

УДК 669.017: 620.175.22

## ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ 01ЮТ

КУЦОВА В. З.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
СТЕЦЕНКО А. П.<sup>2\*</sup>, асп.,  
КОТОВА Т. В.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38098 637 16 93, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Прогресс мирового автомобилестроения ставит перед разработчиками автомобильной стали задачи уменьшения массы автомобиля, снижения затрат на его производство, повышения степени безопасности при эксплуатации транспортного средства. Наиболее широкое применение для указанных целей находят низколегированные стали с традиционными механизмами упрочнения (измельчение зерна, дисперсионное твердение и твердорастворное упрочнение), а также перспективные IF-стали. Однако увеличение прочности металлических материалов обычно приводит к снижению их пластичности. Достижение высокой прочности и пластичности, необходимых для создания новых перспективных конструкционных и функциональных материалов, является одной из фундаментальных проблем материаловедения. **Представлены результаты** исследования формирования текстуры стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей интенсивной пластической деформацией (ИПД) методом кручения под гидростатическим давлением (КГД) при температуре 25 °С. **Выводы.** Установлено, что после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД сохраняется текстура с компонентами {100} и {111}. Вероятно, пластическое деформирование в металле осуществляется по двум механизмам: сдвиг по границам зерен и кристаллографическое скольжение, хотя вклад последнего в формирование текстуры менее выражен. Определено, что значения твердости горячекатаной стали 01ЮТ с последующей деформацией методом КГД повышаются в 2 раза по сравнению с горячекатаным состоянием, модуль упругости практически не изменяется, а пластичность сохраняется на высоком уровне.

**Ключевые слова:** IF-сталь; прямые полюсные фигуры (ППФ); наноиндентирование; модуль Юнга; интенсивная пластическая деформация (ИПД); кручение под гидростатическим давлением (КГД)

## ВПЛИВ КРУТІННЯ ПІД ГІДРОСТАТИЧНИМ ТИСКОМ НА ФОРМУВАННЯ ТЕКСТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 01ЮТ

КУЦОВА В. З.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
СТЕЦЕНКО Г. П.<sup>2\*</sup>, асп.,  
КОТОВА Т. В.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2\*</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38098 637 16 93, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

<sup>3\*</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

**Анотація. Постановка проблеми.** Прогрес світового автомобілебудування ставить перед виробниками автомобільної сталі завдання зменшення маси автомобіля, зниження витрат на його виробництво, підвищення ступеня безпеки під час експлуатації транспортного засобу. Найширше застосування для вказаних цілей знаходять низьколеговані сталі з традиційними механізмами зміцнення (подрібнення зерна, дисперсійне твердіння і твердорозчинне зміцнення), а також перспективні IF-сталі. Однак збільшення міцності металевих матеріалів зазвичай спричинює до зниження їх пластичності. Досягнення високої міцності і пластичності, необхідних для створення нових перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, – одна з фундаментальних проблем металознавства. **Наведено результати** дослідження формування текстури сталі 01ЮТ після гарячої прокатки з наступною інтенсивною пластичною деформацією (ПД) методом крутіння під гідростатичним тиском (КГТ) за температури 25 °С. **Висновки.** Встановлено, що після гарячої прокатки з наступною деформацією методом КГТ зберігається текстура з компонентами {100} і {111}. Вірогідно пластичне деформування в металі здійснюється за двома механізмами: зсув по границях зерен та кристаллографічне ковзання, хоч вклад останнього у формування текстури менше виражений. Визначено, що значення твердості прокатої сталі 01ЮТ з

наступною деформацією методом КГТ підвищуються в 2 рази порівняно з гарячекатаним станом, модуль пружності практично не змінюється, а пластичність зберігається на високому рівні.

*Ключові слова:* ІФ-сталь; прямі полюсні фігури (ППФ); наноіндентування; модуль Юнга; інтенсивна пластична деформація (ІПД); крутіння під гідростатичним тиском (КГТ)

## INFLUENCE OF HIGH PRESSURE TORSION ON THE TEXTURE AND PROPERTIES FORMATION OF THE STEEL 01ALTi

KUTZOVA V.Z.<sup>1</sup>, *Doct. Sc. (Tech.), Prof.*,  
STETSENKO G.P.<sup>2\*</sup>, *postgraduate student*,  
KOTOVA T.V.<sup>3</sup>, *Ph. D., Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2\*</sup> Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38098 637 16 93, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

<sup>3\*</sup> Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +0 562 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

