

Vysokoenergeticheskaia obrabotka materialov [High-energy treatment of materials]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2009, pp. 202–208. (in Russian)

11. Kryshchal M.A., Zhukov A.A. and Kokora A.N. *Struktura i svoystva cplavov obrabotannih izlucheniem lasera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow : Metallurgy Publ., 1973, 192 p. (in Russian)

12. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. and Kokora A.N. *Lazernaja i elektronoluchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 1985, 496 p. (in Russian)

13. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V. and Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kyiv : Technics Publ., 1981, 131 p. (in Russian)

Статья рекомендована к публикации в журнале «Доклады Академии наук Украины», д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина), д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина).

Поступила в редколлегию 05.03.2017

Принята в печать 09.03.2017

УДК 669.018: 620.176.25

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 08Пс ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

КУЦОВА В. З.^{1*}, д. т. н., проф.,
БАЛАКИН В. Ф.², д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО А. П.³, ассист., м. н. с.,
КОТОВА Т. В.⁴, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

² Кафедра технологического проектирования им. В. М. Друяна, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47 42 49, e-mail: kaf.tp@metal.nmetau.edu.ua

³ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(098) 637-16-93, e-mail: ploshenko90@gmail.com

⁴ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

Аннотация. Постановка проблемы. Достижение высокой прочности и пластичности, необходимых для создания новых перспективных конструкционных и функциональных материалов, является одной из фундаментальных проблем материаловедения. Формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) и наноструктуры (НС) при интенсивной пластической деформации (ИПД) обеспечивает получение высокого комплекса механических свойств металлов и сплавов, в том числе и конструкционных сталей, предназначенных для изготовления тонколистового проката. Представлены результаты исследования формирования тонкой структуры и механических свойств стали 08п после горячей прокатки с последующей интенсивной пластической деформацией (ИПД) методом кручения под гидростатическим давлением (КГД) при температуре 25 °С. **Выводы.** Установлено, что твердость и модуль упругости стали 08пс после КГД изменяются по радиусу образца: от центра к периферии твердость возрастает в 2 раза, а модуль упругости снижается на 7 %. Таким образом, для стали 08пс снижение модуля упругости и сохранение пластичности после КГД гарантированно обеспечивает большую склонность к штампуемости, по сравнению с исходным горячекатаным состоянием.

Ключевые слова: наноиндентирование; модуль Юнга; интенсивная пластическая деформация (ИПД); кручение под гидростатическим давлением (КГД)

ФОРМУВАННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ГОРЯЧЕКАТАНОЇ СТАЛІ 08Пс ПІСЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

КУЦОВА В. З.^{1*}, д. т. н., проф.,
БАЛАКИН В. Ф.², д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО Г. П.³, асист., м. н. с.,
КОТОВА Т. В.⁴, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

² Кафедра технологічного проектування ім. В. М. Друяна, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: kaf.tp@metal.nmetau.edu.ua

³ Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(098) 637-16-93, e-mail: ploshenko90@gmail.com

⁴ Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

Анотація. Постановка проблеми. Досягнення високої міцності і пластичності, необхідних для створення нових перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, – одна з фундаментальних проблем матеріалознавства. Формування ультрадрібнозернистої (УДЗ) і наноструктури (НС) за інтенсивної пластичної деформації (ІПД) забезпечує отримання високого комплексу механічних властивостей металів і сплавів, в тому числі і конструкційних сталей, призначених для виготовлення тонколистового прокату. Наведено результати дослідження формування тонкої структури і механічних властивостей сталі 08п після гарячої прокатки з подальшою інтенсивною пластичною деформацією методом кручення під гідростатичним тиском (КГТ) за температури 25 °С. **Висновки.** Встановлено, що твердість і модуль пружності сталі 08пс після КГТ змінюються по радіусу зразка: від центра до периферії твердість зростає удвічі, а модуль пружності зменшується на 7 %. Таким чином, для сталі 08пс зниження модуля пружності та збереження пластичності після КГТ гарантовано забезпечує більшу схильність до штампування, порівняно з вихідним гарячекатаним станом.

