 3, б).

Висновок про нерівномірність деформації ділянки зразка з концентратором напружень, розташованим на опорі, можна підтвердити, зробивши власний аналіз знімку зруйнованого зразка з [22] (рис. 4).

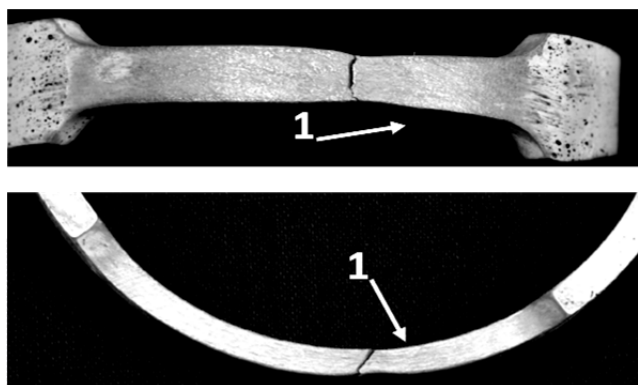


Рис. 4. Кільцевий зразок після руйнування за [22] (1 – зона, яка перед руйнуванням була деформована більше)

Видима нерівномірність стоншення шийки на ділянках з різним впливом тертя і вигляд місця руйнування говорить про значну нерівномірність деформації перед розривом. Невизначені параметри деформації при розгинанні, а також нерівномірність деформації, пов'язана з силами тертя, не дають можливості однозначного співставлення результатів випробувань у поперечному та поздовжньому напрямках.

У роботі [51] автор вказує на недосконалість методики проведення випробування кільцевих зразків на широких опорах без концентратора, пов'язану з великим впливом тертя на контакт між зразком та опорою, і робить висновок щодо можливості застосування методики тільки для визначення межі міцності. Мала інформативність результатів випробувань кільцевих зразків на розтягування в цій роботі підтверджується тим, що підвищення вмісту мартенситу в структурі з 20 до 90% не має впливу на властивості металу, одержані при таких випробуваннях. Це обмежує її застосування навіть для визначення межі міцності. У роботі відсутнє пояснення того факту, що одержані значення межі текучості та межі міцності на 30% перевищують стандартні значення для такого матеріалу.

Форма зразків для випробувань. У [41] докладно описані експерименти з одержання значень властивостей металу при випробуваннях кільцевих зразків. Автори використовували для цього зразки з концентраторами напружень (рис. 5, а).

Випробування проводили у розривній машині при використанні спеціального інструменту, показаного на рис. 5, б. Зразки були розташовані таким чином, щоб концентратор напружень при випробуванні лежав на опорі (рис. 5, в).

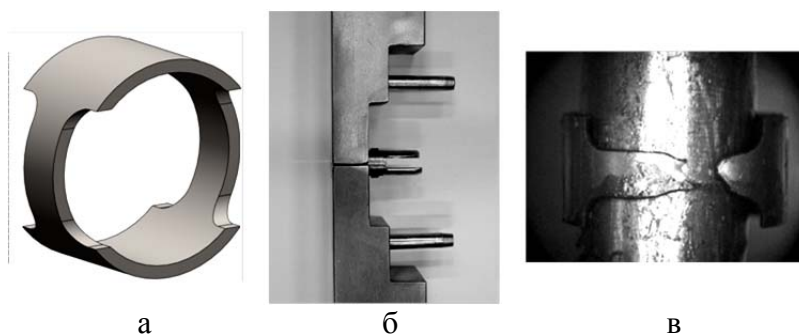


Рис. 5. Проведення випробувань кільцевих зразків на розтягування за [41]:

а – кільцевий зразок з двома концентраторами; б – пристрій для проведення випробувань кільцевих зразків на розтягування; в – розташування зразка на опорах пристрою

Таке розташування зразка перешкоджає розгинанню, але в той самий час є дуже чутливим до тертя на контактній поверхні металу та інструменту. Недоліком роботи є те, що автори не приділили уваги особливостям перерахування сил у напруження. Такий підхід прийнятний, коли існує можливість проводити однакові випробування для оцінки зміни властивостей металу під дією яких-небудь факторів, наприклад, радіації.

