

Структура та механічні властивості трубних відводів, отриманих методом холодної деформації

Ю. М. Подрезов, М. І. Даниленко, М. В. Мінаков,
В. І. Даниленко, С. Є. Шейкин*, С. Ф. Студенець*

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: Yupodrezov@ukr.net

* Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ

Проаналізовано розподіл твердості та пластичної деформації в різних ділянках трубного відводу: в зоні заневолення (до вигину), в області вигину та області відводу після зони вигину. Проведено порівняльний аналіз зміни деформації в цих зонах для різних ділянок труби. В першій зоні істинна пластична деформація не перевищує $\epsilon = 0,2$. В зоні вигину найбільша деформація — в верхній частині труби $\epsilon \sim 1,0$. На бокових та нижній частинах $\epsilon = 0,5-0,7$. На ділянці за зоною вигину деформації нижньої та бокових стінок зростають до $\epsilon = 0,8-1,0$. Результати електронно-мікроскопічних досліджень демонструють наявність дисперсної (200 нм) розорієнтованої коміркової структури в зоні вигину.

Ключові слова: трубні вигини, твердість, пластична деформація, нанозеренна структура.

Вступ

В ІНМ НАН України розроблено оригінальну технологію виготовлення трубних відводів, яка описана в роботі [1]. В її основу покладено метод пластичного протягування труби через шарнір (рис. 1, а). Це технічне рішення дозволяє отримувати відводи більш досконалої форми (рис. 1, б) без зміни геометрії внутрішніх отворів та без гофрів в області вигину. Останнє особливо важливо для зменшення концентрації механічних напружень та мінімізації турбулентної складової руху рідини, наявність якої різко прискорює корозійні процеси. Такі переваги дозволили рекомендувати цей метод для ремонту відповідальних ділянок трубопроводів з нержавіючої сталі в об'єктах атомної та теплової енергетики.

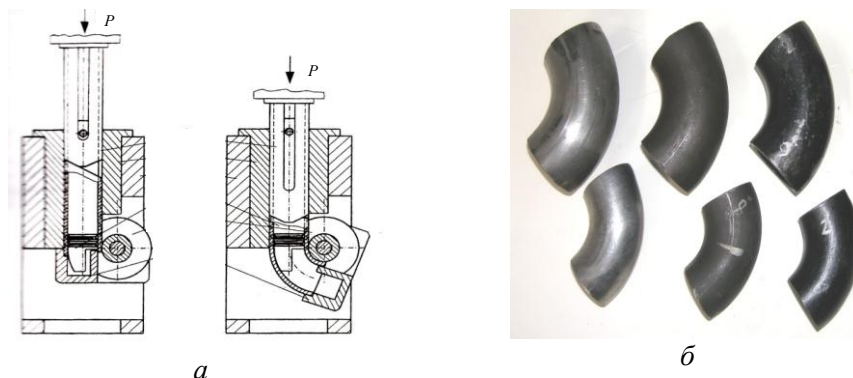


Рис. 1. Технологічна схема виготовлення відводів (а) та вигляд продукції (б).

© Ю. М. Подрезов, М. І. Даниленко, М. В. Мінаков, В. І. Даниленко,
С. Є. Шейкин, С. Ф. Студенець, 2017

Запропонована технологія вирішує не тільки суто конструкторську задачу, але й дозволяє створити високоміцні структурні стани за рахунок великої зсувної компоненти деформації, яка виникає по перерізу труби під час деформування. Це сприяє утворенню деформаційної наноструктури, яка притаманна сильнодеформованим станам, отриманим методом інтенсивної деформації. Відомо, що така структура незначно підвищує деформаційне зміцнення [2], але позитивно впливає на характеристики втоми [3] та зношування [4].

Умови реалізації чистого зсуву розглянуті в роботі Сегала В. М. [5]. Показано, що при такій схемі деформування матеріал може накопичувати велику деформацію, зберігаючи макророзміри у всіх трьох напрямках. Недолік простої схеми чистого зсуву полягає в тому, що її важко реалізувати через неможливість жорсткого закріплення зразка торцевими захватами. На практиці ця проблема вирішується використанням спеціальних схем інтенсивної пластичної деформації (ІПД): пресування під кутом (РККП) [5] або гвинтова екструзія (ГЕ) [6]. В ІНМ НАН України [7] розроблено технології інтенсивного холодного поверхневого пластичного деформування: деформуєче протягування отворів і редукування. Ці технології вдало поєднують в собі оригінальне технічне рішення створення каліброваних отворів і обробки зовнішніх поверхонь з унікальними можливостями управління структурою матеріалу в приповерхневих шарах за рахунок реалізації умов інтенсивної зсувної деформації. Визнаючи безперечну прогресивність цих розробок, слід все ж відзначити обмеженість їх практичного застосування. У випадку об'ємної ІПД це невеликі розміри зразків, що ускладнює виробництво масової продукції. При поверхневому деформуванні суттєвою вадою є відносно мала глибина градієнтного шару. У більшості випадків вона не перебільшує 1 мм.

