

УДК 669.15: 621.777: 620.186

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР ПОНИЖЕННОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МОРФОЛОГИЮ ЛИНИЙ ТЕКУЧЕСТИ

Яковлева С.П., Махарова С.Н.

*ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова»
Сибирского отделения РАН, Якутск, e-mail: spyakovleva@yandex.ru*

На основании исследований структурных изменений в стали 09Г2С установлено формирование наносубмикроструктурной (НСМК) структуры в результате воздействия мегапластической деформации равноканальным угловым прессованием (РКУП) при температурах 400, 450 и 500°C. Определены механические свойства стали с исходной крупнозернистой и полученной наносубмикронной структурой. На разных масштабных уровнях проанализирована морфология линий текучести на полированных образцах стали 09Г2С в исходном и НСМК состояниях при степени деформации $\approx 2,5-3\%$ (использованы методы оптической металлографии, растровой и атомно-силовой микроскопии). Проведено профилометрирование и рассчитаны высотные параметры шероховатости образовавшегося деформационного рельефа. Выявлено, что деформационный рельеф стали после РКУП состоит из тонкодисперсных полос скольжения, внутри которых прослеживаются деформационные структуры меньшего масштаба. В исходном металле деформация происходит путем образования более грубых полос скольжения с меньшей релаксационной эффективностью. Особенностью процесса деформации материала с наносубмикронной структурой в отличие от процессов деформирования крупнокристаллического материала является возникновение стационарных зон локализации деформации.

Ключевые слова: низколегированная сталь, наноструктурирование, равноканальное угловое прессование, механические свойства, линии текучести, шероховатость, локализация деформации

THE FORMATION OF REDUCED DIMENSIONALITY STRUCTURES AS A RESULT OF MEGAPLASTIC DEFORMATION OF LOW-ALLOY STEEL AND THEIR INFLUENCE ON THE FLOW LINES MORPHOLOGY

Yakovleva S.P., Makharova S.N.

*V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Russian Academy of Sciences,
Siberian Branch, Yakutsk, e-mail: spyakovleva@yandex.ru*

The structural changes and formation of nanosubmicrocrystalline (NSMC) structure in 09G2C steel after a severe plastic deformation by equal-channel angular pressing (ECAP) at temperatures of 400, 450 and 500°C were investigated. Mechanical properties of steel with the initial coarse-grained and received nanosubmicrocrystalline structure were defined. At different scale levels analyzed the morphology of the flow line on polished samples of steel 09G2C in the initial and NSMC states when the degree of deformation was equal to $\approx 2,5-3\%$ (used in the methods of optical metallography, scanning and atomic force microscopy). Measurements of the profile were held and altitude parameters of roughness of the formed deformation relief were calculated. It is revealed that the deformation relief of the steel after ECAP is composed of fine slip bands inside which traced the deformation structures on a smaller scale. In the initial metal deformation occurs by formation of a more coarse slip bands with smaller relaxation efficiency. The feature of the deformation mechanism of the material in NSMC state in contrast to the deformation mechanism of the coarse-grained material is the occurrence of stationary zones of strain localization.

Keywords: low-alloy steel, nanostructuring, equal channel angular pressing, mechanical properties, flow line, roughness, strain localization

Важнейшим фундаментальным направлением материаловедения является исследование факторов, обеспечивающих достижение того или иного уровня свойств в материалах. Применительно к структурированию и упрочнению металлов методами мегапластической деформации, в частности равноканальным угловым прессованием (РКУП) [1, 2, 5], следует отметить, что поведение таких материалов при различных внешних нагрузках и роль нано-, субмикронных элементов в формировании их свойств остаются недостаточно изученными. Как известно, РКУП обеспечивает дис-

пергирование структуры металлов до формирования элементов наносубмикронной размерности, что многократно повышает их прочностные свойства. Практика использования таких металлов требует более полных сведений не только о механических свойствах, но и о механизмах формирования этих свойств, физико-механическом поведении при последующих эксплуатационных нагрузках. Это соответствует современному подходу к совершенствованию материалов, рассматривающему систему «материал – технологический передел – свойства – эксплуатация» как единое целое.