Роботи [22, 23] присвячені впливу тертя та побудові полів напружень при випробуваннях кільцевих зразків з концентратором, розташованим на опорі асиметрично напрямку дії сили (рис. 6).

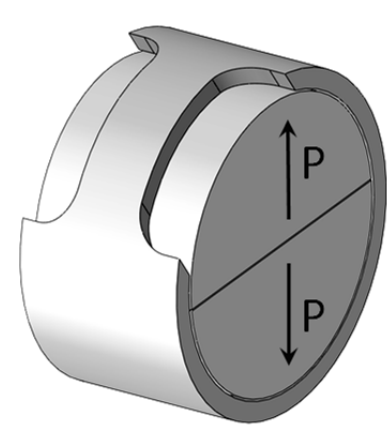


Рис. 6. Схема розташування зразка при випробуванні на розтягування у поперечному напрямку за [22]

У цих роботах приділено увагу урахуванню різниці товщини стінки по периметру труби та розмірів концентратора напружень. Випробування проводилися для алюмінієвого сплаву А6061 в стані Т4 (гартування та природне старіння), а також у стані Т0 (після відпалу) з наступною механічною обробкою.

Гідним уваги є те, що у випадку випробування зразків у стані Т4, характеристики міцності кільцевих зразків виявилися нижчими, ніж у поздовжніх. Схожі результати були одержані також у роботі [36], де проводилися випробування безшовних труб у стані постачання зі сплаву INCOLOY® Fe-Cr-Al alloy MA956 (UNS S67956). З іншого боку, як показано у [22], при випробуванні поздовжніх та кільцевих зразків після відпалу з наступною механічною обробкою механічні властивості у кільцевих зразків виявилися вищими, ніж у поздовжніх. У роботі [52] результати випробувань цирконієвих труб у стані постачання показали більш високі значення механічних властивостей у поперечному напрямку, ніж у поздовжньому.


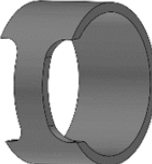


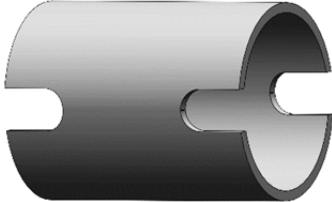
Аналіз відомих робіт показав, що для металевих матеріалів на сьогодні застосовується умовно 3 види кільцевих зразків для визначення механічних властивостей труб у тангенціальному напрямку (табл. 1).

Форма зразка має важливе значення для оцінки результатів випробувань. У [23] на підставі випробувань алюмінієвих зразків з різницею товщин стінок  $\pm 4\%$  зроблено висновок про те, що впливом контактного тиску і різностінності труби можна знехтувати, а вплив тертя урахувати за допомогою калібрівки. Однак такий висновок не був перевірений для сталевих зразків, які при випробуваннях генерують великі значення контактних тисків. Крім того, більшість стандартів на труби передбачають припустимі відхилення за товщиною стінки на рівні  $\pm 12,5\%$ . Також неясним залишився використаний метод перерахунку сил, одержаних при випробуваннях, у напруження. З іншого боку, тертя при таких випробуваннях є функцією контактного тиску, яке залежить від розмірів та властивостей матеріалу опор та зразка. Тому визначення його впливу не є простою задачею.

У роботі [55] запропоновано розташовувати зразок таким чином, щоб концентратор знаходився між опорами. Для визначення властивостей труби у тангенціальному напрямку в умовах, наближених до одновісьового розтягування, та умовах, наближених до плоскої схеми напруженого стану, використовувались 2 різних типи концентраторів (рис. 7). Для отримання характеристик пластичної деформації в області концентратора напружень додатково вимірювалась мікротвердість. На опори для зменшення тертя наносили мастило.

У роботі [57] пропонується також розміщувати зразок таким чином, щоб концентратор знаходився між опорами. Для запобігання розгинанню при цьому використовується спеціальна антифрикційна вставка (рис. 8).

