

## *Текстурні дослідження деформованої ультранизьковуглецевої сталі після крутіння під гідростатичним тиском*

В. З. Куцова, доктор технічних наук, професор

Т. В. Котова, кандидат технічних наук

Г. П. Стеценко

Національна металургійна академія України, Дніпро

*Наведено результати досліджень текстури ультранизьковуглецевої сталі 01ЮТ після комбінованої обробки. За допомогою EBSD-аналізу встановлено, що прокатка в феритному інтервалі температур з наступною інтенсивною пластичною деформацією методом крутіння під гідростатичним тиском призводить до формування текстури з компонентами  $\{100\}$ ,  $\{111\}$ ,  $\{110\}$  та реалізації кристалографічних механізмів деформації в металі.*

Актуальною проблемою сьогодення є організація в Україні виробництва тонкого листа з ультранизьковуглецевих сталей з підвищеним комплексом механічних властивостей, який використовується для виготовлення методом холодної штамповки деталей автомобіле- та машинобудівної галузей, а також інших промислових виробів. В останні роки для цього широко застосовуються методи впливу великих пластичних деформацій, які дозволяють різко подрібнювати структуру металів і сплавів та регулювати їх властивості. Нетрадиційними методами, до яких відноситься схема інтенсивної пластичної деформації (ІПД) – крутіння під гідростатичним тиском (КГТ), вдається деформувати заготовку при незмінному вихідному та кінцевому поперечному перерізі за рахунок необхідних високих ступенів деформації і подрібнення зерна. Найбільш прогресивним напрямом підвищення якості є отримання листового прокату з дрібнозернистою структурою і покращеними властивостями: міцністю, пластичністю, здатністю до глибокої витяжки [1 – 3].

Кристалографічна текстура є основним із багатьох факторів, від яких залежать структурночутливі механічні властивості, що визначають здатність сталі до витяжки [4].

Огляд літературних джерел показав обмежену кількість даних, присвячених дослідженню процесів текстуроутворення та механізмів деформації полікристалів з ОЦК структурою, хоч вони, безумовно, мають науковий та практичний інтерес.

Враховуючи обмеженість світового досвіду використання КГТ ультранизьковуглецевих сталей типу 01ЮТ, дослідження формування їх текстури після гарячої прокатки та ІПД є актуальними.

Мета роботи – встановлення закономірностей впливу деформаційних режимів прокатки та ІПД методом КГТ на текстуроутворення тонколистового прокату з ультранизьковуглецевої сталі.

## Структура, зношування, руйнування

Досліджено зразки сталі 01ЮТ із вмістом вуглецю 0,003 % після двопрхідної деформації на лабораторному прокатному стані ДУО 280 в аустенітному ( $T_{\text{ПР1}} = 970 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та феритному ( $T_{\text{ПР2}} = T_{\text{КП}} = 730 \text{ }^\circ\text{C}$ ) інтервалах температур. Кінцева товщина прокату дорівнює 1,4 мм, сумарний ступінь деформації – 60 %. Зразки після деформації охолоджували разом з піччю, вихідна температура якої складала  $680 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $V_{\text{охол}} \sim 0,05 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ). Деформовані зразки сталі 01ЮТ піддавали КГТ за режимом, представленим в таблиці.

Режим КГТ для сталі 01ЮТ

$T_{\text{и}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$D, \text{ мм}$	$S_0, \text{ мм}$	$N$	$P, \text{ кгс/см}^2$	$S_1, \text{ мм}$	$\varepsilon_1, \%$	$\gamma_1, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\gamma_4, \%$
25,0	9,0	0,7	5,0	310,0	0,3	3,8	44,9	6,0	403,0

Для дослідження просторового розподілу орієнтувань елементів структури сталі 01ЮТ після прокатки та КГТ використовували методику автоматичного аналізу картин дифракції зворотно розсіяного пучка електронів (EBSD-аналіз) з використанням Кікучі-ліній в скануючому растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-6490 при збільшенні 500 крат [5].

