

Скалярная плотность дислокаций во фрагментах с разными типами субструктур

Козлов Э.В., Попова Н.А., Конева Н.А.

E-mail: kozlov@tsuab.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Scalar dislocation density in fragments with different substructure types

Kozlov Ed.V., Popova N.A., Koneva N.A.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk

Работа носит экспериментальный характер. В ней методом просвечивающей электронной микроскопии изучена структура деформированной мартенситной стали. Получена зависимость скалярной плотности дислокаций от размера фрагментов с различными дислокационными субструктурами. Установлено, что тип дислокационной субструктуры определяет соотношение между скалярной плотностью дислокаций и размером фрагментов. Выявлены физические причины такого поведения.

Ключевые слова: скалярная плотность дислокаций, размер фрагментов, сетчатая дислокационная субструктура, ячеистая дислокационная субструктура, мартенситная сталь.

The work is experimental. Structure of the martensite deformed steel was studied by TEM method. The dependence of scalar dislocation density on fragments size having different dislocation substructures in martensite steel was determined. It was established that the type of the dislocation substructure determines the character of the dependence of scalar dislocation density on fragment size. Physical reasons of this behavior were revealed.

Keywords: scalar dislocation density, fragment size, network dislocation substructure, dislocation cells, martensite steel.

1. Введение

Проблема накопления дислокаций в деформированных материалах по-прежнему остается сложной и во многом нерешенной. Это утверждение относится как к чистым металлам и твердым растворам с относительно простыми дислокационными субструктурами, так и к материалам, имеющих сложную субструктуру. В этих материалах до начала (или в ходе) пластической деформации могут происходить фазовые превращения [1,2]. Типичным примером являются субструктуры, формирующиеся в мартенситных сталях, в которых наряду с зернами присутствуют дислокационные ячейки, фрагменты, пакеты и пластины. Подобные структуры, когда одни границы расположены внутри других субструктурных образований, могут возникать в ходе пластической деформации в ультрамелкозернистых (УМЗ) поликристаллах, особенно в условиях динамической рекристаллизации и при других процессах [3,4].

В диапазоне размеров, соответствующих микрочастицам (d) и микрофрагментам ($D_{фр}$), проявляются другие закономерности в накоплении дислокаций по сравнению с закономерностями в мезообласти. Это явление

характерно как для ультрамелкозернистых (УМЗ) поликристаллов, так и для малых фрагментов, наблюдаемых в деформированных мартенситных сталях [5-9]. Количественные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) позволили установить некоторые аналитические зависимости скалярной плотности дислокаций (ρ) от размера зерен и фрагментов. Известно, что соотношение между размерами зерен, дислокационных ячеек и фрагментов и плотностью дислокаций играет важную роль в теории дислокационных субструктур и в концепциях дислокационного упрочнения [10,11].

Целью настоящей работы является исследование методом ПЭМ эволюции дислокационной субструктуры с измерением скалярной плотности дислокаций в мартенситной стали для установления зависимости скалярной плотности дислокаций от размера зерен, дислокационных фрагментов и ячеек. Объектом исследования являлась сталь мартенситного класса, содержащая (масс.%) 0.34 С + 0.40 Ni + 0.30 Cr + 0.60 V + 0.60 Mo, остальное – Fe. Сталь подвергалась закалке от 1000°C, затем проводился отпуск при 600°C, $t = 6.5$ часов. Образцы, изготовленные из отпущенной стали, деформировались растяжением при комнатной температуре до различных

степеней деформации в интервале 5...90%. Из деформированных образцов на электроискровом станке вырезались пластинки толщиной 0.1 мм, которые затем утонялись электрополировкой до необходимой толщины для просмотра в электронном микроскопе. Приготовленные таким образом фольги изучались в электронном микроскопе ЭМ-125 К, снабжённом гониометром, при ускоряющем напряжении 125 кВ. По полученным электронномикроскопическим снимкам проводилась идентификация типов субструктур, наблюдаемых в исследуемой стали, и методом секущей измерялась скалярная плотность дислокаций как средняя в объеме материала, так и в различных составляющих субструктуры. Особое внимание было уделено дислокационным фрагментам с различным типом субструктур в них. Статистическую обработку результатов выполняли по непрерывным участкам фольг площадью ~ 80 мкм², содержащих 500-1000 дислокационных фрагментов.

