

УДК 539

ПОЛУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР В МЕТАЛЛАХ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2020 г. И. С. Кодиров¹, Г. И. Рааб¹, Г. Н. Алешин¹*, А. Г. Рааб¹,
Д. В. Гундеров², Н. К. Цнев³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Уфимский государственный авиационный технический университет”, Уфа, Россия

²Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального
исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Уфимский государственный нефтяной технический университет”, Уфа, Россия

*E-mail: galioshin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.

После доработки 19.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Представлен краткий обзор методов интенсивной пластической деформации при формировании градиентной структуры с позиций физической мезомеханики. Проведен анализ результатов воздействия метода волочения со сдвигом на сталь; метода интенсивной пластической деформации кручением под давлением на сталь, титан и медь; метода знакопеременного изгиба на установке РКУП-Конформ на медь. Показано, что в результате данных воздействий в материалах формируются структуры с разной степенью градиентности.

DOI: 10.31857/S0367676520050178

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребность в создании методов, позволяющих добиться улучшения свойств металлических материалов. Эффективными для повышения прочности и других свойств являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [1, 2]. Большие усилия направлены на изучение особенностей структурных состояний материалов, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением под давлением (ИПДК), и их связи с напряженно-деформированным состоянием и другими факторами [3, 4]. В последние годы сформировалось и продолжает интенсивно развиваться новое направление – формирование градиентных структурных состояний в металлах и сплавах. Это обусловлено тем, что во многих случаях наличие градиентной структуры позволяет материалу приобрести новые, ранее неизвестные свойства [4, 5].

В настоящем кратком обзоре описаны развиваемые в ИФПМ УГАТУ деформационные методы получения градиентных структур. При описании результатов использованы также подходы физической мезомеханики, развиваемые в работах [5–8].

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Градиентными называются такие структуры, в которых вдоль некоторого направления изменяется одна или несколько характеристик [4–6]. Таковыми могут быть, во-первых, характеристики структуры (размер зерен, частиц второй фазы, концентрация вторых элементов, параметры кристаллической решетки матрицы, скалярная и избыточная плотность дислокаций, амплитуда дальнедействующих полей напряжений, степень разориентации элементов субструктуры и др.) и, во-вторых, связанные с ними физико-механические свойства (микротвердость, износостойкость, и др.).

Возникновение градиентных структур при пластической деформации в первую очередь обусловлено неоднородностью деформации вследствие выбранной схемы. Такая неоднородность деформации характерна, в частности, для процесса волочения со сдвигом длинномерных прутков, для свободного кручения таких прутков, а также для интенсивной пластической деформации под высоким давлением образцов-дисков.

Как следует из представлений физической мезомеханики [5–8], первичное пластическое течение в нагруженном твердом теле развивается на

