



УДК 620.176.24

В. З. Куцова /д. т. н./,
А. П. СтеценкоНациональная металлургическая академия
Украины, г. Днепра, Украина
e-mail: root@lks.dp.ua; ploshenko90@gmail.com

Влияние кручения под гидростатическим давлением на тонкую структуру и свойства горячекатанной стали 01ЮТ

V. Z. Kutzova /Dr. Sci. (Tech.),
A. P. StecenkoNational Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
e-mail: root@lks.dp.ua, ploshenko90@gmail.com

Influence of hydrostatic pressure torsion on the fine structure and properties of hot-rolled steel 01ЮТ

Цель. Исследование тонкой структуры при интенсивной пластической деформации (ИПД) методом кручения под гидростатическим давлением (КГД) для улучшения комплекса физико-механических свойств горячекатаной ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ.

Методика. Электронно-микроскопические исследования осуществляли с помощью микроскопа JEM фирмы JEOL. Для оценки механических свойств испытания использовали модуль непрерывного контроля жесткости CSM (Continuous Stiffness Measurement) с непрерывной записью кривой нагружения и разгрузки.

Результаты. Представлены результаты исследования формирования тонкой структуры стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей ИПД методом КГД при температуре 25 °С. Установлено, что после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура с элементами наноструктуры с размером кристаллитов менее 100 нм в плоскостях (110) и (220). Определено, что значения твердости горячекатаной стали 01ЮТ с последующей деформацией методом КГД повышаются в 2,9 раза по сравнению с горячекатаным состоянием, модуль упругости при этом увеличивается на 15 %.

Научная новизна. Впервые показана возможность формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с размерами кристаллитов менее 100 нм в процессе КГД горячекатаной стали 01ЮТ.

Практическая значимость. Достижение высокой прочности и пластичности, необходимых для создания новых перспективных конструкционных и функциональных материалов. (Ил. 2. Табл. 4. Библиорг.: 7)

Ключевые слова: IF-сталь, Модуль Юнга, интенсивная пластическая деформация (ИПД), кручение под гидростатическим давлением (КГД).

Введение. Большие пластические деформации позволяют получать в материале высокую плотность дефектов, оказывающую значительное влияние на его механические и физические свойства. Поэтому задачи по исследованию больших пластических деформаций остаются очень актуальными. Обычно степень дефектности и напряжения, возникающие в материале при легировании или при пластической деформации, исследуют различными методами (рентгеноструктурным, электронно-микроскопическим, измерением электросопротивления и т. д.). Наличие областей искажений в дефектном кристалле сопровождается изменением диф-

ракционных картин и появлением контраста на электронно-микроскопических изображениях. При наличии постепенно меняющейся ориентировки кристаллической решетки в различных участках фольги на электронно-микроскопических снимках наблюдают изгибные экстинкционные контуры, по которым можно определять локальные напряжения и кривизну кручения кристаллической решетки [1–2]. В литературе представлено большое количество работ, выполненных различными авторами, в которых использован один из указанных выше методов. Однако все эти методы исследования имеют как свои достоинства, так и ограничения.

Цель данных исследований заключается в выявлении особенностей формирования тонкой структуры при ИПД методом кручения под гидростатическим давлением (КГД) для улучшения комплекса физико-механических свойств ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ.

Материал и методики. В работе исследовали тонкую структуру и свойства горячекатаной стали 01ЮТ, подвергнутой дополнительной ИПД методом КГД, химический состав которой приведен в табл. 1. Экспериментальные исследования температурно-деформационных условий прокатки проводили на лабораторном прокатном стане ДУО 280, режимы прокатки стали 01ЮТ представлены в табл. 2. Горячекатаные образцы стали 01ЮТ подвергали КГД, режим КГД приведен в табл. 3.