В запропонованій технологічній схемі зсувна деформація реалізується по всій товщині стінки труби, що повинно сприяти підвищенню механічних і експлуатаційних характеристик вигинів. Проте при аналізі фізичних процесів та явищ, що відбуваються при вигині, слід враховувати характер і величини виникаючих деформацій і напруги, закони їх зміни по перерізу. Наші попередні роботи, які присвячені поверхневому деформуванню [7, 8], свідчать про те, що градієнтний характер структури не є суттєвою вадою, котра знижує ефективність використання зсувних схем деформації для отримання підвищених властивостей. Проте очевидно, що в кожній технологічній схемі деформації, де реалізується складний розподіл напруг та деформацій, це питання потребує окремого ретельного опрацювання.

Мета роботи — вивчити особливості розподілу деформації та формування деформаційної наноструктури в різних ділянках відводу.

Матеріал та методика експерименту

Початковою заготовкою для процесу формоутворення відводів методом холодної пластичної деформації слугувала безшовна гаряче- або холоднодеформована труба з хромонікелетитанової аустенітної сталі 12Х18Н10Т. Ця сталь отримала найбільше поширення в промисловості, зважаючи на можливість успішного використання її в різноманітних експлуатаційних умовах. Вона має високу корозійну стійкість в ряді рідких середовищ, стійка проти міжкристалітної корозії після зварюваль-

ного нагріву, порівняно мало окрихчується в результаті тривалого впливу високих температур. Склад сталі 12X18H10T наступний (% (мас.)): С — 0,12; Mn — 2; Cr — 17—19; S — до 0,02; P — 0,035; Si — до 0,8; Ti — 0,4—1; Cu — 0,3; Ni — 9—11.

Метод “cross-section”

Беручи до уваги, що з точки зору атестації працездатності виробу найбільш важливими є його кінцева структура та властивості, для аналізу розподілу пластичної деформації використовується комплексний метод “cross-section. Для дослідження зміцнення приповерхневих шарів деформованих матеріалів застосовують мікротвердомір ПМТ-3. Вивчається переріз зразка, який розташований нормально до площини прикладання навантаження. Досліджується зміна мікротвердості від поверхні навантаження вглиб матеріалу. Важливим обмеженням при вимірюванні мікротвердості приповерхневих шарів є вимога нечутливості поля деформації навколо відбитку до поля деформації від відбитків, які були отримані в попередніх експериментах. Тому кожний наступний відбиток отримується після зміщення предметного столу на відстань, що відповідає розміру діагоналі в напрямку, нормальному до площини навантаження, та п'яти діагоналям в напрямку, паралельному площині навантаження. В “cross-section” експериментах зазвичай використовують індентування з навантаженням на індентор 0,2 або 0,5 Н. Цей метод був відпрацьований нами раніше для атестації градієнтних матеріалів [8] і добре зарекомендував себе при визначенні відповідності отриманих значень деформації структурним змінам, що відбуваються в матеріалі. Крім того, цей метод дозволяє встановити локальні характеристики зміцнення в кожній ділянці (зовнішній та внутрішній) виробу та співставити отримані результати зі структурними змінами.

Методи структурного аналізу

З огляду на специфічний характер досліджуваного об'єкту особлива увага була присвячена аналізу металографічної структури та трансмісійної електронної мікроскопії приповерхневих шарів деформованих зразків. Металографічні шліфи готували таким чином, щоб уникнути „завалів” приповерхневих шарів. Для цього зразки поміщали в спеціальну оправку та занурювали в розчин епоксидної смоли. Після цього всю систему рівномірно шліфували. В цьому випадку викривлення спостерігалось лише в приповерхневому шарі розміром 10 мкм. Оптичну металографію виконували на приборі МІМ-10, для відтворення зображення використовували спеціальну цифрову камеру OLIMPUS. Ця методика дозволяє розрізнити структурні елементи розміром 1 мкм.

Трансмісійну електронну мікроскопію виконували на зразках з різних ділянок вздовж вісі трубного зразка. Зразки готували таким чином: спочатку на електроерозійному пристрої вирізали пластину з відповідного фрагменту деформованої ділянки зразка товщиною 500 мкм. Цю пластину шліфували на наждачному папері малої зернистості до розміру 100 мкм. Після цього з пластини вирізали ерозійним методом зразки діаметром 3 мм. Останньою операцією було електролітичне полірування зразка до отримання отвору. Експерименти по трансмісійній мікроскопії проводили на приборі JSM-100CX фірми „JEOL”.

Результати експерименту

Для встановлення зв'язку між деформацією та твердістю метод “cross-section” модернізовано. На першому етапі розподіл твердості по перерізу визначали на зразку дослідженої сталі, який був випробуваний на розтяг. Було проведено фотометрування цього зразка та встановлено відповідність між деформацією та відстанню від краю зразка (рис. 2).

Після фотометрування зразок розрізали на електроерозійному станку вздовж вісі навантаження по площині, що відповідає найбільшому діаметру, розміщували в спеціальній оправці, яка забезпечувала паралельність його розташування відносно елементів навантаження прилада ПМТ-3, шліфували та встановлювали на предметному столі приладу таким чином, щоб забезпечити його переміщення або вздовж вісі навантаження або в перпендикулярному напрямку.