За результатами EBSD-аналізу встановлено, що найбільш вираженою в центральній зоні деформованого за два проходи зразка сталі 01ЮТ є текстура з переважним орієнтуванням феритних зерен площиною  $\{100\}$  (рис. 1, а). Спостерігається нерівномірність текстури по перерізу листа після двопрхідної прокатки: в центральній зоні переважною є текстура типу  $\{100\}$ , для поверхневої зони характерна сукупність текстур  $\{100\}$  і  $\{111\}$ .

Текстура центральної зони зразків характеризується більшою інтенсивністю, ніж текстура дрібнозернистого поверхневого шару: полюсна щільність орієнування  $\langle 100 \rangle$  знижується порівняно з поверхневим шаром з  $P \langle 100 \rangle = 6,2$  до  $P \langle 100 \rangle = 4,3$  (рис. 1, б).

Згідно з даними роботи [6], через неоднорідність деформації швидкість течії металу у внутрішніх шарах більша, ніж в поверхневих. В результаті текстура центральних шарів виражена більш чітко. Таким чином, по всьому перерізу листа, деформованого в аустенітній та феритній температурних областях, формується звичайна текстура прокатки з найбільш вираженими орієнтуваннями  $\{100\}$  і  $\{111\}$ .

В роботах [4, 7] показано, що сприятливою є текстура з таким переважним орієнтуванням решіток зерен, що їх кристалографічна площина  $\{111\}$  паралельна поверхні листа. Технологія виробництва ІF-сталі повинна забезпечити отримання максимальної кількості зерен такого орієнтування. Автори роботи [4] різницю текстури в поверхневій та центральній зонах зразків досліджених ІF-сталей пояснюють знеуглецюванням поверхні листа під жаровиною.

На рис. 2 наведені прямі полюсні фігури (ППФ) сталі 01ЮТ після двопрхідної прокатки з наступною деформацією методом КГТ при кімнатній температурі. Спостерігається помітне підвищення інтенсивності піків, що приводить до формування менш розмитої текстури в центральній зоні зразка (рис. 2 а) порівняно з центральною зоною листа в гарячекатаному

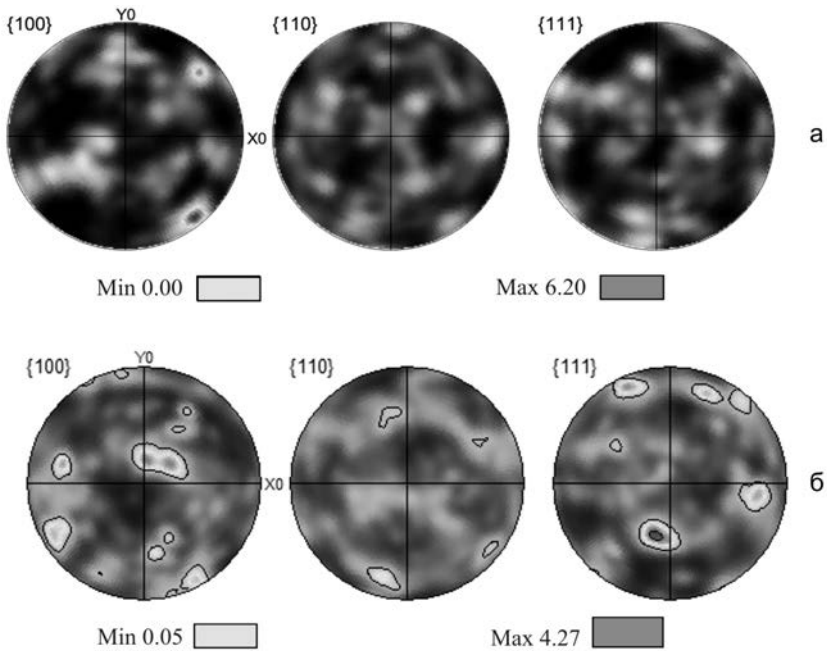


Рис. 1. Кількісні ППФ з даними про інтенсивність текстури для центральної (а) та поверхневої (б) зон зразка гарячекатаної сталі 01ЮТ.