Таблиця 1

Види кільцевих зразків		
№	Тип зразка	Схематичне зображення
1.	Суцільний зразок [37, 38, 48, 51, 53]	
2.	Зразок з 1 концентратором напружень:	
	а) розміри концентратора є еквівалентними стандартному зразку для одновісьового випробування на розтягування [22, 23];	
	б) розміри концентратора не є еквівалентними стандартному зразку для одновісьового випробування на розтягування [49, 54]	
3.	Зразок з двома концентраторами напружень:	
	а) розміри концентраторів є еквівалентними стандартному зразку для одновісьового випробування на розтягування [55, 56, 41];	
	б) розміри концентраторів не є еквівалентними стандартному зразку для одновісьового випробування на розтягування [55, 56, 41]	

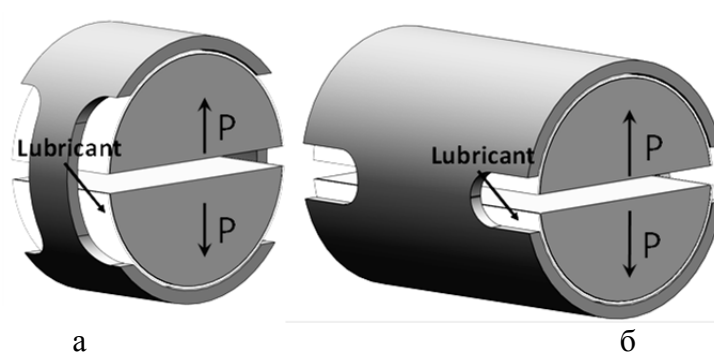


Рис. 7. Випробування кільцевих зразків у тангенціальному напрямку в умовах:  
 а – наближених до одновісьового розтягування; б – наближених до плоского напруженого стану за [55]

Також з використанням такого інструменту були проведені дослідження, описані в роботі [58]. У цій роботі, аналогічно [55], властивості труби визначалися в тангенціальному напрямку як в умовах, наближених до одновісьового розтягування, так і до плоскої схеми

напруженого стану. Змінення схеми напруженого стану було реалізовано шляхом змінення співвідношення довжини зони розтягування та площі її поперечного перерізу. Для отримання характеристик пластичної деформації в області концентратора напружень додатково вимірювалась мікротвердість. На основі одержаних результатів було запропоновано використовувати зразок зі збільшеним відношенням довжини концентратора до його ширини. Це, на думку авторів, дозволяє зменшити нерівномірність деформації. Крім того, як критерій точного визначення рівномірного подовження зразка до утворення шийки було запропоновано використання максимуму першої похідної сили з переміщення ( $-dP/dx$ ). Нажаль, в роботі не наведено аргументації такого рішення.

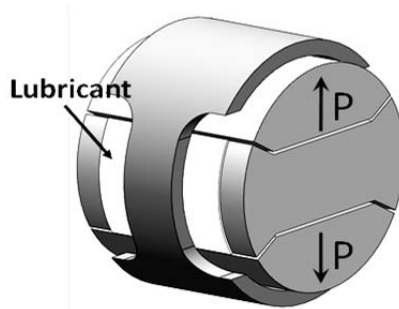


Рис. 8. Пристрій та зразок для проведення випробувань на розтягування труб у поперечному напрямку [57]

У роботі [52] для безшовних труб зі сплаву Zr1Nb показані результати випробувань поздовжніх зразків відповідно до стандарту, аналогічному [6], та поперечних зразків відповідно до [48]. Останній стандарт дозволяє проводити випробування кільцевих зразків без концентратора на опорах, діаметр яких дорівнює внутрішньому діаметру труби з урахуванням допуску на посадку H9/e9 – H11/e11 відповідно до [59]. Показано, що у поперечному напрямку труба має більш високі міцнісні властивості, ніж у поздовжньому. Також варто звернути увагу на результати роботи [53], у якій вивчалися властивості безшовних труб зі сталі 1.4301. Значення одержаних механічних властивостей у поперечному напрямку у цьому випадку були меншими, ніж у поздовжньому напрямку, хоча методи визначення механічних характеристик були такими самими, як і у [52]. Способи випробувань за [52, 53] передбачають наявність спеціальних опор для кожного внутрішнього діаметра зразка. Широке застосування таких випробувань обмежено тим, що труби, особливо безшовні, мають відхилення від номінальних розмірів по діаметру і товщині стінки, а також по овальності. Використання опор з діаметром, меншим за внутрішній діаметр труби, передбачено у [5], однак рекомендації щодо визначення кількісних значень механічних властивостей відсутні.

