

**М. І. Даниленко, Ю. М. Подрезов, С. О. Фірстов**

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Київ, Україна*

### **ВПЛИВ СТУПЕНЮ ДЕФОРМАЦІЇ НА СТРУКТУРНІ ПЕРЕБУДОВИ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ 20Х**

*Проаналізовано вплив ступеню пластичної деформації на структурні перебудови та механічні властивості сталі 20Х, продеформованої вальцюванням при кімнатній температурі.*

*Ключові слова: ступень деформації, дислокаційна структура, міцність, пластичність.*

**Н. И. Даниленко, Ю. Н. Подрезов, С. А. Фирстов.**

### **ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20Х.**

*Проанализировано влияние степени пластической деформации на структурные перестройки и механические свойства стали 20Х, прокатанной при комнатной температуре.*

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

**M. Danylenko, Yu. Podrezov, S. Firstov.**

### **EFFECT OF DEFORMATION DEGREE ON STRUCTURE TRANSFORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOWCARBON STEEL 20X.**

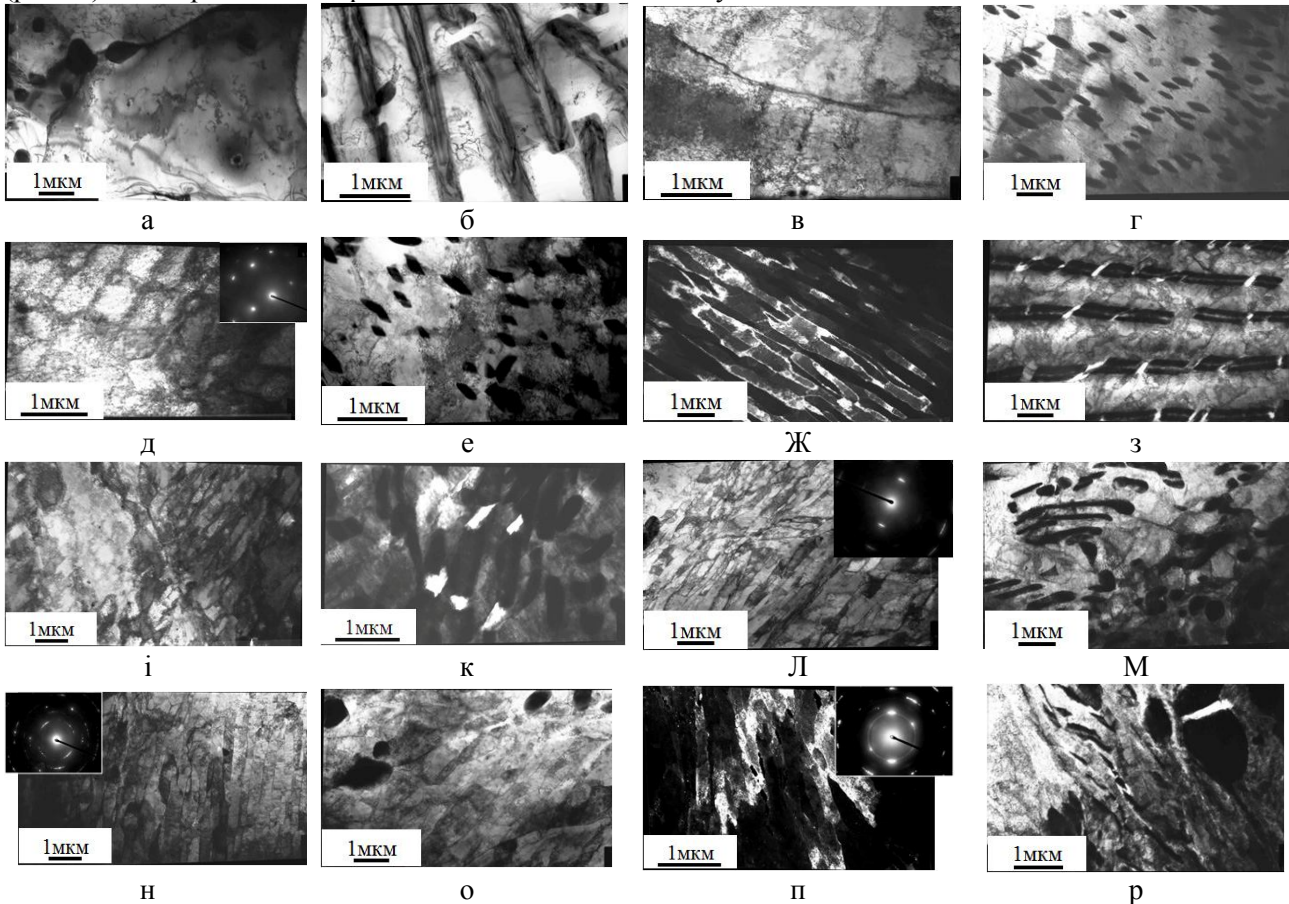
*Effect of plastic deformation degree on structure transformation and mechanical properties of lowcarbon steel 20X rolled at room temperature have been analyzed.*