Виміри мікротвердості проводили у восьми вибраних перерізах, що знаходяться на різних відстанях від центра шийки. Для цього у вибраних перерізах за допомогою приладу ПМТ-3 наносили ряд відбитків. Для кожного перерізу за формулою $e = \ln(d_0/d_k)$ розраховано величину істинної деформації (d_0 — початковий діаметр зразка; d_k — діаметр зразка на певній відстані від краю). В нашому випадку $d_0 = 3,0$ мм.

Результати вимірювання мікротвердості для кожного з перерізів та відповідні значення деформації в перерізі дослідженого зразка представлені в таблиці. Аналіз отриманих результатів показав, що залежність твердості від ступеня деформації в діапазоні $e = 0—1,5$ можна апроксимувати лінійною функцією

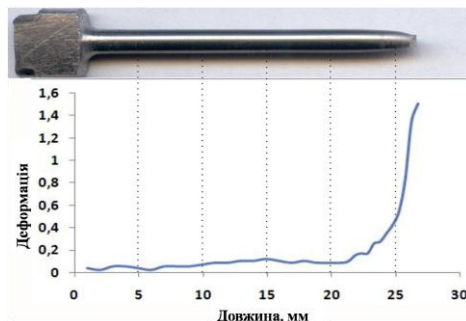
$$H_{\mu}(e) = 300 + 60e. \quad (1)$$

Співвідношення (1) має фізичне тлумачення, якщо взяти до уваги, що твердість дорівнює потроєному значенню напруження плинину при $e = 0,08$. Тобто вона відповідає значенням напруження плинину на кривій зміцнення на стадії середніх та великих деформацій, де виконується лінійний закон зміцнення. Отримані результати використані нами при аналізі розподілу пластичної деформації по перерізу деформованих ділянок відводів.

Дослідження зміни твердості по перерізу труби

Для реалізації методу “cross-section” по перерізу деформованих відводів трубопроводів в зонах виробу, зазначених на рис. 3, а, були вирізані три кільця: в зоні I до вигину, в зоні II у вигині та в зоні III деформованої частини за вигином. На кожному з кілець зроблено шліф для вимірювання твердості. Всі кільця орієнтовані відповідно їх положення на трубі, як показано на рис. 3, б. Верхня ділянка труби позначена цифрою 1, нижня — 2, ліва — 3, права — 4.

Рис. 2. Зміна деформації по довжині зразка, випробуваного на одновісний розтяг.



Зміна твердості по перерізу зразка, випробуваного на одновісний розтяг

d_k , мм	e	$H_{\text{макс}}$, ГПа	$H_{\text{цсер}}$, ГПа
1,56	1,78	4,05	3,82
1,63	1,68	3,95	3,72
1,65	1,6	4,20	3,65
1,68	1,5	3,77	3,58
1,86	1,1	3,85	3,41
2,7	0,5	3,65	3,20
2,85	0,25	3,25	3,10
3,0	0	3,25	

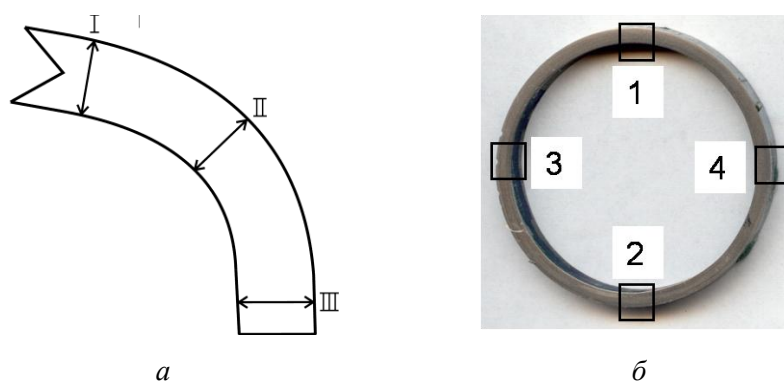


Рис. 3. Схема вирізання зразків: *a* — зони I, II та III на відводі; *б* — ділянки перерізу 1—4, в яких вивчали розподіл твердості.

В кожному сегменті наносили відбитки твердості від верхнього краю до нижнього з кроком 100 мкм при початковій товщині труби 4 мм. Тобто загальна кількість складала приблизно 40 відбитків, але іноді ця цифра була меншою через зміну товщини труби під час деформування. Розподіл твердості по сегменту для різних ділянок труби наведений на рис. 4—6. На рис. 4 наведено значення твердості недеформованої частини труби. В кожному сегменті визначення твердості починалося з верхнього шару сегмента і закінчувалося на нижньому.

Результати експериментів свідчать про те, що в усіх чотирьох зонах недеформованого зразка твердість знаходиться на рівні 3 ГПа, практично не змінюючись вздовж сегмента. На рис. 5 наведено результати вимірювання твердості зразка, що вирізаний з області II, яка розташована безпосередньо в зоні вигину труби. З наведених даних видно, що другий сегмент зазнав значної деформації. Середнє значення твердості сягає величин 3,3—3,4 ГПа, що відповідає еквівалентній деформації на рівні $e = 0,5—0,7$.

