

Обзор микромеханизмов пластической деформации в нанодвойникованных материалах*

Н. В. Сжиба

Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 61;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29;
Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Сжиба Н. В. Обзор микромеханизмов пластической деформации в нанодвойникованных материалах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 3. С. 489–493. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.312>

Предложен краткий обзор теоретических моделей, которые описывают специфические микромеханизмы пластической деформации в нанодвойникованных материалах. Наноструктурные материалы часто обладают уникальными механическими характеристиками, такими как высокая твердость, прочность и износостойкость. При этом большинство наноструктурных материалов проявляют низкую пластичность, нежелательную для практических приложений. В большинстве случаев измельчение зерен до наноскопического размера, сопровождаемое увеличением числа некогерентных границ зерен, одновременно характеризуется ростом прочности и снижением пластичности наноструктурных материалов. Однако присутствие в мелкозернистых материалах когерентных границ зерен (например, границ двойников) также может приводить к упрочнению материала без значительной потери пластических свойств. В рамках моделей рассмотрены микромеханизм расширения нанодвойников за счет миграции когерентных двойниковых границ и микромеханизм исчезновения двойников в результате миграции некогерентных двойниковых границ в нанодвойникованных металлах. Результаты теоретических работ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: деформационные механизмы, нанодвойникованные материалы, нанодвойники, двойниковые границы, пластическая деформация.

1. Введение. Наноструктурные материалы часто обладают высокой прочностью и твердостью. В то же время большинство наноструктурных материалов имеет крайне низкую пластичность и трещиностойкость. Однако современные нанодвойниковые металлы (ультрамелкозернистые материалы с высокой плотностью наноскопических двойников внутри зерен) проявляют одновременно высокую прочность и хорошую пластичность при комнатных температурах [1–5]. Эти характеристики нанодвойникованных металлов являются важными для практических приложений. Однако микромеханизмы, ответственные за уникальное сочетание высокой прочности и функциональной пластичности нанодвойникованных материалов, до сих пор не выявлены и являются предметом интенсивных дискуссий. Согласно экспе-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-32-60110) и Министерства образования и науки (задание 16.3483.2017/ПЧ).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

риментальным данным [1–5], в нанодвойникованных материалах действуют специфические деформационные механизмы. Одним из специфических деформационных механизмов в нанодвойникованных материалах является расширение наноскопических двойников в результате миграции когерентных двойниковых границ под действием внешнего напряжения [1, 2]. Предполагается, что микромеханизм миграции когерентных двойниковых границ под действием напряжения осуществляется за счет скольжения частичных дислокаций вдоль границ двойников. Другим специфическим механизмом деформации нанодвойникованных металлов является процесс исчезновения двойниковых прослоек, который экспериментально наблюдался несколькими исследовательскими группами в нанодвойникованной меди (Cu) [3–5]. Этот микромеханизм пластической деформации реализуется за счет миграции некогерентных двойниковых границ [3–5]. Определение этих механизмов деформации является очень важным при анализе пластического течения нанодвойникованных металлов. Таким образом, рассмотрим теоретические модели, которые описывают расширение наноскопических двойников и процесс исчезновения двойниковых прослоек в нанодвойникованных металлах.

2. Модель расширения наноскопических двойников. В теоретических работах [6–9] рассмотрены двумерные модели ультрамелкозернистого металлического образца с периодической нанодвойникованной структурой (рис. 1, *a*). В рамках этих моделей рассматривается отдельное зерно, которое содержит нанодвойники с одинаковой толщиной λ и длиной d , разделенные когерентными двойниковыми границами (рис. 1, *b*). Приложение внешнего растягивающего напряжения σ приводит к возникновению сдвигового напряжения τ вдоль двойниковых границ. Действие сдвигового напряжения τ вызывает скольжение частичных дислокаций вдоль плоскостей, параллельных границам двойников. Хорошо известно, что скольжение частичных дислокаций вдоль двойниковых границ является основным механизмом миграции этих границ. Таким образом, скольжение частичных дислокаций вызывает движение когерентных двойниковых границ в направлении, перпендикулярном плоскости границы, на расстояние δ между соседними плоскостями, параллельными плоскости двойниковой границы (рис. 1, *c*). В результате элементарный акт пластической деформации нанодвойникованного образца представляет одновременную миграцию когерентных двойниковых границ на одинаковое межплоскостное расстояние δ (рис. 1, *c*). Элементарный акт миграции двойниковых границ на расстояние δ может повторяться многократно. Таким образом, последовательные акты миграции когерентных двойниковых границ вызывают последовательное расширение наноскопических двойников (рис. 1, *d*). Рассмотренный микромеханизм расширения наноскопических двойников (который детально описан в теоретических работах [6–9]) подтверждается экспериментальными наблюдениями пластической деформации в нанодвойникованных металлах.

