

УДК 669.112.227.342:539.4.015

## ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ\*

**Никитина Е.Н.**, инженер

**Громов В.Е.**, д.ф.-м.н, профессор, заведующий кафедрой физики  
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

**Алсараева К.В.**, аспирант кафедры физики им. В.М. Финкеля

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен количественный анализ эволюции дефектной подсистемы стали 30X2H2MФА с бейнитной структурой при деформации сжатием до 36 %. Определены зависимости скалярной плотности дислокаций, объема материала с микродвойниками, размеров фрагментов, количества концентраторов напряжений и амплитуды кривизны-кручения решетки от степени деформации. При пластической деформации бейнитной стали скалярная плотность дислокаций и объем материала, содержащий деформационные микродвойники, а также количество концентраторов напряжений и амплитуда изгиба-кручения кристаллической решетки материала увеличиваются, а средние продольные размеры фрагментов уменьшаются. Выявлена стадийность изменения параметров субструктуры стали. Обсуждены возможные причины стадийности изменения параметров дефектной субструктуры с деформацией. Отмечено, что на первой стадии нагружения ( $0 < \varepsilon < 18 \%$ ) деформирование осуществляется движением дислокаций, а на второй стадии ( $18 < \varepsilon < 36 \%$ ) – движением дислокаций и двойникованием.

**Ключевые слова:** сталь, бейнитная структура, деформация, дефектная субструктура, эволюция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-603-606

Стали с бейнитной структурой широко применяются в автомобильной промышленности, в энергетической отрасли, при производстве рельсов, высокопрочных труб для нефтегазовой промышленности и т.д. [1 – 5]. Стойкость изделий из сталей с бейнитной структурой во многом определяется состоянием дефектной подсистемы, механическими свойствами и их изменениями при эксплуатации. Среди разнообразных факторов, воздействующих на эксплуатируемые изделия, одним из основных является деформационное воздействие. Возможности повышения сопротивления контактно-усталостным повреждениям и износу рельсов на основе перлитной структуры практически исчерпаны [3]. Бейнитная структура характеризуется меньшим межпластинчатым расстоянием и, соответственно, более высокими прочностью, твердостью, ударной вязкостью. Знание закономерностей изменения дефектной субструктуры при деформации позволяет целенаправленно формировать структурно-фазовые состояния и свойства изделий из сталей с бейнитной структурой.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых кандидатов наук МК-4166.2015.2 и докторов наук МД-2920.2015.8, РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-12009 офи\_м, 15-08-03411, 14-08-00506а, госзаданий Минобрнауки № 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

Выражаем благодарность д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванову за обсуждение результатов и критические замечания.

Целью настоящей работы является исследование эволюции дефектной субструктуры бейнитной стали при активной пластической деформации.

В качестве материала исследования была использована конструкционная сталь 30X2H2MФА [6]. Аустенизацию стали проводили при температуре 960 °C в течение 1,5 ч; охлаждение осуществляли на воздухе. Деформацию стали проводили одноосным сжатием столбиков размерами 4×4×6 мм со скоростью приблизительно  $7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  на испытательной машине «Инстрон-1185». Исследования дефектной субструктуры стали осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг.

Кинетика бейнитного превращения и получающиеся при этом структуры имеют черты кинетики и структур, получаемых при диффузионном перлитном и бездиффузионном мартенситном превращениях: диффузионное перераспределение углерода в аустените между продуктами его распада и мартенситное бездиффузионное превращение с образованием структуры пластинчатого типа [7 – 10]. Таким образом, в результате бейнитного превращения при непрерывном охлаждении в стали образуется многофазная структура:  $\alpha$ -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки),  $\gamma$ -фаза (остаточный аустенит, твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки), карбид железа (в низко- и среднеуглеродистых сталях – цементит).

Мартенситный (сдвиговый) механизм формирования феррита приводит к образованию в пластинах бейнита дислокационной субструктуры сетчатого типа с относительно высокой ( $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) скалярной плотностью дислокаций ( $\rho$ ). Пластическая деформация стали приводит к увеличению скалярной плотности дислокаций (рис. 1, а). При этом тип дислокационной субструктуры не изменяется: сохраняется сетчатая субструктура.

