

Вплив деформаційної субструктури на механічні властивості сталі 20Х

М. І. Даниленко, Ю. М. Подрезов, В. А. Назаренко,
В. І. Даниленко, С. О. Фірстов, Н. М. Марченко

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: yupodrezov@mail.ru

Досліджено вплив ступеня пластичної деформації на структурні перебудови та механічні властивості сталі 20Х, продеформованої вальцюванням при кімнатній температурі. За результатами випробувань на розтяг проаналізовано структурну чутливість стандартних механічних характеристик. Показано чутливість параметрів пластичності до зміни структурних станів. Вплив дислокаційної структури на параметри деформаційного зміцнення вивчали в процесі випробувань на стиснення. Встановлено наявність стадії лінійного зміцнення та продемонстровано чутливість коефіцієнта лінійного зміцнення до ступеня попередньої деформації та напрямку прикладання стискаючої напруги.

Ключові слова: ступінь деформації дислокаційна структура, міцність, пластичність.

Вступ

Деформаційна технологія є однією з найбільш перспективних з точки зору створення наноструктурованих тривимірних виробів промислових розмірів з високим рівнем міцності. Структурні дослідження, що виконані на чистих металах, дозволили отримати узагальнюючу картину структурних перебудов, які відбуваються при пластичній деформації [1]. Встановлений зв'язок між структурними змінами та механічними властивостями деформованих матеріалів дає можливість розкрити фізичну природу деформаційного зміцнення та визначити шляхи створення надміцних матеріалів деформаційного походження [2]. З одного боку, такі шляхи пов'язані з оптимізацією існуючих та створенням нових технологічних схем деформування [3], а з іншого — з деформуванням конструкційних сплавів з підвищеною міцністю, що дозволить поєднати структурне зміцнення хімічної природи з дислокаційними механізмами зміцнення [4]. Оскільки найбільш поширеними сплавами конструкційного призначення є вуглецеві сталі, вивчення механізмів структуроутворення в деформованих сталях є актуальною проблемою фізики міцності.

Метою даної роботи є дослідження впливу ступеня деформації на еволюцію структури та механічні властивості промислової феритоперлітної сталі 20Х.

Матеріали та методика

Вихідну структуру сталі отримано відпалом при температурі 950 °С. Аналіз вихідного структурного стану показав, що розмір феритних зерен сягає 10 мкм. Перлітні зерна (приблизно 30%) складаються з цементиту

© М. І. Даниленко, Ю. М. Подрезов, В. А. Назаренко, В. І. Даниленко,
С. О. Фірстов, Н. М. Марченко, 2015

та феритних прошарків (рис. 1, *a*). Цементит має товщину 250 нм, прошарки фериту — 300—500 нм. Цементит формується переважно у вигляді пластин, хоча подекуди зустрічаються кулясті виділення. Вихідні зразки деформували вальцюванням при кімнатній температурі. Логарифмічну деформацію прокатаних зразків визначали за формулою $e = \ln(h_n/h_k)$, де h_n та h_k — відповідно початкова та кінцева висота зразка, яка для досліджених структурних станів сягала значень: 1 — 1,51; 2 — 1,21; 3 — 0,82; 4 — 0,43; 5 — 0,28; 6 — 0,20; 7 — 0,1. Деформаційну субструктуру досліджували методом трансмісійної мікроскопії (ТЕМ) на приладі JSM-100 СХ фірми "Jeol". Механічні випробування проводили на універсальній машині "Ceramtест" з автоматичною реєстрацією результатів. Експерименти на одновісний розтяг здійснювали на стандартних циліндричних зразках діаметром 3 мм. Напрямок розтягування співпадав з напрямком прокатки. Тестування на одновісне стиснення виконували на прямокутних зразках 3x3x4,5 мм. Механічні властивості визначали при стисненні зразків в трьох взаємно перпендикулярних напрямках відносно напрямку прокатки.