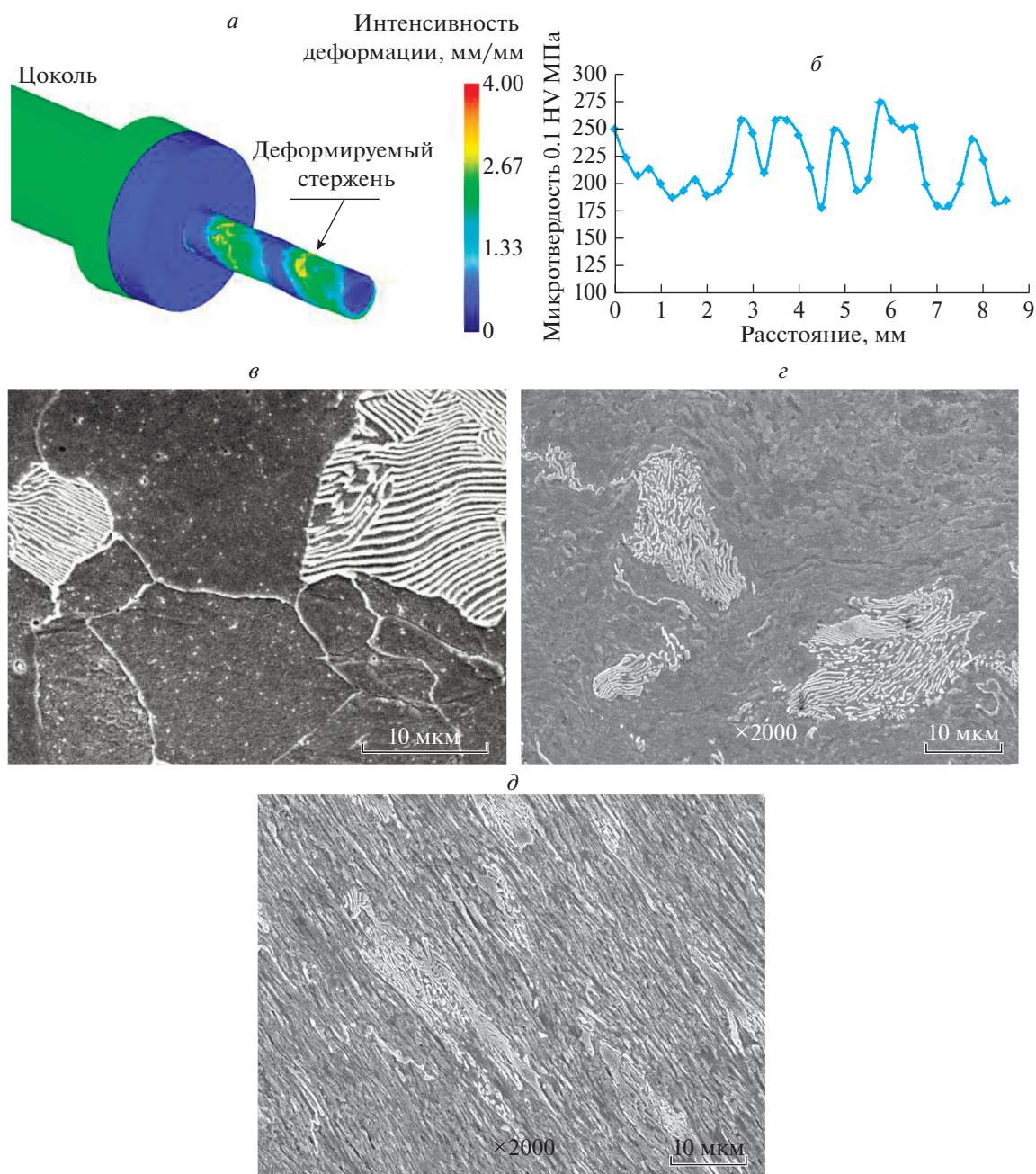


Рис. 1. Волочение со сдвигом: *а* – полученное компьютерным моделированием распределение накопленной деформации на поверхности деформируемого прутка стали 10; видно спиралевидное изменение интенсивности накопленной пластической деформации; *б* – изменение микротвердости по диаметру поперечного сечения прутка (физический эксперимент) после деформационной обработки методом ВcС [8]; электронно-микроскопические изображения микроструктуры стали-10: *в* – состояние поставки; *г* – центр образца после ИПДК; *д* – периферия образца после ИПДК.

его поверхности. Именно такой характер пластического течения имеет место при деформационной обработке методами волочения со сдвигом (ВсС), свободным кручением и ИПДК [9–13].

Волочение со сдвигом

Обработка методом ВсС относится к разновидностям интенсивной пластической деформации

(ИПД), поскольку позволяет получать очень высокие степени деформации, особенно в приповерхностной области прутков. Из-за наложения вращения эксцентриковых фильер на процесс волочения на мезоуровне в приповерхностных слоях развиваются процессы формирования периодической неоднородности структуры (градиентной структуры).

На схеме (рис. 1а), полученной моделированием, отчетливо видны спиралевидные полосы ло-