**Abstract. Formulation of the problem.** The progress of the global automotive industry confronts developers of automotive steel task of reducing vehicle weight, reduce its production costs, increase security level during operation of the vehicle. The most widely used for this purpose are low alloy steels with conventional hardening mechanisms (grain refinement, precipitation hardening and solid solution hardening), as well as promising IF-steels. However, increasing the strength of metal materials usually leads to a decrease in their plasticity. Achieving high strength and ductility required for the creation of new advanced structural and functional materials, it is one of their basic materials science problems. Presented results of the texture researches of steel 01ALTi after severe plastic deformation (SPD) by torsion under hydrostatic pressure (HPT) at the 25 °C. **Conclusion.** It is found that after hot rolling with the next deformation by HPT method saved texture with components stored texture {100} and {111}. It is shown that in the process of deformation has been actively developed mechanisms such as a shift along the grain boundaries and crystallographic slip, although its contribution to the formation of the texture is less pronounced. Hardness after HPT 2 times higher, modulus of elasticity hardly changes in comparison with the initial state, and the ductility is retained at a high level.

*Keywords:* IF-steel; Pole Figures (PF); nanoindentation; Young's modulus; severe plastic deformation (SPD); hydrostatic pressure torsion (HPT)

### Введение

В последние годы все больше внимания привлекают вопросы получения и изучения материалов с ультрамелкозернистой структурой с высокоугловыми границами зерен. Значительное место среди способов достижения такого состояния занимают методы комбинированных пластических деформаций со сдвигом [1–8]. Подтверждением этому может служить большое количество публикаций за последние 10 лет, в которых рассматриваются процессы структурообразования и изменение свойств металлов и сплавов после обработки в наковальнях Бриджмена – кручение под гидростатическим давлением (КГД), равноканальное угловое прессование (РКУП), винтовое прессование и др. Осуществляется также опытно-промышленное использование схем КПДС: всестороннейковки, прокатки со сдвигом, полунепрерывных схем РКУП, схем волочения проволоки с кручением [9–15].

**Целью данных исследований** является определение влияния горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД на формирование текстуры и свойств стали 01ЮТ.

### Материал и методика исследований

В работе исследовали горячекатаную сталь 01ЮТ после ИПД методом КГД, химический состав которой приведен в таблице 1. Экспериментальные исследования температурно-деформационных условий прокатки проводили на лабораторном прокатном стане ДУО 280. Температурно-деформационные режимы прокатки стали представлены в таблице 2. Горячекатаные образцы стали 01ЮТ подвергали КГД, режим КГД приведен в таблице 3.

В работе истинную и сдвиговую деформации при кручении оценивали расчетным путем [16]. Измерения нанотвёрдости проводили с помощью наноиндентера «Nanoindenter G200» производства США, с использованием алмазной трехгранной пирамидки Берковича. Наиболее распространенным методом анализа данных при наноиндентировании является метод Оливера–Фарра, позволяющий находить твердость и модуль упругости образца без измерения его размеров прямыми методами. В настоящей работе проводили испытания, используя модуль непрерывного контроля жесткости CSM (Continuous Stiffness Measurement), с непрерывной записью кривой нагружения и разгрузки [17].

Рентгеноструктурный анализ осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М в CuK $\alpha$ -излучении.

Таблица 1

## Химический состав стали 01ЮТ/ Chemical composition of 01ЮТ steel

Содержание химических элементов, % (по массе)											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003

Таблица 2

Деформационные режимы прокатки стали 01ЮТ/  
Temperatures and deformation modes of the rolling of 01ЮТ steel

$T_{нагр}$	$T_{1пр}$	$h_0$	$h_1$	$\Delta h_1$	$\varepsilon_1$	$T_{2пр}$	$h_2$	$\Delta h_2$	$\varepsilon_2$	$\Sigma \Delta h$	$\Sigma \varepsilon$	$T_{см}$
°C		мм			%	°C	мм		%	мм	%	°C
1000	970	3,5	1,80	1,70	48,6	730	1,4	0,4	22,2	2,1	60,0	680

*Примечание:*  $T_{нагр}$  – температура нагрева листовой стали;  $T_{1пр}$  – температура прокатки листовой стали в первом проходе;  $T_{2пр}$  – температура прокатки листовой стали во втором проходе;  $h_0$  – исходная толщина образца;  $h_1$  – толщина образца после первого прохода;  $h_2$  – толщина образца после второго прохода;  $\Delta h_1$  – абсолютное обжатие металла в первом проходе;  $\Delta h_2$  – абсолютное обжатие металла во втором проходе;  $\Sigma h$  – суммарное обжатие металла за два прохода;  $\varepsilon_1$  – относительная степень деформации металла в первом проходе;  $\varepsilon_2$  – относительная степень деформации металла во втором проходе;  $\Sigma \varepsilon$  – суммарная степень деформации металла за два прохода;  $T_{см}$  – температура скотки.

