

УДК 669.017: 620.179.18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08пс ПОСЛЕ КГД МЕТОДОМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

КУЦОВА В. З.¹, д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО А. П.^{2*} асп.

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

^{2*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, Украина, 49005, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: ploshenko90@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. Основное требование к листовым сталям для вытяжки – обеспечение высокой степени деформируемости при изготовлении деталей сложной формы, высокое качество поверхности после деформации, которое необходимо для нанесения защитного покрытия. Кроме того, высокая пластичность корпусных деталей препятствует хрупкому разрушению в случаях аварий, что также позволяет снизить массу автомобиля. Наиболее широкое применение для указанных целей находят низколегированные стали с традиционными механизмами упрочнения (измельчение зерна, дисперсионное твердение и твердорастворное упрочнение). Поэтому проведение работ, направленных на повышение комплекса свойств, в первую очередь, пластичности, а также стабильности прочностных характеристик низколегированных сталей с традиционными механизмами упрочнения, является актуальным. **Результаты исследования.** Методом инструментального автоматического индентирования с использованием новой методологии обработки данных [1] и анализа результатов для стали 08пс после кручения под гидростатическим давлением (КГД) рассчитаны величины деформации и напряжения, которые соответствуют началу пластической деформации материала при простых схемах нагружения. Установлено влияние схемы деформации на формирование микроструктуры и механические свойства исследуемой стали. **Цель работы:** определить характеристики прочности и пластичности для низкоуглеродистой стали 08пс после КГД. **Вывод.** Исследованы структура, размер зерен, плотность дислокаций, твердость, модуль упругости стали 08пс после прокатки и КГД. Установлено, что сталь 08пс после КГД характеризуется повышенной прочностью и пониженной пластичностью.

Ключевые слова: индентирование; модуль упругости; уравнение индентирования; предельная твердость

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ І ПЛАСТИЧНОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ 08пс ПІСЛЯ КГТ МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ

КУЦОВА В. З.¹, д. т. н., проф.,
СТЕЦЕНКО Г. П.^{2*}, асп.

¹ Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

^{2*} Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: ploshenko90@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Основною вимогою до листових сталей для витяжки – забезпечення високого ступеня деформованості у виготовленні деталей складної форми, висока якість поверхні після деформації, необхідна для нанесення захисного покриття. Крім того, висока пластичність корпусних деталей перешкоджає крихкому руйнуванню у випадках аварій, що також дозволяє знизити масу автомобіля. Найширше застосування для вказаних цілей знаходять низьколеговані сталі з традиційними механізмами зміцнення (подрібнення зерна, дисперсійне твердіння і твердорастворне зміцнення). Тому проведення робіт, спрямованих на підвищення комплексу властивостей, в першу чергу, пластичності, а також стабільності міцності низьколегованих сталей із традиційними механізмами зміцнення, досить актуальне. **Результати дослідження.** Методом інструментального автоматичного індентування із застосуванням нової методології обробки даних [1] і аналізу результатів сталі 08пс після крутіння під гідростатичним тиском (КГТ), розраховано величини деформації і напруги, які відповідають початку пластичної деформації матеріалу при простих схемах навантаження. Встановлено вплив схеми деформації на формування микроструктури та механічні властивості досліджуваної сталі. **Мета роботи:** визначити характеристики міцності і пластичності низьковуглецевої сталі 08пс після КГТ. **Висновок.** Досліджено структуру, розмір зерен, щільність дислокацій, твердість, модуль пружності сталі 08пс після прокатки і КГТ. Установлено, що сталь 08пс після КГТ характеризується підвищеною міцністю і зниженою пластичністю.