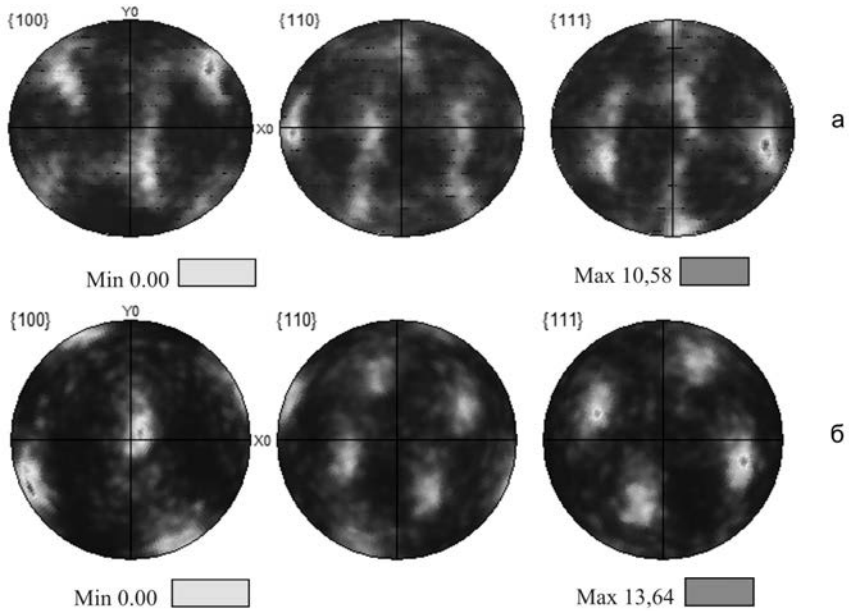


Рис. 2. Кількісні ППФ з даними про інтенсивність текстури для центральної (а) та поверхневої (б) зон зразка гарячекатаної сталі 01ЮТ після деформації методом КГТ.

сталі (рис. 1 а). Аналіз ППФ сталі 01ЮТ після гарячої прокатки з наступною деформацією методом КГТ показав, що деформація, яка реалізується при крутінні, приводить до збільшення значень інтенсивності на периферії зразка до  $P_{\max} = 13,64$ , отже, до формування більш чіткої текстури з вираженими компонентами  $\{100\}$  і  $\{111\}$  (рис. 2). Змінення текстури після

КГТ порівняно з гарячекатаним станом не спостерігається, тобто зберігається текстура з найбільш вираженими компонентами  $\{100\}$  і  $\{111\}$ .

Розглянемо вплив КГТ на формування текстури в термінах зворотних полюсних фігур (ЗПФ). На рис. 3 зображені зворотні полюсні фігури гарячекатаної сталі 01ЮТ після додаткової пластичної деформації методом КГТ для різних зовнішніх напрямків в кристалі: напрямки деформації  $X_0$ , поперечного напрямку  $Y_0$ , нормального напрямку  $Z_0$  (напрямки ЗПФ) для кубічних кристалів  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ .

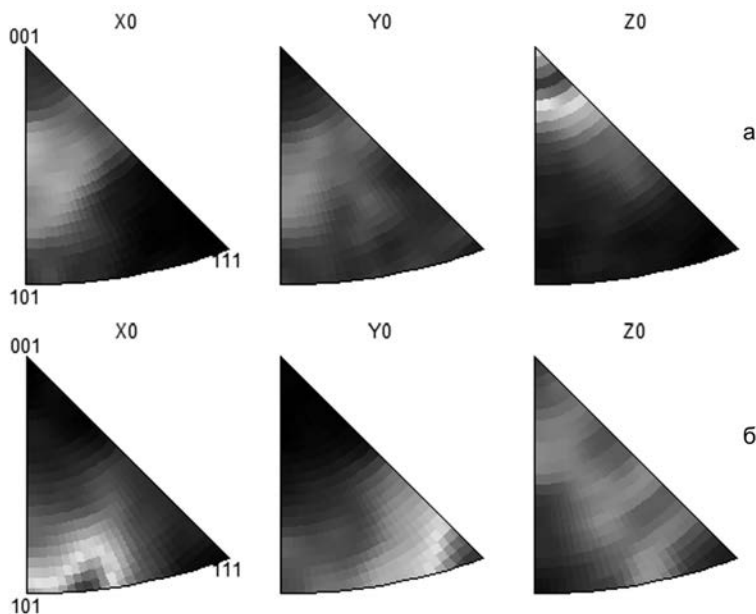


Рис. 3. Зворотні полюсні фігури гарячекатаної сталі 01ЮТ з наступною ІПД методом КГТ. а – центральна зона, б – периферія зразка.