*Key words: the deformation degree, dislocation structure, strength, ductility*

**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 ступеню деформації на еволюцію структури та механічні властивості промислової ферито-перлітної сталі 20Х.

**Матеріали та методика.** Вихідна структура сталі була отримана шляхом відпаду при температурі 950 С. Аналіз вихідного структурного стану (рис. 1 а, б) вказує на те, що розмір феритних зерен сягає 10 мкм. Перлітні зерна складаються з цементиту та феритних прошарків. Цементит має товщину 250 нм, прошарки фериту – 300 - 500 нм. Цементит формується переважно у вигляді пластин, хоча подекуди зустрічаються кулясті виділення. Вихідні зразки деформувались вальцюванням при кімнатній температурі. Логарифмічна деформація прокатаних зразків визначалась за формулою  $\epsilon = \ln(h_n/h_k)$ , 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. Дослідження деформаційної субструктури виконувались методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на мікроскопі JEM-100 СХ. Механічні випробування проводились на універсальній випробувальній машині "Сeramtest" з автоматичною реєстрацією результатів випробувань. Експерименти на одновісний розтяг виконувались на стандартних циліндричних зразка діаметром 3 мм. Напрямок розтягування співпадав з напрямком прокатки. Тестування на одновісне стиснення проводилось на прямокутних зразках 3x3x4,5 мм. Механічні властивості визначались шляхом стиснення зразків в трьох взаємно перпендикулярних напрямках відносно напрямку прокатки. Випробування на тріщиностійкість проводили за методикою трьохточкового згину при рідкому азоті. Тестування на твердість проводили на приладі ПМТ-3 в трьох взаємно перпендикулярних площинах.

**Результати досліджень.** Деформаційна субструктура досліджена методом ТЕМ. Найбільш характерні структурні стани наведені на рис.1. Деформація зразка до  $\epsilon=0,1$  призводить до суттєвого підвищення густини дислокацій у феритних зернах, де формуються дислокаційні скупчення (рис. 1в) та практично не змінює структуру перліту (рис. 1г). Результати структурного аналізу вказують на те, що на початкових етапах прокатки деформуються лише феритні зерна. Це узгоджується з виглядом кривої деформаційного зміцнення. При збільшенні ступеню деформації до  $\epsilon=0,2$  структурні зміни спостерігаються як у фериті, так і в перліті. При цьому, структурні перебудови в перліті суттєво відстають від структурних змін, що відбуваються в фериті. У феритних прошарках перліту спостерігаються скупчення дислокацій, у зернах фериту скупчення дислокацій перебудовуються у коміркову структуру (рис. 1д). Характерна розпорощена структура границь комірок та мікродифракція з ознаками тяжів вказують на те, що комірки мають переважно малокуткову розорієнтацію. Розмір комірок становить 0,4 – 0,6 мкм. В феритних прошарках перліту (рис. 1е) спостерігаються перші ознаки дислокаційних скупчень.



**Рис. 1.** Структура матеріалу, прокатаного до різних ступенів деформації:  $\epsilon = 0$  (а,б);  $\epsilon = 0,1$  (в,г);  $\epsilon = 0,2$  (д,е);  $\epsilon = 0,28$  (ж,з);  $\epsilon = 0,43$  (і,к);  $\epsilon = 0,82$  (л,м);  $\epsilon = 1,21$  (н,о);  $\epsilon = 1,51$  (п,р). Знімки а, в, д, ж, і, л, н, п – феритна складова; б, г, е, з, к, м, о, р – перлітна складова