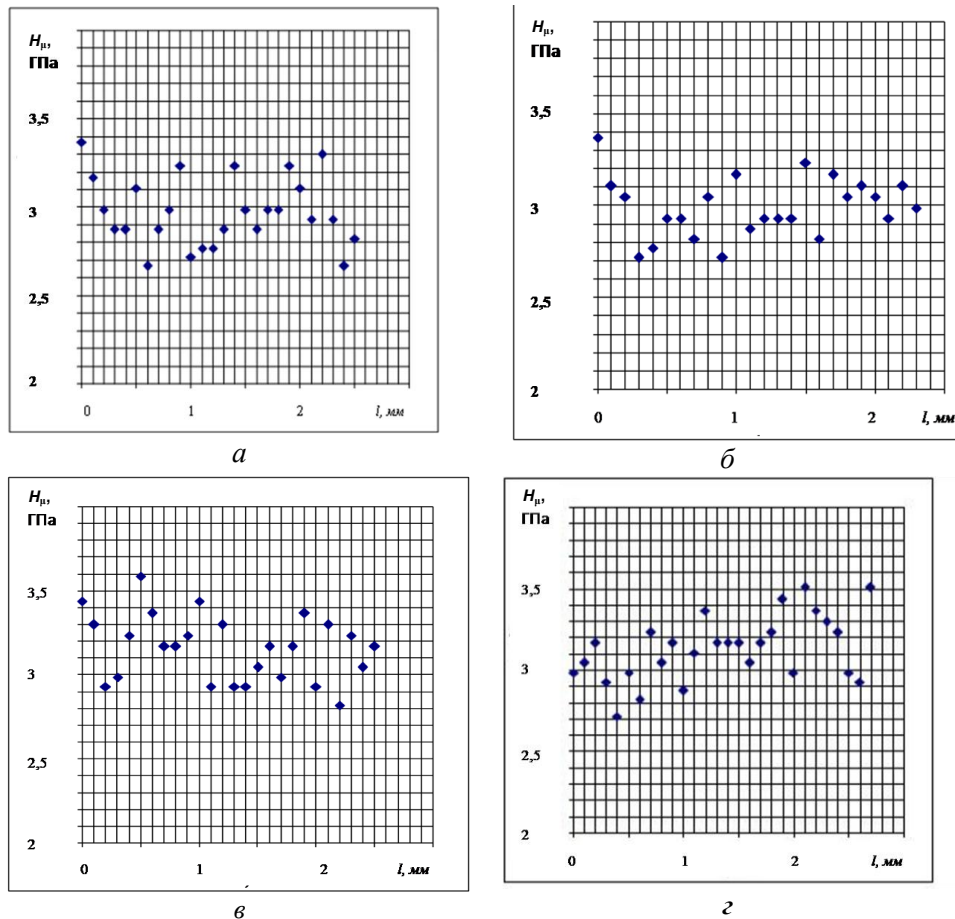


Рис. 4. Розподіл твердості по перерізу недеформованого зразка в зоні I: *a* — верхній; *б* — нижній; *в* — лівий; *г* — правий сегменти.

Розподіл твердості по перерізу нерівномірний. Особливо це стосується нижньої ділянки трубного виробу.

На рис. 6 наведено результати вимірювання твердості в кільці зони III, яке піддано пластичній деформації, але знаходиться поза межею зони вигину. Експерименти показали, що друга та третя зони мають значно вищу твердість, ніж перша. Слід звернути також увагу на значне зниження твердості в цих зонах поблизу поверхні труби (перші 2 відбитка на глибині 100 мкм). В дослідженнях поверхневої деформації [8] нами неодноразово спостерігався такий ефект, який пояснювали особливостями деформації поверхневих шарів, що безпосередньо взаємодіють з деформуючим інструментом.

Зазначимо, що для третьої зони труби верхній сегмент демонструє значення твердості, які близькі до відповідних значень, отриманих для центрального кільця, а нижній та бокові сегменти — більшу твердість до 3,5—3,7 ГПа, що відповідає деформації $e \sim 1,2$.

Зміна деформації по перерізу

Отримані результати з розподілу мікротвердості по перерізах дозволили побудувати карти зміни деформації в деформованих трубах.

