

алмазных частиц: превалирование микротрещин по границе алмаз-матрица уступает место транскристаллитному раскалыванию алмазных зерен (соответственно, их удаление вырывом сменяется на выкрашивание).

3. Термобарические условия при выбранных режимах ВП не привели к оваллизации алмазных частиц и их графитизации (в ИК-спектрах отсутствуют полосы поглощения, свойственные неалмазному углероду). Использование в составе матрицы порошков повышенной твердости дает возможность обеспечить лучшую сохранность алмазной составляющей, чем при традиционных способах спекания.

4. Получены опытные образцы АМК с износостойкостью, соответствующей уровню износостойкости промышленных алмазных карандашей, но при более чем двойной экономии алмазного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крупин А. В., Соловьев В. Я. и др. Обработка металлов взрывом. — М.: Металлургия, 1991. — 495 с.
2. Павловский И. Н. Ударное сжатие алмаза / ФТТ. 1971. Т. 13. № 3. С. 893 – 895.
3. Слепцов О. И., Михайлов В. Е., Петушков В. Г., Яковлев Г. П., Яковлева С. П. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. — Новосибирск: Наука, 1989. — 223 с.

4. Зайцева Т. М., Гуркина Г. А. Природа серо-дымчатой и коричневой окраски кристаллов алмаза / Минералогический журнал. 1986. № 3. С. 48 – 52.
5. Гаргин В. Г. Влияние включений в алмазах на их прочность / Сверхтвердые материалы. 1983. № 4. С. 27 – 30.
6. Пат. 2484940 Российская Федерация. Способ изготовления алмазо-металлического композита методом взрывного прессования / Яковлева С. П., Махарова С. Н., Васильева М. И., Винокуров Г. Г.; Заявл. 31.05.11; Оpubл. 20.06.13.

REFERENCES

1. Krupin A. V., Solov'ev V. Ya. i dr. Obrabotka metallov vzryvom [Treatment of metals by explosion]. Moscow: Metallurgiya, 1991. — 495 p. [in Russian].
2. Pavlovskii I. N. Udarnoe szhatie almaza [Shock compression of diamond] / Fiz. Tverdogo Tela. 1971. Vol. 13. N 3. P. 893 – 895 [in Russian].
3. Sleptsov O. I., Mikhailov V. E., Petushkov V. G., Yakovlev G. P., Yakovleva S. P. Povyshenie prochnosti svarnykh konstruktssii dlya Severa [The increasing durability of welded structures for the North]. — Novosibirsk: Nauka, 1989. — 223 p. [in Russian].
4. Zaitseva T. M., Gurkina G. A. Priroda sero-dymchatoi i korichnevoi okraski kristallov almaza [Nature of the gray-smoky and brown colouring of diamond crystals] / Mineral. Zh. 1986. N 3. P. 48 – 52 [in Russian].
5. Gargin V. G. Vliyanie vklyuchenii v almazakh na ikh prochnost' [Influence of inclusions in diamonds on their strength] / Sverkhtrv. Mater. 1983. N 4. P. 27 – 30 [in Russian].
6. RF Pat. No. 2484940. Sposob izgotovleniya almazometallichesкого kompozita metodom vzryvnogo pressovaniya [Method of making of diamond-metallic composite by explosive pressing] / Yakovleva S. P., Makharova S. N., Vasil'eva M. I., Vinokurov G. G. Appl. 20.06.2013 [in Russian].

УДК 620.17:669.15:620.186.8

СВЯЗЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА И СВОЙСТВ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ С НАНОСУБМИКРОННОЙ СТРУКТУРОЙ¹

© С. П. Яковлева, С. Н. Махарова²

Статья поступила 15 октября 2014 г.

Исследованы микростроение и прочность низколегированной стали после объемного наноструктурирования с применением режима «теплого» (при 300 – 500 °С) равноканального углового прессования (РКУП). Выявлена связь наносубмикронной структуры, обеспечивающей высокопрочное состояние ферритно-перлитных сталей, с эволюцией шероховатости деформационного рельефа и его микростроением. Установлено, что измельчение структурных составляющих стали создает условия для самоорганизации структуры при последующем растяжении, в результате которой локализация деформации происходит на более поздних стадиях, чем в материале в крупнозернистом состоянии.