## ВИСНОВКИ

У відомих роботах відсутнє пояснення різниць результатів випробувань кільцевих та поздовжніх зразків, а також немає єдиної думки щодо того, як перераховувати криву «сила – переміщення» у криву «напруження – деформації». Це обумовлено тим, що на положення кривої напружень, одержаної при випробуваннях кільцевих зразків, відносно кривої, одержаної при випробуваннях поздовжніх зразків, мають вплив як мінімум (щонайменше) два фактори: власне анізотропія властивостей та методика перерахування сил у напруження. Визначити ступінь впливу кожного з цих факторів на цей час є утрудненим.

На підставі аналізу стану досліджень в галузі визначення властивостей труб у тангенціальному напрямку можна зробити такі висновки.

1. Широко застосовувані на практиці методи випробувань труб у поздовжньому напрямку не враховують анізотропії властивостей, наведеної в процесі виробництва труб, а також не враховують впливу поздовжніх дефектів поверхні труб. Застосування такого роду випробувань також обмежено для труб зі змінними властивостями по довжині і коротких патрубків тощо.



2. Різниця у значеннях механічних властивостей при порівнянні результатів випробувань поздовжніх та поперечних зразків може бути обумовлена не тільки властивостями металу, але й методом перерахування з діаграми «сила – переміщення».

3. Надійна характеристика властивостей труб у тангенціальному напрямку потребує аналізу не тільки напружень, але й структури металу. При аналізі змінення структури металу труби під дією тангенціальних напружень важливу роль відіграє тип кристалічних ґрат, а також вид та розподіл фаз, що зміцнюють.

4. Для того, щоб точно охарактеризувати властивості труб у тангенціальному напрямку та забезпечити достовірне перерахування кривої «сила – переміщення» у залежність напружень від деформації, слід вирішити такі задачі.

4.1. Вибір оптимальної форми та розміру зразку. Ключовим питанням тут є концентратор напружень. Він має забезпечувати локалізацію напружень і деформації таким чином, щоб решта частин зразку зазнавали мінімальних деформацій. З іншого боку, чим більшою є площа внутрішньої та зовнішньої поверхні труби в області концентратора напружень, тим повніше характеризується увесь периметр труби. Зразок має бути також відносно простим у виготовленні для забезпечення повторюваності результатів великої кількості експериментів.

4.2. Розробка інструменту та оснащення для проведення випробувань. Для одержання залежностей «деформація – напруження» для різних співвідношень діаметрів і товщин стінок інструмент має забезпечувати потрібну різницю між внутрішнім діаметром зразку і діаметром опори. При цьому важливим питанням, що не відображено у літературних джерелах, є вплив форми роз'єму двох опор.

4.3. Позичування зразка в момент випробувань. Відомі два підходи до позиціонування зразку при проведенні випробувань: перший – розташування концентратора напружень на опорі, а другий – між опорами. У першому випадку на результати випробувань впливає сила тертя і контактний тиск, а в другому – розгинання зразка до руйнування. При цьому розгинання також провокує концентрацію напружень у поздовжніх дефектах внутрішньої поверхні.