Результати досліджень

Характерні структурні стани деформованого матеріалу наведені на рис. 1, *b—i*. Аналіз впливу ступеня деформації на структурні перебудови в сталі 20Х показав, що закономірності структуроутворення в малолегованих вуглецевих сталях в значній мірі співпадають з загальновідомими положеннями стосовно впливу ступеня деформації на еволюцію деформаційної структури. Перш за все, це стосується зміни структурних станів у феритних зернах. При цьому повторюються не тільки якісні зміни, які добре відомі для армко-заліза, але й кількісні значення деформації, що відповідають зміні структурних станів. Зразки, продеформовані до деформації 0,1 та 0,2, слід віднести до хаотичних дислокаційних структур та слабкорозорієнтованих комірок. Зразки, що продеформовані до деформацій 0,82; 1,21 та 1,51, мають розорієнтовані нанозерна в фериті.

Одночасно слід відзначити деякі особливості структуроутворення в деформованих ферито-перлітних сталях. По-перше, структуроутворення в перліті суттєво відстає від структурних змін у феритних зернах. Це можна пояснити тим, що мікротвердість зерен перліту приблизно на третину вища, ніж в зернах фериту. Аналіз кривої зміцнення феритної сталі при прикладанні однакового напруження до зразка показав, що перлітні зерна деформуються при напруженні, яке відповідає пластичній деформації фериту 10—20%. Це відставання залишається на всіх стадіях деформації, що спостерігається в експериментах, проведених методом ТЕМ. По-друге, важливою особливістю структуроутворення в перліті є зародження тріщин в цементиті в структурних станах, при яких скупчення дислокацій в феритних прошарках перліту утворюють концентрацію напружень біля цементитних пластин.

Стадійність структурних змін та особливості структуроутворення в ферито-перлітних сталях враховано нами при аналізі впливу ступеня деформації на механічні властивості матеріалу. Умовні та істинні діаграми навантаження прокатаних зразків, які були випробувані на одновісний розтяг, наведені на рис. 2.

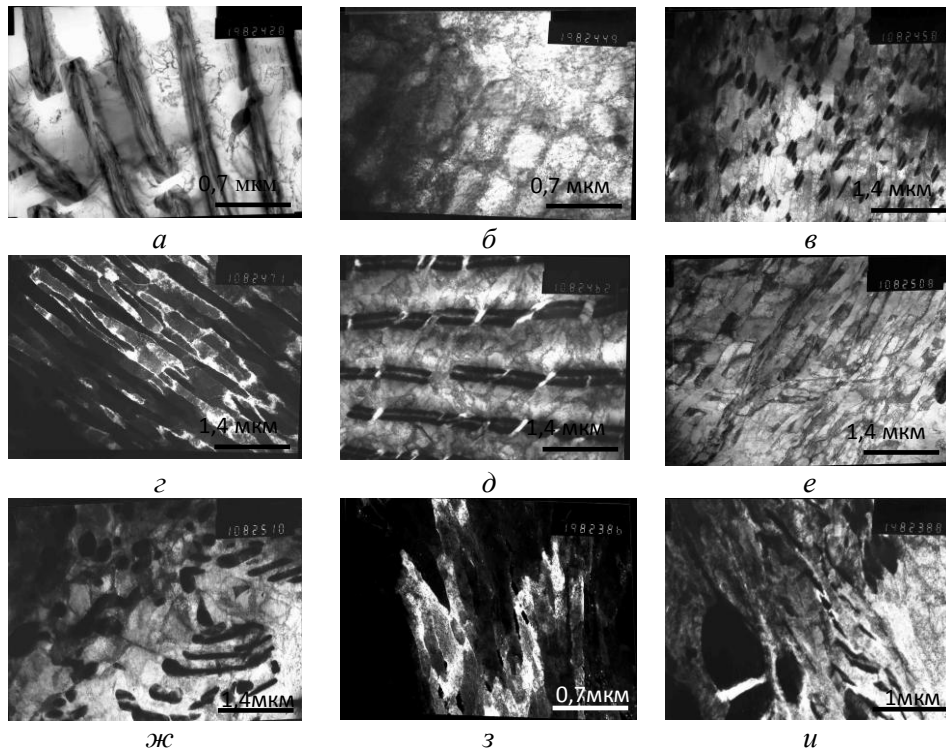


Рис. 1. Електронно-мікроскопічні знімки (ТЕМ) вихідної структури сталі 20Х (а) та зразків, продеформованих до різних ступенів деформації ϵ : 0,2 (б, в); 0,43 (г, д); 0,82 (е, ж); 1,52 (з, и); б, г, е, з — феритна складова; в, д, ж, и — перлітна складова.