Ключевые слова: низколегированная сталь; наноструктурирование; равноканальное угловое прессование; механические свойства; деформационный рельеф; шероховатость.

Структурированию металлов методами интенсивной пластической деформации, в частности равноканаль-

ным угловым прессованием (РКУП) [1 – 4], в последние годы уделяется достаточно большое внимание. Однако несмотря на многочисленные исследования недостаточно ясными остаются поведение таких материалов при различных внешних нагрузках, а также роль нано- и субмикронных частиц в формировании их свойств. Обычно основное внимание уделяется процессам трансформации структуры при РКУП и

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка методов получения химических веществ и создание новых материалов», проект 8.22.

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: spyakovleva@yandex.ru, snmachar@yandex.ru

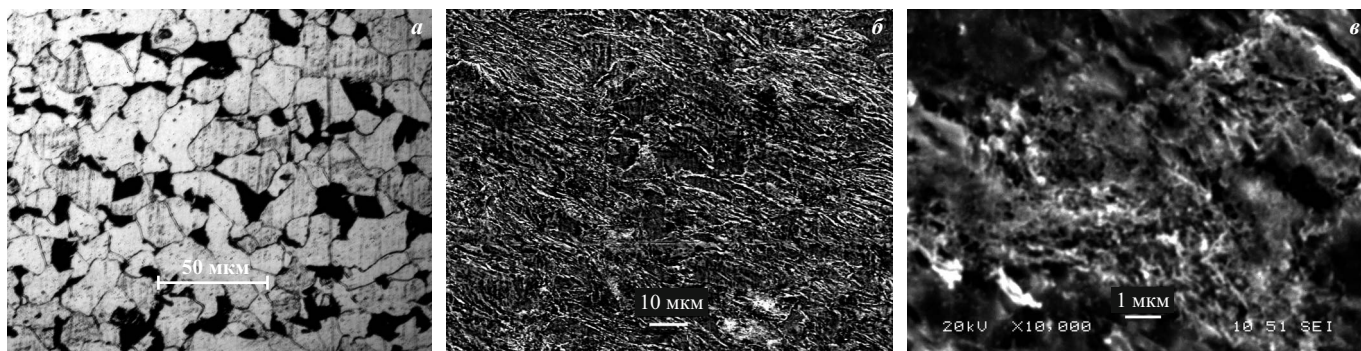


Рис. 1. Микроструктура стали 09Г2С в исходном крупнозернистом состоянии (а) и в наносубмикронном состоянии после РКУП по режиму 2 (б, в)

получаемым свойствам без подробного анализа механизмов, обеспечивающих достижение того или иного уровня свойств. Много исследований посвящено РКУП пластичных цветных металлов, тогда как особенно важен анализ перспектив РКУП железоуглеродистых сплавов. Цель данной работы — изучение влияния нано- и субмикронной структуры, полученной в ферритно-перлитной стали 09Г2С после РКУП, на микропроцессы деформации при ее последующем нагружении. Для этого рассмотрена эволюция деформационного рельефа при растяжении образцов стали 09Г2С до и после РКУП.

Микроструктура стали 09Г2С — ферритно-перлитная; средний размер зерна 20 мкм. Теплое РКУ прессование проводили на установке с углом пересечения каналов 120° цилиндрических заготовок (Ø20 мм, длиной 100 мм) стали по маршруту В_с. Режимы РКУП: 1) температура прессования 400 °С, число циклов 2; 2) температура прессования 450 °С, число циклов 4; 3) температура прессования 500 °С, число циклов 4.

Основные этапы исследования образцов стали 09Г2С после проведенного структурирования включали:

анализ полученных наносубмикроструктур;

оценку влияния структурирования на механические свойства;

изучение изменений деформационного рельефа и количественный анализ микрогеометрии его профиля при растяжении.