Истинную (ϵ_1, ϵ_2) и сдвиговую (γ_1, γ_2) деформации при кручении по сечению образца оценивали расчетным путем [4]. Измерения нанотвёрдости осуществляли 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 прямы-

ми методами. В настоящей работе проводили испытания, используя модуль непрерывного контроля жесткости CSM (Continuous Stiffness Measurement), с непрерывной записью кривой нагружения и разгружения [5]. Рентгеноструктурный анализ осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М в CuK_α - излучении. Электронно-микроскопические исследования осуществляли с помощью микроскопа JEM фирмы JEOL.

Результаты исследований. Исследована тонкая структура горячекатаной стали 01ЮТ, прокатанной по режиму: $T_{\text{нагр}} = 1000$ °С; $T_{1\text{пр}} = 970-980$ °С, $T_{2\text{пр}} = 730-740$ °С, степень деформации 61,5 %, охлаждение на воздухе. На рис. 1 приведены фрагменты тонкой структуры поверхностной зоны горячекатаной стали 01ЮТ. Подобная субзеренная структура стали 01ЮТ является достаточно распространенным явлением в горячедеформированных сталях (рис. 1а) и возникает как следствие полигонизации деформированной ферритной составляющей. Электронно-микроскопические исследования образцов свидетельствуют об отсутствии в стали перлитных колоний, а также выделений карбидов, как по границам ферритных зерен, так и во внутренних объемах. В феррите наблюдается несколько повышенная плотность дислокаций ($\rho \approx 4,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) (рис. 1а), а также наблюдается

Таблица 1

Химический состав стали 01ЮТ

Содержание химических элементов, % (по массе)											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N ₂	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

$T_{\text{нагр}}$	$T_{1\text{пр}}$	h_0	h_1	Δh_1	ϵ_1	$T_{2\text{пр}}$	h_2	Δh_2	ϵ_2	$\Sigma \Delta h$	$\Sigma \epsilon$	$T_{\text{см}}$
°С		Мм			%	°С	мм		%	мм	%	°С
1000	970	3,5	1,80	1,70	48,6	730	1,4	0,4	22,2	2,1	60,0	680

Примечание. $T_{\text{нагр}}$ – температура нагрева листовой стали; $T_{1\text{пр}}$ – температура прокатки листовой стали в первом проходе; $T_{2\text{пр}}$ – 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; Δh_1 – абсолютное обжатие металла в первом проходе; Δh_2 – абсолютное обжатие металла во втором проходе; Σh – суммарное обжатие металла за два прохода; ϵ_1 – относительная степень деформации металла в первом проходе; ϵ_2 – относительная степень деформации металла во втором проходе; $\Sigma \epsilon$ – суммарная степень деформации металла за два прохода; $T_{\text{см}}$ – температура смотки.

Таблица 3

Режим КГД для стали 01ЮТ

$T_{\text{и}}$, °С	D, мм	S_0 , мм	N	P, кгс/см ²	S_1 , мм	ϵ_1	γ_1	ϵ_2	γ_2
25	9,0	0,7	5	310	0,3	3,8	44,85	6,0	403,0

Примечание. $T_{\text{и}}$ – 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_2 – периферия образца); γ – сдвиговая деформация (γ_1 – центр, γ_2 – периферия образца).