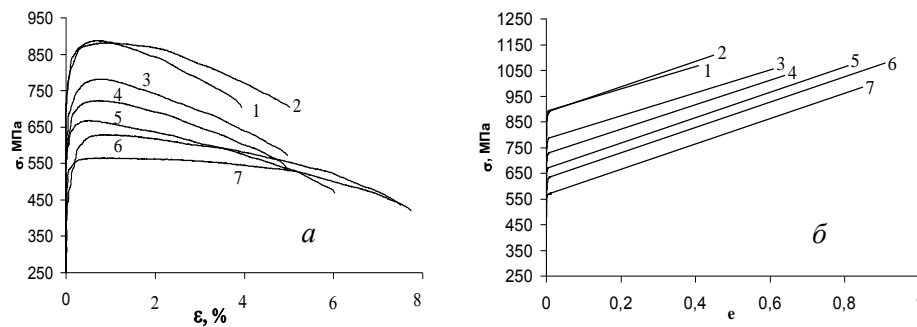


Рис. 2. Умовні (а) та істинні (б) діаграми навантаження при розтязі зразків сталі 20Х, прокатаних до різних ступенів деформації ϵ : 1 — 1,51; 2 — 1,21; 3 — 0,82; 4 — 0,43; 5 — 0,28; 6 — 0,20; 7 — 0,1.

З умовних діаграм розраховано стандартні механічні характеристики: границі плинності σ_T та міцності σ_B , відносне звуження ψ (%), рівномірне $\epsilon_{\text{ривн}}$ та загальне $\epsilon_{\text{заг}}$ подовження. З істинних діаграм визначається істинна руйнуюча напруга $\sigma_{\text{рi}}$, істинна деформація до руйнування $\epsilon_{\text{рi}}$, коефіцієнт лінійного зміцнення або модуль пластичності θ — кут нахилу на лінійній ділянці істинної діаграми зміцнення, яка відповідає інтервалу деформацій від моменту шийкоутворення до моменту руйнування. Результати випробувань на одновісний розтяг наведені в таблиці. Механічні властивості, що

Механічні властивості деформованих зразків сталі 20Х

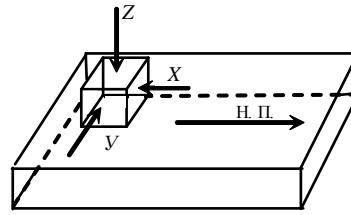
Номер зразка	$e_{\text{прох}}$	σ_{T} , МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{пi}}$, МПа	e_{fr}	ψ , %	θ , МПа	$\epsilon_{\text{рiвн}}$, %	$\epsilon_{\text{заг}}$, %
1	1,51	849	886	1066,6	0,41	32,8	430,5	0,826	3,95
2	1,21	835	880	1108,4	0,45	36,1	498,9	1,044	5
3	0,82	734	780	1053,9	0,61	46,7	443,8	0,922	4,95
4	0,43	690	721	1030,8	0,64	48,4	480,6	0,883	4,98
5	0,28	651	666	1067,2	0,81	55,9	493,9	0,6707	6
6	0,2	592	628	1078,6	0,91	59,6	493,7	1,149	7,5
7	0,1	552	564	983,9	0,85	57,7	494,4	1,286	7,7

характеризують зміцнення: границі плинності та міцності, монотонно збільшуються із зростанням ступеня деформації і не демонструють значних аномалій при зміні структурного стану, подібно до того, як веде себе істинна діаграма навантаження маловуглецевої сталі [5]. Інші характеристики змінюються з деформацією за більш складним законом.

