

XXI Международная научно-
техническая Уральская школа-семинар
металловедов — молодых ученых

УРАЛЬСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ МЕТАЛЛОВЕДОВ

URAL SCHOOL FOR YOUNG METAL SCIENTISTS

Екатеринбург
7–11 февраля 2022 г.

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ключевой Центр превосходства «Материаловедение перспективных
металлосодержащих материалов и технологий их обработки»

УРАЛЬСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ МЕТАЛЛОВЕДОВ

.....

URAL SCHOOL FOR YOUNG METAL SCIENTISTS

Материалы XXI Международной научно-технической
Уральской школы-семинара металлословедов — молодых ученых
(Екатеринбург, 7—11 февраля 2022 г.)

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2022

УДК 669.017(063)

ББК 34.2я43

У68

Рецензенты:

Б. А. Потехин — д-р техн. наук, проф. (кафедра технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета);

В. Г. Пушин — д-р физ.-мат. наук, проф, гл. науч. сотр., руководитель отд. электрон. микроскопии ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» Института физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Редакционная коллегия:

председатель — проф., д-р техн. наук *А. А. Попов*

зампредседателя — академик РАН *В. М. Счастливец*

д-р техн. наук, проф. *М. Л. Лобанов*; канд. техн. наук, проф. *С. Л. Демаков*; канд. хим. наук, доц. *Н. Г. Россина*; канд. техн. наук, доц. *А. Г. Илларионов*; канд. техн. наук, доц. *С. В. Беликов*; канд. техн. наук, доц. *О. Ю. Корниенко*; канд. техн. наук, доц. *М. С. Карабанов*; канд. техн. наук, доц. *С. В. Гриб*; канд. техн. наук, доц. *А. С. Юровских*; канд. техн. наук, доц. *Ф. В. Водолазский*; канд. техн. наук, доц. *С. И. Степанов*; канд. техн. наук, доц. *М. А. Жиликова*; канд. техн. наук, доц. *Н. А. Попов*; канд. техн. наук *К. И. Луговая* (отв. за вып.); канд. техн. наук *А. Ю. Жиликов*; канд. техн. наук *М. А. Зорина*; аспирант *Р. И. Петров*; аспирант *А. А. Коренев*; аспирант *М. А. Шабанов*; аспирант *А. О. Петрова*

Уральская школа молодых металловедов = Ural School for Young Metal Scientists : материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (Екатеринбург, 7–11 февраля 2022 г.) ; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — 520 с.

ISBN 978-5-7996-3533-6

Сборник содержит материалы, подготовленные на основе научных докладов о достижениях молодых ученых, аспирантов и студентов в области материаловедения легких сплавов, и освещает актуальные проблемы развития, обработки, создания и исследования новых металлических и композиционных материалов и покрытий для авиакосмической, морской и других отраслей промышленности.

Сборник предназначен для научных работников в сфере материаловедения, аспирантов и студентов, интересующихся данной темой.

УДК 669.017(063)

ББК 34.2я43

Ответственность за содержание и оформление публикуемых материалов несут авторы докладов.

ISBN 978-5-7996-3533-6

© Уральский федеральный университет, 2022

Научная статья

УДК 669.112.2:539.4

Деформационное упрочнение сталей различных структурных классов

**Крестина Владимировна Аксёнова¹, Виктор Евгеньевич Громов²,
Юрий Федорович Иванов³, Екатерина Степановна Ващук⁴**

^{1,2} Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

⁴ Филиал Кузбасского государственного технического университета
им. Т. Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия

¹ 19krestik91@mail.ru

Аннотация. Получены кривые деформационного упрочнения сталей различных структурных классов, подвергнутых пластической деформации одноосным сжатием. Установлено, что деформационное упрочнение исследуемых сталей носит многофакторный характер.

Ключевые слова: сталь, пластическая деформация, упрочнение, структура

Original article

Deformation Hardening of Steels of Different Structural Classes

**Krestina V. Aksenova¹, Viktor E. Gromov², Yurii F. Ivanov³,
Ekaterina S. Vashchuk⁴**

^{1,2} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁴ Branch of the Kuzbass State Technical University
named after T. F. Gorbachev in Prokopyevsk, Prokopyevsk, Russia

¹ 19krestik91@mail.ru

Abstract. The curves of strain hardening of steels of various structural classes subjected to plastic deformation by uniaxial compression are obtained. It was found that the strain hardening of the investigated steels is multifactorial.

Keywords: steel, plastic deformation, hardening, structure

Несмотря на прогресс развития науки и техники в XX в., человечество и в XXI в. продолжает жить в эпоху, когда основным конструкционным материалом являются стали — сплавы на основе железа [1]. Это обусловлено высокими физико-механическими характеристиками сталей, которые зависят от их структурно-фазового состояния. Всестороннее изучение свойств, характеризующих сопротивление хрупкому разрушению, показало принципиальную возможность эффективного деформационного упрочнения сталей различных классов при условии его рационального применения [2]. Как известно, пластическая деформация — это сложный физико-химический процесс, в результате которого вместе с изменением строения и формы исходного состояния меняются его физико-химические и механические свойства. Знание закономерностей формирования структуры и свойств сталей при пластической деформации необходимо для управления процессом деформационного упрочнения [3].