Ключові слова: індентування; модуль пружності; рівняння індентування; гранична твердість

THE STRENGTH AND PLASTICITY DETERMINATION OF THE LOW CARBON STEEL 08ps AFTER HPT BY INDENTATION

KUTZOVA V.Z.¹, *Doct. Sc. (Tech.), Prof.*,
STETSENKO G.P.^{2*}, *Grad. Stud.*

¹ Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: root@lks.dp.ua

^{2*} Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: ploshenko90@gmail.com

Summary. Raising of problem. The main requirements for sheet steel for exhaust are providing a high degree of deformability in the manufacture of the complex shapes, high quality surface after deformation, which is necessary for the application of a protective coating. In addition, high plasticity of main parts prevents brittle fracture in the case of accidents, which also reduces the weight of the vehicle. The most widely used for these purposes are low alloy steels with conventional hardening mechanisms (grain refinement, precipitation hardening and solid solution hardening). Therefore, carrying out activities aimed at improving the properties of the complex in the first place, ductility and stability of strength properties of low-alloy steels with conventional hardening mechanisms is important. **Study results.** The strain and stress, which correspond to the beginning of plastic deformation of the material for simple loading schemes, were calculated by using new processing methodology [1] and instrumental automatic indentation for steel 08ps after high torsion pressure (HPT). The influence of deformation scheme on the microstructure and mechanical properties formation was investigated for steel 08ps. **Purpose:** to determinate the characteristics of strength and ductility for mild steel 08ps after HPT. **Conclusion.** The structure, grain size, dislocation density, hardness, modulus of elasticity of steel 08ps after rolling and HPT were investigated at present work. It was found that steel 08ps after HPT characterized by increase strength and low ductility.

Keywords: indentation; elastic modulus; indentation equation; the maximum

Введение

Получение объемных наноструктурных металлов и сплавов с помощью ИПД становится важным и быстро развивающимся направлением современного материаловедения, задачей которого является создание материалов с высокими механическими и физическими свойствами. Диспергирование микроstructures до субмикро- или нанокристаллического уровня вызывает значительное повышение прочности, предела выносливости и понижение температуры перехода в сверхпластическое состояние материала [2; 3]. Материалы, полученные методом КГД, характеризуются высоким уровнем внутренних напряжений и значительными искажениями кристаллической решетки. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что сталь 08пс, полученная методом КГД,

характеризуется уникальным комплексом физико-механических свойств, а именно: высокой прочностью при сохранении достаточной пластичности.

Материал и методики исследования

Объектом исследования в данной работе служили образцы горячекатаной низкоуглеродистой стали 08пс после КГД. Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

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 подвергали КГД, режим КГД приведен в таблице 3.

Таблица 1

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

Марка стали	Содержание химических элементов, % (массовая доля, %)								
	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

Таблица 2

Деформационный режим обработки стали 08пс /
Temperature and deformation mode 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	1 000	750	2,07	1,90	0,17	8,2	охл. на возд.

Примечание: $T_{нагр}$ – температура нагрева листовой стали; $T_{пр}$ – 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 стали 08пс / HPT mode of 08ps steel

Марка стали	$T_{и}, ^\circ\text{C}$	$D, \text{мм}$	$S_0, \text{мм}$	N	$P, \text{кгс/см}^2$	$S_1, \text{мм}$	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: $T_{и}$ – 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 [4]. Измерения нанотвёрдости проводили с помощью наноиндентора «Nanoindenter G 200» 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 рассчитаны 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. В настоящей работе проводили испытания, используя

модуль непрерывного контроля жесткости CSM (Continuous Stiffness Measurement), с непрерывной записью кривой нагружения и разгружения [5].

Микроструктурный анализ стали 08пс после прокатки проводили с помощью оптических микроскопов: «Nikon Eclipse MA-200» и «Neophot-21». Для определения 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 исследования

На рисунке 1 представлена микроструктура исходного горячекатаного образца стали 08пс.

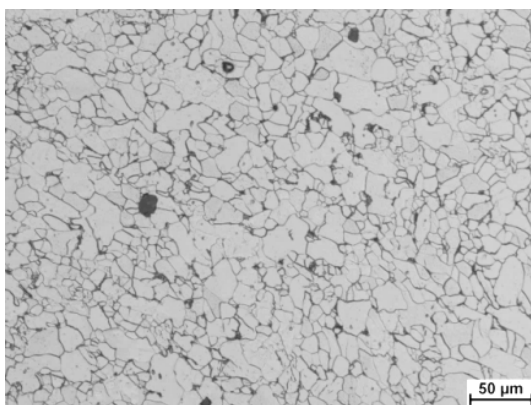


Рис. 1. Микроструктура стали 08пс после горячей прокатки /
Fig. 1. Microstructure of steels 08ps after hotrolling

Прокатка в области ферритно-перлитной структуры металла обеспечила получение равномерной структуры по всему сечению листа, размер ферритного зерна составляет 8...20 мкм (рис. 1). Зерна в основном равноосные.