Деформація до руйнування зменшується при збільшенні деформації прокатки. Слід зазначити, що характер зміни цього параметра для сталі суттєво відрізняється від поведінки деформованого титану, де ця характеристика є незмінною [6]. До того ж спостерігаються суттєві відмінності в шийкоутворенні. В титані в момент руйнування шийка формується у вигляді еліпса, довга вісь якого розташована в напрямку стискання, тоді як у залізі анізотропія шийкоутворення відсутня. Ці відмінності зумовлені різним механізмом руйнування цих матеріалів: в титані ямкове руйнування має місце незалежно від ступеня попередньої деформації, в сталях відбувається розшарування шляхом розтріскування в площині, паралельній площині прокатки. Схильність до розтріскування зменшує граничну деформацію, а наявність переважного напрямку розтріскування компенсує підвищену пластифікацію шийки в цьому напрямку і нівелює умови утворення еліпса.

Характер зміни рівномірної деформації $\epsilon_{\text{рiвн}}$ є немонотонним. Як видно на рис. 2, а, діаграми мають дві короткі ділянки інтенсивного і слабого зміцнення з виходом навантаження на насичення. В зв'язку з цим в матеріалі реалізується мала рівномірна деформація. Її величина зменшується на ранніх стадіях пластичної деформації з $\epsilon_{\text{рав}} = \sim 1,2\%$ при $e = 0,1$ до $\epsilon_{\text{ран}} = \sim 0,6\%$ при $e = 0,28$ і потім збільшується і стабілізує своє значення на рівні $\epsilon_{\text{ран}} \sim 1,0\%$ при великих ступенях деформації (таблиця). Такий самий характер зміни параметра $\epsilon_{\text{рав}}$ від ступеня попередньої деформації виявлений нами раніше для титану [6]. Відмічена механічна поведінка зумовлена особливостями реновації джерел дислокацій на стадії мікропластичності. При трансляційному механізмі деформації збільшення кількості дефектів прискорює зміцнення на ділянці мікропластичності. А при включенні ротаційної моди деформації потрібна додаткова стадія мікропластичності з меншим коефіцієнтом зміцнення, де відбувається адаптація дислокаційних механізмів початкових стадій повторної деформації до дисклінаційних механізмів, характерних для розвинутої деформації. Саме через це і для сталі і для титану характерно зменшення рівномірної деформації в зразках з хаотичною з слабкорозорієнтованою

Рис. 3. Схема розташування зразка при стисненні з вальцьованого листа.



комірковою структурою, але у зразках з розорієнтованою наноструктурою рівномірна деформація збільшується.

На жаль, коротка стадія рівномірної деформації та швидке формування шийки утруднює аналіз процесу деформаційного зміцнення попередньо деформованих сталей при розтязі. Тому для більш ретельного дослідження цих процесів нами пропонується використовувати випробування зразків на одновісне стиснення. При аналізі механічної поведінки деформованих зразків цей метод випробувань має безперечні переваги перед одновісним розтягом. Виконання найпростіших вимог до геометрії зразків (паралельність торцевих граней) і розмірів (співвідношень між шириною b і висотою h зразка $b/h = 1-1,5$) дозволяє отримати коректні значення параметрів зміцнення в діапазоні істинних деформацій $e = 0-0,3$, що приблизно на порядок вище, ніж при розтязі. Використання малих зразків прямокутної форми дозволяє достатньо просто проводити порівняльний аналіз механічної поведінки деформованого матеріалу в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. На зразках сталі 20X параметри зміцнення визначали в напрямках X , Y і Z , пов'язаних з напрямком прокатки (НП) (рис. 8).

Обробка первинних кривих навантаження дозволила отримати істинні криві зміцнення $\sigma-e$ для зразків, продеформованих до різних ступенів деформації, для напрямків X , Y і Z (рис. 4). Порівняльний аналіз діаграм навантаження свідчить про те, що незалежно від ступеня попередньої деформації всі зразки, продеформовані в напрямку Z , швидше (при меншій деформації) досягають напруження насичення, ніж зразки, що стиснені в інших напрямках, а зразки, продеформовані в напрямку Y , в свою чергу, зміцнюються значно швидше, ніж в напрямку X .