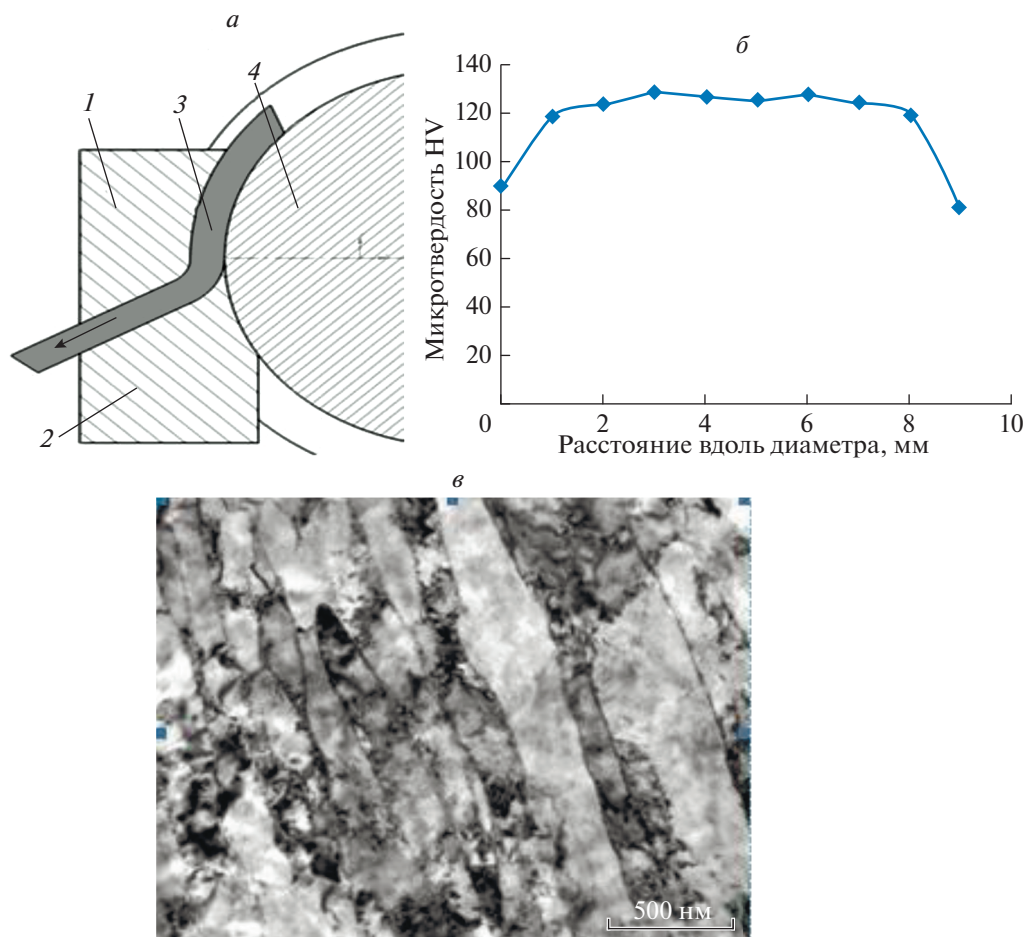


Рис. 2. Знакопеременный изгиб: *a* – схема изгиба заготовки за счет действующих сил трения по схеме “Конформ”: 1, 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – приводной ролик; *б* – микротвердость медных прутков после 8 проходов изгибания по маршруту Вс; *в* – центральная часть медных прутков после 8 проходов изгибания [13].

кализованного пластического течения, возникающие на поверхности деформируемого прутка. Такие же спиралевидные полосы возникают на поверхности прутков, полученных волочением со сдвигом в результате физического эксперимента (рис. 1б). Очевидно, именно в этих участках поверхности прутка в процессе ВсС и возникают квазипериодические локальные концентраторы микронапряжений, проникающих в объем материала, создавая локализованные участки деформации по всему объему прутков [7]. Они приводят к квазипериодическому изменению величины микротвердости HV вдоль диаметра поперечного сечения прутка, что отчетливо наблюдается на рис. 1б.

Периодическая зависимость микротвердости наблюдается при измерении величины HV как в продольном сечении прутков, так и вдоль образующей на боковой поверхности прутка. При этом на поверхности прутков значения HV достигают рекордной для этой стали величины 7 ГПа.

Интенсивная пластическая деформация кручением под давлением

В работе [9] провели компьютерное моделирование процесса ИПДК трех видов материалов, а также физический эксперимент по ИПДК. На рис. 1в–1д представлены электронно-микроскопические изображения микроструктуры стали-10 в исходном состоянии и после 5 оборотов ИПДК при 20°C. Снимки свидетельствуют о формировании градиентной структуры в стали-10 в процессе ИПДК.

Образование градиентных структур в деформируемых материалах происходит также в процессе деформации знакопеременным изгибом [14]. В коллективе разработан оригинальный способ изгибания прутков на установке Конформ (рис. 2). После 8 проходов изгибания медных прутков по данной схеме (с углом оснастки 120° при комнатной температуре) происходит формирование градиентной структуры (рис. 2б, 2в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты микроструктурных исследований свидетельствуют об активизации сдвиговых и поворотных механизмов ИПД на всех структурных уровнях – микроструктурном (дислокационное скольжение), мезоструктурном (ротационные механизмы) и макроскопическом, результатом которого является измельчение микроструктуры и формирование градиентной структуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00720).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем, 2013. 375 с.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. New Jersey: TMS-Wiley, 2014. 440 p.
3. Рааб Г.И., Рааб А.Г. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом. Пат. РФ № 2347633. кл. В21С1/00. 2009.
4. Lu K., Lu J. // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. 375. P. 38.
5. Козлов Э.В., Глезер А.М., Громов В.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67. С. 1374.
6. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
7. Панин В.Е. // Физ. мезомех. 1998. № 1. С. 5.
8. Балохонов Р.Р., Болеста А.В., Бондарь М.П. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.
9. Рааб Г.И., Кодиров И.С., Алешин Г.Н. и др. // Вест. МГТУ им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 64.
10. Raab G.I., Gunderov D.V., Shafigullin L.N. et al. // Mater. Phys. Mech. 2015. V. 24. P. 242.
11. Raab G.I., Simonova L.A., Alyoshin G.N. // Metalurgija. 2016. V. 55. № 2. P. 177.
12. Raab G.I., Podrezov Y.M., Aleshin G.N. // Mater. Sci. Forum. 2016. V. 870. P. 253.
13. Подрезов Ю.Н. // Физ. и техн. высок. давлений. 2008. № 1. С. 31.
14. Raab A.G., Zhilyaev F.P., Kodirov I.S. et al. // Mater. Sci. Non-equilib. Phase Transform. 2019. № 1. P. 11.