Ключові слова: наноіндентування; модуль Юнга; інтенсивна пластична деформація (ІПД); крутіння під гідростатичним тиском (КГТ)

THE STRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION OF HOT-ROLLED STEEL 08PS AFTER COMBINED PLASTIC DEFORMATION

KUTZOVA V.Z.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BALAKIN V.F.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

STETSENKO G.P.³, *Assist.*,

KOTOVA T.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.*

^{1*} Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

² Department of technological engineering behalf V.M. Druyan, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: kaf.tp@metal.nmetau.edu.ua

³ Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(098) 637-16-93, e-mail: ploshenko90@gmail.com

⁴ Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

Abstract. Formulation of the problem. 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. The formation of ultrafine-grained (UFG) and nanostructures (NS) by severe plastic deformation (SPD) provides high complex mechanical properties of metals and alloys, including structural steels. **Presented results** of the researches thin structure of the steel 08nc after severe plastic deformation (SPD) by torsion under hydrostatic pressure (HPT) at the 25 °C. **Conclusion:** It was shown that deformation is localized at the periphery of the sample and formed an inhomogeneous microstructure in diameter. Hardness is increased in 2 times and the modulus of elasticity is reduced in 7 % after deformation by comparison with the initial state. Thus, for steel 08nc decreasing elastic modulus and preservation ductility after HPT provides better propensity to formability, compared with the initial hot rolled state.

Keywords: nanoindentation; Young's modulus; severe plastic deformation (SPD); under hydrostatic pressure torsion (HPT)

Введение

Все большую актуальность приобретают исследования, направленные на создание качественно новых сталей для автолиста и технологий их производства. Такие разработки могут быть осуществлены только на базе глубоких фундаментальных и детальных прикладных исследований процессов и явлений, имеющих место при производстве и последующей эксплуатации

материала. 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. Применительно к УМЗ металлам и сплавам эта проблема может быть решена за счет управления их микроструктурой [1–4].

Поэтому исследования, посвященные установлению закономерностей влияния деформационных режимов на структуро-, текстурообразование, фазовый состав, физико-механические свойства тонколистового проката из низкоуглеродистых (НС) и ультранизкоуглеродистых (УНС) сталей, являются актуальными.

Материал и методики

Объектом исследования в данной работе служили образцы горячекатанной низкоуглеродистой стали 08пс, дополнительно подвергнутые ИПД методом КГД. Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав стали 08пс / Chemical composition of 08ps steel

Марка стали	Содержание химических элементов, % (по массе)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
08пс (ГОСТ 9045-93)	≤ 0,09	0,3	≤ 0,04	≤ 0,025	≤ 0,03	0,1	0,1	0,15	0,02...0,06

Экспериментальные исследования температурных условий прокатки осуществляли в прокатной лаборатории Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины. Деформационный режим

прокатки исследуемой марки стали представлен в таблице 2. Горячекатаные образцы стали 08пс дополнительно подвергали КГД, режим КГД приведен в таблице 3.

Таблица 2

Режим горячей прокатки стали 08пс / Deformation modes of the rolling of 08ps steel

Марка стали	$T_{нагр}$	$T_{1пр}$	h_0	h_1	Δh_1	ϵ_1	$T_{см}$
	°C		мм			%	°C
08пс	1000	750	2,07	1,90	0,17	8,2	охл. на возд.

Примечание: $T_{нагр}$ – температура нагрева листовой стали; $T_{1пр}$ – температура прокатки листовой стали в первом проходе; h_0 – исходная толщина образца; h_1 – толщина образца после первого прохода; Δh_1 – абсолютное обжатие металла в первом проходе; ϵ_1 – относительная степень деформации металла в первом проходе; $T_{см}$ – температура смотки.

Таблица 3

Режим КГД для стали 08пс / НРТ mode of 08ps steel

Марка стали	$T_n, °C$	$D, мм$	$S_0, мм$	N	$P, кгс/см^2$	$S_1, мм$	ϵ_1	γ_1	ϵ_4	γ_4
08пс	25	9,0	0,7	5	310	0,3	3,8	44,85	6,0	403,0

Примечание: T_n – температура испытания, S_0 – толщина до испытания; S_1 – толщина после испытания; N – количество оборотов; D – диаметр образца; P – давление; ϵ – истинная деформация при кручении (ϵ_1 – центр, ϵ_4 – периферия образца); γ – сдвиговая деформация (γ_1 – центр, γ_4 – периферия образца).