Соответственно, детальное изучение явлений, происходящих в металлах и сплавах с наносубмикронным строением при последующих эксплуатационных воздействиях, является актуальной научно-практической проблемой. Ее решение требует, с одной стороны, накопления экспериментальных данных по физико-механическим свойствам, а с другой – развития фундаментальных исследований, направленных на раскрытие механизмов деформации и разрушения металлов.

Механизм скольжения или перемещение атомов по определенным кристаллографическим плоскостям в настоящее время наблюдать невозможно. Но результаты этих процессов проявляются в виде полос скольжения на поверхности образцов и в изменении физико-механических свойств материалов. Об особенностях механизма формирования свойств материала в зависимости от структуры и ее способности адаптироваться к воздействию внешних нагрузок можно судить, изучая морфологию деформационного рельефа и его геометрические параметры в сопоставлении с уровнем достигаемых механических характеристик.

Цель работы – анализ структур пониженной размерности, формирующихся в низколегированной стали 09Г2С при различных режимах теплового РКУП и их влияния на морфологические особенности рельефа полос Чернова – Людерса, образцов стали в исходном крупнозернистом и наносубмикронном состояниях с учетом уровня полученных механических свойств.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на широко применяемой в промышленности низколегированной стали 09Г2С. Микроструктура стали ферритно-перлитная; средний размер зерна 20 мкм. Режимы РКУП: 1 – прессование при 400 °С, число циклов 2; 2 – прессование при 450 °С, число циклов 4; 3 – прессование при 500 °С, число циклов 4.

Основные этапы исследования стали 09Г2С после проведенного структурирования включают:

- 1) анализ и сравнение параметров полученных структур пониженной размерности;
- 2) оценку влияния структур пониженной размерности на механические свойства;
- 3) исследование морфологии и высотных параметров шероховатости полос Чернова – Людерса, образовавшихся при растяжении образцов стали 09Г2С в исходном состоянии и после обработки РКУП по режиму 1.

Механические свойства стали определены на плоских образцах по ГОСТ 1497-84 (образцы растягивали при 20 °С на испытательной машине ZWICK/ROELL Z600).

Для получения полос Чернова – Людерса при относительно низких средних напряжениях на предварительно отшлифованных и отполированных об-

разцах материала, обработанного по режиму 1, были выполнены концентраторы напряжений. Линии текучести, расположенные под углом 45° к направлению действия нормальных напряжений, проявились на металле уже при небольших степенях общей деформации (порядка 3 %).

Микроструктуру металла и строение линий текучести исследовали с помощью металлографических микроскопов «Neophot-32», «Axio Observer D1m», на растровом электронном микроскопе JSM-6480 LV «JEOL» и в атомно-силовом микроскопе «NTEGRA Spectra». Шероховатость поверхностей полос скольжения измеряли профилометром SJ-201P. При профилометрировании характеристики микрогеометрии поверхности определяются в рамках измерительной базы. При значении базовой длины профилометрирования $L = 0,5$ мм число таких базовых длин было $n = 8$, т.е. общая длина линии профилометрирования на каждом из образцов составила 4,0 мм. По известным формулам [3] рассчитывали высотные параметры шероховатости Ra (среднеарифметическое отклонение профиля), Rz (высота микронеровностей профиля), Rq (среднеквадратичное отклонение профиля).

Результаты исследования и их обсуждение

Образование структур пониженной размерности в стали 09Г2С при РКУП. Микроструктура стали 09Г2С в исходном состоянии (рис. 1, а) представляет собой ферритно-перлитную смесь со средним размером зерна ≈ 20 мкм и объемной долей перлита $\approx 20\%$. В результате мегапластического деформирования методом РКУП микроструктура стали изменяется вследствие накопления деформации, перемены направления сдвига и температурного воздействия. Наблюдаются вытягивание и утонение структурных составляющих (рис. 1, б); деформирование перлитных зерен сопровождается изгибом и дроблением перлита, который постепенно «размывается» в деформирующейся ферритной матрице. Это связано с деформационно-стимулированным динамическим растворением перлитной фазы, облегчающим перестройку дислокационной структуры при прессовании.

Для характеристики образовавшихся структур на мезоуровне проведен их количественный анализ: определен средний размер перлитных участков и построены гистограммы распределения размеров оптически разрешающихся в световом микроскопе параметров ферритной фазы (за «зерно феррита» условно приняты ферритные области, свободные от перлита и карбидов. При измерениях (по методу случайных секущих) учитывали конфигурацию ферритных площадок, фиксируя их протяженность и толщину.