3. Модель микромеханизма исчезновения двойников. В теоретических работах [9, 10] представлены модели отдельного зерна с ростовыми двойниками, разделенными когерентными двойниковыми границами, в деформируемом нанодвойникованном образце (рис. 2, *a*). Это зерно подвергается воздействию сдвигового напряжения τ , как показано на рис. 2, *a*. В исходном состоянии модельное зерно содержит прямоугольный двойник $ABDC$, ограниченный сегментами AB и CD границ зерен и когерентными границами зерен AD и BC (рис. 2, *a*). В рамках модели некогерентная двойниковая граница EF зарождается на сегменте AB границы зерна и движется вдоль когерентных двойниковых границ AD и BC (рис. 2, *b*). Таким образом,

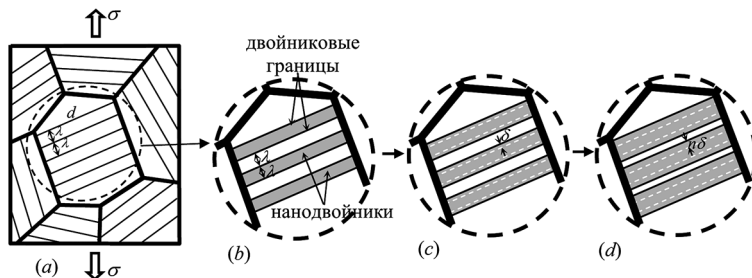


Рис. 1. Модель пластической деформации нанодвойникового материала за счет расширения наноскопических двойников. Ультрамелкозернистый образец с нанодвойникованной структурой (а). Зерно, имеющее структуру из одинаковых нанодвойников, разделенных когерентными двойниковыми границами (б). Элементарный акт миграции двойниковых границ (с). Двойниковая структура после реализации n -го элементарного акта миграции двойниковых границ (д).

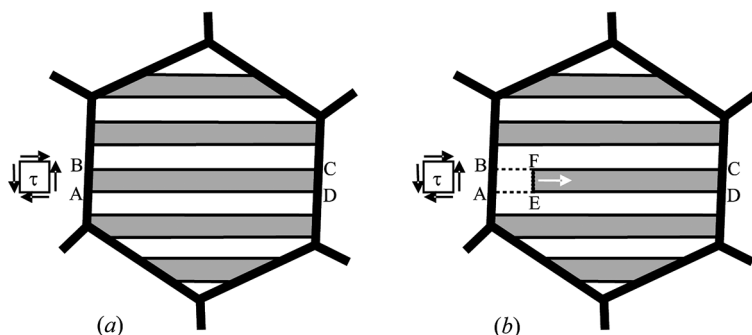


Рис. 2. Модель зерна в ультрамелкозернистом нанодвойникованном образце под действием сдвигового напряжения τ (а). Некогерентная двойниковая граница EF зарождается на границе зерна АВ и движется под действием сдвигового напряжения вдоль когерентных двойниковых границ AD и BC (б).

миграция некогерентной двойниковой границы EF сопровождается исчезновением фрагментов AE и BF когерентных двойниковых границ, способствуя сокращению двойника EDCF (рис. 2, б). Если некогерентная двойниковая граница EF достигнет границы зерна CD, двойник ABCD полностью исчезнет, обеспечивая локальное исчезновение двойников в нанодвойникованном материале. Этот микромеханизм хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями [4] движения некогерентных двойниковых границ в нанодвойникованной меди (Cu).

4. Заключение. Представлен обзор теоретических моделей, которые описывают специфические механизмы деформации в нанодвойникованных материалах. В рамках теоретических моделей [6–9] микромеханизм пластической деформации осуществляется за счет последовательной миграции когерентных двойниковых границ, способствуя расширению наноскопических двойников. В теоретических моделях [9, 10] рассмотрен микромеханизм исчезновения двойниковых прослоек за счет миграции некогерентных двойниковых границ, приводящей к сокращению длины нанодвойников. Теоретические результаты [6–10] хорошо согласуются с экспериментальными данными [1–5].

Литература

1. Lu L., Huang X., Lu K. Revealing the maximum strength in nanotwinned copper // *Science*. 2009. Vol. 323. P. 607–610.
2. Lu K., Lu L., Suresh S. Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale // *Science*. 2009. Vol. 324. P. 349–352.
3. Anderoglu O., Zhang X., Misra A., Huang J. Y., Hitrh J. P., Wang J., Li N. Detwinning mechanisms for growth twins in face-centered cubic metals // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. Iss. 6. P. 2262–2270.
4. Li N., Wang J., Huang J. Y., Misra A., Zhang X. Influence of slip transmission on the migration of incoherent twin boundaries in epitaxial nanotwinned Cu // *Scripta Materialia*. 2011. Vol. 64. Iss. 2. P. 149–152.
5. Liu Y., Jian J., Chen Y., Wang H., Zhang X. Plasticity and ultra-low stress induced twin boundary migration in nanotwinned Cu by in situ nanoindentation studies // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. Iss. 23. P. 231910.
6. Morozov N. F., Ovid'ko I. A., Skiba N. V. Plastic flow through widening of nanoscale twins in ultrafine-grained metallic materials with nanotwinned structures // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2014. Vol. 37. P. 29–36.
7. Морозов Н. Ф., Овидько И. А., Скиба Н. В. Микромеханика пластического деформирования нанодвойникованных металлов посредством расширения двойников // *Доклады Академии Наук*. 2015. Vol. 60. Iss. 11. P. 507–510.
8. Skiba N. V., Bobylev S. V. Twinning Mechanism and Yield Stress in Nanotwinned Materials // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2017. Vol. 51. Iss. 1. P. 86–89.
9. Skiba N. V., Ovid'ko I. A., Sheinerman A. G., Konakov Ya. V. Micromechanisms of plastic deformation in nanotwinned materials // *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 30. Iss. 1. P. 40–52.
10. Ovid'ko I. A., Skiba N. V., Sheinerman A. G. Micromechanisms of twinning and detwinning processes in nanocrystalline and ultrafine-grained metals // *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 27. Iss. 1. P. 42–52.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2018 г.; рекомендована в печать 22 марта 2018 г.