В работе истинную и сдвиговую деформации при кручении оценивали расчетным путем [5]. Измерения нанотвёрдости проводили с помощью наноиндентера «Nanoindenter G200» производства США, с использованием алмазной трехгранной пирамидки Берковича. Отпечатки наносили на расстоянии 100 мкм друг от друга. На каждом образце проводили по 10 измерений, затем результаты усредняли. Значения твердости и модуля упругости рассчитывали на глубине от 500 до 900 нм. Испытания выполняли при постоянной скорости деформации, которая составляла $0,05 \text{ с}^{-1}$.

Наиболее распространенным методом анализа данных при наноиндентировании является метод Оливера – Фарра, позволяющий находить твердость и модуль упругости образца без измерения его размеров прямыми методами. Однако существенным

недостатком классического метода Оливера – Фарра является то, что по результатам испытаний находят твердость H и модуль упругости E образца только при максимальной нагрузке на индентор, что не всегда удобно и часто требует длительных и продолжительных испытаний.

В настоящей работе проводили испытания, используя модуль непрерывного контроля жесткости CSM (Continuous Stiffness Measurement), с непрерывной записью кривой нагружения и разгрузки [6].

Микроструктурный анализ стали 08пс после прокатки проводили с помощью оптических микроскопов: «Nikon Eclipse MA-200» и «Neophot-21». При определении величины исходного зерна использовали программное обеспечение для обработки и анализа данных NIS-Elements. Рентгеноструктурный анализ

осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М в $\text{CuK}\alpha$ - излучении.

Результаты исследований

Микроструктура листового проката определяет уровень его механических свойств, а также качество штампованных деталей. Исходное горячекатаное состояние, степень деформации 8,2 %, по режиму с нагревом до 750 °С и прокаткой в один проход в

области ферритно-перлитной структуры металла, характеризуется равномерной структурой по всему сечению листа, размер ферритного зерна составляет 8...20 мкм. Зерна в основном равноосные (рис. 1 а). Исследование микроструктуры поверхности листа стали 08пс после ИПД методом КГД подтвердило наличие сильной локализации деформации на периферии образцов (рис. 1 в).

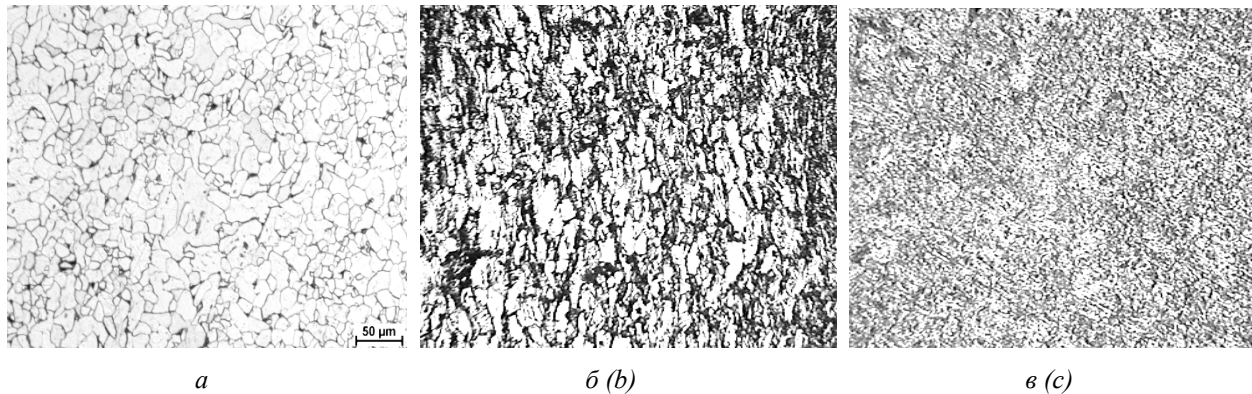


Рис. 1. Микроструктура горячекатаной стали 08пс с последующей холодной деформацией методом КГД: а – исходное горячекатаное состояние; б – центр диска-образца после КГД; в – периферия диска-образца после КГД / Fig. 1. The microstructure of the hot rolled steel 08ps with the followed cold deformation by HPT: a – the initial hot-rolled state; b – the center-sample after HPT; c – the peripherals of the sample after HPT

Тонкая структура исходной горячекатаной стали 08пс представлена на рисунке 2. Повышенное содержание углерода в стали 08пс приводит к наследственной вытянутости зерен и субзерен в исходном горячекатаном состоянии (рис. 2 а). Микродифракционная картина показывает, что границы между кристаллитами являются малоугловыми, т. к. дифракционная картина носит монокристалльный характер (рис. 2 б).