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. DIN EN 10216: *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur*. Berlin, Beuth Verlag, 2013.
2. DIN EN ISO 8492: *Metallische Werkstoffe – Rohr – Ringfaltversuch (ISO 8492:2013)*. Berlin, Beuth Verlag, 2013.
3. DIN EN ISO 8494: *Metallische Werkstoffe – Rohr – Bördelversuch (ISO 8494:2013)*. Berlin, Beuth Verlag, 2013.
4. DIN EN ISO 8495: *Metallische Werkstoffe – Rohr – Ringaufdornversuch (ISO 8495:2013)*. Berlin, Beuth Verlag, 2013.
5. DIN EN ISO 8496: *Metallische Werkstoffe – Rohr – Ringzugversuch (ISO 8496:2013)*. Berlin, Beuth Verlag, 2013.
6. DIN EN ISO 6892: *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009)*. Berlin, Beuth Verlag, 2009.
7. DIN EN ISO 6507: *Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2005)*. Berlin, Beuth Verlag, 2005.
8. DIN EN ISO 148: *Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2009)*. Berlin, Beuth Verlag, 2010.
9. DIN EN ISO 204: *Metallische Werkstoffe – Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung – Prüfverfahren (ISO 204:2009)*. Berlin, Beuth Verlag, 2009.
10. DIN EN 6072: *Luft- und Raumfahrt – Metallische Werkstoffe – Prüfverfahren – Ermüdungstest mit konstanter Amplitude*. Berlin, Beuth Verlag, 2010.
11. DIN EN ISO 8491: *Metallische Werkstoffe – Rohr (Rohrabschnitt) – Biegeversuch (ISO 8491:1998)*. Berlin, Beuth Verlag, 2004.
12. DIN EN ISO 8493: *Metallische Werkstoffe – Rohr – Aufweitversuch (ISO 8493:1998)*. Berlin, Beuth Verlag, 2004.
13. ASTM A370: *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org).
14. Knapstein G. *Statik, insbesondere Schnittprinzip*. Deutscher Verlag, Frankfurt am Main, 2007.
15. *Theorie der Rohreherstellung. Intermetinzhiniring / Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romanzev B.A., Samusev S.V. – Moskau, 2002.*
16. Frolov Ya.V. *Prediction of Changes in the Mechanical Properties of the Metal at Cold Pilger Rolling /*