Перерахунок цих кривих (рис. 4) в координатах $d\sigma_{icr}/de-e$ дозволяє визначити швидкість зміцнення деформованого матеріалу при заданому ступені попередньої деформації. Якщо на один графік нанести залежності $d\sigma_{icr}/de-e$ та $\sigma_{icr}-e$, то, згідно з умовою Консидера $d\sigma_{icr}/de = \sigma_{icr}$, точка

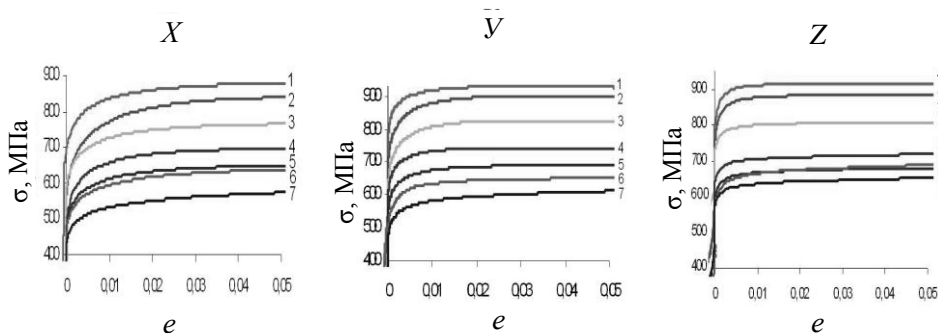


Рис. 4. Істинні криві зміцнення зразків сталі 20X, прокатаних до ступенів деформації 1,51 (1), 1,21 (2), 0,82 (3), 0,43 (4), 0,28 (5), 0,20 (6), 0,1 (7), випробуваних на стиснення в напрямках X , Y та Z .

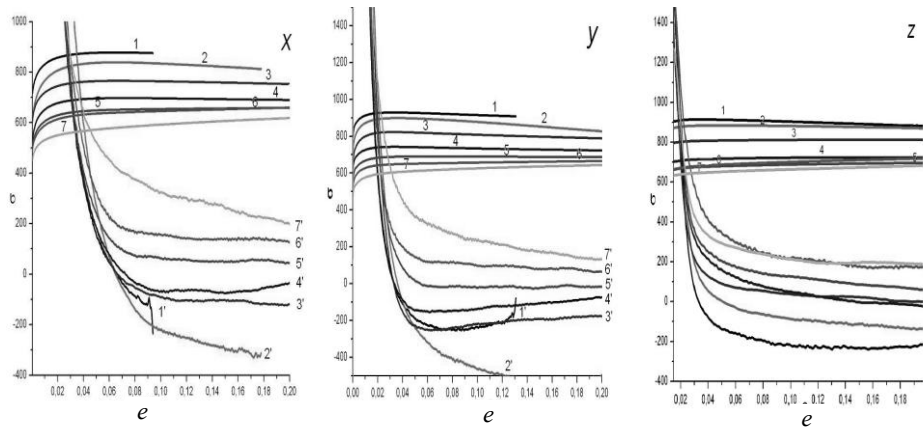


Рис. 5. Істинні криві зміцнення та їх похідні зразків сталі 20X, прокатаних до ступенів деформації 1,51 (1), 1,21 (2), 0,82 (3), 0,43 (4), 0,28 (5), 0,20 (6), 0,1 (7) та випробуваних на стиснення в напрямках X , Y , Z .

перетину цих кривих повинна відповідати деформації, за якої відбувається локалізація при розтязі. На рис. 5 наведено експериментальні криві, з яких визначались ці точки для зразків сталі 20X, продеформованих до різних ступенів деформації та випробуваних на стиснення в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

За даними на рис. 5 побудовано залежності, які демонструють вплив попередньої деформації на напруження (рис. 6, *a*) та деформацію (рис. 6, *б*) в точці перетину, там же наведено відповідні залежності, що отримані при одновісному розтязі. Результати досліджень показали практичне співпадіння значень напруження при розтязі і стисненні, що свідчить про відсутність SD-ефекту при зміні знаку навантаження. Результати дослідження впливу попередньої деформації на момент локалізації вказують на те, що характер залежностей, отриманих при стисненні, практично співпадає з такими, що одержані при розтязі, але абсолютні значення відповідної деформації при стисненні виявляються значно вищими, ніж при розтязі. До того ж деформація в напрямку X значно вища, ніж в напрямках Z та Y . Для встановлення причин такої різниці проведено порівняльний аналіз кривих зміцнення та їх похідних поблизу точки локалізації зразків, які продеформовані до однакового ступеня попередньої деформації та випробувані в різних напрямках на стиснення та розтяг.