Химический состав стали определяли на спектрометре FOUNDRY-MASTER UVR WAS AG. Микроструктуру исследовали с помощью металлографических микроскопов Neophot-32, Axio Observer D1m и на растровом электронном микроскопе JSM-6480 LV (JEOL).

Для определения механических свойств материала после РКУ прессования использовали плоские образцы без головки типа II по ГОСТ 1497–84 с длиной рабочей части 50 мм, шириной 10 мм, толщиной 3 мм (образцы растягивали при 20 °С на испытательной машине ZWICK/ROELL Z600).

Перед растяжением все образцы шлифовали и полировали. Для оценки степени локальной деформации вдоль рабочей части образцов наносили риски с интервалом 5 мм. Поскольку при разрыве образцов происходит формирование шейки, то участки вблизи излома, очевидно, имеют большую степень деформации, чем удаленные от него. Условно можно считать, что данные для участков вдали от излома отражают ранние стадии процесса деформирования, а рядом с изломом — стадии, близкие к критическим. Сравнение результатов исследований поверхности испытанных образцов стали в исходном состоянии и после РКУП на различном расстоянии от излома позволяет судить об эволюции деформационного рельефа в зависимости от дисперсности структуры. Для изучения геометрических характеристик и других особенностей поверхностей деформации использовали методы профилометрирования (прибор марки SJ-201P; путь профилометрирования 4,0 мм) и атомно-силовой микроскоп NTEGRA Spectra. Измерения и исследования проводили на расстояниях ~1 - 1,5 мм от излома.

Образование структур пониженной размерности в стали 09Г2С при РКУП. Микроструктура стали в исходном состоянии (рис. 1, а) представляет собой ферритно-перлитную смесь со средним размером зерна ~20 мкм. После обработки наблюдаются вытягивание и утонение структурных составляющих (рис. 1, б); средний размер зерна феррита ~4 мкм. Как известно, при РКУП внутри зерен феррита образуется сильноориентированная субмикронная ячеистая структура; кроме того, происходит дробление карбидной составляющей вплоть до размеров нанодиапазона и ее перераспределение [1 – 4]. Минимальная толщина пластинок перлита в исследованной стали после РКУП, а также сфероидизированного карбида — первые сотни нанометров (рис. 1, в). Наибольшее диспергирование структурных составляющих и лучшую их однородность на мезоуровне обеспечил режим 2 (по итогам анализа распределения ферритной и карбидной фаз по размерам).

Таким образом, структура образцов стали 09Г2С, подвергнутой РКУП, представляет собой субмикроструктурную ферритную матрицу, упрочненную