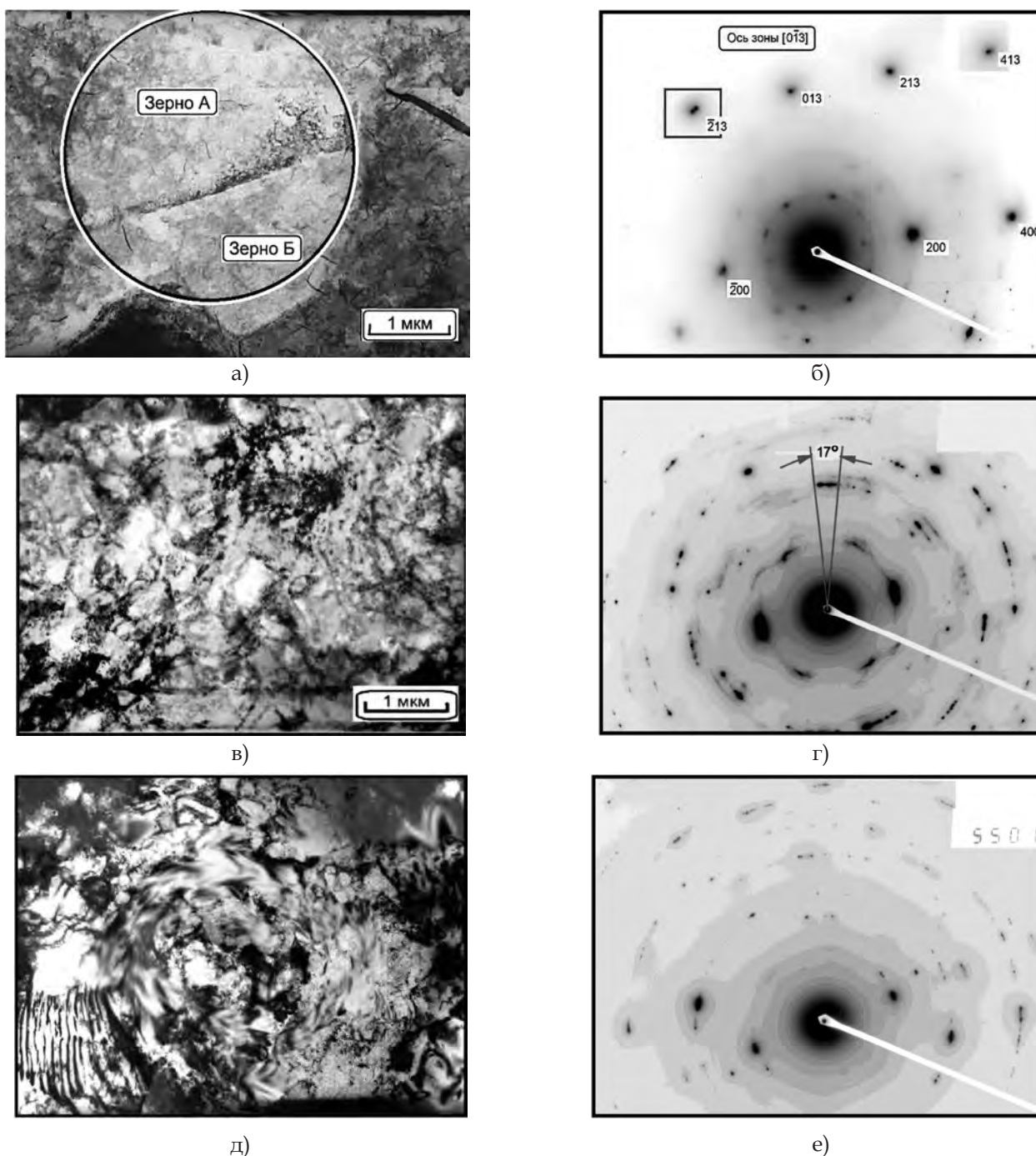


Рис. 1. Тонкая структура горячекатаной стали 01ЮТ после дополнительной пластической деформации методом КГД:
 а, б – структура и дифракционная картина поверхностной зоны образца;
 в, г – структура и дифракционная картина середины образца;
 д, е – структура и дифракционная картина периферии образца

повышенное количество малоугловых полигональных границ, что связано с выделением значительного количества избыточного феррита при деформации в межкритическом интервале температур (740 °С). Средний размер ячеек (субзерен) достигает $d_{суб} = 2,5$ мкм. Одна из таких границ расположена между зернами А и Б на рис. 1а. Дифракционная картина свидетельствует о существовании равномерно распределенных дислокаций, которые не связаны в

полигональные, малоугловые или субзеренные границы, хотя они и вносят свой вклад в повышение прочности ферритной фазы.