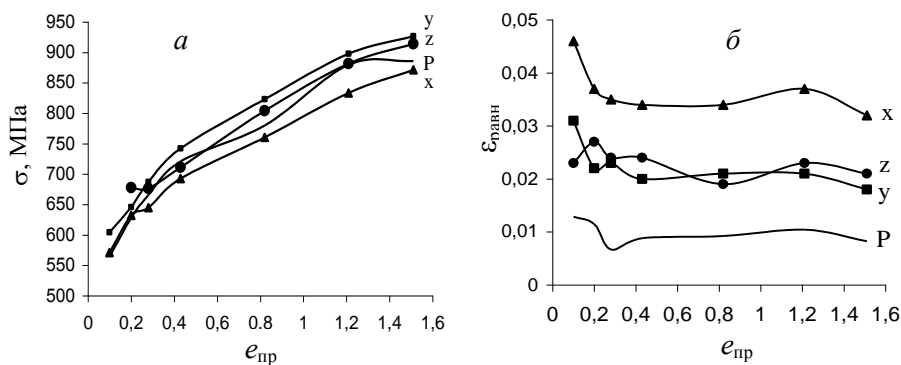


Рис. 6. Вплив попередньої деформації на напруження (*a*) та деформацію (*б*) в точці перетину кривих $\sigma_{\text{ист}}-e$ та $d\sigma_{\text{ист}}/de-e$.

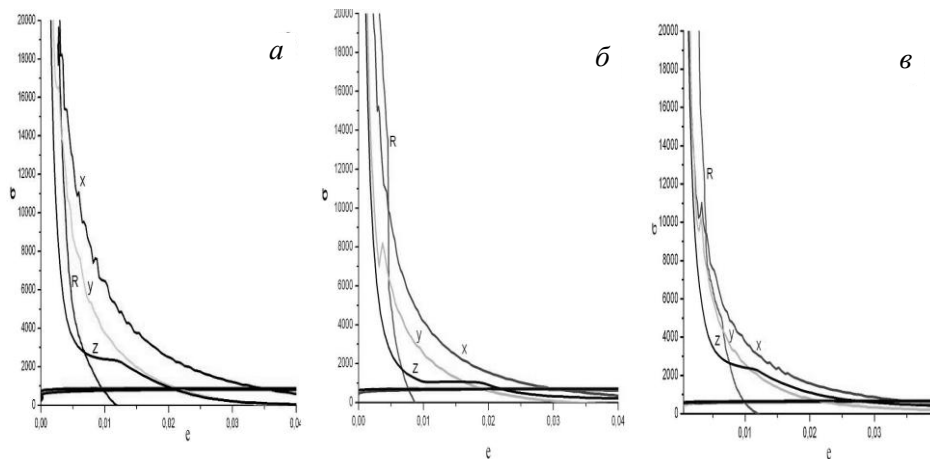


Рис. 7. Залежності $\sigma_{\text{ист}}—\epsilon$ та $d\sigma_{\text{ист}}/d\epsilon—\epsilon$ зразків сталі 20X, попередньо продеформовані до ступенів 1,21 (а), 0,43 (б), 0,2 (в) та випробуваних на стиснення в напрямках Z, Y, X та на розтяг — R.

Результати експериментів на зразках, продеформованих до ступенів деформації 1,21; 0,43 та 0,2, наведені на рис. 7.