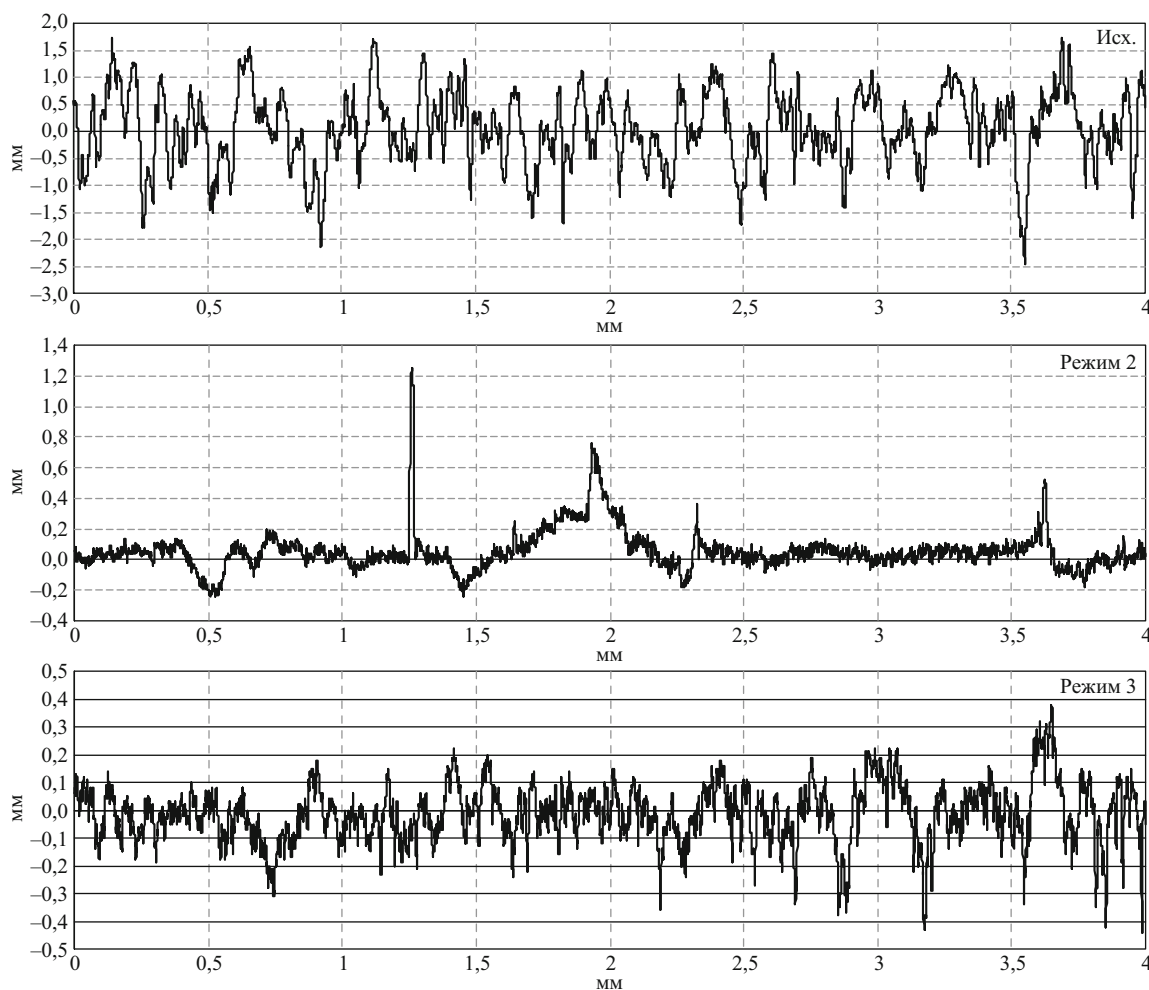


Рис. 2. Профилограммы деформационного рельефа стали 09Г2С в различных состояниях (степень деформации 2,5 %)

мелкодисперсными карбидами, в том числе наноразмерными.

Механические свойства стали 09Г2С после РКУП. В табл. 1 представлены результаты механических испытаний стали 09Г2С в различных структурных состояниях, из которых видно, что наибольший предел прочности материала получен при структурировании по режиму 1. Тем не менее наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности материала обеспечил режим 2.

Далее для выявления роли наносубмикронных структур в повышении прочности стали исследовали эволюцию шероховатости и микростроение деформационного рельефа.

Эволюция деформационного рельефа стали 09Г2С в крупнозернистом и наносубмикронном состояниях при растяжении. Для образцов стали 09Г2С по известным формулам оценивали параметры шероховатости деформационного рельефа: R_a (среднеарифметическое отклонение профиля); R_z (высоту микронеровностей профиля); R_q (среднеквадратичное отклонение профиля). Профилометрирование выполняли для материала в исходном состоянии и после РКУП по режимам, по которым получены лучший комплекс свойств (режим 2) и наименьшее упрочнение (режим 3). На рис. 2 в качестве примера приведены профилограммы деформационного рельефа исследованных образцов при степени деформации 2,5 %.

Таблица 1. Механические свойства стали 09Г2С после различных режимов РКУП

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

Обобщенные данные по шероховатости деформационного рельефа стали в различных структурных состояниях и при разных степенях деформации (имеется в виду степень локальной деформации, определенная по реперным точкам, которая может значительно отличаться от общей относительной деформации образца) приведены на рис. 3.