На рисунке 2 представлена микроструктура стали 08пс после ИПД методом КГД.

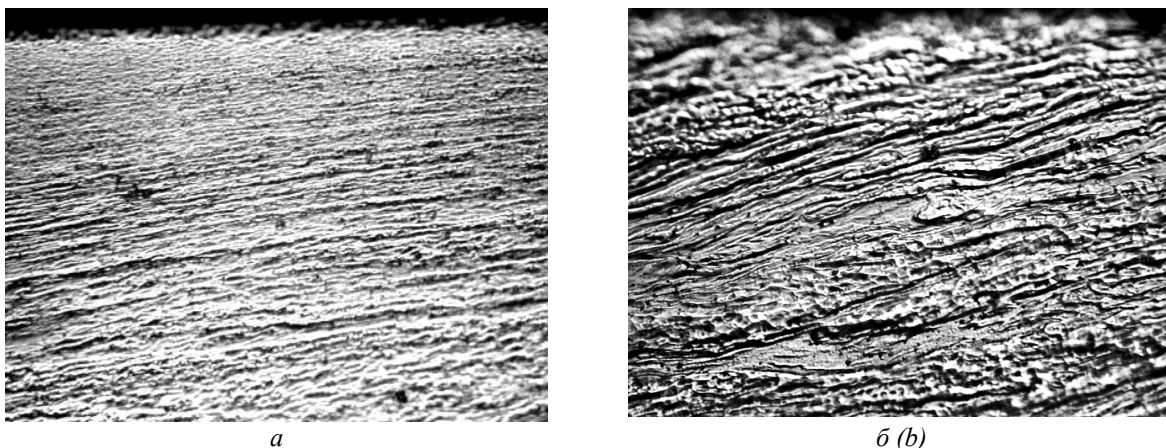


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения образца стали 08пс после КГД, N = 5: а – общий вид, × 50; б – периферия образца, × 400 / Fig.2. The microstructure of the sample cross section of the steel 08ps after HPT, N = 5: a – general view; b – sample periphery

Исследование микроструктуры в поперечном сечении образцов подтвердило наличие сильной локализации деформации на периферии образцов. На рисунке 2 а хорошо видны линии течения металла в процессе деформации, приводящие к

формированию выраженной металлографической текстуры, совпадающей с направлением кручения.

Рентгеноструктурный анализ. Данные рентгеноструктурного анализа стали 08пс после КГД приведены в таблице 4.

Таблица 4

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

D, мм	S ₀	N	P, кгс/см ²	a, Å	L ₁₁₀ , нм	L ₂₂₀ , нм	L, нм	M, 10 ⁻³ Н/м ²	D ₁₁₀ ¹⁰ , см ⁻²	D ₂₂₀ 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: a – параметр решетки, L – размер кристаллитов, M – напряжение, D – плотность дислокаций.

Анализ рентгеноструктурных данных стали 08пс после КГД (N = 5, P = 310 кгс/см², D = 9 мм) подтверждает формирование нано- и ультрамелкозернистой структуры с размером кристаллитов менее 100 нм.

Определение характеристик прочности и пластичности при индентировании:

1) Определение твердости и модуля упругости. Результаты определения твердости и модуля упругости для стали 08пс методом Оливера – Фарра в исходном состоянии и после КГД на глубине внедрения 500 и 900 нм приведены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты измерения твердости и модуля упругости методом индентирования для стали 08пс / The results of hardness and elastic modulus measurements by indentation for steel 08ps

h, нм	Исход. данные		После КГД (N = 5)							
	H ₀	E ₀	H ₁	E ₁	H ₂	E ₂	H ₃	E ₃	H ₄	E ₄
500	2,99	211,36	3,40	222,19	3,63	198,52	5,25	197,03	6,01	196,70
900	2,94	184,3	3,45	224,96	3,59	188,87	5,14	175,08	6,01	177,46

Примечание: h – глубина внедрения индентора, H₀ – твердость после прокатки, изменение твердости H₁–H₂ по радиусу образца (от центра к периферии), E₀ – модуль упругости после прокатки, изменение модуля упругости E₁–E₂ по радиусу образца (от центра к периферии).

