

УДК 669.15: 621.777: 620.186

АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ В КРУПНОЗЕРНИСТОМ И НАНОСУБМИКРОННОМ СОСТОЯНИЯХ

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*

Исследованы структурные изменения и механические свойства стали 09Г2С после теплового равноканального углового прессования (РКУП) при температурах 400, 450 и 500 °С. Для сравнения адаптивных процессов при растяжении стали с различным уровнем дисперсности структуры рассчитаны автокорреляционные функции профиля деформационного рельефа при возрастании степени пластической деформации образцов в крупнозернистом состоянии и образцов со структурами пониженной размерности. Выявлено, что измельчение структурных составляющих стали создает условия для деформационно-стимулированной самоорганизации структуры, приводящей к появлению структурных мезокластеров со взаимосогласованным восприятием нагрузки. Размерность этих мезокластеров в образцах металла, показавших лучшую прочность и пластичность, составляет ≈ 200 мкм. Локализация деформации и возникновение опасных концентраций напряжений в таком материале при его растяжении происходят на более поздних стадиях по сравнению с материалом в крупнозернистом состоянии.

Ключевые слова: низколегированная сталь, наноструктурирование, равноканальное угловое прессование, механические свойства, деформационный рельеф, профилометрирование, автокорреляционная функция шероховатости, локализация деформации

AUTOCORRELATION FUNCTIONS OF THE DEFORMATION SURFACE PROFILE OF THE LOW-ALLOYED STEEL IN COARSE-GRAINED AND NANOSTRUCTURED STATES

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

Structural changes and mechanical properties of steel 09G2S after warm equal-channel angular pressing (ECAP) at temperatures of 400, 450 and 500 °C are investigated. Comparison of adaptive processes at tensile tests of steel with various level of structure dispersion is carried out. Autocorrelation functions (ACF) of the deformation relief profiles with increasing degree of plastic deformation of the samples in the coarse-grained state and samples with reduced dimensionality structures are for this purpose calculated. It is revealed that crushing of structural components of steel creates conditions for self-organization of the structure leading to emergence of structural mesoclusters with mutually agreed perception of loading. The dimension of these mesoclusters are equal in the samples of metal which showed the best strength and plasticity ≈ 200 microns. Localization of deformation and emergence of dangerous concentration of tension in such material at its stretching happens at later stages in comparison with material in a coarse-grained state.

Keywords: low-alloy steel, nanostructuring, equal-channel angular pressing, mechanical properties, a deformation relief, measurement of a profile, the autocorrelation function of roughness, deformation localization

Структурированию металлов методами мегапластической деформации, в частности РКУ прессованием, в последние годы уделяется достаточно большое внимание. Но, несмотря на многочисленность исследований, недостаточно ясными остаются поведение таких материалов при различных внешних нагрузках и роль наносубмикронных элементов в формировании их свойств. Соответственно, детальное изучение структурно-механических изменений металлов с наносубмикронным строением при последующем нагружении является актуальной научно-практической проблемой. Требуется, с одной стороны, накопление экспериментальных данных по их физико-механическим свойствам, а с другой – раз-

витие фундаментальных исследований, направленных на раскрытие механизмов деформации и разрушения. Поскольку процессы, происходящие внутри металлов при деформировании, проявляются на поверхности образцов в виде разномасштабных деформационных фигур (полос скольжения, состоящих на мезо- и микроуровнях из канавок, ступенек и т.п.), то изучение деформационного рельефа является важнейшим способом установления характера и механизмов деформации.

Цель работы: выявление особенностей процессов пластической релаксации при растяжении образцов стали 09Г2С с крупнозернистой и наносубмикронной структурой на основе количественного анализа

изменений микрогеометрии деформационных поверхностей. Для этого при различных степенях деформации были определены автокорреляционные функции (АКФ) высотных параметров профилограмм образцов стали 09Г2С до и после диспергирующей обработки.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на широко применяемой низколегированной стали 09Г2С. Микроструктура стали ферритно-перлитная; средний размер зерна 20 мкм. Режимы РКУП: 1 – температура 400 °С, число циклов 2; 2 – температура 450 °С, число циклов 4; 3 – температура 500 °С, число циклов 4. Далее проводили кратковременный отжиг металла при 350 °С. Основные этапы исследования стали 09Г2С после проведенного структурирования включили:

- 1) анализ полученных структур пониженной размерности;
- 2) оценку влияния наносубмикроструктурных структур на механические свойства;
- 3) расчет АКФ профилограмм деформационного рельефа и анализ их изменения с ростом деформации.