После второго прохода при температуре прессования 400 °С (режим 1) ферритные составляющие вытягиваются в одном направлении, длина ферритных областей в основном

не более 30 мкм (рис. 2, а), толщина большей частью не превышает 3–6 мкм (рис. 2, г).

Четвертый цикл прессования при температурах 450°C (режим 2) и 500°C (режим 3)

обуславливает заметное измельчение феррита, разбивая его на более мелкие фрагменты, что подтверждается диаграммами их распределения по размерам (рис. 2, б, д, в, е).

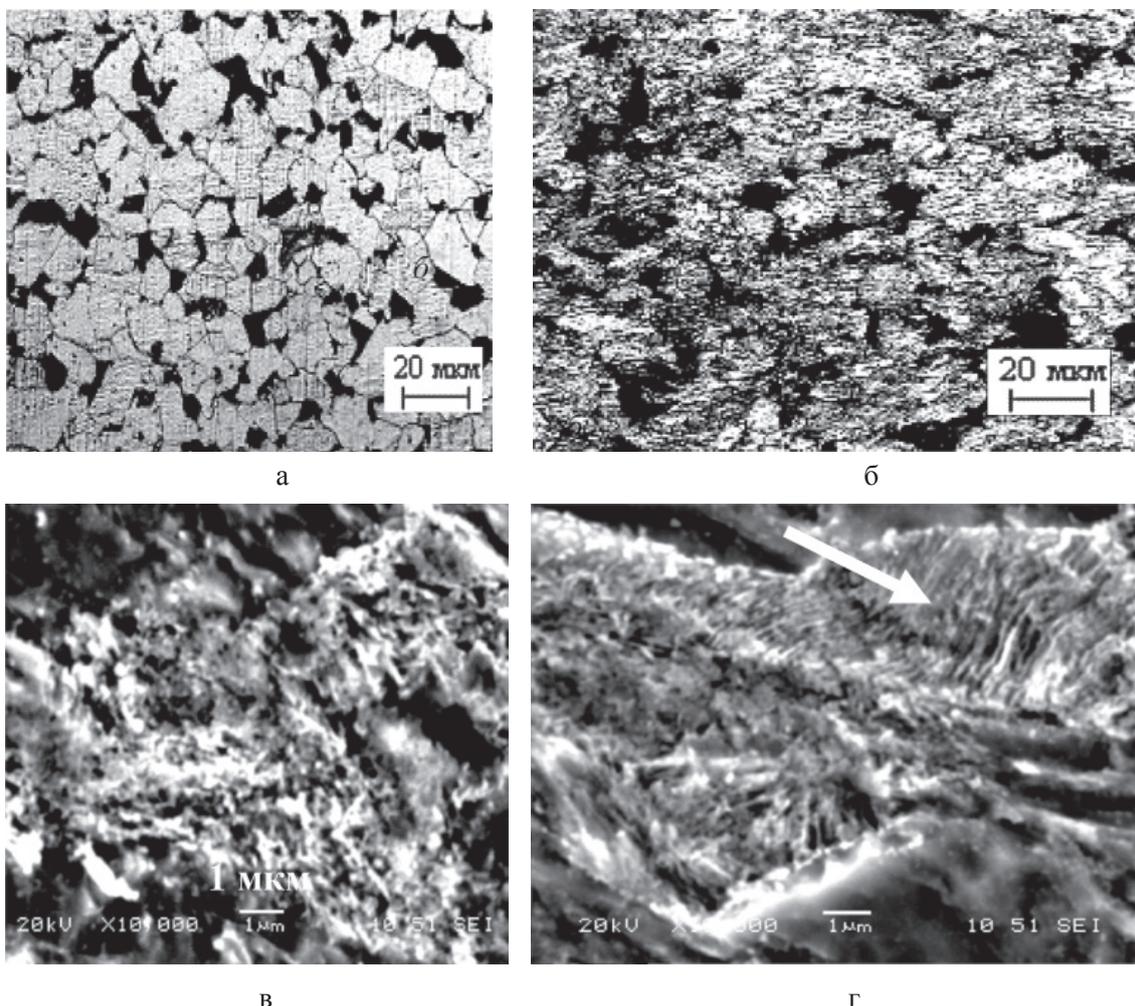


Рис. 1. Микроструктура стали 09Г2С в исходном крупнозернистом состоянии (а) и в наносубмикронном состоянии после РКУП по режиму 2 (б, в, г)

Средний размер основной части перлитных участков после обработки по режиму 1 составляет $\approx 4,3$ мкм; после режима 2 – 3,7 мкм и после режима 3 – 4,4 мкм.