Таблица 3

## Режим КГД для стали 01ЮТ/ НРТ mode of 01ЮТ steel

$T_{и}, ^\circ\text{C}$	$D, \text{мм}$	$S_0, \text{мм}$	$N$	$P, \text{кгс/см}^2$	$S_1, \text{мм}$	$\varepsilon_1$	$\gamma_1$	$\varepsilon_4$	$\gamma_4$
25	9,0	0,7	5	310	0,3	3,8	44,85	6,0	403,0

*Примечание:*  $T_{и}$  – температура испытания;  $S_0$  – толщина до испытания;  $S_1$  – толщина после испытания;  $N$  – количество оборотов;  $D$  – диаметр образца;  $P$  – давление;  $\varepsilon$  – истинная деформация при кручении ( $\varepsilon_1$  – центр,  $\varepsilon_4$  – периферия образца);  $\gamma$  – сдвиговая деформация ( $\gamma_1$  – центр,  $\gamma_4$  – периферия образца).

## Результаты исследований

Преимущественные ориентировки (текстуры) имеют существенное влияние на структурозависимые свойства поликристаллических материалов. Как показал обзор работ, посвященных изучению процессов текстурообразования и механизмов деформации поликристаллов с ОЦК структурой, не проводилось систематическое исследование текстур, хотя эти данные имеют научный и практический интерес.

На рисунке 1 а представлены полюсные фигуры горячекатаной стали 01ЮТ для плоскостей (100), (110), (111). Хотя для ОЦК металлов достаточно показывать изменения прямых полюсных фигур (ППФ) для плоскостей (110), мы приводим полюсные фигуры для трех наиболее важных направлений кубического кристалла. Наиболее выраженной в центральной зоне образца стали 01ЮТ является текстура с преимущественным ориентированием ферритных зерен плоскостью {100} (рис. 1 а). Наблюдается неравномерность текстуры по сечению листа, прокатанного за два прохода: в центральной зоне предпочтительной является текстура типа {100},

для поверхностной зоны характерна совокупность текстур {100} и {111}.

Текстура центральной зоны образцов характеризуется большей интенсивностью, чем текстура мелкозернистого поверхностного слоя: полюсная плотность ориентировки <100> снижается по сравнению с поверхностным слоем с  $P \langle 100 \rangle = 6,2$  до  $P \langle 100 \rangle = 4,3$  (рис. 1).

Таким образом, согласно данным работы [18], из-за неоднородности деформации скорость течения металла во внутренних слоях больше, чем в поверхностных. В результате текстура центральных слоев выражена более четко. Таким образом, по всему сечению образца, обработанного по такому режиму, формируется обычная текстура прокатки, с наиболее выраженными ориентировками – {100} и {111}.

Из литературных источников [19; 20] известно: благоприятной является текстура, когда большая часть решеток зерен ориентирована таким образом, что их кристаллографическая плоскость {111} параллельна поверхности листа. Технология производства IF-стали должна обеспечить получение максимального количества зерен такой ориентировки. Авторы работы [20] разницу текстуры

в поверхностных и центральных зонах образцов обезуглероживанием поверхности образцов под исследованных IF-сталей объясняют окалиной.

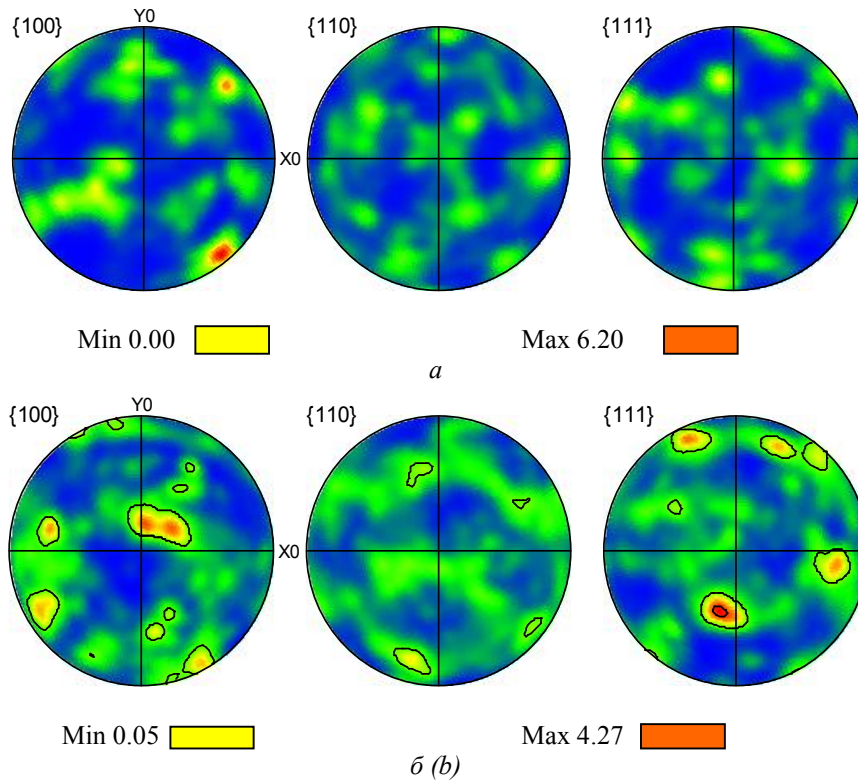
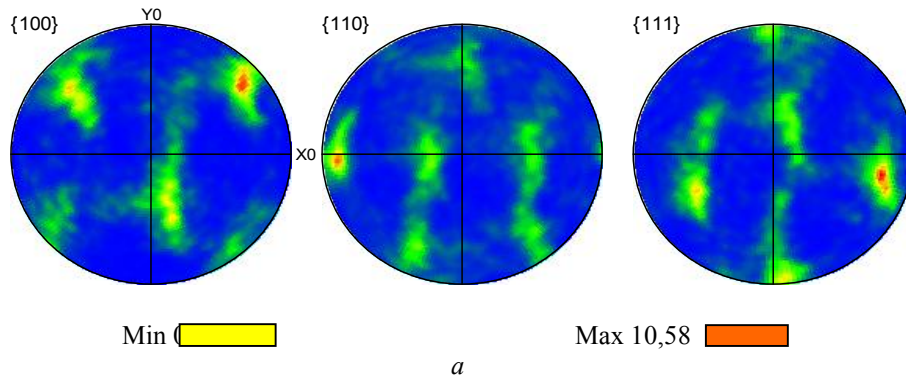