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг из образцов горячекатаной ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ позволили проследить структурные изменения в процессе ИПД методом КГД. Деформация после горячей прокатки распределена неоднородно по радиусу образца, и эта неоднородность про-

является и в дислокационно-ячеистой структуре, как на снимках тонкой структуры, так и на микродифракционных картинах (рис. 1в–1е).

Тонкая структура средней части радиуса диска-образца горячекатаной ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ после дополнительной деформации методом КГД представлена на рис. 1в. Влияние деформации проявляется в изменении размеров ячеек, которые характеризуются наличием азимутальных дифракционных рефлексов микродифракционных картин (рис. 1г).

В связи с локализацией деформации на периферии образца на дифракционных картинах азимутальное размытие рефлексов составляет $17...21^\circ$ (рис. 1е). В данном случае следует отметить, что изображение расщепления основного рефлекса имеет центросимметричный характер, что присуще вихревому течению металла при наличии микроучастков вращения, которые сопровождаются возникновением ротационных мод (рис. 1д). Размер микроучастков с таким ротационным характером составляет 2...5 мкм и более. Можно считать, что в центральной части таких «циклоноподобных» образований плотность дислокаций несколько меньше, чем на периферии.

Данные рентгеноструктурного анализа стали 01ЮТ в горячекатаном состоянии и после различных режимов КГД приведены в табл. 4. Анализ данных табл. 4 свидетельствует, что ИПД горячекатаной стали 01ЮТ приводит к формированию УМЗ структуры при $d = 15$ мм, $N = 3$, $P = 150$ кгс/см². 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/см² и $N = 5$.

Плотность дислокаций стали 01ЮТ после КГД при $P = 300$ кгс/см² возрастает в плоскости (110) в 1,5 раза, а в плоскости (220) в 1,7 раза. Значения микронапряжений после КГД возрастают по сравнению с горячекатаным состоянием: на 7 % при трех оборотах и давлении 150 кгс/см² и на 38 % при 5 оборотах и давлении 300 кгс/см².

Методом наноиндентирования получены зависимости поверхностной твердости (рис. 2а) и

модуля упругости (рис. 2б) от глубины внедрения индентора для исследуемой стали 01ЮТ.

Как следует из рис. 2а, пластическое течение во всех образцах начинается только с глубины ~ 200 нм, 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 твердости стали 01ЮТ после горячей прокатки с последующей деформацией методом КГД имеет следующий характер: мак-

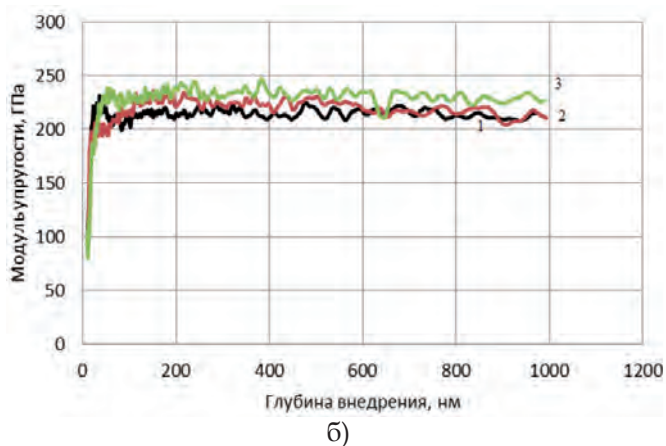
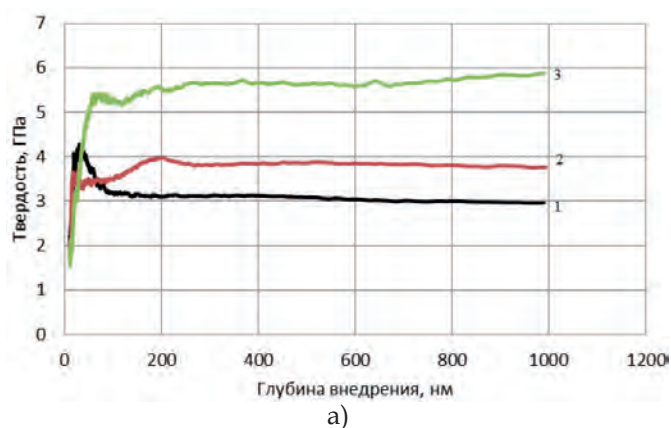