Микроструктуру исследовали с помощью металлографических микроскопов «Neophot-32», «Axio

Observer D1m» и на растровом электронном микроскопе JSM-6480 LV «JEOL».

Механические свойства стали определены по ГОСТ 1497-84 на плоских образцах без головки типа II 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 были отшлифованы и отполированы. Для определения степени локальной деформации вдоль рабочей части образцов были нанесены риски с интервалом 5 мм. Схема выбора областей для изучения деформационного рельефа после испытаний образцов показана на рис. 1. Очевидно, участки образца, локализованные вблизи излома, имеют большую степень деформации по сравнению с удаленными от этой зоны. Условно можно считать, что данные для участка d_1 отражают ранние стадии процесса деформирования, а для участка d_3 – степени деформации, близкие к критическим. Соответственно, данные, полученные для области d_1 , соответствуют уровню деформации ϵ_1 ; для области d_2 – деформации ϵ_2 ; для области d_3 – деформации ϵ_3 . При этом выполняется соотношение $\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$. Сравнение результатов исследований для различных степеней деформации образцов стали в исходном состоянии и после РКУП позволяет судить об эволюции ее деформационного рельефа в зависимости от дисперсности структуры.

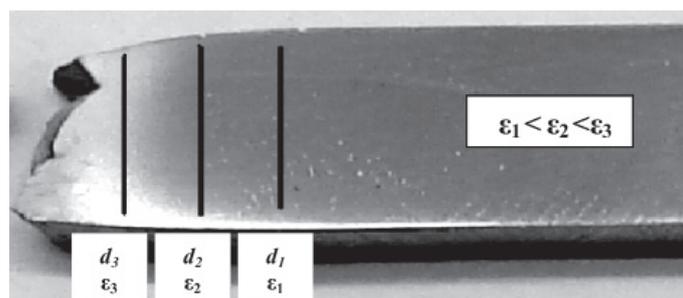


Рис. 1. Фрагмент образца, испытанного на растяжение, с указанием мест измерения шероховатости (вдоль линий d_i с различным уровнем деформации ϵ)

Геометрические и другие особенности деформационного рельефа исследовали на различных масштабных уровнях методом профилометрирования (профилометр SJ-201P) и на атомно-силовом микроскопе «NTEGRA Spectra» (в туннельном сканирующем режиме).

АКФ с шагом $l = 0, 10, 20, \dots, 490$ мкм были получены обработкой параметров профилограмм в электронных таблицах Excel.

Как известно, математической мерой автокорреляции двух случайных величин служит коэффициент линейной корреляции Пирсона:

$$k = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x – шероховатость, y – та же шероховатость, но с шагом l ; $\text{Cov}(x, y)$ – ковариация между переменными x, y ; σ_x, σ_y – стандартные отклонения для переменных x, y ; \bar{x}, \bar{y} – средние арифметические для переменных x, y . После получения для каждого шага $l = 0, 10, 20, \dots,$

490 мкм своего коэффициента корреляции можно построить автокорреляционную функцию профиля, объединяя значения коэффициентов корреляции. Первый интервал l , при котором автокорреляция переходит из положительной в отрицательную, называется радиусом автокорреляции профиля.

Результаты исследования и их обсуждение

Образование структур пониженной размерности в стали 09Г2С при РКУП и их влияние на механические свойства. Микроструктура стали 09Г2С в исходном состоянии (рис. 2, а) представляет собой ферритно-перлитную смесь со средним размером зерна ≈ 20 мкм. После двух циклов РКУП при 400 °С ферритные составляющие вытягиваются в одном направлении (рис. 2, б), длина ферритных областей в основном не более 30 мкм, толщина большей частью не превышает 3–6 мкм. Четвертый цикл прес-

сования при 450 и 500 °С обуславливает заметное измельчение феррита, разбивая его на более мелкие фрагменты (рис. 2, в). При этом в ферритной фазе в результате РКУП, как известно, образуется сильноразориентированная ячеистая структура [1–3] наносубмикронной размерности.