Рис. 1. Количественные ППФ с данными об интенсивности текстуры для центральной (а) и поверхностной (б) зон образца горячекатаной стали 01ЮТ / Fig. 1. The quantitative SPF with texture intensity data for central (a) and surface (b) zones of the hot rolled steel 01ЮТ

На рисунке 2 приведены ППФ стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД при комнатной температуре. Наблюдается заметное повышение интенсивности пиков, что приводит к формированию менее размытой текстуры в центральной зоне образца (рис. 2 а) по сравнению с центральной зоной в горячекатаном состоянии (рис.1 а).

Анализ ППФ стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД

показал, что деформация, реализуемая при кручении, приводит к увеличению значений интенсивности на периферии образца до значений  $P_{max} = 13,64 \text{ кгс/см}^2$ , а, следовательно, к формированию более четкой текстуры с выраженными компонентами  $\{100\}$  и  $\{111\}$  (рис. 2). Изменения текстуры после КГД по сравнению с горячекатаным состоянием не наблюдается, т. е. сохраняется текстура с компонентами  $\{100\}$  и  $\{111\}$ .



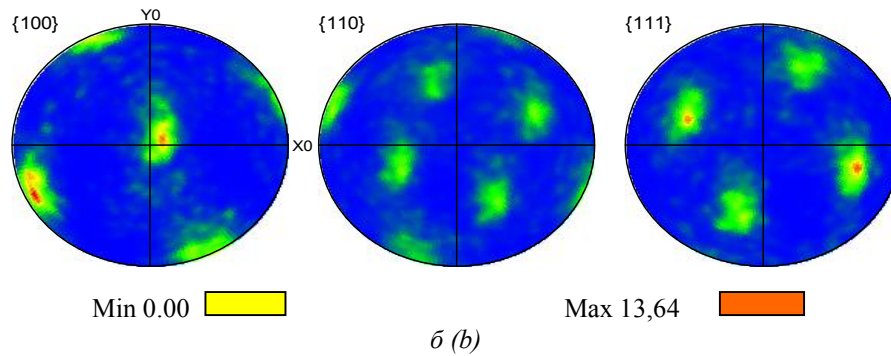


Рис. 2. Количественные ППФ с данными об интенсивности текстуры для центральной (а) и периферийной (б) зон горячекатаной стали 01ЮТ после деформации методом КГД / Fig. 2. The quantitative SPF with texture intensity data for central (a) and peripheries (b) zones of the steel 01ЮТ after deformation by HTP method

В таблице 4 приведены данные горячекатаном состоянии и после различных рентгеноструктурного анализа стали 01ЮТ в режимов КГД.

