



Семинар «Фундаментальные проблемы интенсивной пластической деформации кристаллических твердых тел»

УДК 669.15

В.В. Рыбин

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

V.V. Rybin

St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF CRYSTALLINE SOLIDS

Краткое вступление научного руководителя семинара (см. заглавие), доказывающее актуальность и своевременность проведения этого научного форума.

СЕМИНАР, ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (ИПД), КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ТВЕРДОЕ ТЕЛО.

This is a short introduction written by a supervisor of studies of the seminar (see the title). It substantiates the actuality of holding the scientific forum.

SEMINAR, SEVERE PLASTIC DEFORMATION (SPD), CRYSTALLINE SOLID.

16 января 2013 года в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете под научным руководством члена-корреспондента РАН, профессора В.В. Рыбина состоялся общероссийский научно-технический семинар «Фундаментальные проблемы интенсивной пластической деформации кристаллических твердых тел». В работе семинара приняли участие крупные отечественные ученые, внесшие заметный личный вклад в зарождение и становление этой бурно развивающейся в последние десятилетия области науки о материалах. Развитие происходит как в части фундаментальных, так и прикладных исследований, а также в области практических приложений, поскольку использование именно интенсивной пластической деформации (ИПД) яв-

ляется основным приемом промышленного получения ультрамелкозернистых (УМЗ) и нанокристаллических (НК) материалов, обладающих уникальным комплексом механических свойств и эксплуатационных характеристик.

Чтобы понять актуальность и своевременность проведения подобного семинара, совершим небольшой экскурс в историю вопроса.

Долгое время одним из постулатов в практике и теории металловедения поликристаллов было утверждение о невозможности измельчения зерен методами пластической деформации. Считалось, что в процессе пластического деформирования поликристалла зерно, сохраняя с высокой точностью объем, испытывают лишь формоизменение (причем изоморфно с из-

менением формы макрообразца) и меняют кристаллографическую ориентировку. При этом зерна не теряют своей идентичности [1, 2]. Иными словами, еще относительно недавно считалось невозможным создавать внутри зерен большеугловые границы (БУГ) деформационного происхождения. В пользу этого утверждения говорили как многочисленные экспериментальные данные, так и основные положения механики, а также классической дислокационной физики пластичности кристаллических твердых тел (КТТ).

Тем более неожиданным в 1974 году оказалось открытие явления фрагментации, которое заключалось в том, что на стадии развитой пластической деформации ($\varepsilon > \varepsilon_0 \approx 0,2$) зерна поликристаллического молибдена (чистота 99,9 %), деформируемого при комнатной температуре в условиях одноосного растяжения со скоростью $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, разбились на множество разориентированных фрагментов. Поперечные размеры фрагментов d_f оказались близкими к 0,2 мкм, а угол θ разориентировки между ними после деформации $\varepsilon = 0,4$ достигал десяти градусов [3].

В последующие годы явление фрагментации подверглось тщательному и детальному изучению. Была построена физическая теория фрагментации; по существу это теория структурообразования на стадии развитой пластической деформации. Были экспериментально изучены особенности фрагментации не только на молибдене, но и на других металлах и сплавах (железо, алюминий, титан, стали ферритного, мартенситного и аустенитного классов) в условиях, типичных для прессования, прокатки, гидроэкструзии, волочения. Были экспериментально определены функции распределения фрагментов по размерам и разориентировкам. Оказалось, что распределения по размерам имеют форму одиночного пика с максимумом, расположенным вблизи 0,2 мкм. Распределение по разориентировкам выглядит сложнее. Оно состоит из двух пиков, расположенных вблизи $\theta_1 = 2 - 3^\circ$ и $\theta_2 = 8 - 12^\circ$, соответственно.

В области большеугловых разориентировок распределение принимает вид мед-

ленно спадающего плато. Максимальное значение разориентировок деформационного происхождения θ_{\max} зависит от величины макроскопической деформации ε и следует выражению

$$\theta_{\max} = \alpha(\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (1)$$

где α — коэффициент пропорциональности ($\alpha \leq 1$) [4, 5].

Из формулы (1) следует, что первый пик на распределении разориентировок появляется при $\varepsilon \geq \varepsilon_0 \approx 0,2$, второй — при $\varepsilon \geq 0,4$. Это полностью согласуется с экспериментальными наблюдениями.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют большеугловые границы фрагментов межзеренного типа. Очевидно, что разработка технологии получения фрагментированных структур, у которых доля большеугловых границ будет примерно такой же, как и у полученных при рекристаллизации поликристаллов, решает задачу создания материалов принципиально нового класса — ультрамелкозернистых.

Для этого, исходя из положений физики развитой пластической деформации, следует разработать технологию, которая бы обеспечивала возможность деформирования материалов до значений, превышающих некоторую критическую величину ε_{cr} , которая определяется из вполне естественного условия. Оно формулируется следующим образом: максимальная разориентировка фрагментов θ_{\max} при ε_{cr} должна равняться или превышать значение θ_{sym} — минимального из углов, возможных для кристаллов данной сингонии и принадлежащих группе поворотной симметрии. Для металлов и сплавов, кристаллическая решетка которых принадлежит кубической сингонии, $\theta_{sym} = \pi/2$, поэтому для них

$$\varepsilon_{cr} \geq (1/\alpha) \theta_{sym} + \varepsilon_0 \approx \pi/2 + 0,2 = 1,77. \quad (2)$$

Приведенная оценка показывает, что разработка технологии создания УМК-материалов с помощью пластической деформации представляет собой далеко не тривиальную задачу. Действительно, необходимо разработать технологию, которая бы позволяла деформировать исходную заготовку,

во-первых, до весьма значительных деформаций без образования в ней несплошностей и микротрещин (для этого схема нагружения должна предусматривать использование в очаге деформации высокого квазигидростатического давления);

во-вторых, не прибегая к нагревам до температур, которые могут вызвать рекристаллизацию деформируемого материала.