У центральній зоні зразка (рис. 3 а) максимальна щільність зосереджена в напрямку  $\langle 001 \rangle$  ЗПФ. Максимальна полюсна щільність спостерігається в напрямку  $\langle 101 \rangle$  і зосереджена біля напрямку  $\langle 111 \rangle$  (рис. 3 б). В інших напрямках (поперечному і аксіальному) принципів змін не спостерігається. Крім того, зворотні полюсні фігури стали більш гострими, що свідчить про наявність кристалографічних механізмів деформації в процесі обробки, наприклад, внутрішньозернового ковзання (рис. 3 б).

Встановлено, що в процесі гарячої деформації сталі при прокатці внаслідок дії зсувної (тангенціальної) складової сили тертя в зоні деформації в поверхневому шарі в результаті обертання ОЦК-решітки фериту уздовж напрямку дії цієї складової сили тертя формується текстура із вираженою компонентою  $\{110\}$ ; в центральній зоні прокату силовий вплив при деформації симетричний, тому тут формується звичайна текстура прокатки, найбільш вираженими орієнтуваннями якої є  $\{100\}$  і  $\{111\}$ ; додаткова ІПД методом КГТ гарячекатаної ультранизьковуглецевої сталі 01ЮТ приводить до формування текстури з компонентами  $\{100\}$ ,  $\{111\}$ ,  $\{110\}$ ; ЗПФ гарячекатаної сталі 01ЮТ свідчать про реалізацію кристалографічних механізмів деформації в процесі додаткової холодної деформації методом КГТ.

## Література

1. Wang J.T., Figueiredo R.B., Langdon T.G., Nanomaterials by severe plastic deformation. – Zurich: TransTech; 2011. – P. 169–291.
2. Y. Cao, Wang Y.B., An X.H. Concurrent microstructural evolution of ferrite and austenite in a duplex stainless steel processed by high-pressure torsion // Acta Materialia. – 2014. – V. 63. – P. 16–29.
3. Scheriau S., Zhang Z., Kleber S. Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion // Mat. Sci. Eng. A. – 2011. – V. 528. – P. 2776–2786.
4. Лукин Ю.С., Бахтин С.В., Лукин А.С. Формирование кристаллографической текстуры в легированных титаном IF-сталях // Сталь. – 2009. – № 11. – С. 85–87.
5. Миронов С.Ю., Даниленко В.Н., Мышляев М.М. Анализ пространственного распределения ориентировок элементов структуры поликристаллов, получаемого методами просвечивающей электронной микроскопии и обратно рассеянного пучка электронов в сканирующем электронном микроскопе // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 1217–1225.
6. Бородкина М.М., Спектор Э.Н. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
7. Дедек Вл. Полосовая сталь для глубокой вытяжки. – М.: Металлургия, 1970. – 208 с.

Одержано 05.04.17

**В. З. Куцова, Т. В. Котова, А. П. Стеценко**

### **Текстурные исследования деформированной ультранизкоуглеродистой стали после кручения под гидростатическим давлением**

#### **Резюме**

Приведены результаты исследований текстуры ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ после комбинированной обработки. С помощью EBSD-анализа установлено, что прокатка в ферритном интервале температур с последующей интенсивной пластической деформацией методом кручения под гидростатическим давлением (КГТ) приводит к формированию текстуры с компонентами {100}, {111}, {110} и реализации кристаллографических механизмов деформации в металле в процессе КГТ.

**V. Z. Kutsova, T. V. Kotova, G. P. Stetsenko**

### **Texture studies of the deformed ultra-low carbon steel after hydrostatic pressure torsion**

#### **Summary**

The study results of the influence of combined deformation on the texture of ultra low-carbon steel 01ЮТ are given at the present work. It has been established by using the EBSD analysis that the additional severe plastic deformation (SPD) by hydrostatic pressure torsion (HPT) of hot-rolled ultra low carbon steel leads to the formation of a texture with components {100}, {111}, {110}. It has been established that crystallographic mechanisms of are in the process of severe cold deformation.