Рис. 2. Экспериментальные кривые зависимости твердости (а) и модуля упругости (б) от глубины внедрения индентора для горячекатаной стали 01ЮТ после деформации методом КГД:

1 – горячекатаное состояние; 2 – после прокатки и КГД (центр); 3 – после прокатки и КГД (периферия)

Таблица 4

Данные рентгеноструктурного анализа стали 01ЮТ в горячекатаном состоянии и после различных режимов КГД

d, мм	S_{0° , мм	N	P, кгс/см ²	a, Å	L_{110° , нм	L_{220° , нм	L, нм	M, 10^{-3} Н/м ²	D_{110° , 10^{10} см ⁻²	D_{220} , 10^{10} см ⁻²
Горячекатаное состояние				2,8661	105,8	73,9	137,4	0,91	6,7	23,4
15	0,9	3	150	2,8665	90,4	69,3	118,1	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.

симальные значения твердости наблюдаются на периферии образца и достигают 5,8 ГПа, что в 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, т. е. увеличивается на 15 % (рис. 2б). В литературе [6–7] 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 [7].

Выводы

1. Методами электронной микроскопии тонких фольг и микродифракции изучена зернограничная, дислокационная, полигонизованная и деформационная структура ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ. Установлено, что в результате ИПД методом КГД размер ячеек составляет 2...5 мкм. Наличие ротационных мод в тонкой структуре горячекатаной стали 01ЮТ после дополнительной деформации методом КГД свидетельствует о локализации больших степеней деформации на периферии образца.

2. Рентгеноструктурный анализ горячекатаной стали 01ЮТ после КГД подтверждает формирование ультрамелкозернистой структуры и наноструктуры с размером кристаллитов менее 100 нм в плоскостях (110) и (220).

3. Интенсивная пластическая деформация методом КГД приводит к значительному повышению значений твердости горячекатаной стали 01ЮТ от 2 ГПа до 5,8 ГПа, т. е. возрастает в 2,9 раза. Модуль упругости исследуемой стали 01ЮТ изменяется от $E_{исх} = 210$ ГПа до $E_{периф.} = 246$ ГПа, т. е. увеличивается на 15 %.

Библиографический список / References

1. Кошовкина В. С. Влияние кручения под квазигидростатическим давлением на структуру и механические свойства низкоуглеродистой стали 06МБФ / В. С. Кошовкина, Г. Г. Майер. – Томск: XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии» Секция 6: Материаловедение. – 2013. – С. 76–77.

Koshovkina V. S., Majer G. G. *Vliyanie kruchenia pod kvazigidrostaticheskim davleniem na strukturu i*

mehanicheskie svojstva nizkouglerodistoj stali 06МБФ [Influence of torsion under quasihydrostatic pressure on the structure and mechanical properties of low carbon steel 06 МБФ]. Tomsk, International scientific-practical conference “Modern Techniques and Technologies”. Section 6: Materials science. 2013, pp. 76-77.

2. Сегал В. М. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов, Д. А. Павлик, В. Ф. Малышев. – Минск: Наука и техника, 1994. – 231 с.

Segal V. M., Reznikov V. I., Kopylov V. I., Malyshev V. F. *Processy plasticheskogo strukturoobrazovania metallov* [Processes of the plastic structure metal formation]. Minsk, Science and Technology, 1994, 231 p.

3. 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.

Oliver W., 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.

4. Бернштейн М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – Москва: Metallurgy, 1979. – 495 с.