Таблица 4

**Данные рентгеноструктурного анализа стали 01ЮТ в горячекатаном состоянии и после различных режимов КГД / X-ray diffraction analysis data of 01ЮТ steel after rolling and HTP**

$d$ , мм	$S_0$ , мм	$N$	$P$ , кгс/см <sup>2</sup>	$a$ , Å	$L_{110}$ , нм	$L_{220}$ , нм	$L$ , нм	$M$ , 10 <sup>-3</sup> Н/м <sup>2</sup>	$D_{110}$ , 10 <sup>10</sup> см <sup>-2</sup>	$D_{220}$ , 10 <sup>10</sup> см <sup>-2</sup>
Горячекатаное состояние				2,8661	90,4	69,3	118,1	0,91	6,7	23,4
15	0,9	3	150	2,8665	105,8	73,9	137,4	0,98	4,93	20,2
9	0,7	5	300	2,8642	73,1	53,2	95,5	1,26	10,3	39,7

Примечание:  $a$  – параметр решетки,  $L$  – размер кристаллитов,  $M$  – напряжение,  $D$  – плотность дислокаций.

Формирование ультрамелкозернистой структуры наблюдается при  $d = 15$  мм,  $N = 3$ ,  $P = 150$  кгс/см<sup>2</sup>. Максимальное давление при КГД приводит к максимальному измельчению зерна, при этом размер кристаллитов составляет менее 100 нм для всех исследуемых образцов стали 01ЮТ при  $P = 300$  кгс/см<sup>2</sup> и  $N = 5$ . Плотность дислокаций стали 01ЮТ после КГД при  $P = 300$  кгс/см<sup>2</sup> возрастает для плоскости (110) в 1,5 раза, а для (220) в 1,7 раза. Значения микронапряжений после КГД возрастают по сравнению с горячекатаным состоянием: на 7 % при трех оборотах и давлении 150 кгс/см<sup>2</sup> и на 38 % при пяти оборотах и давлении 300 кгс/см<sup>2</sup>.

В результате обработки данных индентирования получены зависимости поверхностной твердости (рис. 3 а) и модуля упругости (рис. 3 б) от глубины внедрения индентора для исследуемой стали 01ЮТ.

Пластическое течение во всех образцах начинается только с глубины ~200 нм (рис. 3 а), с этой глубины становится возможным контроль твердости. Таким образом, перегиб на кривой зависимости твердости от перемещения соответствует переходу от упругой к упруго-пластической деформации в зоне отпечатка.

Изменение твёрдости стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД имеет следующий характер: максимальные значения твердости наблюдаются на периферии образца и достигают 5,8 ГПа, что 2 раза выше, чем в горячекатаном состоянии. Неравномерность распределения твердости вдоль радиуса вызвана локализацией деформации на периферии образца.

Модуль упругости исследуемой стали 01ЮТ изменяется от  $E_{исх} = 210$  ГПа до  $E_{периф.} = 246$  ГПа (рис. 3 б). В литературе [1–4; 15; 16] обсуждается несколько факторов, оказывающих влияние на упругие свойства ультрадисперсных материалов, полученных методами ИПД. Предполагается, что определяющую роль в уменьшении упругих свойств наноматериалов играют границы зерен и тройные стыки, т. к. значительная доля атомов наноструктурного материала расположена в местах, отличных от их нормальных позиций в кристаллической решетке, а объемная доля границ зерен, приграничных объемов и тройных стыков возрастает по мере уменьшения размера зерна [3; 10; 12].

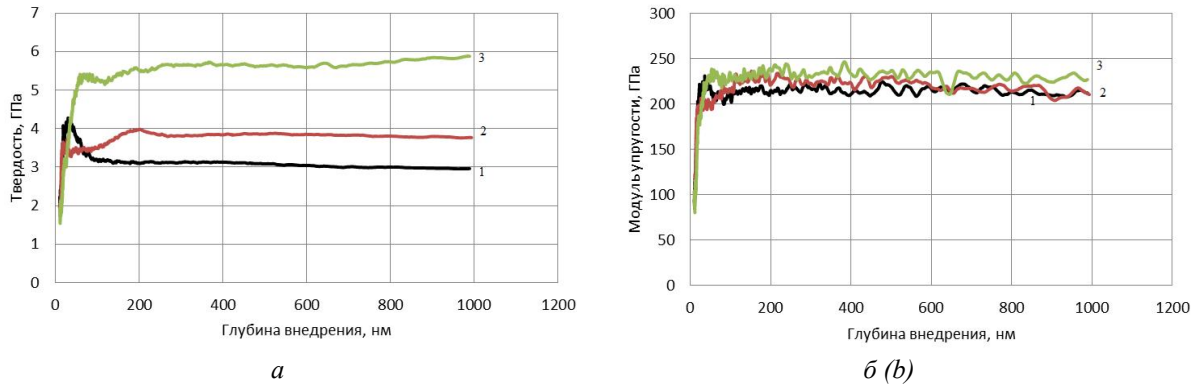


Рис. 3. Экспериментальные кривые зависимости твердости (а) и модуля упругости (б) от глубины внедрения индентора горячекатаной стали 01ЮТ после деформации методом КГД: 1 – горячекатаное состояние; 2 – после прокатки и КГД (центр); 3 – после прокатки и КГД (периферия) /  
 Fig. 3. Experimental curves of the hardness (a) and Young modulus (b) independents from the indenter displacement into the surface of the 01ЮТ after deformation by HPT method : 1 – hot rolled state; 2 – after rolling and HPT (center); 3 - after rolling and HPT (peripheries)

Согласно методологии Ю. В. Мильмана [21], для индентора Берковича значение характеристики пластичности  $\delta_n$ , определяют по выражению:

$$\delta_n = 1 - 10,2 \cdot (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HM}{E}, \quad (1)$$

где:  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $HM$  – твердость,  $E$  – модуль упругости.