2. Зависимость плотности дислокаций от размера зерна в УМЗ поликристаллах

Зависимости $\rho = f(d)$ определяются типом дислокационной субструктуры, содержащейся в зернах УМЗ металлов. В работах [5-9] изучена зависимость плотности дислокаций от размера зерен УМЗ поликристаллов меди и никеля в условиях формирования в них сетчатой и ячеистой (или фрагментированной) субструктур. Результаты, приведенные в [5-9], свидетельствуют о том, что основное соотношение, связывающее плотность дислокаций ρ и размер зерен d на микроуровне для чистых металлов имеет вид:

$$\rho = Cd, \quad (1)$$

где C – константа. Соотношение (1) выполняется в интервале микроразмеров зерен металлов. При этом метод изготовления УМЗ поликристаллов [3], РКУП или КГД (РКУП – равноканальное угловое прессование, КГД – кручение под гидростатическим давлением), не изменяет эти закономерности. Формирование внутри зерен сетчатой, фрагментированной или ячеистой субструктур в чистых УМЗ металлах не влияет на соотношение (1), а определяет лишь величину константы C . Выполнение соотношения (1) означает, что в интервале размеров, соответствующих микроразмерам, с уменьшением d скалярная плотность дислокаций уменьшается. При достижении размера $d \approx 100$ нм зерна становятся бездислокационными. Тем самым определяется величина второго критического размера зерен $d_2^{кр}$, когда дислокации при $d \leq d_2^{кр}$ остаются лишь на границах зерен. Параметры критических размеров зерен в микрообласти приведены в [5,9]. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что соотношение (1) относится к интервалу размеров, соответствующих микроразмерам. В интервале размеров, соответствующих мезоскопическим зернам, выполняется соотношение:

$$\rho = k\epsilon d^{-1}, \quad (2)$$

где ϵ – степень деформации, k – константа. Это соотношение введено М.Ф. Эшби [12] и подтверждено Х. Конрадом [13], А.Н. Орловым [14] и авторами настоящей статьи [1].

3. Зависимость скалярной плотности дислокаций от размера фрагментов с сетчатой дислокационной субструктурой в мартенситной стали

Типичная картина фрагментов с сетчатой дислокационной субструктурой деформированной стали представлена на рис.1. Надежные соотношения между плотностью дислокаций и размером фрагментов установлены

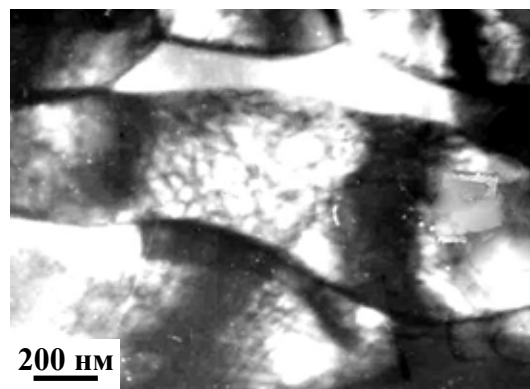


Рис. 1. Сетчатая дислокационная структура внутри фрагментов деформированной стали (ПЭМ).

для фрагментов с сетчатой дислокационной субструктурой в мартенситной стали. Зависимость скалярной плотности дислокаций от размера фрагментов отпущенной деформированной мартенситной стали подчиняется тем же закономерностям, что и зависимость скалярной плотности дислокаций от размера зерен УМЗ чистых металлов Cu и Ni [5,8,9]. Скалярную плотность дислокаций и размер фрагментов $D_{фр}$ в стали связывает соотношение:

$$\rho = C' D_{фр}, \quad (3)$$

где C' – константа. Подобие соотношений (1) и (3) свидетельствует о наличии основополагающих зависимости

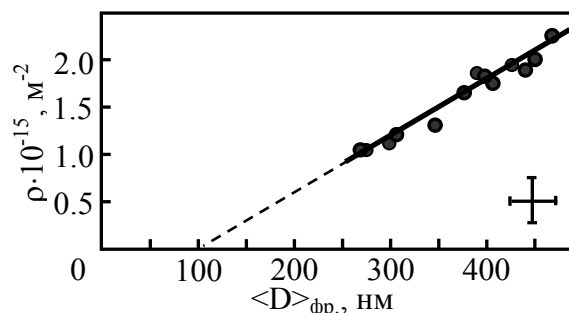


Рис. 2. Зависимость скалярной плотности дислокаций (ρ) от среднего размера фрагментов ($\langle D_{фр} \rangle$) с сетчатой дислокационной структурой.

стей, связывающих скалярную плотность дислокаций с размером зерен или фрагментов, в которых дислокации

накапливаются с деформацией. Типичная зависимость $\rho = f(D_{\text{фр}})$ приведена на рис.2. Из этого рисунка видно, что соотношение (3) выполняется достаточно строго. Одновременно рис.2 демонстрирует критический размер фрагментов, при котором скалярная плотность дислокаций становится равной нулю.