Важной характеристикой при этом является угол азимутального размытия, который зависит от искривления кристаллических решеток на определенной длине диаметра образца. Схема процесса образования размытия рефлексов приведена на рисунке 2 г.

Тонкая структура выделена прямоугольником (рис. 2 з, д), где путем контрастирования стало возможным подсчитать количество субрефлексов от полигонов, формирующих отражения. В данном случае количество субзерен, попадающих в диафрагму диаметром 4...5 мкм, составляет 21 ± 3 субзерна, что позволяет сделать вывод, что размер ячеек составляет 0,5...1,0 мкм при углах разориентации от 0, 5 до 15...20 градусов.

На периферии азимутальное размытие рефлексов столь значительное, что затрудняет их измерение. Поэтому изменение этих углов проводили по отражениям 110, которые соответствуют ориентировке $\langle 111 \rangle$, что дает возможность выбрать из шести отражений равнозначных максимумов

размытый угол, что будет характеризовать реальные значения степени деформации на избранном участке.

Анализ рентгеноструктурных данных показал, что с увеличением значений давления при КГД изменяется размер кристаллитов до наноразмеров при $P = 310 \text{ кг/см}^2$ $L < 100 \text{ нм}$, увеличиваются значения микронапряжений до $1,37 \text{ Н/м}^2$, возрастает плотность дислокаций практически в два раза, как в плоскости (110), так и (220).

Результаты определения нанотвердости и модуля упругости стали 08пс приведены в таблице 5.

Полученные результаты позволяют утверждать, что твердость стали 08пс после КГД изменяется по радиусу образца: от центра к периферии твердость возрастает от $H_1 = 3,4 \text{ ГПа}$ до $H_4 = 6,0 \text{ ГПа}$, соответственно. Повышение твердости в 1,8 раза от центра к периферии образца подтверждает факт локализации деформации на периферии образца. Значения твердости на периферии H_4 практически в два раза выше, чем твердость стали в исходном состоянии H_0 (после прокатки).

Что касается модуля упругости для стали 08пс после КГД, то значения данной величины на глубине внедрения индентора 900 нм уменьшаются от центра к периферии: от $E_1 = 224,96 \text{ ГПа}$ до $E_4 = 177,46 \text{ ГПа}$, т. е. на 7 %. Значения модуля упругости сильно снижаются от центра к периферии с глубиной проникновения индентора в материал образца. Снижение модуля упругости после КГД гарантирует улучшение штампуемости стали 08пс.