Наибольшее диспергирование структурных составляющих и лучшую их однородность на мезоуровне обеспечил режим 2 (по результатам анализа распределения ферритной и карбидной фаз по размерам). Минимальная толщина пластинок перлита – первые сотни нм; размерность частиц карбида – также первые сотни нм и менее 100 нм (рис. 1, г). Такие металлы и сплавы с субмикроструктурной ферритной матрицей, содержащей микронные и на-

норазмерные карбиды, относят к классу объемных наноструктурированных материалов; они также должны иметь качественно новые свойства. Результаты испытаний стали 09Г2С в различных структурных состояниях показали многократный рост характеристик прочности, приблизивший эту низколегированную сталь к классу среднелегированных: $\sigma_T = 1090, 1005, 870$ МПа; $\sigma_B = 1100, 1010, 870$ МПа для режимов 1, 2, 3 соответственно против 350 и 480 МПа для исходного состояния. По сочетанию прочности и пластичности (претерпевшей значительное падение после упрочнения) лучший комплекс механических характеристик материала получен при режиме 2, сформировавшем, как уже отмечалось, наиболее дисперсную и однородную микроструктуру.

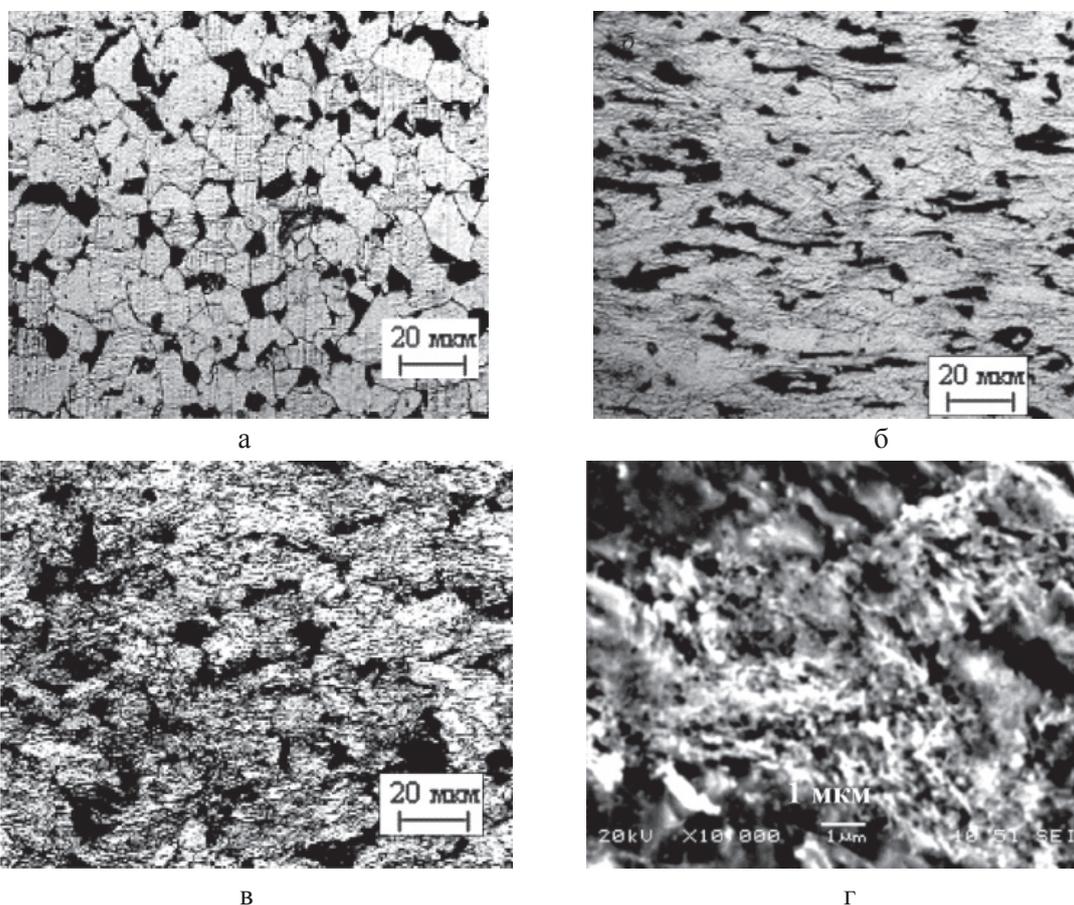


Рис. 2. Микроструктура стали 09Г2С в исходном состоянии (а – $\times 500$) и после РКУП по режимам 1 (б – $\times 500$) и 2 (в – $\times 500$; г – $\times 10000$)