- Frolov Ya.V., Danchenko V.N. // *Metallurgical and Mining Industry*. – Vol. 3. – Nr. 7. – 2011. – S. 39.
17. Frolov Ya.V. *Effect of Deformation Conditions on Mechanical Properties of Metal During Tube Cold Pilger Rolling* / Frolov Ya.V. // *Metallurgical and Mining Industry*. – Vol. 2. – Nr. 1. – 2010. – S. 36–38.
18. Danchenko V.N. *Ingress of the salt lubricant on a tube-mandrel contact in the stands continuous mill of tubes* / Danchenko V.N.; Mamuzić I., Drozhzha P. V. // *Metallurgy*. – Vol. 41. – Nr. 2. – 2002. – S. 93–97.
19. *ABS guide for building and classing: Subsea pipeline systems*. American Bureau of Shipping, ABS Plaza, Houston, TX, 2014.
20. *Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes* / I. Frolov, M. Schaper, O. Grydin, V. Andreiev, A. Tereschenko // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2016. – No. 9. – P. 72–79. – [http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2016\\_9/011FrolovIaroslav.pdf](http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/011FrolovIaroslav.pdf).
21. Papirno R. *Plastic stress-strain history at notch roots in tensile strips under monotonic loading* / Papirno R. // *Experimental Mechanics*. – Vol. 11. – Nr. 10. – 1971. – S. 446–452.
22. Dick C.P. *Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test* / Dick C.P., Korkolis Y.P. // *International Journal of Solids and Structures*. – Nr. 51. – 2014. – S. 3042–3057.
23. Dick C.P. *Assessment of anisotropy of extruded tubes by ring hoop tension test* / Dick C.P., Korkolis Y.P. // *11th International Conference on Technology of Plasticity*. – ICTP. – Nagoya, 2014.
24. *Development of Pipe Cold Pilger Rolling Mode Computation Method with Account of Metal Properties Change* / Danchenko V.N., Frolov Ya.V., Dekhtyarev V.S., Golovchenko A.P., Belikov Yu.M., Tereshchenko A.A., Chigirinskiy Yu.V. // *Metallurgical and Mining Industry*. – Vol. 3. – Nr. 3. – 2011. – S. 110–113.
25. Rezik F.P. *Vorrichtung für Zugversuch des ringförmigen Materials* / Rezik F.P. // *Patentschrift*. – 1933. – UdSSR – Nr. 31156.
26. Ivanov Ju. S. *Vorrichtung für Zerreiβversuch der Ringproben* / Ivanov Ju. S. // *Patentschrift*, 1947. – UdSSR Nr. 68635.
27. McCauley C. R. *Pipe ring test machine* / McCauley C. R. // *Patent*. – 1976. – US – Nr. 3,934,464.
28. Krawchuk M. *Rupture testing apparatus for boiled tubes* / Krawchuk M. // *Patent*. – 1988. – US – Nr. 4,716,767.
29. Salamatin G.M. *Vorrichtung für Festigkeitsversuch des Kesselmaterials* / Salamatin G.M. // *Patentschrift*, 1932. – UdSSR – Nr. 25757.
30. *Vorrichtung für Zugversuch der Ringproben* / Savinkov A.I., Orehov A.V., Kachalov N.P., Orehov A.V. // *Patentschrift*, 1990. – UdSSR. – Nr. 1596227.
31. *Vorrichtung für Zugversuch der Ringproben* / Eremichev A.N., Zinov'ev P.A., Cvetkov S.V. // *Patentschrift*. – 1991. – UdSSR. – Nr. 1663490.
32. *Characterizing the Material Properties of a Tube from a Lateral Compression Test* / Rathnaweera G., Durandet Y., Ruan D., Kinoshita S. // *International Journal of Protective Structures*. – Vol. 2. – Nr. 4. – 2011. – S. 456–474.
33. GOST 25.603: *Die Methoden der mechanischen Prüfungen von Materialkompositen mit Polymermatrize. Die Methode für Zugversuch der Ringproben bei normalen, hohen und tiefen Temperaturen*. – Moskau, Izdatel'stvo standartov, 1982.
34. ASTM D2290: *Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)
35. *The nol ring test an improved tool for characterizing the mechanical degradation of non-failed polyethylene pipe house connections* / Rozental-Evesque M., Rabaud B., Sanchez M., Louis S., Bruzek C-E. // *Plastic Pipes XIV*. – Budapest, 2008.
36. Alamo A. *Oxide dispersion strengthened ferritic alloys obtained by mechanical alloying effects of processing on textures and tensile properties* / Alamo A., Regle H., Bechade J.L. // *Powder metallurgy world congress*. – San Francisco, 1992.
37. Hübner R. *Das Bestrahlungsverhalten des austenitischen Stahls DIN 1.4970*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2000.
38. Bykov E.M. *Die Versuchsergebnisse von Wärmeaustauschrohre des Dampferzeugers «PGV-1000» mit künstlichen Defekten* / Bykov E.M., Kolesov A.F., Zhukov R.Ju. // *FSUE Experimental-Konstruktionsbüro «Gidropress», Podol'sk*, 2000.
39. Grigoriev V. *Advanced techniques for mechanical testing of irradiated cladding materials* / Grigoriev V., Jakobsson R., Josefsson B., Schrire D. – 2002.
40. Campitelli E. N. *Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zircalloys and steels with non-standerd tests and finite element calculations*. Dissertation, EPFL, Lausanne, 2005.
41. *Hoop strength and ductility evaluation of irradiated fuel cladding* / Kim S.-K., Bang J.-G., Kim D.-H., Lim I.-S., Yang Y.-S., Song K.-W., Kim D.-S. // *Nuclear Engineering and Design*. – Vol. 239. – 2009. – S. 254–260.
42. Samal M.K. *A load-separation technique to evaluate crack growth and fracture resistance behaviour of thin-walled axially cracked tubular specimens* / Samal M.K., Sanyal G. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*. – Vol. 226. – 2011. – S. 1447–1461.
43. Ukai S. *Perspective of ODS alloys application in nuclear environments* / Ukai S., Fujiwara M. // *Journal of Nuclear Materials*. – Vol. 307–311. – 2002. – S. 749–757.
44. *2004 Tube manufacturing trials by different routes in 9CrW-ODS martensitic steels* / Ukai S., Narita T., Alamo A., Parmentier P. // *Journal of Nuclear Materials*. – Vol. 329–333. – 2004. – S. 356–361.