Уже с самого начала растяжения (при $\varepsilon = 2,5\%$) параметры R_a , R_z деформационного рельефа исходного материала многократно превышают параметры шероховатости наносубмикронного, т.е. уровень развития деформационных процессов материала в этих состояниях существенно различный. Если в образцах после РКУП развитая шероховатость только начинает формироваться, то исходный материал уже имеет хорошо развившийся рельеф. С ростом деформации процессы эволюции рельефа (а значит, и процессы самоорганизации структуры, находящие отражение в картине, создаваемой выходом линий скольжения на поверхность) в каждом из материалов индивидуальны.

Для стали, обработанной по режиму 2 и имеющей более благоприятное сочетание характеристик прочности и пластичности, наблюдается относительно спокойный подъем шероховатости (рис. 3, а), т.е. диссипация энергии деформирования происходит более эффективно по сравнению с другими образцами; это позволяет избежать быстрой критической локализации деформации. После достижения 5 %-й деформации возможность адаптации структуры к внешней нагрузке исчерпывается, что проявляется в более резком возрастании параметра R_a ; ускоряются деградация структуры и разрушение образца. Аналогичный этап в образце после РКУП по режиму 3 достигается уже при $\varepsilon = 2,5\%$. Далее деформация в нем резко локализуется, ускоряя наступление разрушения. До $\varepsilon = 10\%$ рельефность исходного материала, первоначально многократно превышающая рельефность материала после РКУП по режиму 3, изменяется незначительно, в то время как высота рельефа образца из последнего материала повышается в несколько раз. Это соответствует достижению критического уровня деформации и дальнейшей неспособности металла к адаптивной самоорганизации структуры.

Параметр R_z исходного металла несколько снижается с ростом деформации, а затем повышается (рис. 3, б). Это может свидетельствовать о большей хаотичности процессов микродеформации в неупрочненной стали, а также быть следствием изменения мест локализации деформации по длине рабочей части образца, что свойственно относительно пластичным материалам.

По среднеквадратичному отклонению профиля R_q можно судить о степени однородности рельефа (или о степени однородности микродеформаций, обусловивших его возникновение). Как видно из рис. 3, в, неоднородность деформирования наиболее характерна для стали, упрочненной по режиму 3. Среднеквад-

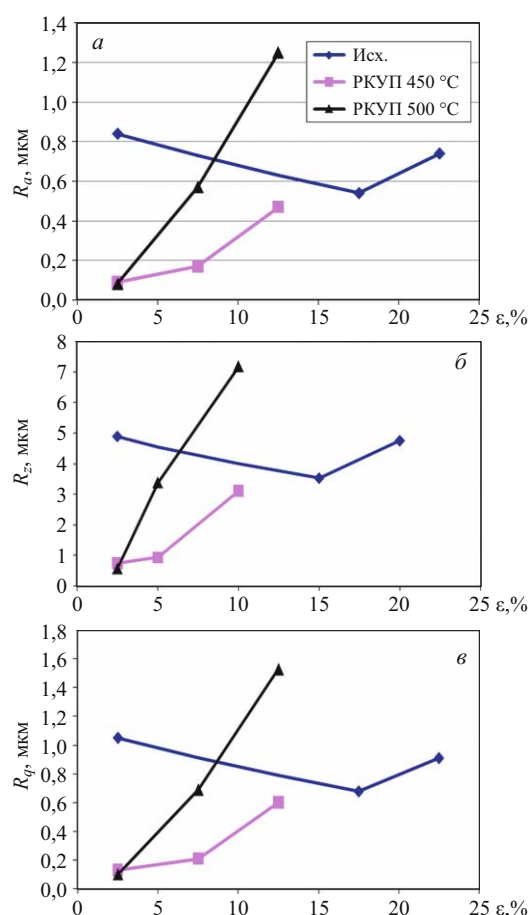


Рис. 3. Зависимости параметров шероховатости деформационного рельефа стали 09Г2С в различных структурных состояниях от степени деформации ε : а — среднеарифметическое отклонение профиля R_a ; б — высота микронеровностей профиля R_z ; в — среднеквадратичное отклонение профиля R_q

ратичные отклонения профиля стали после обработки по режиму 2 по абсолютной величине ниже для всех рассмотренных состояний материала и значений деформации. Как известно, однородность деформации связана с лучшим сопротивлением материала локализации деформации. Следует отметить, что различия эволюции деформационного рельефа стали в крупнозернистом и наносубмикронном состояниях соответствуют различиям макропараметров, определяющих процессы деформирования и разрушения, т.е. показателей прочности и пластичности (см. табл. 1).