Этот критический размер близок к размеру $D_{\text{фр,кр}} \approx 100$ нм. Тем самым установлено, что второй критический размер зерна в микрообласти оказывается равным критическому размеру фрагментов в дислокационной структуре мартенситной стали, формирующейся при деформации. На наш взгляд, равенство критических размеров микрорезерв и дислокационных фрагментов полностью обусловлено подобием механизмов взаимодействия скользящих дислокаций с границами микрорезерв и фрагментов.

4. Зависимость плотности дислокаций от размера фрагментов с ячеистой дислокационной субструктурой

При переходе к ячеистой дислокационной субструктуре картина закономерностей накопления дислокаций в стали усложняется [15]. Дислокационная ячеистая субструктура, возникающая внутри фрагментов деформированной мартенситной стали, представлена на рис.3. В

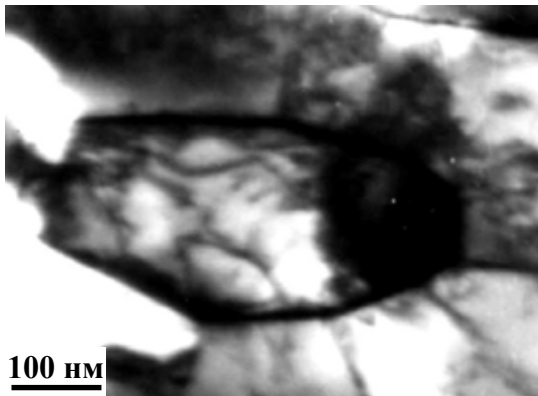


Рис. 3. Ячеистая дислокационная субструктура внутри фрагментов деформированной мартенситной стали (ПЭМ).

этом случае с уменьшением размера фрагментов плотность дислокаций не убывает, а наоборот растет.

Несомненно, это связано с тем фактом, что скользящие дислокации взаимодействуют со стенками ячеек, находящимися внутри фрагментов, иначе, чем с дислокациями сетчатой дислокационной субструктуры. Барьерное торможение [16] стенками ячеек является более сильным фактором, и с уменьшением размера фрагментов, содержащих ячеистую субструктуру, скалярная плотность дислокаций возрастает. Соответствующие данные представлены на рис.4. Как видно, здесь реализуется соотношение:

$$\rho = \rho_{\text{кр}} - A D_{\text{фр}}, \quad (4)$$

где A – константа, $\rho_{\text{кр}} \sim 3.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Несомненно, что выполнение соотношения (4) связано с интенсивным взаимодействием дислокаций со стенками ячеек, содержащихся внутри фрагментированной структуры стали.

Это подтверждают данные, приведенные на рис.5. На рисунке представлена зависимость плотности дислокаций от размера ячеек ($D_{\text{яч}}$) в исследуемой стали. Видно, что в этом случае выполняется соотношение:

$$\rho = \rho_{\text{пр}} - A' D_{\text{яч}}^{-1}, \quad (5)$$

где A' – константа, $\rho_{\text{пр}}$ – предельная плотность дислокаций в ячеистой субструктуре. Сравнение рис.4 и 5 показывает, что зависимость плотности

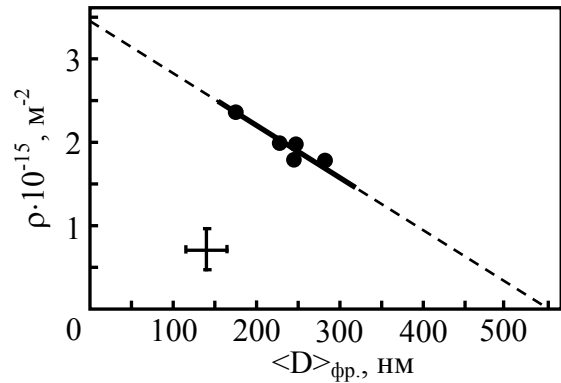


Рис. 4. Зависимость скалярной плотности дислокаций (ρ) от среднего размера фрагментов ($\langle D_{\text{фр}} \rangle$) с ячеистой дислокационной субструктурой.