2) **Уравнение индентирования для стали 08пс после КГД.** Одной из важных характеристик материала является отношение его твердости H к модулю нормальной упругости E (модулю Юнга) H/E^* . Известно [6–8], что величина H/E^* характеризует способность материала сопротивляться изменению размеров и формы в процессе деформации. Расчет величины H_{IT}/E^* согласно ISO 14577 [9] и методологии акад. НАНУ С. А. Фирстова (Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев) [1] производили по формуле:

$$H_{IT}/E^* = 0,3206 \cdot (h_s/h_c), \tag{1}$$

где h_s – глубина внедрения индентора, на протяжении которой контакт с материалом отсутствует в результате образовавшегося в материале углубления вокруг индентора; h_c – глубина внедрения, на протяжении которой осуществляется контакт между индентором и материалом после полного нагружения.

На рисунке 3 показано изменение величины H/E^* вдоль радиуса образца.

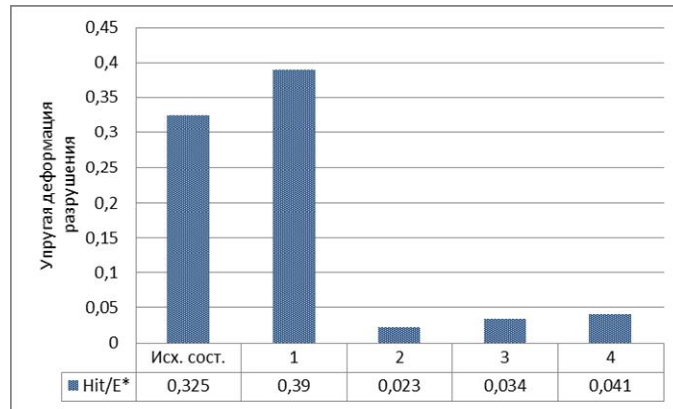


Рис. 3. Анализ расчетов упругой деформации разрушения для стали 08пс после КГД вдоль радиуса образца / Fig. 3. The calculations analysis of elastics train to failure for steel 08ps after HPT along the sample radius

Значение H_{IT}/E^* в исходном состоянии для стали 08пс составляет 0,325. При последующем кручении в результате пластического деформирования происходит снижение значений H_{IT}/E^* от центра к радиусу образца до $H_{IT}/E^* = 0,041$, что свидетельствует о неравномерности деформации стали 08пс.

3) **Определение предельной твердости для стали 08пс после КГД.** Величина $H_{пред}$ определяется константами упругости его и индентора (модули Юнга и коэффициенты Пуассона) и условиями индентирования, в частности теми параметрами,

которые влияют на константы упругости материала и индентора, а также углом заточки индентора.

Предельную твердость рассчитывали по формуле [1]:

$$H_{пред} = 0,1803 \cdot E^*, \tag{2}$$

где E^* – модуль упругости.

На рисунке 4 показано распределение значений $H_{пред}$ по радиусу образца для стали 08пс.

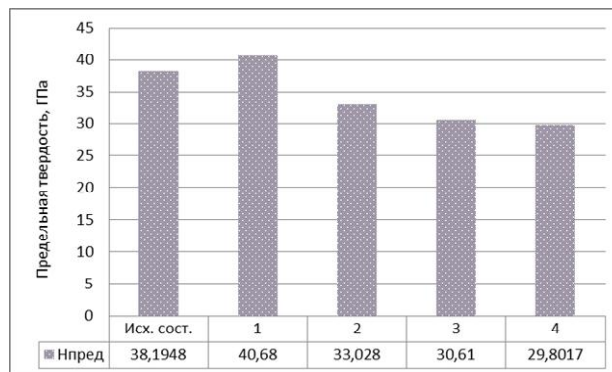


Рис. 4. Распределение значений предельной твердости по радиусу образца для стали 08пс после КГД (N = 5) / Fig. 4. The hardness limit values distribution for steel 08ps after HPT (N = 5) along the sample radius

Значения предельной твердости имеют неравномерный характер распределения по радиусу образца. Значение $H_{пред}$ снижается от 38,19 ГПа до 29,8 ГПа. Фактором, обеспечивающим достижение предельной твердости, является наличие полностью упругой деформации материала под индентором (диаграммы нагружения и разгрузки совпадают).