Анализируя результаты (рис. 1, а), можно выделить два участка на зависимости скалярной плотности дислокаций от степени деформации. На участке I ( $0 < \varepsilon < 18\%$ ) наблюдается линейное увеличение скалярной плотности дислокаций; на участке II ( $18 < \varepsilon < 36\%$ ), равном по продолжительности первому, рост плотности дислокаций практически не выявляется. Данное обстоятельство может быть обусловлено как трудностью анализа дислокационной субструктуры при плотностях дислокаций, больших  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ , что обусловлено перекрытием ядер близко расположенных дислокаций, так и возможностью реализации недислокационного механизма деформации материала.

Одним из таких механизмов, реализующихся при деформации, может быть двойникование. Действительно, выполненные в настоящей работе исследования

выявили существенное увеличение объема материала, содержащего деформационные микровойники, при степени деформации, превышающей 18 % (рис. 1, б).

Упругие напряжения, имеющие место при реализации сдвигового механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, приводят не только к формированию субструктуры с высокой скалярной плотностью дислокаций, но и к фрагментации пластин бейнита, то есть к разбиению пластин на области с малоугловой разориентацией, которые наиболее отчетливо выявляются методами анализа темного поля.

Деформация стали приводит к уменьшению средних продольных размеров фрагментов ( $L$ ) (поперечные размеры фрагментов ограничены границами пластин бейнита и при деформации практически не изменяются) (рис. 2, а). При этом в изменении размеров фрагментов также выявляется некоторая стадийность: на стадии I этот процесс протекает весьма интенсивно, на стадии II – существенно медленнее.

Изменение размеров фрагментов протекает на фоне увеличения степени их разориентации (рис. 2, б). Азимутальную составляющую полного угла разориентации ( $\Delta\alpha$ ) определяли по относительной величине тяжей рефлексов  $\alpha$ -фазы соответственно методике, изложенной в работе [10]. Можно выделить три стадии разви-

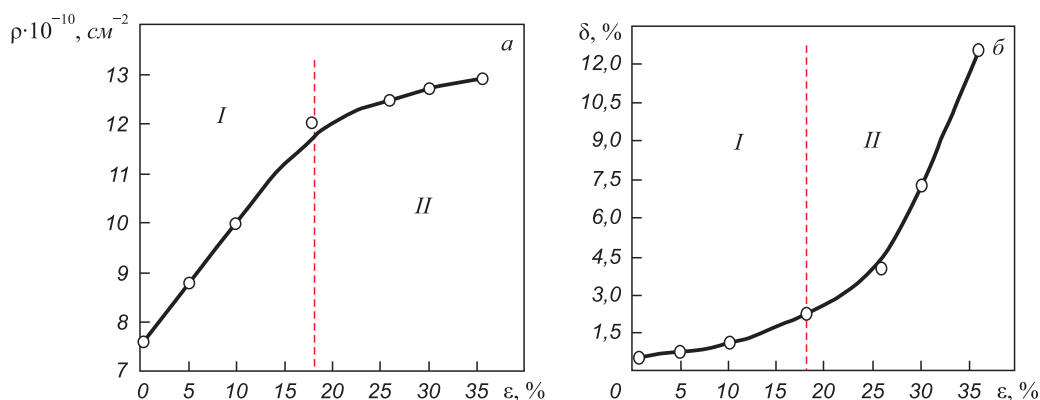


Рис. 1. Зависимость скалярной плотности дислокаций (а) и объема материала (δ), содержащего микровойники (б), от степени деформации

Fig. 1. Dependence of scalar dislocation density (a) and material volume containing the microtwins (b) on the deformation degree