АКФ деформационного рельефа стали 09Г2С в крупнозернистом и наносубмикронном состояниях и особенности развития деформации в них. Для анализа особенностей развития деформации образцов стали 09Г2С после РКУП были рассчитаны

АКФ профилограмм, снятых при различных степенях деформации. Здесь имеется в виду степень локальной деформации, определенная по реперным точкам (она может значительно отличаться от общей деформации образца, определяемой пересчетом на всю

его рабочую часть). На рис. 3 в качестве примера показаны профили и микропрофили рельефа при $\varepsilon = 2,5\%$. На этой стадии наблюдается снижение высотных параметров образцов «диспергированной» стали как на мезоуровне (рис. 3, а-г), так и на микроуровне (рис. 3, е, иллюстрирующий наличие наномасштабных ступенек). Примечательным является резкое отличие вида профилограммы материала после режима 2, давшего лучшее сочетание прочности и пластичности, от профилограмм всех остальных образцов, что указывает на различия в характере их деформации. Эле-

менты деформационной поверхности стали в этом состоянии имеют наиболее тонкое строение, что физически обусловлено структурой и особенностями микропроцессов деформации, их самоорганизации, находящихся отражение в картине, создаваемой выходом линий скольжения на поверхность. В сталях после РКУП с момента начала действия последующей растягивающей нагрузки в деформации участвует большое число дислокаций,двигающихся в различных плоскостях скольжения. Именно этот фактор создает условия для реализации интенсивных адаптивных процессов.