Значение характеристики пластичности  $\delta_A$  определяли в соответствии с [21; 22] и рассчитывали по отношению площадей на диаграмме непрерывного вдавливания по формуле:

$$\delta_A = \frac{A_p}{A_t} = 1 - \frac{A_e}{A_t}, \quad (2)$$

где:  $A_e$  – площадь под кривой разгрузки,  $A_t$  – площадь под кривой нагружения,  $A_p = A_t - A_e$ .

Изменение значений характеристик пластичности  $\delta_n$  и  $\delta_A$  после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД вдоль радиуса образца стали 01ЮТ, рассчитанных по формулам (1) и (2), показано на рисунке 4.

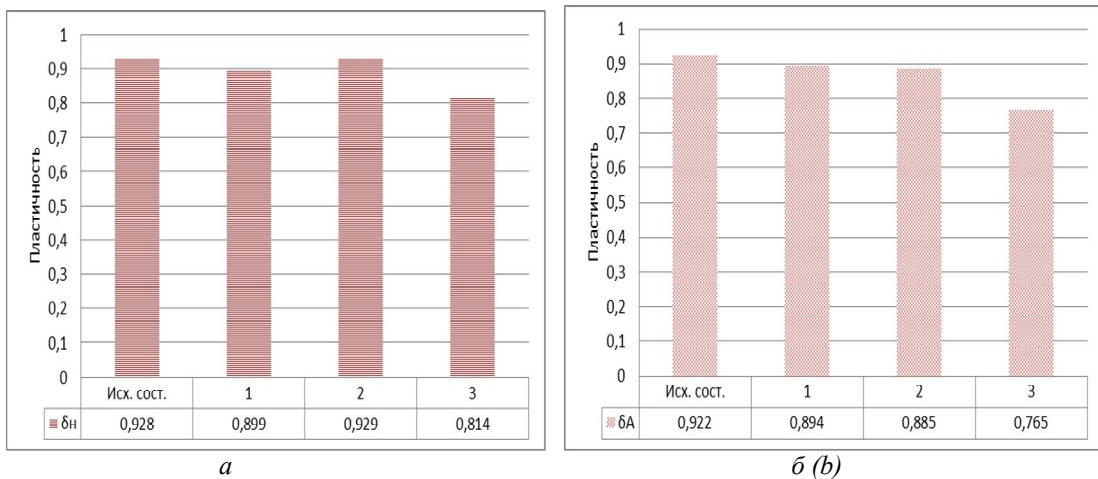


Рис. 4. Расчетные значения характеристик пластичности стали 01ЮТ вдоль радиуса образца после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД ( $N = 5$ ): 1 – центр образца; 2 – середина радиуса образца; 3 – периферия образца; а – расчет по формуле (1); б – расчет по формуле (2) /  
 Fig. 4. The calculated values of the characteristics of plasticity for steel 01ЮТ after hot rolling with the next deformation by HPT method ( $N = 5$ ) along the sample radius : 1 – center of the sample; 2 – middle of the sample radius; 3 – peripheries; а – calculation by formula (1); б – calculation by formula (2)

Экспериментальные исследования показали, что с достаточной точностью значения характеристик пластичности стали 01ЮТ составляют  $\delta_n \approx \delta_A$ .

Значения характеристик пластичности стали 01ЮТ в исходном горячекатаном состоянии

составляют:  $\delta_n = 0,928$  и  $\delta_A = 0,922$ . Наблюдается снижение пластичности вдоль радиуса образца стали 01ЮТ: в центре  $\delta_n = 0,899$ ,  $\delta_A = 0,884$ , на периферии  $\delta_n = 0,814$ ,  $\delta_A = 0,727$ . При этом определение характеристики пластичности  $\delta_A$  по



формуле (2), в отличие от методики расчета характеристики  $\delta_n$  (формула 1), не требует определения модуля Юнга, твердости и коэффициента Пуассона, вносящих некоторую погрешность.