В зразках, прокатаних до  $\epsilon=0,28$ , деформаційні границі розподілу, які характерні для коміркової структури, з'являються в феритних прошарках перліту (рис. 1з). Концентрація напруження при взаємодії цих новоутворень з цементитом веде до його розтріскування і наступного руйнування цементитних пластин. У феритних зернах формується коміркова структура, наявність розорієнтації в комірках виявляється за допомогою аналізу структури в темному полі (рис. 1ж). При збільшенні деформації до  $\epsilon=0,43$  в феритних зернах формується розвинена коміркова структура, розмір якої зменшується до критичного розміру 0,25 мкм (рис. 1і), проте, границі розподілу між комірками залишаються малорозорієнтованими. Про що свідчать тяжі на дифрактограмах. В перлітних зернах також формуються комірки, наявність яких провокує руйнування цементиту через концентрацію напруження (рис. 1к). При деформації зразків до ступеню  $\epsilon=0,82$ , в феритних зернах починає формуватись розорієнтована коміркова структура. Цьому сприяє ротаційний механізм деформації. Про включення цього механізму свідчать

стрічкоподібні зсувні ділянки (рис. 1л), які можна трактувати як наслідок руху дисклінацій. Проте, слід зазначити, що на дифракціях переважають тяжі, які характерні для мало кутових структур. Довжина тяжів збільшується в порівнянні з менш деформованими матеріалами, що свідчить про збільшення середнього кута розорієнтації. Зміна механізму деформації в фериті зменшує концентрацію напружень в перлітних зернах, де за наявності слабкорозорієнтованих комірок зникають (заліковуються) тріщини в цементиті (рис. 1м). Деформація  $\epsilon=1,21$  згідно загальної класифікації може бути віднесена до великої або розвиненої. Для неї характерне формування розорієнтованих коміркової структури. Структурні дослідження підтверджують, що у фериті формуються переважно розорієнтовані комірки з середнім розміром 0,25 мкм (рис. 1н), спостерігаються переважно крапкові дифрактограми, які характерні для нанозерених структур. У перліті коміркова структура еволюціонує повільно і її розвиток суттєво відстає від еволюції структури у феритних зернах (рис. 1о). В найбільш деформованому стані  $\epsilon=1,51$  в феритних зернах формується деформаційна наноструктура з висококутовою розорієнтацією, про що свідчать результати темнопольних досліджень (рис. 1п) та точкові мікродифракції. При надвисоких деформаціях у перлітних зернах спостерігаються ознаки ротаційних процесів: формування стрічкоподібних зсувних структур (рис. 1 р), концентрація деформації на яких сприяє розтріскуванню цементиту.

Таким чином, закономірності структуроутворення в малолегованих вуглецевих сталях в значній мірі співпадають з загальними поглядами стосовно впливу ступеню деформації на еволюцію деформаційної структури. Перш за все, це стосується зміни структурних станів у феритних зернах. При цьому повторюється не тільки якісна картина змін, яка добре відома для армко-заліза, але і кількісні значення деформації, що відповідають зміні структурних станів. Зразки, продеформовані до 0,1 та 0,2 слід віднести до хаотичних дислокаційних структур, продеформовані до 0,28 та 0,43 – до 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 в феритних зернах. Це можна пояснити, враховуючи, що мікротвердість зерен перліту приблизно на третину вища, ніж в зернах фериту. Виходячи з кривої зміцнення феритної сталі [5] при прикладанні однакового напруження до зразка перлітні зерна почнуть деформуватися 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 відзначені особливості структуроутворення в ферито-перлітних сталях були враховані нами при аналізі впливу ступеня деформації на механічні властивості матеріалу, що визначені за допомогою різних методів тестування.

Умовні та істинні діаграми навантаження деформованих зразків, продеформованих на одиницький розтяг, наведені, відповідно, на рис. 2а та 2б.