Контактная информация:

Скиба Николай Васильевич — д-р физ.-мат. наук; nikolay.skiba@gmail.com

Review of micromechanisms of plastic deformation in nanotwinned materials

N. V. Skiba

Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences,

Bol'shoi pr. V. O., 61, St. Petersburg, 199178, Russian Federation;

Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Politekhnicheskaya ul., 29,

St. Petersburg, 195251, Russian Federation;

St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7–9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Skiba N. V. Review of micromechanisms of plastic deformation in nanotwinned materials. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2018, vol. 5 (63), issue 3, pp. 489–493. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.312>

A brief review of the theoretical models which describe specific plastic deformation micromechanisms in nanotwinned materials is suggested. Novel nanotwinned materials (ultrafine-grained metallic materials with high-density ensembles of nanoscale twins within grains) exhibit simultaneously high strength and good ductility at room temperature. These characteristics of nanotwinned metals are very important for practical applications. However, micromechanisms responsible for the unique combination of high strength and ductility in nanotwinned metals have not yet been determined and represent the subject of intensive discussions. According to experimental data, the specific deformation mechanisms operate in nanotwinned materials. One of the specific deformation mechanisms in

nanotwinned metals is widening of nanoscale twins due to stress-driven migration of twin boundaries. Another specific deformation mechanism in nanotwinned metals is detwinning process which was experimentally observed by several research groups in nanotwinned copper (Cu). In the framework of the models, micromechanism of nanotwin widening due to coherent twin boundary migration and detwinning micromechanism through migration of incoherent twin boundaries in nanotwinned materials are considered. Results of the theoretical models demonstrate good agreement with corresponding experimental data.

Keywords: deformation mechanisms, nanotwinned materials, nanotwins, twin boundaries, plastic deformation.

References

1. Lu L., Huang X., Lu K., “Revealing the maximum strength in nanotwinned copper”, *Science* **323**, 607–610 (2009).
2. Lu K., Lu L., Suresh S., “Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale”, *Science* **324**, 349–352 (2009).
3. Anderoglu O., Zhang X., Misra A., Huang J. Y., Hitrh J. P., Wang J., Li N., “Detwinning mechanisms for growth twins in face-centered cubic metals”, *Acta Materialia* **58**, issue 6, 2262–2270 (2010).
4. Li N., Wang J., Huang J. Y., Misra A., Zhang X., “Influence of slip transmission on the migration of incoherent twin boundaries in epitaxial nanotwinned Cu”, *Scripta Materialia* **64**, issue 2, 149–152 (2011).
5. Liu Y., Jian J., Chen Y., Wang H., Zhang X., “Plasticity and ultra-low stress induced twin boundary migration in nanotwinned Cu by in situ nanoindentation studies”, *Applied Physics Letters* **104**, issue 23, 231–910 (2014).
6. Morozov N. F., Ovid’ko I. A., Skiba N. V., “Plastic flow through widening of nanoscale twins in ultrafine-grained metallic materials with nanotwinned structures”, *Reviews on Advanced Materials Science* **37**, 29–36 (2014).
7. Morozov N. F., Ovid’ko I. A., Skiba N. V., “Micromechanics of plastic deformation of nanotwinned metals due to twin widening”, *Doklady Physics* **60**, issue 11, 507–510 (2015).
8. Skiba N. V., Bobylev S. V., “Twinning Mechanism and Yield Stress in Nanotwinned Materials”, *Reviews on Advanced Materials Science* **51**, issue 1, 86–89 (2017).
9. Skiba N. V., Ovid’ko I. A., Sheinerman A. G., Konakov Ya. V., “Micromechanisms of plastic deformation in nanotwinned materials”, *Materials Physics and Mechanics* **30**, issue 1, 40–52 (2017).
10. Ovid’ko I. A., Skiba N. V., Sheinerman A. G., “Micromechanics of twinning and detwinning processes in nanocrystalline and ultrafine-grained metals”, *Materials Physics and Mechanics* **27**, issue 1, 42–52 (2016).

Author’s information:

Nikolay V. Skiba — nikolay.skiba@gmail.com