Микростроение деформационного рельефа стали 09Г2С в крупнозернистом и наносубмикронном состояниях. Исследовали морфологию деформационного рельефа на начальных стадиях деформации образцов стали 09Г2С в исходном состоянии и после обработки РКУП по режиму 1. Для получения полос Чернова – Людерса при более низких средних напряжениях на образцах выполняли концентраторы напряжений. Уже при небольших степенях деформации (порядка 3 %) на металле проявились линии текучести, расположенные под углом 45° к направлению действия нормальных напряжений (рис. 4). Резуль-

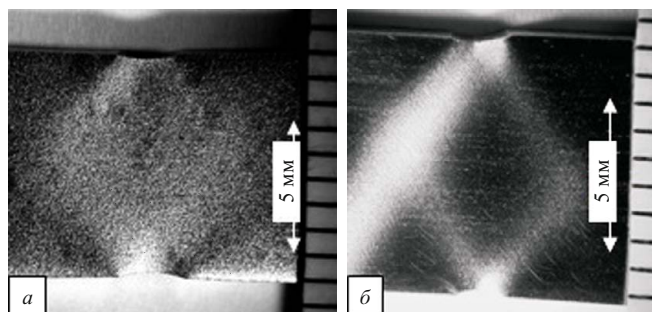


Рис. 4. Полосы Чернова – Людерса на растянутых образцах стали 09Г2С в исходном состоянии (а) и после РКУП по режиму 1 (б)

таты профилометрирования (табл. 2) показали, что в материале после РКУП деформационный рельеф более сглаженный, чем в исходном крупнозернистом.

Соответствующие различным структурным состояниям стали 09Г2С морфологические особенности полос скольжения были исследованы методом сканирующей туннельной микроскопии (рис. 5).

В материале после РКУП, т.е. после высокой предварительной деформации, обеспечившей диспергирование структурных элементов, с момента начала действия последующей растягивающей нагрузки в процессах скольжения участвует большое число дислокаций,двигающихся в различных плоскостях скольжения. Именно этот фактор создает условия для реализации интенсивных адаптивных процессов. В таких образцах в первую очередь активируются источники в приповерхностных слоях. В результате образуется большое число одиночных дефектов, часть из которых распадается, а часть трансформируется в тонкодисперсные полосы скольжения, внутри которых про-

Таблица 2. Параметры шероховатости рельефа полос Чернова – Людерса на образцах стали 09Г2С в различных состояниях

Состояние материала	R_a , мкм	R_z , мкм	R_q , мкм
Исходное	0,77	4,76	0,95
После РКУП по режиму 1	0,41	2,64	0,51

слеживаются деформационные структуры меньшего масштаба (рис. 5, в, з).

В исходном металле деформация происходит путем образования более грубых полос скольжения с меньшей релаксационной эффективностью (рис. 5, а, б). Стенки полос скольжения неровные, их глубина варьируется от десятков нм до нескольких мкм. Глубина деформационных фигур в стали после РКУП изменяется преимущественно в пределах от десятков до сотен нанометров.