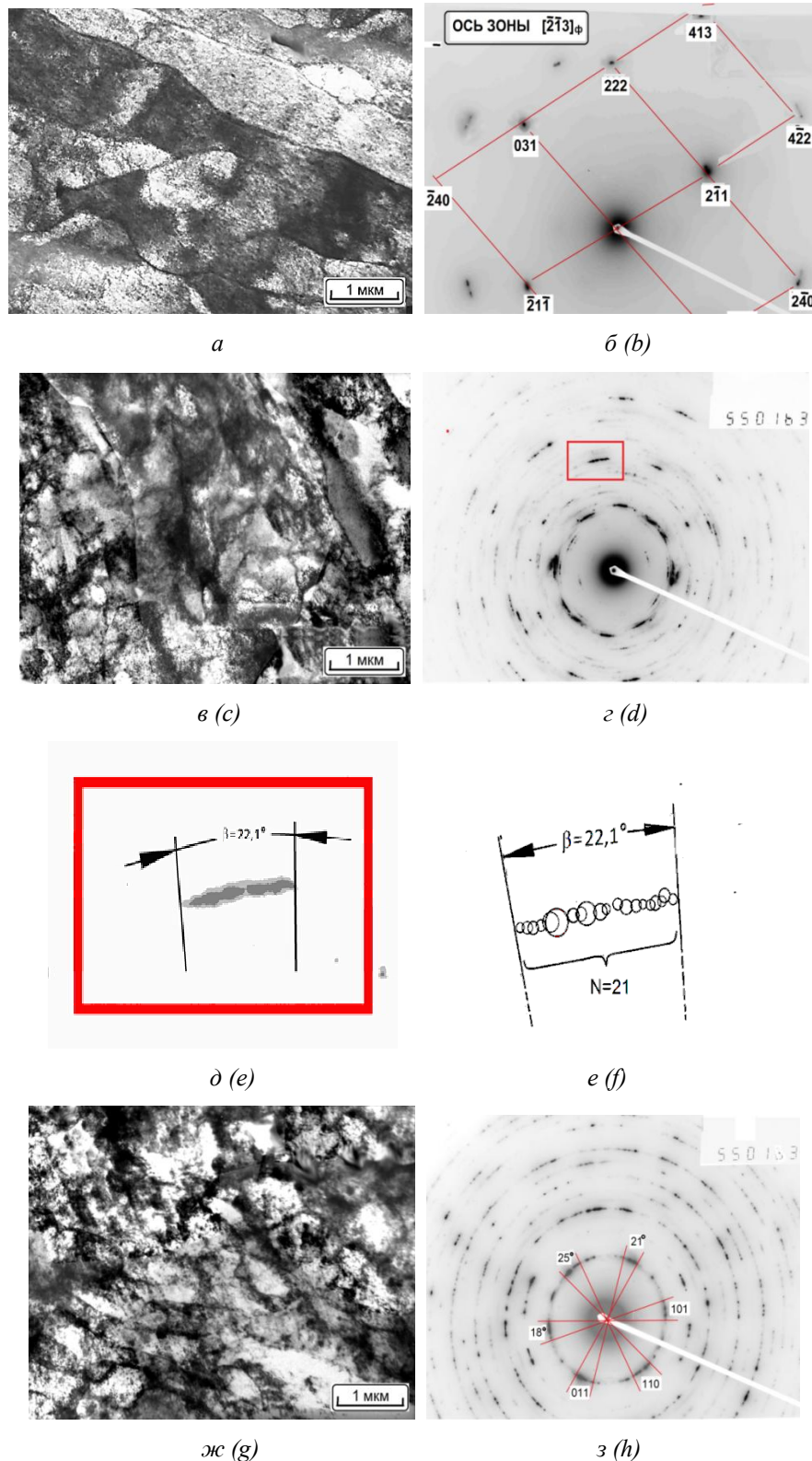


Рис. 2. Тонкая структура низкоуглеродистой горячекатаной стали 08пс после дополнительной ИПД методом КГД: а, б – структура и дифракционная картина горячекатаного состояния; в, г – структура и дифракционная картина середины радиуса образца после КГД; д, е – схема формирования субзерен; ж, з – структура и дифракционная картина периферии образца после КГД / Fig. 2. The thin structure of the low-carbon hot-rolled steel 08ps after SPD by HPT: a, b – structure and diffraction pattern of the hot-rolled state; c, d – the structure and the diffraction pattern of the mid-range of the sample after HPT; e, f – scheme of formation subgrains; g, h – structure and the diffraction pattern of the periphery of the sample after HPT

Таблиця 4

Данные рентгеноструктурного анализа для стали 08пс после КГД /
X-ray diffraction analysis data of 08ps steel after rolling and НТР

d , мм	S_0	N	P , кг/см ²	a , Å	L_1 , нм	L_2 , нм	L , нм	M , 10 ⁻³ Н/м ²	D_{110} , 10 ¹⁰ см ⁻²	D_{220} , 10 ¹⁰ см ⁻²
9,0	0,7	5	310	2,8663	75,5	51,8	99,4	1,37	9,4	41,1
15	0,9		100	2,8672	97,7	59,4	127,1	1,31	5,79	31,0
			55	2,8663	107,6	70,1	139,9	1,05	4,77	22,4

Примечание: d – диаметр образца, S_0 – толщина образца, P – давление, a – параметр решетки, L – размер кристаллитов, M – напряжение, D – плотность дислокаций.