На изображениях перлитных участков при больших увеличениях (рис. 1, г) видно, что частично сохраняется их пластинчатое строение. Тем не менее толщина пластинок перлита – первые сотни нанометров (такой участок отмечен стрелкой на рис. 4, з). Размерность других карбидных образований (в том числе сфероидизированного карбида) – также первые сотни нанометров и менее 100 нм.

В ферритной фазе в результате РКУП, как известно, образуется сильноразориентированная ячеистая субструктура [1, 2]. Кроме того, в материалах после РКУП

внутри зерен, как правило, содержатся дислокационные субструктуры с размерами элементов в нанодиапазоне. Поэтому такие субмикроструктурные металлы и сплавы обычно относят к классу объемных наноструктурированных материалов.

Таким образом, структура образцов стали 09Г2С, подвергнутой РКУП, представляет собой субмикроструктурную ферритную матрицу, упрочненную мелкодисперсными карбидами, в том числе наномасштабного размера. Наибольшее диспергирование структурных составляющих и лучшую их однородность обеспечил режим 2 (спектр распределения ферритной фазы по размерам на диаграммах рис. 2, б, д наиболее узкий).

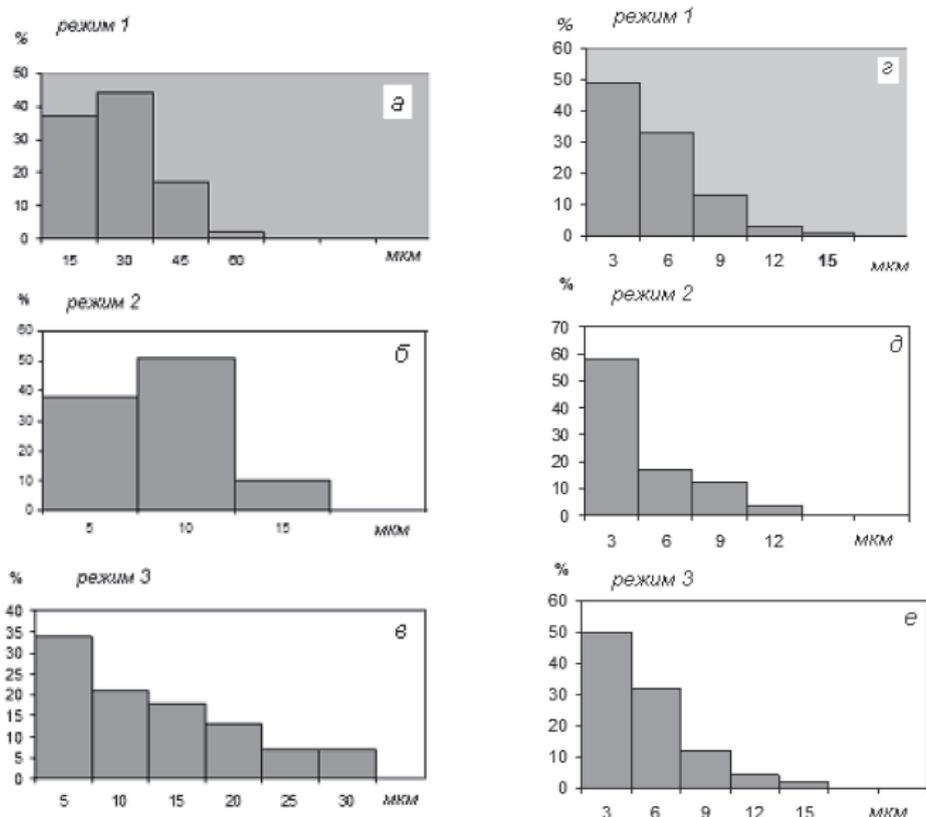


Рис. 2. Распределение размеров ферритных областей в стали 09Г2С после различных режимов РКУП: а, б, в – в продольном направлении; г, д, е – в поперечном направлении

Механические свойства стали 09Г2С после РКУП. По определению, к наноматериалам относят материалы, не только содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки), геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, но также обладающие качественно новыми свойствами. В табл. 1 представлены результаты механических испытаний стали 09Г2С в различ-

ных структурных состояниях, показавшие многократный рост ее характеристик прочности, приблизивший эту низколегированную сталь к классу среднелегированных. По сочетанию прочности и пластичности лучший комплекс механических характеристик материала получен при режиме 2, сформировавшем, как уже отмечалось, наиболее дисперсную и однородную микроструктуру.