Целью настоящей работы является анализ структурно-фазовых состояний сталей различных структурных классов, подвергнутых пластической деформации одноосным сжатием.

Материал исследования — конструкционные стали с перлитной (рельсовая сталь), бейнитной (30X2H2MФА) и мартенситной (38XH3MФА) структурами. Предварительно стали подвергали термической обработке: аустенизировали при температуре 960 °С, 1,5 ч и охлаждали в воде (сталь 38XH3MФА) или на воздухе (сталь 30X2H2MФА). Рельсовая сталь была подвергнута дифференцированной закалке сжатым воздухом. Деформацию сталей проводили при комнатной температуре одноосным сжатием со скоростью $\sim 7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ столбиков размерами $4 \times 4 \times 6 \text{ мм}^3$ на испытательной машине типа Instron при автоматической записи нагрузки и удлинения. Сжатие как способ деформации было удобно использовать, поскольку в этом случае удастся достигать более глубоких деформаций, чем при растяжении. Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг.

Характерный вид кривых деформационного упрочнения исследуемых материалов приведен на рис., *а*. Видно, что деформационное упрочнение материалов протекает похожим образом, однако прочностные характеристики мартенситной стали выше, а пластичность ниже, чем у бейнитной и рельсовой. Математическая обработка кривых деформационного упрочнения показывает, что зависимость σ - ε имеет параболический вид и описывается полиномом четвертой степени (независимо от структуры материала). Разрушение испытываемых образцов стали, независимо от структуры, происходило путем хрупкого скола с образованием нескольких крупных осколков.

Дифференцирование кривой зависимости σ - ε позволяет определить коэффициент деформационного упрочнения стали $\theta = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$. Ана-

лизируя приведенные на рис., *б* результаты, можно выделить две стадии деформационного упрочнения: 1) стадию с параболической зависимостью σ - ε или убывающим коэффициентом упрочнения θ ; 2) стадию со слабо изменяющимся отрицательным или низким значением коэффициента упрочнения. Переход от первой стадии ко второй наступает в интервале степеней деформации 17–22 % независимо от структурного состояния исследуемых материалов.

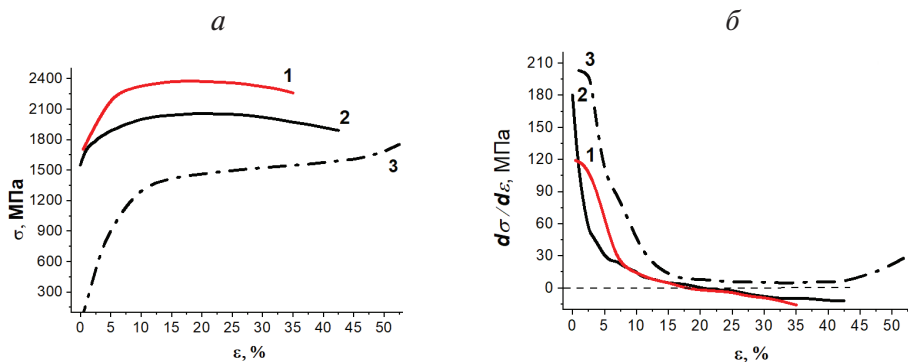


Рис. Сталь 38ХНЗМФА (кривая 1), сталь 30Х2Н2МФА (кривая 2) и рельсовая сталь (кривая 3):

а — кривые деформационного упрочнения; *б* — зависимости коэффициента деформационного упрочнения от степени деформации

Проведенные электронно-микроскопические микродифракционные исследования показали, что в результате указанной выше термиче-

ческой обработки в стали 38ХНЗМФА была сформирована структура пакетного (реечного) мартенсита; в стали 30Х2Н2МФА — структура нижнего бейнита, сформировавшаяся по сдвиговому механизму $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения [4]. В объеме реек присутствуют частицы цементита (более крупные в стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой) и дислокационная субструктура сетчатого типа с относительно высокой скалярной плотностью дислокаций, составляющей в стали с мартенситной структурой $\approx 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$; в пластинах нижнего бейнита $\approx 0,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Основным типом структуры, формирующейся в рельсовой стали, имеющей выраженный градиентный характер, является перлит пластинчатой морфологии (эвтектоидная смесь феррита и цементита, в которой обе фазы имеют форму протяженных пластинок), относительная объемная доля которого меняется в пределах 0,34–0,87. Доля зерен феррито-карбидной смеси (зерен феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита разнообразной формы) составляет 0,12–0,65 структуры стали, а структурно свободного феррита (зерен феррита, не содержащими в объеме частиц карбидной фазы) — 0,01–0,05. С увеличением расстояния до поверхности относительная объемная доля пластинчатого перлита увеличивается, а зерен феррито-карбидной смеси и структурно-свободного феррита уменьшается.