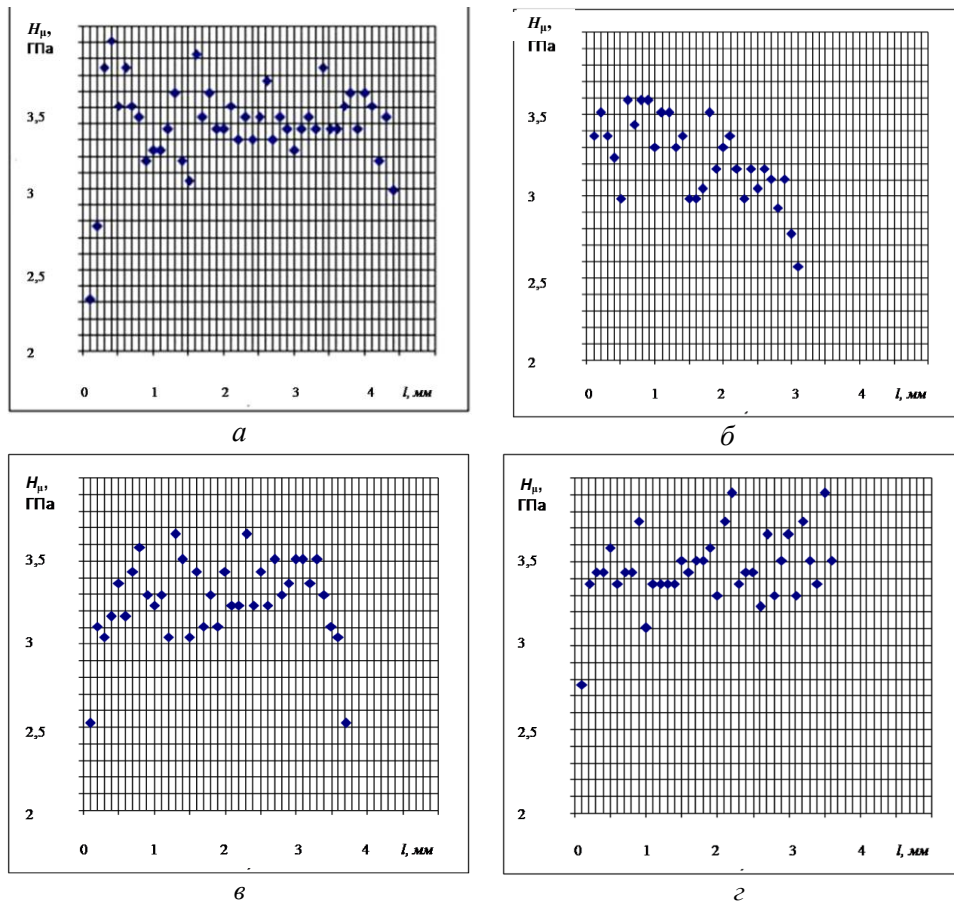


Рис. 5. Розподіл твердості по перерізу кільця в зоні II в місці вигину: *a* — верхній; *б* — нижній; *в* — лівий; *г* — правий сегменти.

Для встановлення зв'язку між твердістю та ступенем пластичної деформації в локальних об'ємах використано рівняння (1). Значення твердості на рис. 4—6 поставлені у відповідність значення пластичної деформації.

З наведених на рис. 7 карт розподілу деформації видно, що вона нерівномірно розподіляється по перерізу труби. Результати розрахунків свідчать про те, що в першій зоні істинна пластична деформація не перевищує $e = 0,2$. Деформація несуттєво змінюється як по перерізу труби, так і в різних ділянках. Карта розподілу в зоні I малоінформативна і на рисунку не наведена. Наявність пластичної складової в цій зоні зумовлена технологічними особливостями переміщення труби з зони заневолення в зону вигину.

В зоні вигину (рис. 7, *a*) найбільшою є деформація в верхній частині труби, яка за рахунок зсувної компоненти сягає дуже великих значень $e \sim 1,0$. На бокових та нижній частинах деформація дещо менша — $e = 0,5—0,7$, але внаслідок зсуву це значення також значно більше, ніж розраховане зі зміни товщини перерізу. За зоною вигину (рис. 7, *б*) деформація в верхній частині труби співрозмірна з деформацією в зоні вигину, але деформації в нижній та бокових стінках зростають до значень $e = 0,8—1,2$.