4) Определение величины упругой деформации и соответствующих напряжений. Рассчитанные

значения величины упругой деформации по радиусу образца представлены на рисунке 5:

$$\epsilon_{es} = 0,307 (H_{IT}/E^*) [1], \tag{3}$$

где H_{IT}/E^* – величина, которая характеризует способность материала сопротивляться изменению размеров и формы в процессе деформации.

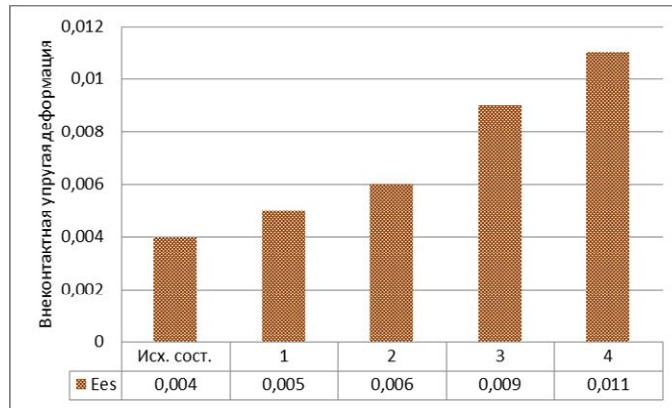


Рис. 5. Расчетные значения величины упругой деформации по радиусу образца для низкоуглеродистой стали после КГД (N=5)/ Fig. 5. Calculated values of the elastic deformation for steel 08nc after HPT (N = 5) along the sample radius

Значения упругой деформации также изменяются вдоль радиуса образца: в центре минимальное значение $\epsilon_{es} = 0,004$, максимальное на периферии $\epsilon_{es} = 0,011$. На протяжении глубины внедрения связь между внеконтактной упругой деформацией материала и соответствующим ей напряжением может быть описана выражением, аналогичным закону Гука (использование такого приема обосновано в ряде работ [6; 8]). Значения напряжений и их предельных величин определяли по формулам [1]:

$$\sigma_{es} = E^* \cdot \epsilon_{es}, \tag{4}$$

$$\sigma_{es}^{пред} = E^* \cdot \epsilon_{es}^{пред}, \tag{5}$$

где E^* – модуль упругости; ϵ_{es} – внеконтактная упругая деформация; $\epsilon_{es}^{пред}$ – предельная внеконтактная упругая деформация.

Изменение значений напряжений вдоль радиуса образца показано на рисунке 6.

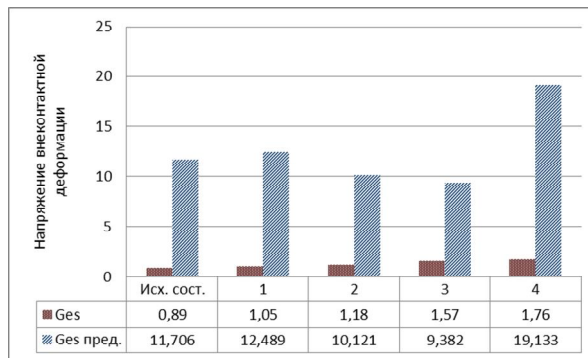


Рис. 6. Расчетные значения напряжений внеконтактной упругой деформации и его предельных величин для низкоуглеродистой стали 08nc / Fig. 6. The calculated values of non-contact stress and their elastic deformation limit values for low-carbon steel 08ps

Значения напряжений возрастают в соответствии со значениями внеконтактной упругой деформации (рис. 6). В исходном горячекатаном состоянии $\sigma_{es} = 0,89$, после КГД: минимальные напряжения в центре образца $\sigma_{es} = 1,05$, а максимальные на периферии $\sigma_{es} = 1,76$. Отсюда следует, что и упругие, и пластические характеристики материала, определяемые при индентировании, контролируются величиной его упругой деформации.

