

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 7, 2017

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 60

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тумский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагадинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАПШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjivz@sibsiiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Попов В.Н., Черепанов А.Н. Оптимизация распределения модифицирующего материала при лазерной обработке поверхности металла	505
Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан Изгибная жесткость стальных прутков	512
Филиппова М.В., Темлянец М.В., Перетятко В.Н. Прудкий Е.Е. Математическое моделирование прокатки шаров	516
Лехов О.С., Михалев А.В. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 2	522
Герике П.Б., Гаряшин В.В., Тагильцев-Галета К.В. Классификация защитных устройств щековых дробильных машин	527

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Прохоренко О.Д., Башенко Л.П., Кибко Н.В. Металлографические исследования качества сварных швов, полученных при сварке под флюсом на основе шлака силикомарганца	531
---	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Федотов Д.Ю., Сидоров С.А., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Яковлев А.В. Влияние процессов релаксации на величину сбросов механического напряжения в ленточных аморфных и нанокристаллических сплавах при электроимпульсном воздействии	538
Аксёнова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Никитина Е.Н., Косинов Д.А. Перераспределение углерода при деформации сталей с бейнитной и мартенситной структурами	544
Теплякова Л.А., Куницкая Т.С., Конева Н.А., Кашин А.Д. Деформационное упрочнение монокристаллов ГЦК сплава на мезоуровне	549

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Якушевич Н.Ф. Термодинамическое обоснование возможности использования высокотемпературных факелов горения для окисления примесей расплава в агрегатах конвертерного типа. Сообщение 1. Термодинамический анализ процессов, протекающих в факеле горения при использовании природного газа	556
---	-----

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов	565
--	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Гурин И.А., Лавров В.В., Спирин Н.А., Никитин А.Г. Веб-технологии построения автоматизированных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии	573
---	-----

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

V.N. Popov, A.N. Cherepanov Optimization of modifying material distribution during laser processing of the metal surface	505
S.A. Zaides, Nguen Van Khuan Influence of parameters of the calibration process on bending stiffness of steel rod	512
M.V. Filippova, M.V. Temlyantsev, V.N. Peretyat'ko, E.E. Prudkii Mathematical modeling of balls rolling	516
O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev Continuous casting and deformation installation for the production of steel plates for welded pipes. Report 2	522
P.B. Gericke, V.V. Garyashin, K.V. Tagil'tsev-Galeta Classification of protection devices of jaw crushers	527

RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, O.D. Prokhorenko, L.P. Bashchenko, N.V. Kibko Metallographic investigations of quality of welding seam obtained by silicomanganese slag flux welding	531
--	-----

MATERIAL SCIENCE

D.Yu. Fedotov, S.A. Sidorov, V.A. Fedorov, T.N. Pluzhnikova, A.V. Yakovlev Influence of relaxation processes on mechanical stress shifts in amorphous and nanocrystalline ribbon alloys at electropulse exposure	538
K.V. Aksenova, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, E.N. Nikitina, D.A. Kosinov Carbon redistribution under deformation of steels with bainite and martensite structures	544
L.A. Teplyakova, T.S. Kunitsyna, N.A. Koneva, A.D. Kashin Strain hardening of monocrystals of alloy FCC at mesolevel	549

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

V.V. Solonenko, E.V. Protodopov, S.V. Feiler, N.F. Yakushevich Thermodynamic justification of opportunity of using high-temperature combustion flanks for oxidation of melt impurities in aggregates of converter type. Report 1. Thermodynamic analysis of processes in combustion flame when using natural gas	556
--	-----

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

A.V. Novichikhin, A.V. Shorokhova Procedures for stage processing of iron-ore wastes in industrial mining areas	565
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

I.A. Gurin, V.V. Lavrov, N.A. Spirin, A.G. Nikitin Web-technologies for construction of automated information-modeling systems of technological processes in metallurgy	573
---	-----

УДК 669.112:539.4

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ С БЕЙНИТНОЙ И МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРАМИ*

Аксёнова К.В.¹, к.т.н., ассистент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. профессора В.М. Финкеля (alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru)

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин
им. профессора В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Иванов Ю.Ф.^{2,3}, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (yuf55@mail.ru)

Никитина Е.Н.¹, инженер-исследователь кафедры естественнонаучных дисциплин
им. профессора В.М. Финкеля (nikitina_en@mail.ru)

Косинов Д.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник управления
научных исследований (УНИ) (kosinov.dima@rambler.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