### Выводы

Интенсивная пластическая деформация методом КГД приводит к значительному повышению значений твердости горячекатаной стали 01ЮТ от 2 ГПа до 5,8 ГПа. Установлено, что в процессе КГД

сохраняется текстура с компонентами  $\{100\}$  и  $\{111\}$ , как и при горячей прокатке, которая характеризуется повышенной поляризованностью. Определение пластичности согласно методике Ю. В. Мильмана показало хорошую согласованность значений  $\delta_n \approx \delta_A$ . Сочетание оптимальной текстуры, повышенной твердости и пластичности горячекатаной стали 01ЮТ с последующей деформацией методом КГД гарантированно улучшит ее способность к штампуемости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Механические свойства металлов : монография / [М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский]. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 495 с.
2. Физические основы прочности тугоплавких материалов : монография / [В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов]. – Киев : Наукова думка, 1975. – 315 с.
3. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов : монография / М. Л. Бернштейн. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 431 с.
4. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали : монография / [В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков]. – Киев : Наукова думка, 1974. – 232 с.
5. Астанин В. В. Масштабный фактор и сверхпластичность сплава Al – 6 % Cu – 0,4 % Zr / В. В. Астанин // Физика металлов и металловедение. – 1995. – Т. 79. – № 3. – С. 166–173.
6. Разрушение деформированной стали : монография / [Ю. Я. Мешков, Т. Н. Сердитова]. – Киев : Наукова думка, 1989. – 160 с.
7. Структура металла и хрупкость стальных изделий : монография / [Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко]. – Киев : Наукова думка, 1985. – 268 с.
8. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов : монография / В. А. Скуднов. – Москва : Metallurgiya, 1988. – 176 с.
9. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов : монография / [В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский, И. Д. Горная, А. Д. Васильев]. – Киев : Наукова думка, 1989. – 256 с.
10. Каверина С. Н. Особенности формирования деформационной структуры в ГЦК-металлах в интервале температур 0,05–0,5 Tпл / С. Н. Каверина, Э. П. Печковский, Г. Ф. Саржан, С. А. Фирстов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2002. – Т. 24. – № 2. – С. 251–269.
11. Mishra R. S. Mechanism of high strain rate superplasticity in aluminum alloy composites / R. S. Mishra, T. R. Bieler, A. K. Mukherjee // Acta Mater. – 1997. – Vol. 45. – № 2. – Pp. 561–568.
12. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : монография / Н. Н. Малинин. – Москва : Машиностроение, 1975. – 400 с.
13. Mazurski M. I. A New Theoretical Concept for Micrograin Superplasticity Providing the Prediction of the Optimum Conditions for Superplastic Deformation / M. I. Mazurski, F. U. Enikeev // Physica Status Solidi. – 1998. – Vol. 206. – Pp. 519–534.
14. Kuhlmann-Wilsdorf D. Theory of Plastic Deformation: properties of low energy dislocation structures / D. Kuhlmann-Wilsdorf // Mat. Sci. and Eng. A. – 1989. – Vol. 113A. – Pp. 1–41.
15. Бочвар А. А. О разных механизмах пластичности в металлических сплавах / А. А. Бочвар // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 11. – С. 53–56.
16. Кузнецов Р. И. Пластическая деформация твердых тел под давлением / Р. И. Кузнецов, В. И. Быков, В. П. Чернышев, В. П. Пилюгин, Н. А. Ефремов, А. В. Пашеев // Препринт 4/85, ИФМ УРО АН СССР. Свердловск. СССР. – 1985.
17. Oliver W. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. Oliver, G. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19. – № 1. – Pp. 3–20.
18. Бородкина М. М. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – Москва : Metallurgiya, 1981. – 272 с.
19. Дедек В. Полосовая сталь для глубокой вытяжки / В. Дедек. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 208 с.
20. Лукин Ю. С. Формирование кристаллографической текстуры в легированных титаном IF-сталях / Ю. С. Лукин, С. В. Бахтин, А. С. Лукин [и др.] // Сталь. – 2009. – № 11. – С. 85–87.
21. Мильман Ю. В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 4. – С. 182–187.
22. International Standard ISO 14577-1-2002(E).
23. Milman Yu. V. Acta Metall. Mater. / Yu. V. Milman, B. A. Galanov, S. I. Chugunova. – 41. – № 9. – 2523 (1993).

### REFERENCES

1. Bernshtein M.L. and Zaimovsry V.A. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1979, 495 p. (in Russian).
2. Trefiliv V.I., Milman U.V. and Firstov S.A. *Fisicheskie osnovy prochnosti tugoplavkikh materialov* [Physical basis of the strength of refractory materials]. Kiyv : Naukova Dumka Publ., 1975, 315 p. (in Russian).