Необходимо также после столь большой деформации обеспечить получение приемлемого (на уровне около 5 мм) сечения готового материала, чтобы впоследствии изготовить из него образцы для испытаний физико-механических свойств и служебных характеристик.

Как ни удивительно, но технологии, удовлетворяющие вышеприведенным условиям, были успешно разработаны. В основном это вариации и усовершенствования весьма оригинальной технологии равноканального углового прессования (РКУП), предложенной В.М. Сегалом с сотрудниками в 1981 году [6]. Структура и свойства полученных при этом образцов УМЗ-материалов были изучены подробнейшим образом. Результаты исследований представлены в многочисленных публикациях и в ряде обстоятельных обзоров (см., например, работы [7 – 9]).

В заключение надо остановиться на терминологическом аспекте проблемы. Дело в том, что англоязычный термин «severe plastic deformation» (SPD), введенный в свое время для обозначения специфических процессов пластического деформирования – таких, которые удовлетворяют всем перечисленным выше требованиям и

потому приводят к главному, а именно – аномальному измельчению исходных зерен и созданию в них ультрамелкокристаллической структуры, перешел в отечественную литературу как «интенсивная пластическая деформация» (сокращенно ИПД). Во избежание недоразумений при использовании этого русскоязычного термина подчеркнем, что «интенсивная пластическая деформация» – это не просто численная характеристика величины ϵ . Поэтому при использовании термина ИПД слово «интенсивная» нужно воспринимать как синтетическую (в том числе и по величине ϵ , см. формулу (2)) характеристику *процесса* пластической деформации, способного вызвать измельчение зерен и сформировать в деформируемом материале УМК-структуру.

Таким образом, в этой краткой заметке мы попытались показать, что фундаментальные проблемы ИПД весьма различны. Они касаются как вопросов физики развитой пластической деформации кристаллических твердых тел, так и особенностей технологий, использующих пластическую деформацию для получения УМЗ-материалов. Они затрагивают специфику методов испытаний УМЗ-материалов и особенности изучения их необычных свойств. Все эти аспекты были рассмотрены на семинаре. В данной рубрике журнала представлены наиболее интересные из представленных на нем докладов. Ознакомившись с ними, читатель несомненно ощутит новизну и нетривиальность проблем, с которыми приходится сталкиваться материаловедам, создающим перспективные УМЗ- и НК-материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
2. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. 496 с.
3. Рыбин В.В., Вергазов А.Н., Лихачёв В.А. Вязкое разрушение молибдена как следствие фрагментации структуры // Физика металлов и металловедение. 1974. Т. 37. № 3. С. 620–624.
4. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
5. Рыбин В.В. Структурно-кинетические аспекты физики развитой пластической деформации // Известия вузов. Физика. 1991. № 3. С. 7–22.
6. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский Ф.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115–123.
7. Hughes D.A., Liu Q., Chrzan D.C., Hansen N. Scaling of microstructural parameters: Misorientations of deformation induced boundaries // Acta Materialia. 1997. Vol. 45. No. 1. P. 105–112.

8. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // *JOM*. 2006. Vol. 58. Iss. 4. P. 33–39.

9. Estrin Y., Vinogradov F. Extream grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 782–817.

REFERENCES

1. Honikomb R. *Plasticheskaja deformacija metallov*. Moscow, Mir, 1972. 408 p. (rus)

2. Kelli A., Grovs G. *Kristallografija i defekty v kristallah*. Moscow, Mir, 1974. 496 p. (rus)

3. Rybin V.V., Vergazov A.N., Likhachev V.A. Vjazkoe razrushenie molibdena kak sledstvie fragmentacii struktury. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1974, Vol. 37, No. 3, pp. 620–624. (rus)

4. Rybin V.V. *Bol'shie plasticheskie deformacii i razrushenie metallov*. Moscow, Metallurgija, 1986. 224 p. (rus)

5. Rybin V.V. Strukturno-kineticheskie aspekty fiziki razvitoj plasticheskoy deformacii. *Izvestija vuzov. Fizika*. 1991, No. 3, pp. 7–22. (rus)

6. Segal V.M., Reznikov V.I., Drobyshevskij

F.E., Kopylov V.I. *Plasticheskaja obrabotka metallov prostym sdivigom*. *Izv. AN SSSR. Metally*. 1981, No. 1, pp. 115–123. (rus)

7. Hughes D.A., Liu Q., Chrzan D.C., Hansen N. Scaling of microstructural parameters: Misorientations of deformation induced boundaries. *Acta Materialia*. 1997, Vol. 45, No. 1, pp. 105–112.

8. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 2006, Vol. 58, Iss. 4, pp. 33–39.

9. Estrin Y., Vinogradov F. Extream grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*, 2013, Vol. 61, pp. 782–817.

РЫБИН Валерий Васильевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
rybin.spb@gmail.com