45. Structure application of mechanical alloying / Alamo A., Decours J., Pigoury M., Foucher C. // *Proceedings of an ASM International*. – 1990. – S. 27–29.
46. Arsene S., Bai J., Bompard P. Hydride embrittlement and irradiation effects on the hoop mechanical properties of pressurized water reactor (PWR) and boiling-water reactor (BWR) ZIRCALOY cladding tubes: Part I. Hydride embrittlement in stress-relieved, annealed, and recrystallized ZIRCALOYs at 20 °C and 300 °C. *Metallurgical and Materials Transactions A*. – Vol. 34. – Issue 3. – 2003. – S. 553–566.
47. API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. API Monogram Equipment, 2011.
48. DSTU 2528. Die Methode für Zugversuch der Ringproben bei der Erwärmung. Kiew, Derzhspozhivstandart Ukrainy, 1994.
49. Andreiev A.K., Dehtjarev V.S., Frolov Ja.V. Tensile tests of O-ring samples. *Proceedings of X-th international Scientific and Technical Conference «Plastic deformation of metals»*. – NMetAU. – Vol. 1. – Dnipropetrovs'k, 2014. – S. 135–144.
50. Device for tensile test of ring samples / Andreiev A.K., Dehtjarev V.S., Pol'skij G.A., Frolov Ja.V. // *Collective monograph «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»*. – Nr. 40. – Czestochowa, 2014. – S. 165–171.
51. Eichler E. Wirkmedienbasierte Mikroumformung unter Ausnutzung von temperatur-gesteuerter Umwandlungsplastizität. Dissertation, der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, Rostock, 2009.
52. High-temperature strength of KTTs-110 zirconium alloy / Kovalev V. V., Kiselevskii V. N., Borisenko V. A., Bukhanovskii V. V. // *Strength of Materials*. – Vol. 36. – Nr. 3. – 2004. – S. 314–320.
53. Festigkeit und Plastizität des Metalls von Wärmeaustauschrohre der Dampferzeuger des Energieblocks mit Reaktoren VVER-1000 / Krajnjuk E.A., Mitrofanov A.S., Ozhigov L.S., Savchenko V.I. // *VANT*. – Vol. 78. – Nr. 2. – 2012. – S. 52–55.
54. Genauigkeit der Bestimmung der Dehngrenze bei der Zugversuche der flachen Proben und Ringproben / Sokurenko V.P., Malysch A.D., Levchenko L.M., Abrosimova T.M. // *Proizvodstvo trub i ballonov: tematich. sb. nauch. trudov*. – DTI, Dnipropetrovs'k, 2002. – S. 118–122.
55. Link T.M. Failure of Zircaloy cladding under transverse plane-strain deformation / Link T.M., Koss D.A., Motta A.T. // *Nuclear Engineering and Design*. – Vol. 186. – 1998. – S. 379–394.
56. Besson J. Comportement et rupture de gaines en zircaloy-4 detendu vierges, hydrurees ou irradiees en situation accidentelle de type ria / Besson J. // *Dissertation*. – Mines ParisTech. – 2008.
57. Arsene S. A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test / Arsene S., Bai J. // *Journal of Testing and Evaluation*. – Vol. 24. – Nr. 6. – 1996. – S. 386–391.
58. Mechanical Property Testing of Irradiated Zircaloy Cladding Under Reactor Transient Conditions / Daum R. S., Majumdar S., Tsai H., Bray T. S., Koss D. A., Motta A. T., Billone M. C. // *Small Specimen Test Techniques*. – Vol. 4. – West Conshohocken, 2002.
59. DIN EN ISO 286-2. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen. Berlin, Beuth Verlag, 2010.

Андреев А. К. – науч. співр. каф. матеріалознавства університету Падерборну (ФРН)

Гридин О. Ю. – гол. інж. каф. матеріалознавства університету Падерборну (ФРН)

Шишацький Д. В. – аспірант каф. ОМТ ім. акад. О. П. Чекмарьова НМетАУ

Панюшкін М. Є. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМТ ім. акад. О. П. Чекмарьова НМетАУ

Шапер М. – проф., зав. каф. матеріалознавства університету Падерборну (ФРН)

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМТ ім. акад. О. П. Чекмарьова НМетАУ

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

E-mail: andreiev@lwk.upb.de, grydin@lwk.upb.de, shyshatskyi@gmail.com,  
panushkin@metal-forming.org, schaper@lwk.upb.de, frolov@metal-forming.org

Статья поступила в редакцию 04.11.2016 г.