Ці графіки дозволяють більш детально проаналізувати деякі особливості поведінки кривих зміцнення в інтервалі деформацій, що відповідають умовам локалізації. Спостерігається однакова залежність $d\sigma_{\text{ист}}/d\epsilon—\epsilon$ для різних ступенів попередньої деформації. На початкових стадіях деформації зразки, що стикались в напрямку Z, найшвидше наближаються до точки локалізації, потім — зразки, що стиснені в напрямку Y, і найповільніше — в напрямку X. Проте при наближенні до точки локалізації швидкість зміцнення в напрямку Z різко уповільнюється, що може свідчити про зміну механізму деформації поблизу цієї точки. В двох інших напрямках уповільнення значно менше. В цьому сенсі найбільш цікава поведінка зразка, який випробуваний на розтяг. Спочатку він зміцнюється найповільніше, проте при наближенні до точки локалізації цей зразок не демонструє уповільнення і першим перетинає криву зміцнення. Таким чином, виявляється своєрідний SD-ефект поблизу точки локалізації, зумовлений різними законами зміцнення при розтязі та стисненні. Порівняння даних, наведених на рис. 7, вказує на те, що встановлені особливості механічної поведінки деформованих матеріалів поблизу точки Консидера є характерними для всіх досліджених ступенів деформації, тобто для різних структурних станів.

Результати, представлені на рис. 8, дозволяють проаналізувати вплив попередньої деформації на коефіцієнт лінійного зміцнення при стисненні. З наведених даних випливає, що швидкість зміцнення стає постійною при стисненні деформованих зразків приблизно на 5%. Значення коефіцієнта лінійного зміцнення при всіх деформаціях і у всіх напрямках є низьким. Його залежність від ступеня деформації для зразків сталі 20X, випробуваних на стиснення в трьох напрямках, наведено на рис. 8. Спостерігається зменшення коефіцієнта θ зі збільшенням ступеня попередньої деформації. Подібний ефект виявлено нами раніше [6] при дослідженні впливу ступеня деформації на деформаційне зміцнення прокатаного титану. Проте, якщо у випадку титану величини коефіцієнта

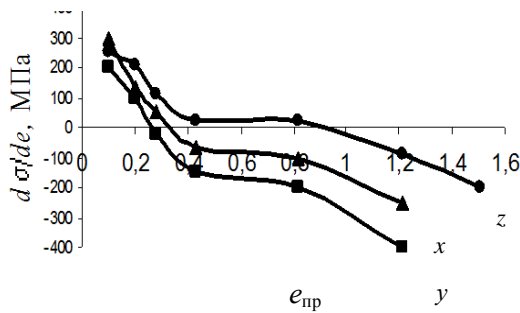


Рис. 8. Залежності коефіцієнтів лінійного зміцнення від ступеня деформації для зразків сталі 20Х (а) і технічно чистого титану (б), випробуваних на стиснення в трьох напрямках.

зміцнення лише наближаються до нульового значення, в досліджуваній сталі 20Х в сильнодеформованих станах коефіцієнт лінійного зміцнення має від'ємні значення. Оскільки для існування такого ефекту немає фізичних обмежень, можемо вважати його наявність особливістю механічної поведінки досліджуваної сталі. Зменшення коефіцієнта θ із збільшенням деформації пояснювалось текстурними перебудовами в деформованих зразках і розташуванням найбільш сприятливих площин ковзання в напрямку прокатки.

Таким чином, випробування на стиснення дозволяють отримати додаткову інформацію про особливості зміцнення попередньо деформованих матеріалів і порівняти механічну поведінку цих матеріалів в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Висновки

Закономірності структуроутворення в малолегованих вуглецевих сталях в значній мірі співпадають з загальними положеннями стосовно впливу ступеня деформації на еволюцію деформаційної структури. У феритних зернах повторюються не тільки якісні зміни, що добре відомі для армко-заліза, але й кількісні, що відповідають зміні структурних станів. Еволюція деформаційної структури в перліті суттєво відрізняється від структурних змін в феритних зернах і це відставання залишається на всіх стадіях деформації. Важливою особливістю структуроутворення в перліті є зародження тріщин в цементиті при скупченні дислокацій в феритних прошарках перліту.