Проведенные начальные исследования поверхности локализованной деформации материала после РКУП с использованием методов, позволяющих изучать строение деформационных фигур на макро-, мезо- и микроуровнях, показали, что в упрочненном РКУП материале с субмикронной структурой процесс образования полос скольжения идет на меньших масштабных уровнях. При этом, как показано выше, в мелкодисперсной структуре, полученной при РКУП по режиму 2 и обеспечившей лучшее сочетание механических свойств, пластическая деформация наиболее однородна. Такие особенности деформации, обусловленные формированием ультрадисперсных структурных элементов, обеспечивают лучшее сопротивление материала возникновению опасных локальных концентраций напряжений, меняют микро-механизмы и кинетику развития разрушения (результаты исследования строения изломов образцов стали 09Г2С, испытанных на ударный изгиб после различ-

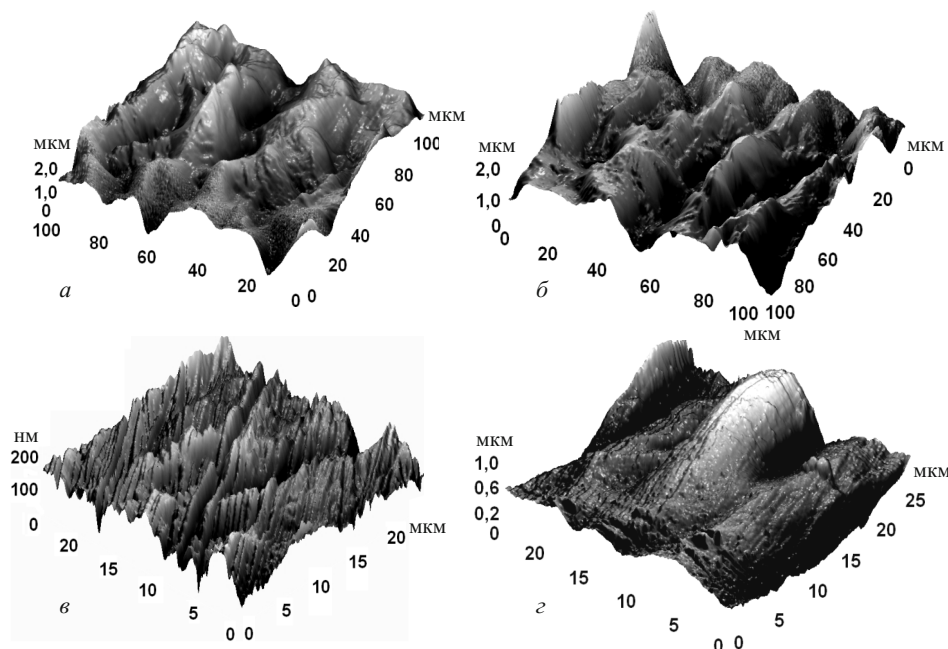


Рис. 5. Микростроение участков деформационного рельефа на начальном этапе локализованной деформации стали 09Г2С в крупнозернистом (а, б) и субмикронном (в, з) состояниях

ных режимов теплого РКУП, представлены, например, в работах [5, 6]). Закономерности формирования разномасштабной картины деформационного рельефа на разных этапах деформирования, в том числе при приближении к стадии разрушения, требуют дальнейших исследований.

Таким образом, обработка низколегированной стали 09Г2С методом теплого РКУП сформировала в ней структурные элементы наносубмикронной размерности, обусловившие многократный рост прочности стали, приблизивший ее к классу среднелегированных. При использованных режимах РКУП лучший комплекс свойств стали ($\sigma_B = 1010$ МПа; $\delta = 4,9\%$) получен в ходе прессования при 450°C , обеспечившего наибольшее измельчение структурных составляющих.

Исследование эволюции деформационного рельефа при растяжении показало, что уже при степени деформации $\varepsilon = 2,5\%$ образцы стали в исходном состоянии имеют более развитый рельеф, чем образцы после РКУП. С ростом деформации параметры шероховатости образцов стали в крупнозернистом состоянии несколько снижаются, а затем возрастают. Это свидетельствует о большей хаотичности процессов микродеформации и может быть следствием переброса мест локализации деформации по длине рабочей части образца, что свойственно относительно пластичным материалам.