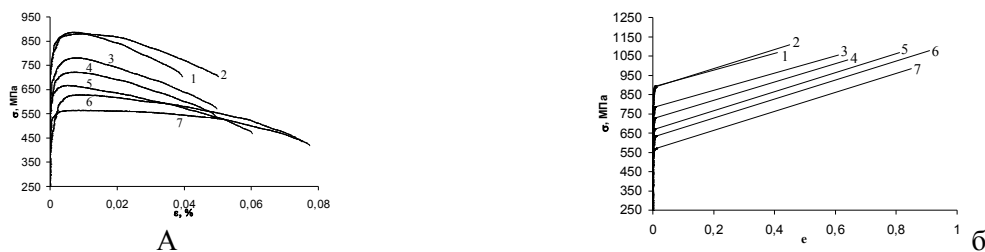


Рис. 2. Умовні (а) та істинні (б) діаграми навантаження при розтязі зразків сталі 20Х прокатаних до різних ступенів деформації: 1- 1,51; 2 - 1,21; 3 - 0,82; 4 - 0,43; 5 - 0, 28; 6 - 0,20; 7 - 0,1

З умовних діаграм розраховані стандартні механічні характеристики:  $\sigma_T$  – границя плинності;  $\sigma_B$  – границя міцності;  $\psi$ , % – відносне звуження;  $\epsilon_{\text{рівн}}$  – рівномірне подовження;  $\epsilon_{\text{заг}}$  –

загальне подовження. З істинних діаграм визначається істинна руйнуюча напруга  $\sigma_{ri}$ , істинна деформація до руйнування  $\epsilon_{fr}$ ,  $N$  – коефіцієнт лінійного зміцнення.

Результати випробувань на одновісний розтяг наведені в табл. 1. Результати тестування вказують на те, що границя плинності збільшується з деформацією монотонно, подібно до того, як веде себе істина діаграма навантаження маловуглецевої сталі [5]. Інші характеристики змінюються з деформацією за більш складним законом.

Таблиця 1. Механічні властивості деформованих зразків сталі 20X

№	$\epsilon_{\text{прох}}$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{\text{пi}}$ , МПа	$\epsilon_{fr}$	$\psi$ , %	$\theta$ , 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

Характер зміни рівномірної деформації  $\epsilon_{\text{рiвн}}$  є немонотонним. Спостерігається зменшення рівномірної деформації в зразках з хаотичною та слабзорозорієнтованою комірковою структурою, при формуванні розорієнтованої структури значення рівномірної деформації збільшується. Така механічна поведінка пов'язана з особливостями реновації джерел дислокацій на стадії мікропластичності. При трансляційному механізмі деформації наявність дислокаційних дефектів збільшує швидкість зміцнення на ділянці мікропластичності, тоді як при необхідності включення ротаційної моди деформації необхідна додаткова стадія мікродеформації з меншим коефіцієнтом зміцнення, де відбувається адаптація до дисклінаційних механізмів попередньої деформації.

Деформація до руйнування зменшуються при збільшенні деформації. Слід зазначити, що характер зміни цього параметру для сталі суттєво відрізняється від поведінки деформованого титану, де ця характеристика є незмінною. До того ж, спостерігаються суттєві відмінності в шийкоутворенні. В титані в момент руйнування шийка формується у вигляді еліпса, довга вісь якого направлена в напрямку стиснення, тоді як у залізі анізотропія шийкоутворення відсутня. Ці відмінності пов'язані з різним механізмом руйнування цих матеріалів: в титані ямкове руйнування спостерігається незалежно від ступеню попередньої деформації, в сталях відбувається розшарування шляхом розтріскування в площині паралельній площині прокатки. Схильність до розтріскування зменшує значення граничної деформації, а наявність переважного напрямку розтріскування компенсує підвищену пластифікацію шийки в цьому напрямку і нівелює умови утворення еліпсу.

Таблиця 2. Значення границі текучості та коефіцієнтів лінійного зміцнення сталі 20X, випробуваної на стиснення в трьох напрямках

Деформація	$\sigma_T$ , МПа	$\theta$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\theta$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\theta$ , МПа
	x		y		z	
1,51	766	-100	872	-200	878	-180
1,21	675	-250	807	-500	847	-50
0,82	661	-50	741	-250	778	38
0,43	586	-30	688	-80	686	30
0,28	553	58	630	-30	644	72
0,2	537	137	586	104	630	215
0,1	487	282	541	188	616	193
0	345		279		253	

Експерименти на стиснення дозволяють отримати істинні криві зміцнення при прикладенні навантаження в трьох взаємно перпендикулярних напрямках: X – в напрямку прокатки, Z – в площині прокатки, В табл. 3 наведені значення границі текучості та коефіцієнтів лінійного зміцнення сталі 20X, випробуваної на стиснення в трьох напрямках.