5) Определение характеристики пластичности. Сочетание прочностной характеристики H и характеристики пластичности δ_H позволяет более полно характеризовать механическое поведение материала, чем только твердость. Целесообразным оказалось введение новой характеристики пластичности как доли пластической деформации в общей упруго-пластической деформации. Такая характеристика (соответствующая физическому определению пластичности как способности

материала к пластической деформации) была предложена в работе [10] в виде безразмерного параметра. Эта характеристика пластичности может быть определена при различных методах механических испытаний (растяжение, сжатие, изгиб), но проще определять ее при индентировании пирамидальными инденторами, как показано в [10].

Расчет характеристики пластичности осуществляли согласно формуле, предложенной в [10]:

$$\delta_H = 1 - 10.2 \cdot (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HM}{E}, \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуансона; HM – твердость; E – модуль упругости.

На рисунке 7 представлено изменение характеристики пластичности стали 08пс по радиусу образца после КГД.

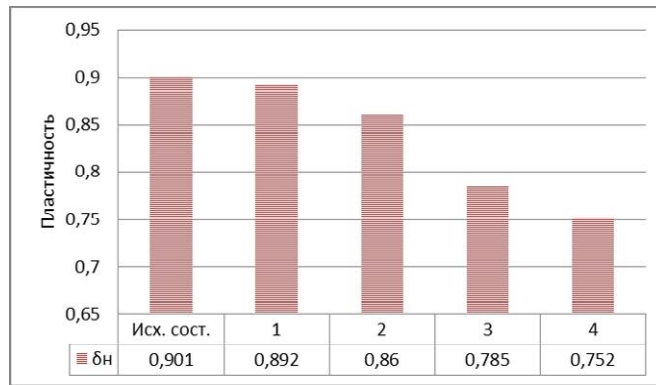


Рис. 7. Расчетные значения характеристики пластичности по радиусу образца для стали 08пс после КГД ($N = 5$) / Fig. 7. The calculated values of the characteristics of plasticity for steel 08ps after HPT ($N = 5$) along the sample radius

В исходном состоянии стали 08пс значение пластичности $\delta = 0,901$. Снижение характеристик пластичности после КГД связано с увеличением показателей твердости, вызванным поверхностным упрочнением. Неравномерное распределение пластичности по радиусу образца вызвано природой локализации деформации при процессе КГД на периферии образца. При $\varepsilon = 5,308$ и $H = 6,01$ ГПа, что соответствует значениям на периферии образца, показатель пластичности составляет $\delta = 0,752$, в то время как в центральной зоне образца, при $\varepsilon = 3,8$ ГПа и $H = 3,4$ ГПа, $\delta = 0,892$, что очень близко к значению показателя пластичности в исходном состоянии (рис. 8).

Таким образом, предварительный наклеп привел к заметному упрочнению материала, по сравнению с ненаклепанным состоянием, и снижению пластичности. Данное поведение вероятно вызвано выделением карбидов и нитридов.

Выводы

1. 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.

2. Установлено, что твердость и модуль упругости стали 08пс после КГД изменяются по радиусу образца: от центра к периферии твердость возрастает, а модуль упругости уменьшается.

3. Рассчитаны характеристики прочности и пластичности для стали 08пс в исходном состоянии и после КГД. Показано, что в результате КГД значения напряжений при индентировании возрастают в соответствии со значениями внеконтактной упругой деформации, которые также возрастают по мере

удаления от центра к периферии образца. Установлено, что после КГД значения характеристики пластичности снижаются, что связано с увеличением показателей твердости, вызванным поверхностным упрочнением.