Установлено, что пластическая деформация одноосным сжатием сталей сопровождается скольжением дислокаций и микродвойникованием, а также взаимосвязанной эволюцией фазового состава и дефектной субструктуры материала, проявляющейся на макро- (образец в целом, структура зеренного ансамбля), мезо- (пакет, кристаллы мартенсита, остаточный аустенит), микро- (дефектная субструктура кристаллов мартенсита, частицы карбидной фазы) и наноструктурных (перераспределение атомов углерода при разрушении частиц карбидной фазы) уровнях.

В результате проведенных исследований установлено, что деформационное упрочнение исследуемых сталей носит многофакторный характер [4]. Наибольший вклад в величину деформационного упрочнения исследуемых сталей дает упрочнение, обусловленное внутренними дальнедействующими полями напряжений, и твердорастворное упрочнение, обусловленное внедрением атомов углерода в кристаллическую решетку феррита. Для бейнитной стали при больших степенях деформации увеличивается доля вклада упрочнения, обусловленного внутрифазными границами.

Список источников

1. Вишнякова Е. В. История развития конструкционных материалов // Научный журнал НИУ ИТМО. 2016. № 1. С. 49–60.
2. Song R., Ponge D., Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C–Mn steel processed by warm deformation and annealing // Acta Materialia. 2005. No. 53. P. 4881–4792.
3. Ultrafine grain structure development in steel with different initial structure by severe plastic deformation / J. Zrnik [et al.] // Revista Materia. 2010. Vol. 15, no. 2. P. 240–246.
4. Strain Hardening of Bainitic and Martensitic Steel in Compression / K. V. Aksenova [et al.] // Steel in Translation. 2018. Vol. 48, no. 10. P. 631–636.

References

1. Vishnyakova E. V. History of development of structural materials // Scientific journal of NRU ITMO. 2016. No. P. 49–60.
2. Song R., Ponge D., Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C–Mn steel processed by warm deformation and annealing // Acta Materialia. 2005. No. P. 4881–4792.
3. Ultrafine grain structure development in steel with different initial structure by severe plastic deformation / J. Zrnik [et al.] // Revista Materia. 2010. Vol. 15, no. 2. P. 240–246.
4. Strain Hardening of Bainitic and Martensitic Steel in Compression / K. V. Aksenova [et al.] // Steel in Translation. 2018. Vol. 48, no. 10. P. 631–636.

<i>М. В. Главатских, Р. Ю. Барков, М. Г. Хомутов, А. В. Поздняков.</i> Влияние Er и Y на структуру и свойства сплава Al-Zn-Mg-Cu-Zr с повышенным содержанием меди.....	31
<i>А. Г. Орлов, В. В. Котов.</i> Моделирование испытания труб на сплющивание.....	36
<i>М. И. Кафтаранова, С. Г. Аникеев, В. Н. Ходоренко.</i> Прочностные и пластические свойства сплавов TiNiMoFeCu	42
<i>К. Е. Шугаев.</i> Рост зерна при нагреве чистого железа, деформированного кручением под высоким давлением при 77 К.....	47
<i>А. А. Кищик, А. В. Михайловская.</i> Сплав на основе алюминия для высокоскоростной сверхпластической формовки.....	52
<i>А. Г. Мочуговский, А. В. Михайловская.</i> Сверхпластичность сплавов системы Al-Mg-Si-Ce	57
<i>Н. Ю. Юрченко, Е. С. Панина, В. Ю. Новиков, Г. А. Салищев, С. В. Жеребцов, Н. Д. Степанов.</i> Особенности пластической деформации тугоплавких высокоэнтропийных сплавов с упорядоченной B2 -структурой	61
<i>К. В. Аксёнова, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Е. С. Ващук.</i> Деформационное упрочнение сталей различных структурных классов	64
<i>Н. А. Кривенко, А. В. Вобликов, О. В. Селиванова, В. А. Хотинов.</i> Использование эффекта деформационного старения для повышения прочности стали 38Г2ФБ	69
<i>В. Р. Никитина, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова.</i> Исследования структуры и свойств хладостойкого листового проката в толщинах от 25 до 100 мм	73
<i>В. В. Палачева, А. Г. Мочуговский.</i> Влияние термомеханической обработки на структуру и функциональные свойства Fe-Al-P3M сплавов.....	77
<i>Д. Г. Чубов, А. Г. Мочуговский, В. В. Палачева.</i> Исследование структуры и функциональных свойств Fe-21Al-Tb сплавов после термомеханической обработки	80