Таблиця 5

Результаты наноиндентирования стали 08пс в исходном состоянии и после КГД /
Nanoindentation results of the steel 08ps in initial state and after НТР

h , нм	Исходные данные		Данные после КГД							
	H_0 , ГПа	E_0 , ГПа	H_1 , ГПа	E_1 , ГПа	H_2 , ГПа	E_2 , ГПа	H_3 , ГПа	E_3 , ГПа	H_4 , ГПа	E_4 , ГПа
500	2,998	211,359	3,40	222,19	3,63	198,52	5,25	197,03	6,01	196,70
900	2,938	218,434	3,45	224,96	3,59	188,87	5,14	175,08	6,01	177,46

Примечание: h – глубина внедрения индентора, H_0 – твердость после прокатки, E_0 – модуль упругости после прокатки, изменение твердости H_1 – H_2 и модуля упругости E_1 – E_2 по радиусу образца.

Выводы

В результате КГД низкоуглеродистой стали 08пс формируется неоднородная структура, которая характеризуется течением металла в направлении кручения. Такого рода неоднородность обусловлена изменением степени деформации при КГД от периферии к центру образца.

Анализ рентгеноструктурных данных стали 08пс после КГД подтверждает формирование

ультрамелкозернистой структуры и наноструктуры с размером кристаллитов менее 100 нм.

Установлено, что твердость и модуль упругости стали 08пс после КГД изменяются по радиусу образца: от центра к периферии твердость возрастает, а модуль упругости уменьшается. Таким образом, для стали 08пс снижение модуля упругости после КГД гарантированно обеспечивает большую склонность к штампуемости по сравнению с исходным горячекатаным состоянием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Механические свойства металлов : монография [М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский]. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 495 с. – Режим доступа: http://www.studmed.ru/bernshteyn-ml-zaymovskiy-ma-mehanicheskie-svoystva-metallov_511244_ec9a7.html
2. Физические основы прочности тугоплавких материалов : монография / [В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов]. – Киев : Наукова думка, 1975. – 315 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/169674/>
3. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов : монография / М. Л. Бернштейн. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 431 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/675269/>
4. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали : монография / [В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков]. – Киев : Наукова думка, 1974. – 232 с. – Режим доступа: http://нэб.пф/catalog/000016_000021_CHONB-RU_%D0%A7%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D0%B1%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F+%D0%9E%D0%A3%D0%9D%D0%91_IBIS_669.14%3A539.4-945145/
5. Кузнецов Р. И. Пластическая деформация твердых тел под давлением / Р. И. Кузнецов, В. И. Быков, В. П. Чернышев, В. П. Пилогин, Н. А. Ефремов, А. В. Пашеев // Препринт 4/85. – Свердловск : / ИФМ УРО АН СССР, 1985. – Режим доступа: <http://www.msm.cam.ac.uk/mechtest/docs/untitled/MTS%20Info/Oliver%20Pharr%20Paper.pdf>
6. 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. – P. 3–20.

REFERENCES

1. Bernshtein M.L. and Zaimovsry V.A. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow : Metallurgia, 1979, 495 p. (in Russian)
2. Trefiliv V.I., Milman U.V. and Firstov S.A. *Fizicheskiye osnovy prochnosti tugoplavkikh materialov* [Physical basis of the strength of refractory materials]. Kyiv : Naukova Dumka, 1975, 315 p. (in Russian).
3. Bernshtein M.L. *Struktura deformirovannykh metallov* [The structure of deformed metal]. Moscow : Metallurgia, 1977, 431 p. (in Russian).
4. Gridnev V.N., Gavriluk V.G. and Meshkov Yu.Ya. *Prochnost i plastichnost kholodnodeformirovannoy stali* [The strength and ductility of cold steel]. Kyiv : Naukova Dumka, 1974, 232 p. (in Russian).
5. Kuznetsov R.I., Bykov V.I., Chernyshev V.P., Pilyugin V.P., Yefremov N.A. and Pasheev A.V. *Plasticheskaya deformaciya tverdyh tel pod davleniem* [Plastic deformation of solids under pressure]. Working paper 4/85, Sverdlovsk : IFM URO AS USSR, 1985. (in Russian)
6. 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.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина), д-ром техн. наук, проф. А. В. Ноговицыным (Украина).

Поступила в редколлегию 20.04.2017

Принята в печать 21.04.2017