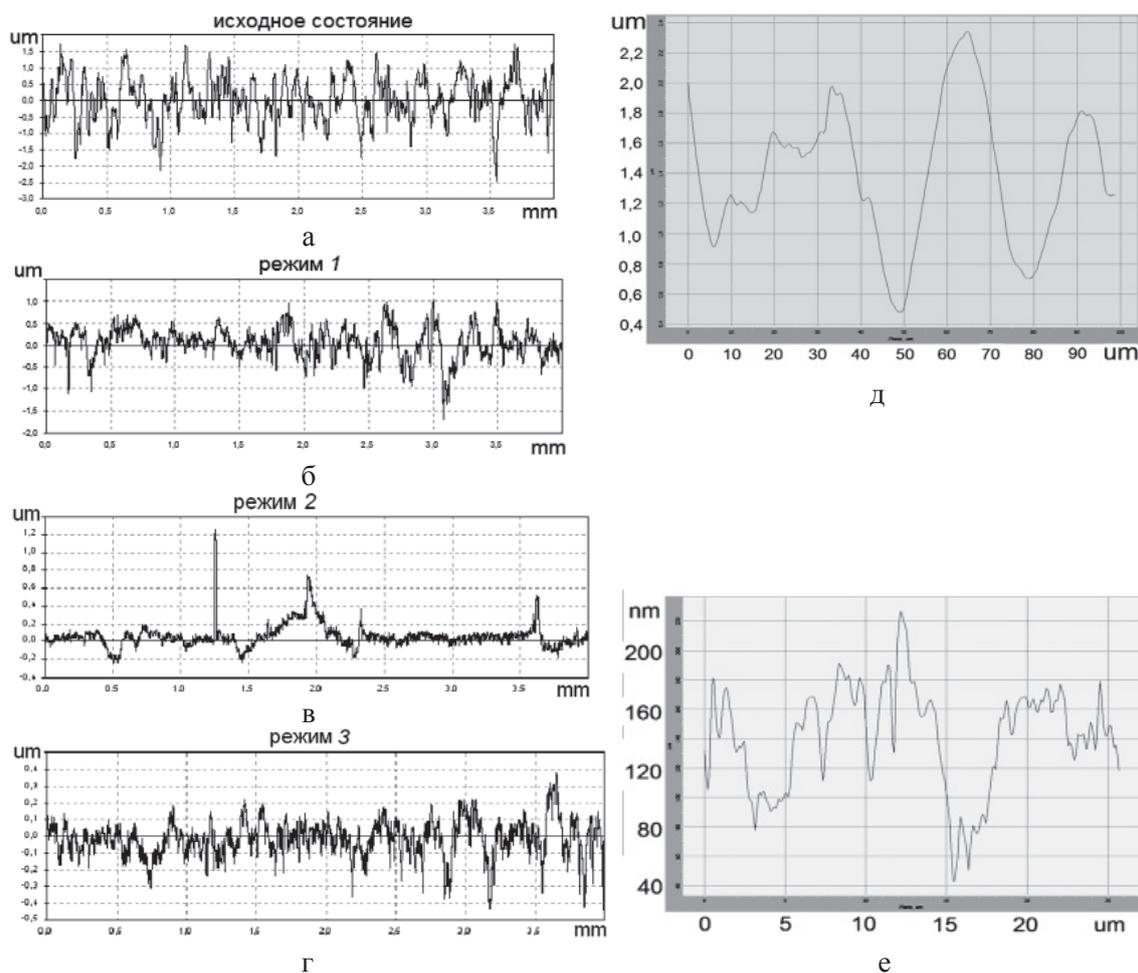


Рис. 3. Профилограммы деформационного рельефа стали 09Г2С в различных состояниях (а-г) и микропрофилограммы стали в крупнозернистом состоянии (д) и после обработки по режиму 1 (е), полученные на начальном этапе локализованной деформации (степень локальной деформации $\approx 2,5\%$)

АКФ профилограмм деформационного рельефа образцов в начале локализации деформации приведены на рис. 4; радиусы АКФ r – в таблице. Автокорреляция отражает зависимость между протеканием деформации различных микроучастков. Анализ

АКФ дает возможность судить не только о различии в уровне деформирования, но также о взаимодействии микроучастков, разделенных различными интервалами (шагами). У стали с меньшей прочностью (исходное состояние и после РКУП по ре-

жиму 3) области взаимовлияния процессов деформирования, локализованы в пределах $\approx 60\text{--}80$ мкм. У стали после РКУП по режиму 2 масштаб таких участков при $\varepsilon = 2,5\%$ и $\varepsilon = 5\%$ значительно выше: от $\approx 200\text{--}210$ до $130\text{--}140$ мкм соответственно. Это означает, что нагрузка взаимосогласованно воспринимается сравнительно крупными мезообъемами материала. С исчерпанием пластичности и локализацией деформации, отвечающей стадии предразрушения, величина этих мезообъемов снижается до $80\text{--}90$ мкм. Снижение r с ростом дефор-

мации обнаруживается для всех образцов и свидетельствует об уменьшении размера мезообъемов с самосогласованной деформацией. Следует говорить об исчерпании способности материала к структурной самоорганизации, обеспечивающей эффективное рассеяние энергии нагружения, о «вырождении» мезокластеров взаимосогласованной деформации и достижении их «критического» для данных условий размера. Для исследуемых материалов и использованных условий экспериментов значение этого размера равно $80\text{--}90$ мкм.