Bershtejn M. L., Zajmovskij V. A. *Mehanicheskie svojstva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Metallurgy, 1979, 495 p.

5. Трефилов В. И. Физические основы прочности тугоплавких материалов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 315 с.

Trefilov V. I., Milman U. V., Firstov S. A. *Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkih materialov* [Physical basis of the refractory materials strength]. Kiev, Naukova Dumka, 1975, 315 p.

6. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – Москва: Metallurgy, 1977. – 431 с.

Bershtejn M. L. *Struktura deformirovannyh metallov* [The structure of deformed metal]. Moscow, Metallurgy, 1977, 431 p.

7. Каверина С. Н. Особенности формирования деформационной структуры в ГЦК – металлах в интервале температур 0,05-0,5Т пл. / С. Н. Каверина, Э. П. Печковский, Г. Ф. Саржан, С. А. Фирстов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2002. – Т. 24, № 2. – С. 251–269.

Kaverina S. N., Pechkovskij E. P., Sargan G. F., Firstov S. A. *Osobennosti formirovania deformacionnoj struktury v GCK-metallah v intervale temperatur 0,05-0,5T* [Features formation of the deformation structure in the fcc- metals in the temperature range

0,05-0,5T]. Metal Physics and newest technologies. 2002, vol. 24, no. 2, pp. 251-269.

Purpose. Study of the fine structure under intense plastic deformation (IPD) by torsion under hydrostatic pressure (CGD) to improve the complex of physicomechanical properties of hot-rolled ultra low-carbon steel 01YT.

Methodology. Electron microscopy studies were performed with a JEM microscope JEOL. To assess the mechanical properties, the tests were carried out using the CSM (Continuous Stiffness Measurement) module, with a continuous recording of the loading and unloading curve.

Findings. The results of the investigation of the formation of the fine structure of OCTT steel after hot rolling followed by IPD by the KGD method at a temperature of 25 °C are presented. It has been established that after ultra-hard rolling with subsequent deformation by the KGD method, ultrafine-grained (UMZ) structure with elements of a nanostructure with crystallite size less than 100 nm in the (110) and

(220) planes is formed. It has been determined that the hardness values of hot-rolled steel 01CTT with subsequent deformation by the KGD method increase by 2.9 times in comparison with the hot-rolled state, the modulus of elasticity increases by 15 %.

Originality. For the first time, the possibility of forming an ultrafine-grained (UMZ) structure with crystallite sizes of less than 100 nm in the process of KGD of hot-rolled steel 01YTT is shown for the first time.

Practical value. Achieving high strength and plasticity, necessary for the creation of new promising structural and functional materials.

Key words: IF-steel, Young's modulus, intensive plastic deformation (IPD), torsion under hydrostatic pressure (KGD).

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. З. Куцовой

Поступила 23.05.2017



Посвящается памяти Ю.Н. Тарана-Жовнира

Наука

УДК 669.14.018.295:620.192

С. И. Губенко, В. Н. Беспалько,
И. А. Никульченко

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

Влияние структуры зоны насыщения стальной матрицы, полученной при лазерной обработке, на развитие трещин вблизи неметаллических включений при последующей деформации

S. I. Gubenko, V. N. Bepalko, I. O. Nikulchenko National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The influence of saturation zones of steel matrix obtained at laser treatment on the development of cracks near non-metallic inclusions under subsequent deformation

Целью работы является выявление основных закономерностей трансформации межфазных границ включение – матрица и формирования зон контактного взаимодействия при лазерной обработке сталей и влияние этих зон на развитие трещин вблизи неметаллических включений при пластической деформации. Установлено, что при лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений. Уровень лазерного упрочнения границы включение – матрица определяется оптимальным соотношением скоростей диссипативных и активационных процессов. Исследование особенностей формирования зон контактного взаимодействия в стальной матрице и включениях, а также упрочнения границ включение – матрица позволило выявить ряд закономер-