Чутливість границі текучості до ступеню деформації як і у випадку розтягнення є монотонною. Значення деформуючої напруги при розтязі та стисненні близькі і не виявляють

наявність SD-ефекту, незважаючи на існування вихідних тріщин. На відміну від границі плинності коефіцієнт лінійного зміцнення суттєво відрізняється в експериментах на розтяг та стиснення. Зменшення коефіцієнта  $\theta$  із збільшенням ступеню деформації пояснювалось текстурними перебудовами в деформованих зразка і розташуванням найбільш сприятливих площин ковзання в напрямку прокатки. Зазначимо, що в дослідженій сталі 20X в сильно деформованих станах коефіцієнт лінійного зміцнення демонструє негативні значення. Оскільки для існування такого ефекту немає фізичних обмежень, можна вважати наявність такого ефекту пов'язана з особливостями механічної поведінки сталі 20X.

Зазначимо, що монотонне підвищення напруження плинну зі збільшенням ступеню деформації характерне для одновісних схем випробування: одновісному розтягу або одновісному стисненню. При складних схемах навантаження, наприклад, випробуваннях на твердість залежність від ступеню деформації більш складна (рис.3а). Твердість збільшується на початковій стадії деформації, але лишається незмінною на стадіях формування дислокаційних скупчень та слабкорозорієнтованих комірок. Значне зростання твердості спостерігається при переході до розорієнтованих комірок.

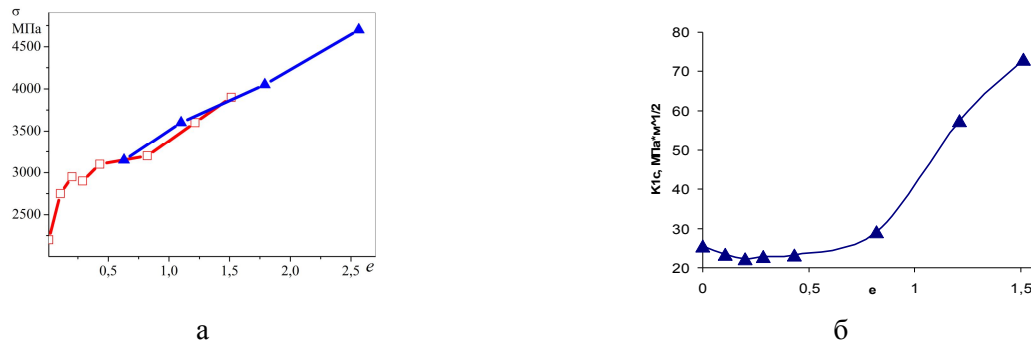


Рис. 3. Залежність твердості (а) та тріщиностійкості (б) від ступеню деформації

Зазначена, чутливість до зміни структурних станів ще в більшій мірі проявляється у випробуваннях на тріщиностійкість сталі 20X (рис. 3б). Спостерігається зниження тріщиностійкості при формуванні лісу дислокацій, незначне підвищення тріщиностійкості при утворенні слабкорозорієнтованих структур і різке збільшення на стадії формування нанозерен.

Висновки.

1. Закономірності структуроутворення в малолегованих вуглецевих сталях в значній мірі співпадають з загальними поглядами стосовно впливу ступеню деформації на еволюцію деформаційної структури. У феритних зернах повторюється не тільки якісна картина змін, яка добре відома для армко-заліза, але і кількісні значення деформації, що відповідають зміні структурних станів. Еволюція деформаційної структури в перліті суттєво відстає 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 скупчення дислокацій в феритних прошарках перліту.

2. Напруження зміцнення збільшується зі ступенем деформації монотонно, що пов'язано зі збільшенням густини деформаційних дефектів в феритній матриці. Характеристики пластичності, мікротвердості та тріщиностійкості змінюються зі ступенем деформації немонотонно, що пов'язано з чутливістю цих характеристик до стадійності змін розподілу деформаційних дефектів.

1. Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. - Киев: Наук. думка, 1975.- 315 с.
2. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский и др.; под ред. В.И.Трефилова. – Киев: Наук. думка, 1987.
3. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И., Павлик Д. А., Малышев В. Ф. Процеси пластичного структуроутворення металів. – Мінськ: Наука і техніка, 1994. – 232 с.
4. Борисовская Е. М., Подрезов Ю. Н., Фирстов С. А. Динамика структурных перестроек с учетом процесса зарождения дислокаций // 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.

Стаття прийнята до друку 06.04.2015.