дислокаций от размера ячеек более сильная, чем от размера фрагментов ($A' > A$). Это означает, что основной эффект заключается в барьерном торможении скользящих дислокаций стенками ячеек. Экстраполяция зависимости, представленной на рис.5, позволяет оценить предельное значение для

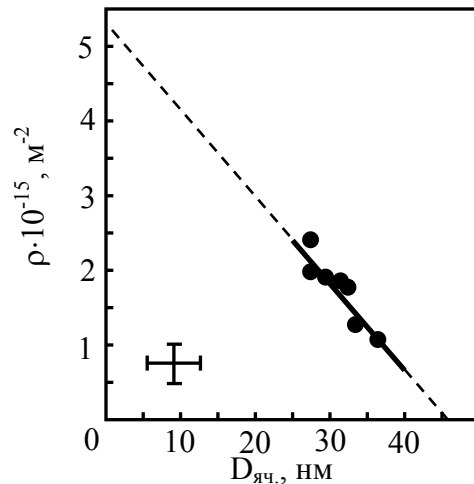


Рис. 5. Зависимость скалярной плотности дислокаций (ρ) от размера ячеек ($\langle D_{\text{яч}} \rangle$) в деформированной мартенситной стали.

скалярной плотности дислокаций, $\rho \leq 5.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Такая высокая скалярная плотность дислокаций, близкая к $\rho \approx 10^{16} \text{ м}^{-2}$, свидетельствует о том, что торможение дислокаций стенками дислокационных ячеек следует отнести к максимальному торможению скользящих дислокаций в дислокационной структуре.

5. Заключение

Экспериментально установлены эмпирические зависимости скалярной плотности дислокаций от размера фрагментов и ячеек в деформированной мартенситной стали. Обнаружено, что тип дислокационной структуры во фрагментах стали решающим образом определяет зависимость скалярной плотности дислокаций от их размера. Если внутри фрагментов присутствует сетчатая дислокационная субструктура, то скалярная плотность дислокаций убывает с уменьшением размера фрагментов. Напротив, если дислокационная субструктура во фрагментах ячеистая, то с уменьшением размера фрагментов скалярная плотность дислокаций растет. С измельчением размера ячеек плотность дислокаций также интенсивно возрастает. Такое поведение обусловлено различными механизмами торможения скользящих дислокаций в сетчатой и ячеистой дислокационных субструктурах. Установленные в работе соотношения между различными параметрами дислокационной субструктуры являются основополагающими для дальнейшего развития физики дислокационного упрочнения твердого тела [17]. Дислокационная парадигма субструктурного упрочнения получает в таких соотношениях, во-первых, прямое подтверждение и, во-вторых, раскрывает основополагающую роль субструктурных образований в дислокационной концепции физики упрочнения.

Литература

1. G.V. Kyrdyumov, L.M. Utevskaia, R.I. Entin. Transformations in Iron and Steel. M.: Nauka, (1977) 236p.
2. H.K. Bhadeshia. Bainite in steels, London: The Institute of Materials. (1992) 451p.
3. R.Z. Valiev, T.G. Langdon. Progr. Mat. Sci. 51, 881 (2006).
4. N.I. Noskova, R.R. Mulyukov. Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys. Yekaterinburg: UrB RAS, (2003) 279p. (in Russian)
5. E.V. Kozlov, N.A. Koneva, N.A. Popova. Physical Mezomech. 12 (4), 93 (2009). (in Russian)
6. E.V. Kozlov, N.A. Popova, N.A. Koneva. Fundamental Problems of Modern Materialovedeniya. 6 (2), 14 (2009). (in Russian)
7. N.A. Koneva, E.V. Kozlov, N.A. Popova. Fundamental Problems of Modern Materialovedeniya. 7 (1), 64 (2010). (in Russian)
8. N.A. Koneva, E.V. Kozlov, N.A. Popova, et al. Mat. Sci. Forum. 633-634, 605 (2010).
9. N.A. Koneva, N.A. Popova, E.V. Kozlov. Bulletin of the Russian Academy of Sciences; Physics. 74 (5), 592 (2010).
10. D. Kuhlmann-Wilsdorf. Phil. Mag. A 79, 955 (1999).
11. L.P. Kubin, C. Fressengeas, G. Ananthakrishna. In Dislocation in Solids. V.11. Ed. F.N.R. Nabarro and M.S. Duesbery. Amsterdam: Elsevier, 101-192 (2002).
12. M.F. Ashby. Phil. Mag. 21, 399 (1970).
13. H. Conrad. In Ultrafine-Grain Metals. Ed. J.J. Burke and V. Weiss. Syracuse: Syracuse University (1973) p. 206.
14. A.H. Orlov. Fizika metallov i metallovedenie. 44, 966 (1977). (in Russian)
15. M.A. Meyers, K.K. Chawla. Mechanical Behavior of Materials. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. (1998) 680p
16. E.V. Kozlov, N.A. Koneva, L.A. Teplyakova et al. Mat. Sci. Eng. A 319-321, 261 (2001).
17. R.W. Cahn. The Coming of Materials Science. Amsterdam: Elsevier Science, Ltd. (2001) 571p.