3. Bernshtein M.L. *Struktura deformirovannykh metallov* [The structure of deformed metal] Moscow : Metallurgia Publ., 1977, 431 p. (in Russian).
4. Gridnev V.N., Gavriluk V.G. and Meshkov U.Ya. *Prochnost i plastichnost kholodnodeformirovannoy stali* [The strength and ductility of cold steel]. Kiyv : Naukova Dumka Publ., 1974, 232 p. (in Russian).
5. Astanin V.V. *Masshtabnyi faktor I sverkhplastichnost сплава Al-6%Cu-0,4%Zr* [The scale factor and alloy superplasticity]. *Fizika metallov i metalovedenie* [The Physics of Metals and Metallography]. 1995, vol. 79, no. 3, pp. 166–173. (in Russian).
6. Meshkov U.Ya. and Serditova T.N. *Razrushenie deformirovannoy stali* [Destruction of deformed steel]. Kiyv : Naukova Dumka Publ., 1989, 160 p. (in Russian).
7. Meshkov U.Ya. and Pakhareno G.A. *Struktura meyalla i khrupkost stalnykh izdeliy* [Metal structure and the fragility of the steel products]. Kiyv : Naukova Dumka Publ., 1985, 268 p. (in Russian).
8. Scudnov V.A. *Predelnie plasticheskie deformatsii metallov* [Limit the plastic deformation of metals]. Moscow : Metallurgia Publ., 1988, 176 p. (in Russian).
9. Trefilov V.I., Moiseev V.F., Pechkovskiy E.P., Gornaya I.D. and Vasilev A.D. *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie policristallicheskikh materialov* [Strain hardening and destruction of polycrystalline materials]. Kiyv : Naukova Dumka Publ., 1989, 256 p. (in Russian).
10. Kaverina S.N., Pechkovskiy E.P., Sargan G.F. and Firstov S.A. *Osobennosti formirovaniya deformatsionnoi struktury v GTZK-metallakh v intervale temperature 0,05–0,5T<sub>p</sub>* [Features of formation of the information structure in the GTsK-metals in the range of temperatures 0,0–0,5T<sub>p</sub>]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technology]. 2002, vol. 24, no. 2, pp. 251–269. (in Russian).
11. Mishra R.S., Bieler T.R. and Mukherjee A.K. Mechanism of high strain rate superplasticity in aluminum alloy composites. *Acta Mater*, 1997, vol. 45, no. 2, pp. 561–568.
12. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1975, 400 p. (in Russian).
13. Mazurski M.I. and Yenikeev F.U. A New Theoretical Concept for Micrograin Superplasticity Providing the Prediction of the Optimum Conditions for Superplastic Deformation. *Physica Status Solidi*, 1998, vol. 206, pp. 519–534.
14. Kuhlmann-Wilsdorf D. Theory of Plastic Deformation: properties of low energy dislocation structures. *Mat. Sci. and Eng. A.*, 1989, vol. 113A, pp. 1–41.
15. Bochvar A.A. *O raznykh mekhanizmax plastichnosti v metallicheskikh splavakh* [About the various mechanisms of plasticity in metal alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2002, no. 11, pp. 53–56. (in Russian).
16. Kuznetsov R.I., Bykov V.I., Chernyshev V.P., Pilugin V.P., Yefremov N.A. and Pasheev A.V. *Plasticheskaya deformatsiya tverdykh tel pod davleniem* [Plastic deformation of solids under pressure]. Preprint 4/85, IFM URO AS USSR, Sverdlovsk, USSR, 1985. (in Russian).
17. Oliver W. and Pharr G. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. Mater. Res.*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 3–20.
18. Borodkina M.M. and Spektor E.N. *Rentgenograficheskiy analiz textury metallov i splavov* [Radiographic analysis of the texture of metals and alloys]. Moscow : Metallurgia Publ., 1981, 272 p. (in Russian).
19. Dedek V.I. *Polosovaya stal dlya glubokoy vytyagki* [Steel strip for deep drawing]. Moscow : Metallurgia Publ., 1970, 208 p. (in Russian).
20. Lukin U.S., Bakhtiv S.V. and Lukin A.S. *Formirovanie kristallograficheskoy tekstury v legirovannykh titanom IF-stalyah* [The formation of crystallographic texture in titanium alloyed IF-steels]. *Stal'* [Steel]. 2009, no. 11, pp. 85–87.
21. Milman U.V., Chugunova S.I. and Goncharova I.V. *Kharakteristika plastichnosti, opredelyaemaya metodom indentirovaniya* [Plasticity characteristic defined indentation method]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology]. 2011, no. 4, pp. 182–187. (in Russian).
22. International Standard ISO 14577-1-2002(E).
23. Milman Yu.V., Galanov B.A. and Chugunova S.I. *Acta Metall. Mater.*, 41, no. 9: 2523 (1993).

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Р. П. Дидыком (Украина); д-ром техн. наук, проф. Н. Е. Калининой (Украина)*

Поступила в редколлегию 12.07.2016

Принята к печати 15.08.2016