Таблица 1
Механические свойства стали 09Г2С после различных видов обработки

Состояние материала	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
	+20 °С	+20 °С	+20 °С
Исходное	350	480	32
Режим 1. РКУП при 400 °С, 2 цикла	1090	1100	4
Режим 2. РКУП при 450 °С, 4 цикла	1005	1010	4,9
Режим 3. РКУП при 500 °С, 4 цикла	870	870	4,6

Микростроение полос Чернова – Людера на образцах стали 09Г2С в крупнозернистом и наносубмикронном состояниях. Деформационный рельеф отражает на

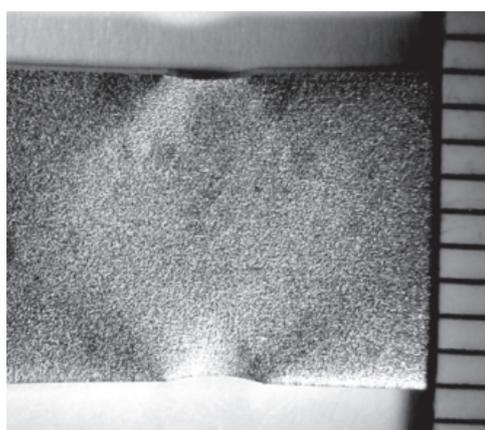
поверхности материала зоны локализации деформации. Деформационные фигуры стали в исходном состоянии выглядят более рельефными (рис. 3, б–г), чем в обработан-

ном по режиму 1 материале при тех же увеличениях (рис. 4, б–г), что согласуется с результатами профилометрования (табл. 2).

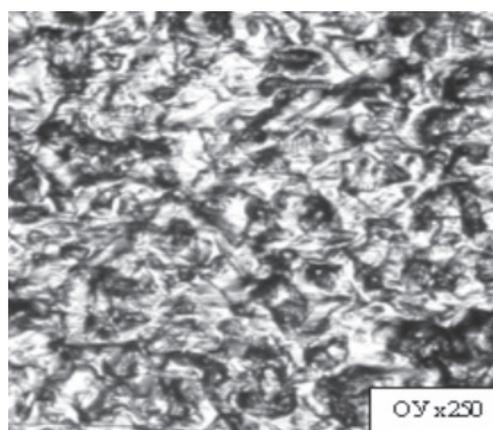
Таблица 2
Шероховатость полос Чернова – Людерса на образцах стали 09Г2С в различных состояниях

Состояние материала	R_A	R_z	R_q
Исходное	0,77	4,76	0,95
Режим 1	0,41	2,64	0,51

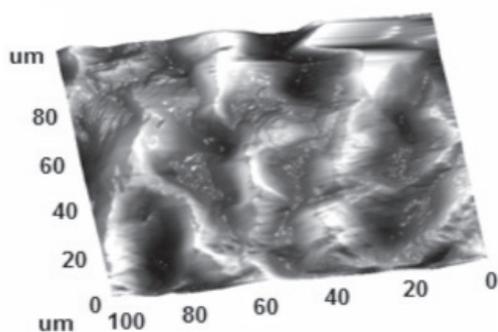
Известно, что повышение механических свойств ферритно-перлитных сталей определяется главным образом морфологией перлита – расстоянием между цементитными пластинами. Уменьшение его приводит к одновременному повышению прочностных свойств и относительного сужения. Последнее означает улучшение способности к сосредоточенной пластической деформации, что отодвигает стадию разрушения. Морфологически это проявляется в более сложном, многомерном строении деформационного рельефа.