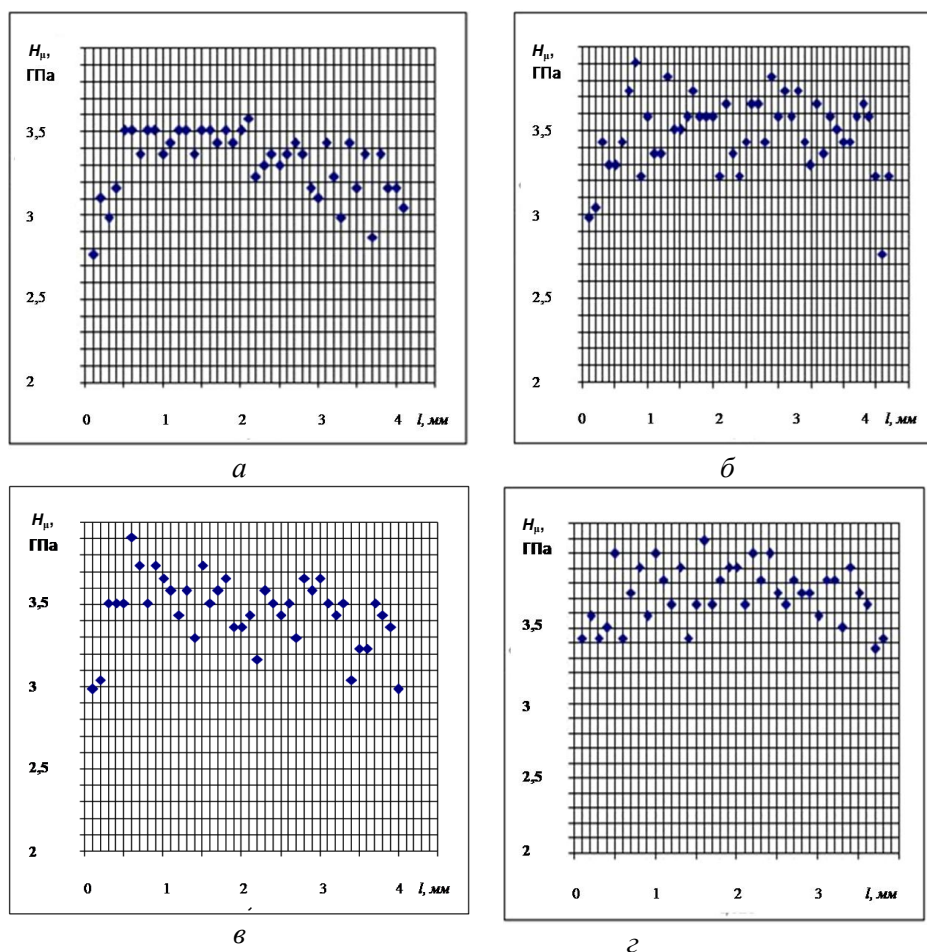


Рис. 6. Розподіл твердості по перерізу кільця після вигину в зоні III: *a* — верхній; *b* — нижній; *v* — лівий; *z* — правий сегменти.

Величини деформації в більшості ділянок зон II та III суттєво вищі, ніж розраховані по зміні товщини стінки труби. Це свідчить про значний внесок зсувної компоненти деформації в структуроутворення відводів в зоні вигину. Значення деформації в цих зонах характеризуються в теорії міцності як великі. За таких деформацій формується наддрібна нанозеренна структура, наявність якої сприяє значному зміцненню холоднодеформованого виробу. Крім того, присутність зсувної компоненти суттєво зменшує негативний вплив структурної анізотропії, що позитивно впливає на деформаційну спроможність.

Структурні дослідження

Оскільки спектр деформаційних станів в перерізі труби є широким, важливою є інформація про вплив ступеня деформації на еволюцію деформаційної структури дослідженого матеріалу. Результати електронно-мікроскопічних досліджень наведені на рис. 8. Видно, що в зоні I спостерігається структура лісу дислокацій та слабкорозорієнтована коміркова структура (рис. 8, *a*), яка характерна для матеріалів, продеформованих до малих ступенів деформації.