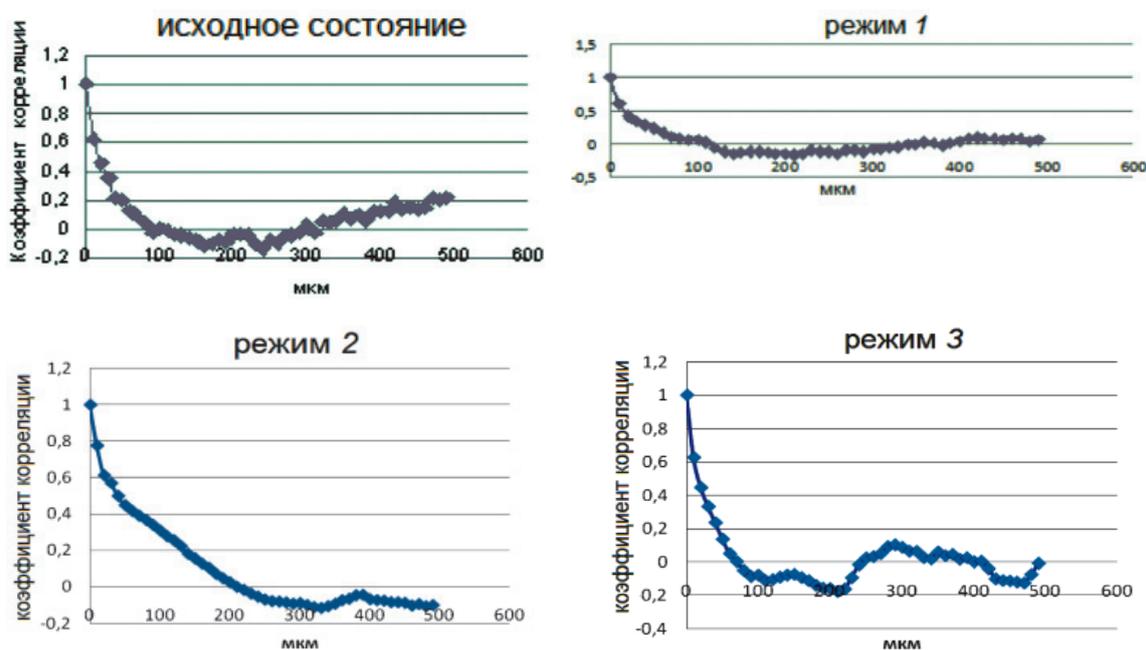


Рис. 4. Изменение автокорреляционных функций профилограмм деформационного рельефа образцов стали 09Г2С при локальной деформации $\varepsilon = 2,5\%$

Радиусы АКФ деформационного рельефа стали 09Г2С с различной структурой

Структурное состояние материала	Радиусы АКФ (r ; мкм) при различных значениях локальной деформации ε				
	$\varepsilon = 2,5\%$	$\varepsilon = 5\%$	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 15\%$	$\varepsilon = 20\%$
Исходное	80–90	–	–	60–70	50–60
Режим 1	110–120	80–90	–	–	–
Режим 2	200–210	130–140	80–90	–	–
Режим 3	70–80	70–80	70–80	–	–

Примечание. Прочерки в значениях АКФ объясняются тем, что для исходного состояния снимали профилограммы на начальной и завершающей стадиях деформирования; для обработанного материала – разрушением образцов до достижения соответствующих ε

Выявленные особенности деформации стали после РКУП, обусловленные формированием в ней наносубмикронных структурных элементов, обеспечивают лучшее сопротивление материала возникновению опасных локальных концентраций напря-

жений, меняют микромеханизмы и кинетику развития разрушения (результаты исследования строения изломов образцов стали 09Г2С, испытанных на ударный изгиб после различных режимов теплового РКУП представлены, например, в работах [4, 5]).

Заключение

1. В результате РКУП при температурах 400, 450 и 500 °С (режимы 1, 2, 3 соответственно) микроструктура стали 09Г2С со средним размером зерна ≈ 20 мкм трансформировалась в наносубмикронную, обеспечившую повышение прочности в $\sim 2-3$ раза (при значительном падении пластичности). Наиболее дисперсное и однородное микростроение с наилучшим сочетанием механических свойств имеет материал, обработанный при 450 °С (режим 2).

2. На основе анализа характера изменения автокорреляционных функций профилограмм деформационного рельефа и значений их радиусов при растяжении образцов стали 09Г2С с разным уровнем дисперсности структуры выявлено, что в ходе растяжения материала, показавшего наилучшее сочетание свойств, адаптивные процессы обеспечили деформационно-стимулированную самоорганизацию субмикронной структуры с появлением динамических мезообъемных образований размером ≈ 200 мкм со взаимосогласованным восприятием нагрузки. Локализация деформации и, соответственно, возникновение опасных локальных концентраций напряжений в таком материале происходят на более поздних стадиях по сравнению с другими структурными состояниями стали, что способствует росту сопротивления материала развитию деструкционных процессов и разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных 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. Шагалина С.В. Получение субмикроструктурной структуры в сталях ст10 и 08Р при равноканальном угловом прессовании / С.В. Шагалина, Е.Г. Королева, Г.И. Рааб, М.В. Бобылев, С.В. Добаткин // *Металлы*. – 2008. – № 3. – С. 44–51.
4. Яковлева С.П. Разрушение ферритно-перлитных сталей после обработки интенсивной пластической деформацией с разными скоростями // *Деформация и разрушение материалов*. – 2011. – № 11. – С. 26–34.
5. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Борисова М.З. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикроструктурном состоянии // *Металлы*. 2006. – № 4. – С. 51–55.

References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Obemnyye nanostrukturnyye 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. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, no. 1, pp. 110-119.
3. Shagalina, S.V., Koroleva E.G., Raab G.I., Bobylev M.V., Dobatkin S.V. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 3, pp. 44-51.
4. Yakovleva S.P. *Deformation and fracture of materials*, 2011, no. 11, pp. 26-34.
5. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Borisova M.Z. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 4, pp. 51-55.

Рецензенты:

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

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

Работа поступила в редакцию 23.10.2014.