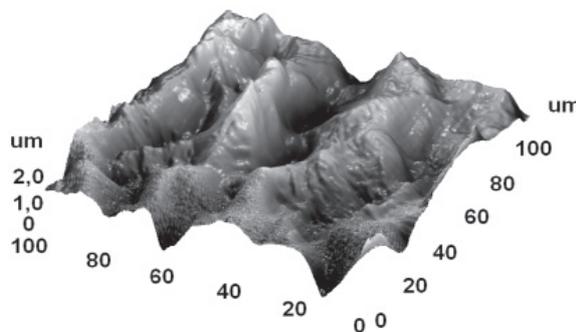
а



б



в



г

Рис. 3. Полосы Чернова – Людерса (а) на растянутом образце стали 09Г2С в исходном состоянии и их изображения в оптическом микроскопе (б – $\times 250$) и в атомно-силовом микроскопе (в – двумерное изображение, г – трехмерное изображение)

В материале после РКУП, то есть после диспергирования структурных элементов, при последующем растяжении в скольжении участвует большое число дислокаций,двигающихся в различных плоскостях скольжения. Этот фактор создает условия для реализации интенсивных адаптивных процессов [4]. В таких образцах в первую очередь активизируются источники в приповерхностных

слоях. В результате возникает большое число одиночных дефектов нанометровой размерности. Часть из них распадается, а часть трансформируется в тонкодисперсные полосы скольжения, внутри которых прослеживаются деформационные структуры меньшего масштаба (рис. 4, в, г); глубина деформационных фигур меняется преимущественно в пределах от десятков до сотен нм.