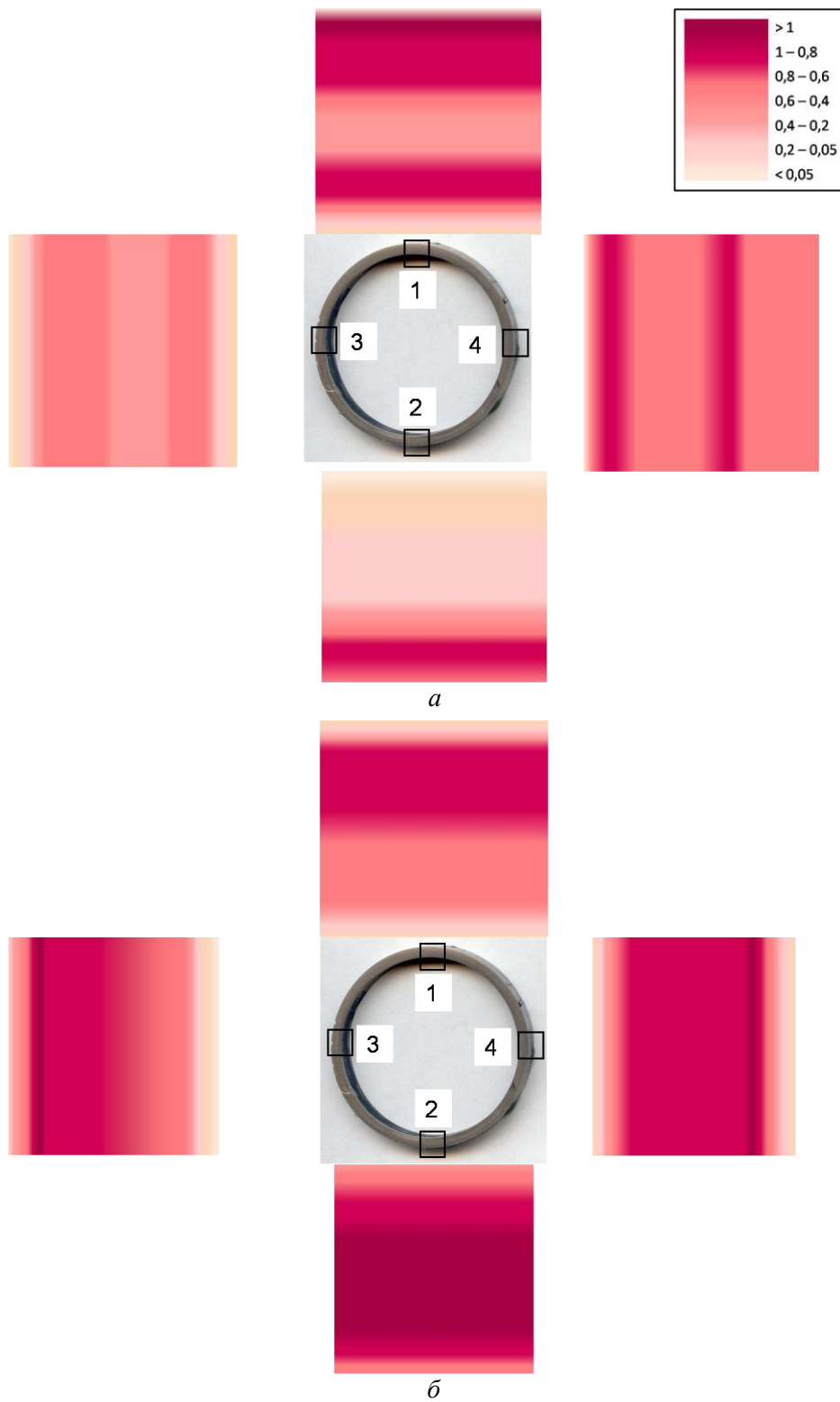


Рис. 7. Карти розподілу деформації в перерізі вигину для зон II (а) та III (б).

Для зони II, де має місце великий градієнт деформації, характерними є коміркові структури. В сильнодеформованих областях це розорієнтовані

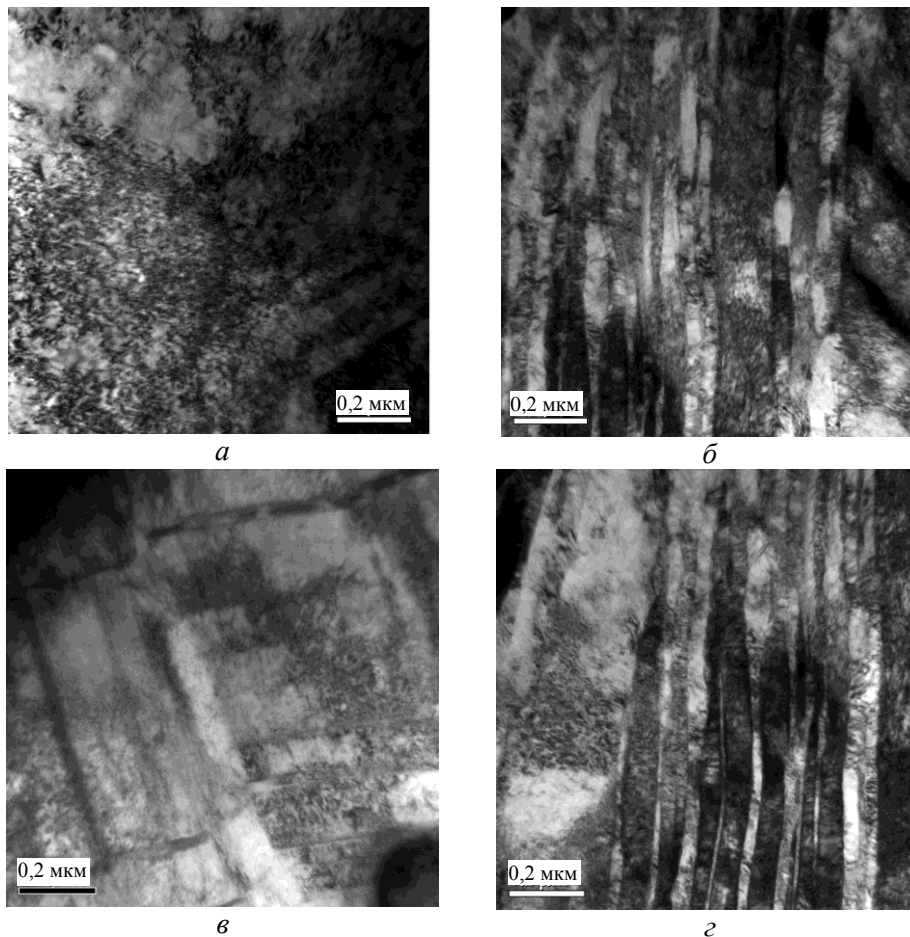


Рис. 8. Деформаційна структура в різних зонах та ділянках вигину: *a* — зона I, ділянка 1; *б* — зона II, ділянка 1; *в* — зона II, ділянка 3; *г* — зона III.

комірки малих розмірів — ~ 200 нм (рис. 8, *б*), які є типовими для верхньої ділянки отвору, та слабкорозорієнтовані комірки розміром 500 нм (рис. 8, *в*), які характерні для бокових ділянок.

Для зони III більш властивим є сильноеформований стан. В цій зоні структура складається переважно з розорієнтованих комірок малого розміру 100—200 нм (рис. 8, *г*).

Таким чином, результати структурних досліджень підтверджують висновок про те, що зсувна компонента деформації, яка виникає при виготовленні холоднодеформованих вигонів, різко збільшує деформаційні характеристики в локальних ділянках трубних виробів, а це веде до формування наноструктурних станів деформаційного походження. Наявність такої структури сприяє підвищенню параметрів зміцнення, які визначалися за результатами вимірювання твердості, та повинна позитивно впливати на службові характеристики.