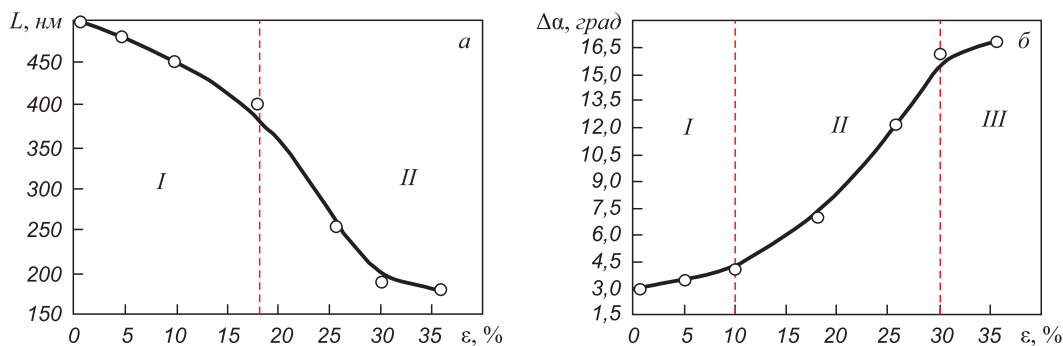


Рис. 2. Зависимость средних продольных размеров фрагментов (а) и величины азимутальной составляющей полного угла разориентации субструктуры (б) от степени деформации

Fig. 2. Dependence of the average longitudinal fragment sizes (a) and the azimuth component of disorientation substructure whole angle (b) on the deformation degree

тия данного процесса: на стадиях *I* и *III* разориентация элементов субструктуры нарастает сравнительно медленно, на стадии *II* – существенно интенсивнее.

Деформация стали сопровождается формированием внутренних полей напряжений, которые методами электронной микроскопии тонких фольг выявляются при анализе изгибных экстинкционных контуров [11 – 14]. Характерные изображения структуры стали, демонстрирующие присутствие изгибных контуров экстинкции, формирующихся при пластической деформации, представлены на рис. 3.

Выполненные исследования показали, что с ростом степени деформации увеличивается поверхностная плотность контуров (рис. 4, *a*) (количество контуров на единицу площади снимка) и снижаются их средние поперечные размеры (*h*) (рис. 4, *б*). Первый факт указывает на увеличение количества концентраторов напряжений в материале с ростом степени деформации, второй – на рост амплитуды изгиба-кручения кристаллической решетки материала и внутренних дальнедействующих полей напряжений [12 – 14]. Одновременно с этим изменяются форма контуров и их расположение в пластинах бейнита: в исходном состоянии и при малых степенях деформации контуры располагались пре-

имущественно поперек пластин, пересекая пластину от одной границы до другой; после деформации с большой (18 % и более) степенью деформации в материале формируются кольцевые контуры, охватывающие некоторые области в объеме пластин.

**Выводы.** Выполнен количественный электронно-микроскопический микроdifракционный анализ эволюции дефектной субструктуры стали 30Х2Н2МФА при пластической деформации одноосным сжатием. Показано, что пластическая деформация бейнитной стали сопровождается, во-первых, увеличением скалярной плотности дислокаций и объема материала, содержащего деформационные микродвойники, во-вторых, уменьшением средних продольных размеров фрагментов и увеличением степени их разориентации, в-третьих, увеличением количества концентраторов напряжений и амплитуды изгиба-кручения кристаллической решетки материала. Выявлена стадийность изменения параметров субструктуры стали. Высказано предположение о смене механизма деформирования стали: на первой стадии нагружения ( $0 < \varepsilon < 18\%$ ) деформирование осуществляется преимущественно движением дислокаций; на второй стадии ( $18 < \varepsilon < 36\%$ ) – движением дислокаций и двойникованием.