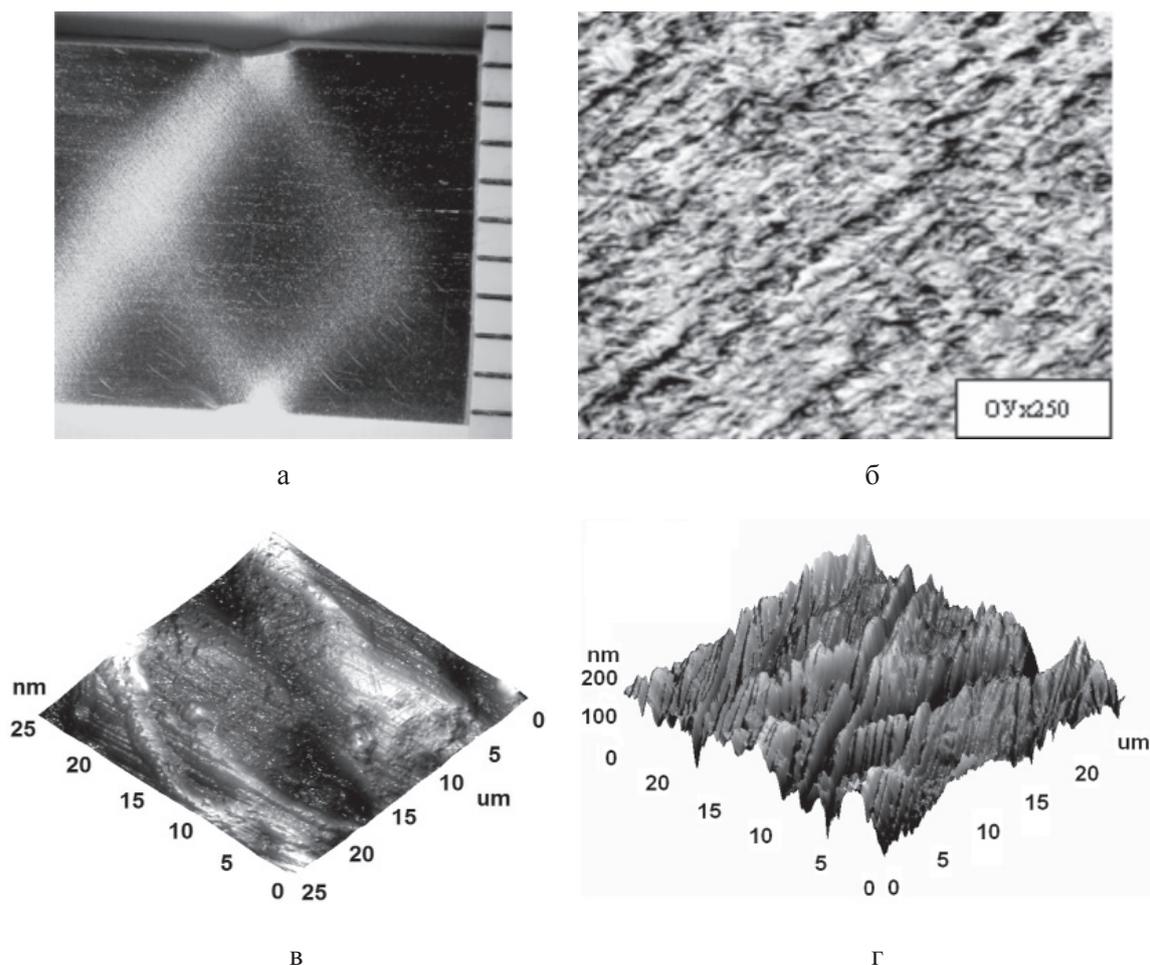


Рис. 4. Полосы Чернова – Людерса (а) на растянутом образце стали 09Г2С, обработанной РКУП по режиму 1, и их изображения в оптическом микроскопе (б – $\times 250$) и в атомно-силовом микроскопе (в – двумерное изображение, г – трехмерное изображение)

В исходном металле деформация происходит путем образования более грубых полос скольжения с меньшей релаксационной эффективностью (рис. 3). Стенки полос скольжения неровные, их глубина варьирует от десятков нм до нескольких мкм. При этом наблюдается свойственный относительно пластичным материалам и связанный с процессами упрочнения переброс мест локализации деформации по длине рабочей части образца.

Заключение

1. В результате РКУП при температурах 400, 450 и 500 °С микроструктура стали 09Г2С со средним размером зерна ≈ 20 мкм трансформировалась в наносубмикронную, обеспечившую повышение прочности в ~ 2 –3 раза (при значительном падении пластичности). Наиболее дисперсное и однородное микростроение

с наилучшим сочетанием механических свойств имеет материал, обработанный при 450 °С.

2. Материал в наносубмикронном состоянии, в отличие от крупнокристаллического, деформируется с образованием стационарных зон локализации деформации, поверхность которых представляет собой многоуровневую систему в виде мезомасштабных полос скольжения, сформированных микронными деформационными фигурами и наноразмерными ступеньками. Такое строение линий текущей поверхности свидетельствует о самоорганизации наносубмикронной структуры, обеспечивающей активную релаксацию напряжений и лучшее сопротивление материала развитию деструкционных процессов при локализации деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаменталь-

ных исследований Президиума РАН «Разработка методов получения химических веществ и создание новых материалов», проект 8.22.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига». – 2007. – 398 с.
2. Добаткин С.В. Теплое и горячее равноканальное угловое прессование низкоуглеродистых сталей / С.В. Добаткин, П.Д. Одесский, Р. Пиппан, Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, А.М. Арсенкин // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 110–119.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
4. Яковлева С.П. Субмикронная структура как фактор адаптивного поведения при нагружении сталей, упрочненных пластической деформацией с разными скоростями // *HighMatTech: тез. докл. 4-й Междунар. конф. (Киев, 7–11 окт. 2013 г.)*. – Киев, 2013. – С. 61.
5. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Mater.* 2000. – Vol. 48. – № 1. – P. 1–29.

References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Obemnyye nanostructurnyye materialy poluchenie struktura i svoystva*. [Bulk nanostructured metallic materials: synthesis, structure and properties]. Moscow, Akademkniga, 2007, 398 p.
2. Dobatkin S.V., Odesskiy P.D., Pippan P., Raab G.I., Krasilnikov N.A., Arsenkin A.M. *Metally –Metalls*, 2004, no. 1, pp. 110–119.
3. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos*. [Calculation basis of friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 526 p.
4. Yakovleva S.P. *TezisyDokladov 4 Mezhdunarodnoy Konferentsii «High Mat Tech»* (Proc. 4th Int. Conf. «HighMat-Tech»). Kiev, 2013, pp. 61.
5. Gleiter H. *Acta Materialia*, 2000, Vol. 48, no 1, pp. 1–29.

Рецензенты:

Соколова М.Д., д.т.н., доцент, зав. лабораторией, ФГБУН «Институт проблем нефти и газа» СО РАН, г. Якутск;

Левин А.И., д.т.н., зав. сектором ритмологии северной техники, ФГБУН «Якутский научный центр» СО РАН, г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 17.10.2014.