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. Фирстов С. А. Новые методологические возможности определения механических свойств современных материалов методом автоматического индентирования / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский. – Наука та інновації. – 2010. – Т. 6. – № 5. – С. 7–18.
Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/All/Scinn/2010_5/Firstov.pdf
2. Объемные наноструктурные металлические материалы : монография / [Р. З. Валиев, И. В. Александров]. – Москва: ИКЦ Академкнига, 2007. – 398 с.
Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/707888/>
3. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы : монография / [Н. И. Носкова, Р. Р. Мулюков]. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 279 с.
Режим доступа: https://books.google.com.ua/books/about/Субмикроструктурные_и_нанокристаллические_металлы_и_сплавы.html?id=HUmwAAAACAAJ&redir_esc=y
4. Пластическая деформация твердых тел под давлением : монография / [Р. И. Кузнецов, В. И. Быков, В. П. Чернышев, В. П. Пилugin, Н. А. Ефремов, А. В. Пашеев] // ИФМУРО Академии наук СССР. – Свердловск, 1985. – 123 с.
Режим доступа: <http://66.181.23.20/Default.aspx?book=3j19d4m4m>
5. 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.
Режим доступа: <http://www.msm.cam.ac.uk/mechtest/docs/untitled/MTS%20Info/Oliver%20Pharr%20Paper.pdf>
6. Мильман Ю. В. Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором / Ю. В. Мильман // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. — Київ: Наукова думка, 1998. — С. 637–656.
Режим доступа: file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B0/PhTVD_2011_21_1_2.pdf
7. Cheng Yang-Tse. Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation / Cheng Yang-Tse, Cheng Che-Min // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73. – № 5. – Pp. 614–619.
Режим доступа: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/73/5/10.1063/1.121873>
8. Галанов Б. А. Аналитическая модель индентирования хрупких материалов / Б. А. Галанов, О. Н. Григорьев // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2006. – Т. 13. – С. 4–42.
Режим доступа: [ile:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B0/empm_2015_21_17%20\(2\).pdf](ile:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B0/empm_2015_21_17%20(2).pdf)
9. Metallic Materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. ISO 14577, 2002, 76 p.
Режим доступа: <http://nanomechanicsinc.com/wp/wp-content/uploads/2015/12/App-Note-Interactive.pdf>
10. 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.
Режим доступа: http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2011_4/article_2011_4_182.pdf

REFERENCES

1. Firstov S.A., Gorban V.F. and Pechkovskiy E.P. *Novye metodologicheskie vozmozhnosti opredelenia mehanicheskikh svoistv sovremennykh materialov metodom avtomaticheskogo indentirovaniya* [New methodological possibilities of determining the mechanical properties of advanced materials by automatic indentation]. *Nauka ta innovatsii* [Science and Innovation]. 2010, vol. 6, no. 5, pp. 7–18. (in Russian).
2. Valiev R.Z. and Alexandrov I.V. *Ob'yemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy* [Bulk nanostructured metallic materials]. Moscow : IKTs Akademkniga, 2007, 398 p. (in Russian).
3. Noskova N.I. and Mulukov R.R. *Submikrokristallicheskie i nanokristallicheskie metally i splavy* [Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys]. Ekaterinburg : UrORAN, 2003, 279 p. (in Russian).
4. Kuznetsov R.I., Bykov V.I., Chernyshev V.P., Pilugin V.P., Efremov N.F. and Pasheyev A.V. *Plasticheskaya deformatsiya tverdykh tel pod davleniyem* [Plastic deformation solid bodies under pressure]. IFMURO Akademii Nauk SSSR, Sverdlovsk, 1985, 123 p. (in Russian).
5. 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.
6. Milman U.V. *Novye metodiki mikromekhanicheskikh ispytaniy materialov metodom lokalnogo nagruzheniya zhostkim indentorom* [New techniques micromechanical testing of materials by local loading hard indenter]. *Suchasne materialoznavstvo XXI storichchia*. [Modern materials XXI century]. Kiyv: Naukova Dumka, 1998, pp. 637–656. (in Russian).
7. Cheng Yang-Tse and Cheng Che-Min. Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 73, no. 5, pp. 614–619.
8. Galanov B.A. and Grigorev O.N. *Analiticheskaya model' indentirovaniya khrupkikh materialov* [Analytical model of the indentation of brittle materials]. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost' materialov* [Electron microscopy and strength of materials]. 2006, vol. 13, pp. 4–42. (in Russian).

9. Metallic Materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. ISO 14577, 2002, 76 p.

10. Milman U.V., Chugunova S.I. and Goncharova I.V. *Kharakteristika plastichnosti, opredelyayemaya metodom indentirovaniya* [Plasticity characteristic defined by indentation method]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology]. 2011, no. 4, pp. 182–187. (in Russian).

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 31.05.2016

Принята к печати 03.06.2016