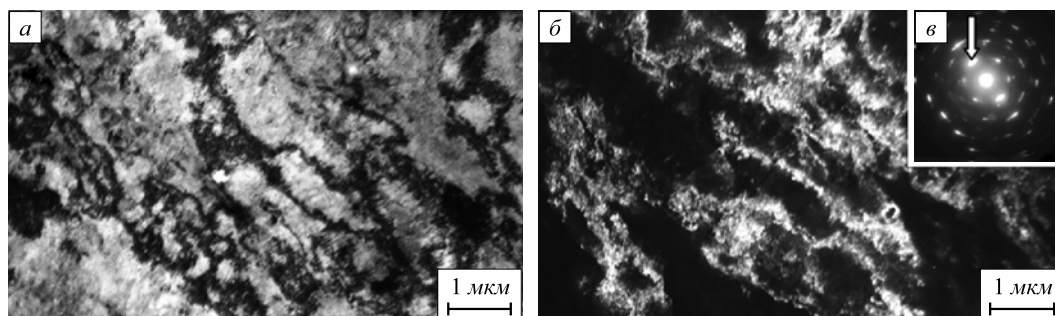


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение, демонстрирующее изгибные контуры экстинкции: *a* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе  $[110]\alpha\text{-Fe}$ ; *в* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Fig. 3. Transmission electron microscopy image demonstrating the bend extinction contours: *a* – light field; *б* – dark field, obtained in  $[110]\alpha\text{-Fe}$  reflex; *в* – microelectron diffraction pattern, arrow shows the reflex in which the dark field is obtained

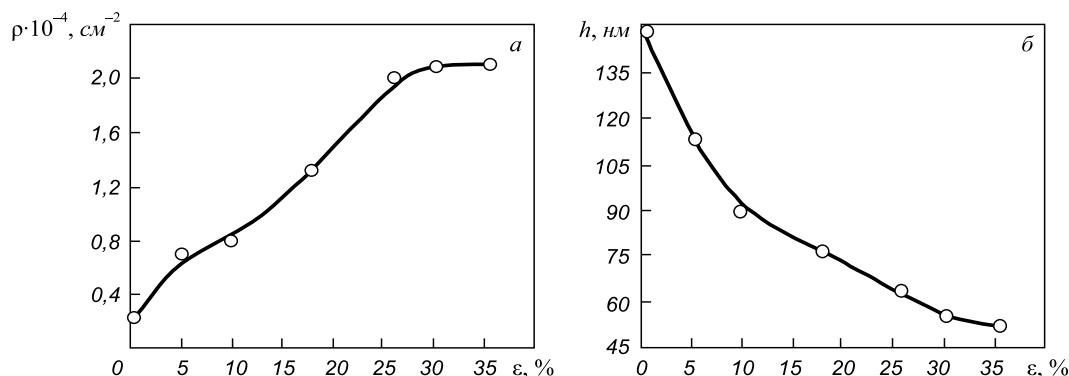


Рис. 4. Зависимость поверхностной плотности контуров (*a*) и их средних поперечных размеров (*б*) от степени деформации

Fig. 4. Dependence of surface contours density (*a*) and their average transversal sizes (*б*) on deformation degree

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1966. – 1274 с.
2. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных газопроводов. – М.: Металлургия, 1989. – 288 с.
3. Павлов В.В., Годик Л.А., Корнева Л.В. и др. // Металлург. 2007. № 4. С. 51 – 53.
4. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
5. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
6. Приданцев М.В., Давыдова Л.Н., Тамарина А.М. Конструкционные стали. Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
7. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
8. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. 2nd ed. – The Institute of Materials London, 2001. – 460 p.

9. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в легированных сталях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – 236 с.
10. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
11. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
12. Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вуз. Физика. 1982. № 8. С. 3 – 14.
13. Конева Н.А., Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Лычагин Д.В. – В кн.: Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Сб. трудов международной конференции. – Томск: изд. ТГУ, 1990. С. 83 – 93.
14. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. – 174 с.

Поступила 25 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 8, pp. 603–606.