Висновки

Розроблено методику аналізу розподілу деформації в локальних об'ємах деформованого виробу, яка базується на встановленні зв'язку між

твердістю та деформацією з незалежного експерименту на зразку, випробуваному на одновісний розтяг, та наступному перенесенні цієї інформації на дослідний зразок, де методом “cross-section” визначений розподіл твердості по перерізу.

Встановлено, що пластична деформація в локальних шарах відводів значно перевищує макродеформацію, яка визначається по зміні перерізу стінки труби. Отриманий результат пояснюється великими значеннями зсувної компоненти деформації.

Проведено порівняльний аналіз зміни деформації в різних зонах для різних ділянок труби. Показано, що в першій зоні істинна пластична деформація не перевищує $e = 0,2$. В зоні вигину найбільша деформація — в верхній частині труби $e \sim 1,0$. На бокових та нижній частинах $e = 0,5—0,7$. Через зсув це значення значно більше, ніж розраховане зі зміни товщини перерізу. На ділянці за зоною вигину деформації нижньої та бокових стінок зростають до $e = 0,8—1,2$.

Результати структурних досліджень підтверджують висновок про те, що зсувна компонента деформації, яка виникає при виготовленні холоднодеформованих вигинів, різко збільшує деформаційні характеристики в локальних ділянках трубних виробів, а це сприяє формуванню наноструктурних станів деформаційного походження. В зоні вигину спостерігається розорієнтована коміркова структура деформаційного походження з розміром комірок 100—200 нм.

1. *Розенберг О. А.* Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы / [О. А. Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Грушко и др.] // — Вінниця : УНІВЕРСУМ. 2004. — 142 с.
2. *Валиев Р. З.* Нанокристаллические материалы, полученные путем интенсивной пластической деформации / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М. : Логос, 2000 — 272 с.
3. *Луговской Ю. Ф.* Механические свойства и механизмы разрушения слоистого технически чистого железа, полученного совместной прокаткой лент / [Ю. Ф. Луговской, Ю. Н. Подрезов, В. А. Назаренко и др.] // Порошковая металлургия. — 2017. — № 5/6. — С. 10—19.
4. *Подрезов Ю. М.* Зміна твердості по глибині дорожки тертя деформованої сталі 20Х / [Ю. М. Подрезов, К. Е. Гринкевич, М. Д. Рудик та ін.] // Электронная микроскопия и прочность материалов. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2015. — Вып. 21. — С. 4—43.
5. *Сегал В. М.* Процессы пластического структурообразования металлов / [В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов и др.]. — Минск : Наука и техника, 1994. — 232 с.
6. *Beigelzimmer Y.* On ultrafine grained materials: properties and structure / Y. Beigelzimmer, V. Varyukhin, D. Orlov // Proc. of the Second Internat. Symp. — Los Alamos Nat. Lab. Edit., 2002. — P. 234—238.
7. *Розенберг О. А.* Технологическая механика деформирующего протягивания / [О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин и др.]. — Воронеж : Изд-во Гос. технол. акад. — 2001. — 112 с.
8. *Розенберг О. А.* Формирование градиентной наноструктуры на поверхности деталей методом пластического деформирования / [О. А. Розенберг, Н. В. Новиков, С. Е. Шейкин и др.] // Металлофиз. новейшие технологии. — 2004. — 26, № 11. — С. 1493—1500.

Структура и механические свойства трубных отводов, полученных методом холодной деформации

Ю. Н. Подрезов, Н. И. Даниленко, Н. В. Минаков,
В. И. Даниленко, С. Е. Шейкин, С. Ф. Студенец

Проанализировано распределение твердости и пластической деформации в разных участках трубного отвода: в зоне заневолья (до выгиба), в области выгиба и в области отвода после зоны выгиба. Проведен сравнительный анализ изменения деформации в этих зонах. В первой зоне истинная пластическая деформация не превышает $e = 0,2$. В зоне выгиба наибольшая деформация — в верхней части трубы — $e \sim 1$. На боковых и нижнем участках $e = 0,5–0,7$. На участке за зоной выгиба деформации нижней и боковых стенок возрастают до $e = 0,8–1,2$. Результаты электронно-микроскопических исследований демонстрируют наличие дисперсной (200 нм) разориентированной ячеистой структуры в зоне выгиба.

Ключевые слова: трубные выгибы, твердость, пластическая деформация, нанозернистая структура.

Structure and mechanical properties of tube drains obtained by cold deformation technology

Yu. M. Podrezov, M. I. Danylenko, M. V. Minakov,
V. I. Danylenko, S. Ye. Sheykin, S. F. Studenec

Distribution of hardness values and plastic deformation in different section of tube drain was analyzed. Deformation charts at cross-sections in bend and after bend zones were designed. In zone before bending plastic deformation is not more than $e = 0,2$. In bending zone highest deformation value $e \sim 1,0$ was fixed in upper part, but in inner and lateral part the values essentially less: $e = 0,5–0,7$. In after bend zone increasing of plastic deformation these parts of tube up to: $e = 0,8–1,2$ is observed. TEM experiments demonstrate nanostructure with grain size $d = 200$ nm.

Keywords: tube drain, hardness, plastic deformation, nanograin structure.