Напруження зміцнення зростає зі ступенем деформації монотонно, що зумовлено збільшенням густини деформаційних дефектів в феритній матриці. Величина рівномірної деформації змінюється зі ступенем деформації немонотонно, що пояснюється чутливістю цих характеристик до стадійності змін розподілу деформаційних дефектів.

Закономірності деформаційного зміцнення попередньо деформованих зразків проаналізовано за результатами випробування на одновісне стиснення. Згідно з умовою Консидера визначено напруження та деформацію, що відповідають моменту локалізації, та встановлено чутливість цих параметрів до ступеня деформації та напрямку стиснення. Результати досліджень продемонстрували співпадіння значень напруження при розтязі та стисненні, що свідчить про відсутність SD-ефекту при зміні знаку навантаження. Хоча абсолютне значення відповідної деформації при стисненні виявляється дещо вищим, характер залежностей, отриманих при стисненні, практично співпадає з даними, отриманими при розтязі. Це вказує на єдині механізми впливу вихідної деформаційної субструктури на формування кривих зміцнення при розтязі та стисненні.

Криві деформаційного зміцнення при стисненні мають лінійну стадію. Встановлено, що коефіцієнт лінійного зміцнення чутливий до ступеня деформації і для сильнодеформованих станів може мати від'ємні значення. Спостерігається подібний характер залежності цього коефіцієнта від ступенів деформації для трьох взаємно перпендикулярних станів.

1. Трефилов В. И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. — К. : Наук. думка, 1975. — 315 с.
2. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / [В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский и др.]; Под ред. В. И. Трефилова. — К. : Наук. думка, 1987.
3. Сегал В. М. Процеси пластичного структуроутворення металів / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов. — Мінськ : Наука і техніка, 1994. — 232 с.
4. Борисовская Е. М. Динамика структурных перестроек с учетом процесса зарождения дислокаций / Е. М. Борисовская, Ю. Н. Подрезов, С. А. Фирстов // Электронная микроскопия и прочность материалов. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2007. — Вып. 14. — С. 3—11.
5. Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. — М. : Машиностроение, 1968. — 131 с.
6. Подрезов Ю. Н. Анализ влияния повторной деформации на механическое поведение образцов титана, продеформированных методом винтовой экструзии / Ю. Н. Подрезов, В. И. Даниленко // Электронная микроскопия и прочность материалов. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2009. — Вып. 16. — С. 67—78.

Влияние деформационной субструктуры на механические свойства стали 20X

Н. И. Даниленко, Ю. Н. Подрезов, В. А. Назаренко, В. И. Даниленко,
С. А. Фирстов, Н. М. Марченко

Исследовано влияние степени пластической деформации на структурные преобразования и механические свойства стали 20X, продеформированной вальцеванием при комнатной температуре. По результатам испытаний на растяжение проанализирована структурная чувствительность стандартных механических характеристик. Показана чувствительность параметров пластичности к изменению структурных состояний. Испытания на сжатие использовались для изучения влияния дислокационной структуры на параметры деформационного упрочнения. Установлено наличие стадии линейного упрочнения и продемонстрирована чувствительность коэффициента линейного упрочнения к степени предварительной деформации и направлению приложения напряжения сжатия.

Ключевые слова: степень деформации, дислокационная структура, прочность, пластичность.

The influence of deformation substruction on mechanical properties of steel 20X

N. I. Danilenko, Yu. N. Podrezov, V. A. Nazarenko,
V. I. Danilenko, S. A. Firstov, N. M. Marchenko

This work is dedicated to the analysis of the influence of the degree of plastic deformation on structural transformations and mechanical properties of steel 20X, has been deformed by rolling at room temperature. Structural sensitivity of standard mechanical characteristics was analysed according to the results of a tensile test. The sensitivity of the parameters of plasticity to changes structural states was demonstrated. Compression testing was used to study the influence of dislocation structure on the parameters of strain hardening. The presence of the stage of linear hardening and demonstrated the sensitivity of the coefficient of linear hardening to the degree of pre-strain and the direction of compressive stress.

Keywords: the degree of deformation, dislocation structure, strength, plasticity.