## CARBIDE SUBSYSTEM EVOLUTION OF CONSTRUCTIONAL STEEL WITH BAINITE STRUCTURE UNDER DEFORMATION

**Nikitina E.N.**, Research Engineer of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

**Gromov V.E.**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

(gromov@physics.sibsiu.ru)

**Alsaraeva K.V.**, Postgraduate of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

**Siberian State Industrial University** (42, Kirova Str., Kemerovo region, Novokuznetsk, 654007, Russia)

**Abstract.** The quantitative analysis of defect subsystem evolution of the steel with bainite structure under compression deformation up to 36 % was carried out by the methods of transmission electron diffraction microscopy. The dependences of scalar dislocation density, the material volume with microtwins, fragment sizes, stress concentrator numbers and amplitude of lattice curvature-torsion on deformation degree were defined. The authors discussed the possible reasons of staging of defect substructure parameter changes with deformation.

**Keywords:** steel, bainite structure, deformation, defect substructure, evolution.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-8-603-606

## REFERENCES

1. Gudremon E. *Especial steel*. Berlin: Springer-Verlag, 1956; (Russ. ed.: Gudremon E. *Spetsial'nye stali*. Vol.1. Moscow: Metallurgiya, 1966. 344 p.).
2. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. *Stal' dlya magistral'nykh gazoprovodov* [Steel for gas-main pipelines]. Moscow: Metallurgiya, 1989. 288 p. (In Russ.).
3. Pavlov V.V., Godik L.A., Korneva L.V., Kozyrev N.A., Kuznetsov E.P. Railroad rails made of bainitic steel. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 3–4, pp. 209–212.
4. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of metal heat treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1978. 392 p. (In Russ.).
5. Pickering F.Brian. *Physical metallurgy and the design of steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. (Russ.ed.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley*. Moscow: Metallurgiya, 1982. 182 p.).
6. Pridansev M.V., Davydova L.N., Tamarina A.M. *Konstruktsionnye stali: Spravochnik* [Constructional steels: Reference-book]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 288 p. (In Russ.).

7. Kurdyumov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977. 236 p. (In Russ.).
8. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels*. 2nd ed. The Institute of Materials London, 2001. 460 p.
9. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A. *Ostatochnyi austenit v legirovannykh stalyakh* [Retained austenite in alloyed steel]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2014. 236 p. (In Russ.).
10. Utevskii L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in physical metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 584 p. (In Russ.).
11. Hirsh P., Hovi R., Nicholson R., Pashley D.W., Whelan M.J. *The Electron Microscopy of Thin Crystals*. Butterworths, 1965. 549 p. (Russ.ed.: Hirsh P., Hovi R., Nicholson R. *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov*. Moscow: Mir, 1968. 574 p.).
12. Koneva N.A., Kozlov E.V. Nature of substructural hardening. *Soviet Physics Journal*. 1982, vol. 25, no. 8, pp. 681–691.
13. Koneva N.A., Kozlov E.V., Trishkina L.I., Lychagin D.V. *Dal'nodeistviyushchie polya napryazhenii, krivizna-kruchenie kristallicheskoj reshetki i stadii plasticheskoi deformatsii. Metody izmerenii i rezul'taty* [Long-range stress fields, curvature-twisting of a crystal lattice and the stages of plastic deformation. Methods of measurement and the results]. In.: *Novye metody v fizike i mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. Sb. trudov mezhdunarodnoi konferentsii 26–31 maya 1990 g.* [New methods in physics and mechanics of a deformable solid. Proceedings of the International conference May 26–31, 1990]. Tomsk: izd. TGU, 1990. pp. 83–93. (In Russ.).
14. Ivanov Yu.F., Kornet E.V., Kozlov E.V., Gromov V.E. *Zakalennaya konstruktsionnaya stal': struktura i mekhanizmy uprochneniya* [Hard constructional steel: structure and hardening mechanisms]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2010. 174 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Grant of President of Russian Federation for state support of young Russian scientists-candidates of Sci. MK-4166.2015.2 and Doctors of Sci. MD-2920.2015.8, RFBR within the framework of scientific projects no. 13-02-12009 ofi\_m, 15-08-03411, 14-08-a, state task of the Ministry of education no. 2708 and 3.1496.2014/K on the performance of research work.

Authors thank Ivanov Yu. F., Dr. Sci. (Phys.-math.) for discussions of the results and critical comments.

Received May 25, 2015