Для наносубмикронной стали с наиболее благоприятным сочетанием свойств при увеличении степени деформации происходит относительно небольшое повышение шероховатости рельефа, однородность которого лучше, что позволяет избежать быстрой локализации деформации. После достижения 5% -й деформации возможность адаптации данной структуры к внешней нагрузке исчерпывается (параметры шероховатости резко возрастают), ускоряется ее деградация и наступает разрушение. Аналогичный этап в образце с меньшей прочностью после РКУП достигается уже при $\varepsilon = 2,5\%$.

Анализ морфологических особенностей исследованных участков деформационных поверхностей при $\varepsilon = 2,5 - 3\%$ показал, что крупнозернистый материал деформируется с образованием полос скольжения глубиной до нескольких микрометров. Деформационный рельеф стали после РКУП состоит из тонкодисперсных полос скольжения, внутри которых прослеживаются деформационные структуры меньшего масштаба (от десятков до нескольких сотен нано-

метров). Такие особенности деформации, обусловленные наличием структурных элементов пониженной размерности, обеспечивают лучшее сопротивление материала возникновению опасных локальных концентраций напряжений и развитию деструктивных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. — 398 с.
2. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Acta Mater. 2000. Vol. 48. N 1. P. 1 – 29.
3. Добаткин С. В., Одесский П. Д., Пиппан Р., Рааб Г. И., Красильников Н. А., Арсенкин А. М. Теплое и горячее равноканальное угловое прессование низкоуглеродистых сталей / Металлы. 2004. № 1. С. 110 – 119.
4. Астафурова Е. Г., Захарова Г. Г., Найденкин Е. В., Рааб Г. И., Добаткин С. В. Структура и механические свойства низкоуглеродистой ферритно-перлитной стали 10Г2ФТ после интенсивной пластической деформации и последующих высокотемпературных отжигов / Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 4. С. 91 – 101.
5. Яковлева С. П., Махарова С. Н., Борисова М. З. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикрорекристаллическом состоянии / Металлы. 2006. № 4. С. 51 – 55.
6. Яковлева С. П. Разрушение ферритно-перлитных сталей после обработки интенсивной пластической деформацией с разными скоростями / Деформация и разрушение материалов. 2011. № 11. С. 26 – 34.

REFERENCES

1. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Ob'emye nanostrukturnye metalliche-skie materialy: poluchenie, struktura i svoistva [Bulk nanostructured metallic materials: synthesis, structure and properties]. — Moscow: IKTs «Akademkniga», 2007 [in Russian].
2. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Acta Mater. 2000. Vol. 48. N 1. P. 1 – 29.
3. Dobatkin S. V., Odesskii P. D., Pippin R., Raab G. I., Krasil'nikov N. A., Arsenkin A. M. Teploe i goryachee ravnokanal'noe uglovoe pressovanie nizkouglerodistykh staley [Warm and hot equal channel angular pressing of low carbon steels] / Metally. 2004. N 1. P. 110 – 119 [in Russian].
4. Astafurova E. G., Zakharova G. G., Naidenkin E. V., Raab G. I., Dobatkin S. V. Struktura i mekhanicheskie svoistva nizkouglerodistoi ferritno-perlitnoi stali 10G2FT posle intensivnoi plasticheskoi deformatsii i posleduyushchikh vysokotemperaturnykh otzhigov [Structure and mechanical properties of low carbon ferritic-pearlitic 10G2FT steel after severe plastic deformation and subsequent high-temperature annealing] / Fiz. Mezomekh. 2010. Vol. 13. N 4. P. 91 – 101 [in Russian].
5. Yakovleva S. P., Makharova S. N., Borisova M. Z. Struktura, svoistva i osobennosti razrusheniya nizkolegirovannoi stali v submikrokristallicheskom sostoyanii [Structure, properties, and the features of fracture of low-alloy steel in submicrocrystalline state] / Metally. 2006. N 4. P. 51 – 55 [in Russian].
6. Yakovleva S. P. Razrushenie ferritno-perlitnykh staley posle obrabotki intensivnoi plasticheskoi deformatsiei s raznymi skorostyami [Fracture of ferrite-pearlite steels after processing by severe plastic deformation at different speeds] / Deform. Razrush. Mater. 2011. N 11. P. 26 – 34 [in Russian].