³ Институт сильноточной электроники СО РАН
(654055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. В последние годы значительно увеличился объем применения высокопрочных сталей и, прежде всего, сталей мартенситного и бейнитного классов для изготовления деталей и конструкций ответственного назначения. Достижение высокопрочного состояния возможно за счет эффективного деформационного упрочнения сталей различных классов при условии его рационального применения. Знание количественных закономерностей и механизмов деформационного упрочнения сталей различных структурных классов при активной пластической деформации необходимо для целенаправленного формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств материала. В работе методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен сравнительный анализ эволюции структуры, фазового состава и состояния дефектной субструктуры стали с мартенситной и бейнитной структурами при активной пластической деформации до разрушения. Показано, что после аустенитизации при температуре 950 °С (1,5 ч) и последующей закалки в масле стали 38ХНЗМФА и нормализации стали 30Х2Н2МФА формируется многофазная структура (α -фаза, γ -фаза, цементит), основу которой составляют мартенсит пакетной морфологии (сталь 38ХНЗМФА) и нижний бейнит (сталь 30Х2Н2МФА). Полученные количественные закономерности изменения параметров структуры стали в процессе пластического деформирования позволили выполнить исследования, направленные на анализ распределения атомов углерода в структуре деформированной стали. Выявлены места локализации атомов углерода в структуре мартенсита (закаленная сталь 38ХНЗМФА) и бейнита (нормализованная сталь 30Х2Н2МФА). Установлено, что деформация сталей сопровождается разрушением частиц цементита. Для закаленной мартенситной стали с увеличением степени деформации суммарное количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе α - и γ -железа, снижается, а на дефектах структуры – увеличивается. Перераспределение атомов углерода в стали с бейнитной структурой с увеличением степени деформации заключается в росте количества атомов углерода, расположенных в α -железе, дефектах кристаллической структуры, цементите на внутрифазных границах и уменьшении количества атомов углерода в частицах цементита, лежащих в объеме пластин бейнита и в γ -железе.

Ключевые слова: сталь, структура, углерод, локализация, деформация, дефекты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-544-548

Перераспределение углерода и легирующих элементов при пластической деформации является одним из важных процессов, определяющих структурно-фазовые состояния сталей. В ряде работ [1 – 7] показано, что углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе α - и γ -железа, на дислокациях, на межфазных и внутрифазных границах, в частицах

карбидной фазы. Количество углерода в твердых растворах на основе α - и γ -железа обычно оценивается по относительному изменению параметра кристаллической решетки [8 – 10]. Количество углерода в карбидных частицах оценивают, исходя из химического состава карбида, типа кристаллической решетки и объемной доли частиц карбидной фазы в стали [11]. Оценка количества углерода, расположенного на дефектах, является наиболее сложным моментом и практически не поддается прямому экспериментальному определению. Обычно используют косвенные методы, а также проводят теоретическую оценку [2, 7].

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-32-60048 мол_а_дк) и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП 1335.2016.1).

Мартенсит и бейнит являются наиболее сложными (в том числе и для количественной интерпретации) структурами, формирующимися в стали при термической обработке. Знание количественных закономерностей формирования и эволюции распределения углерода в мартенсите и бейните позволяет целенаправленно управлять структурно-фазовыми состояниями и дефектной субструктурой стали и, в конечном счете, ее механическими свойствами.

Целью настоящей работы является анализ перераспределения углерода в структурах мартенситной и бейнитной стали при деформации.

В качестве материалов исследования использованы конструкционные стали 38ХНЗМФА и 30Х2Н2МФА [12]. Аустенитизацию сталей проводили при температуре 950 °С в течение 1,5 ч; сталь 38ХНЗМФА закалывали в масле на мартенсит, а сталь 30Х2Н2МФА охлаждали на воздухе для образования бейнитной структуры. Деформацию сталей проводили на испытательной машине «Инстрон-1185» одноосным сжатием столбиков размерами 4×4×6 мм со скоростью примерно $7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг [13, 14].

В результате мартенситного и бейнитного превращений в сталях формируется многофазная структура, основными фазами которой являются α -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки), γ -фаза (остаточный аустенит, твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки) и карбид железа (в низко- и среднеуглеродистых сталях – цементит) [15 – 17].

После термической обработки стали 38ХНЗМФА мартенсит имеет преимущественно пакетную морфологию [17, 18], а в стали 30Х2Н2МФА формируется структура нижнего бейнита (рис. 1) [19, 20].

Ранее выполненные электронно-микроскопические исследования [17 – 20] позволили проследить за поведением структуры и фазового состава сталей. Установлено, что с увеличением степени деформации стали 38ХНЗМФА наблюдается уменьшение продольных раз-

меров фрагментов кристаллов мартенсита, увеличение плотности микродвойников, скалярной и избыточной плотности дислокаций, линейной плотности изгибных экстинкционных контуров и амплитуды дальнедействующих полей напряжений. Выявлено изменение фазового состава закаленной стали в процессе деформации, обусловленное допревращением остаточного аустенита.

При изучении стали 30Х2Н2МФА установлено, что с увеличением степени деформации также наблюдается уменьшение продольных размеров фрагментов пластин бейнита, увеличение плотности микродвойников, скалярной и избыточной плотности дислокаций, линейной плотности изгибных экстинкционных контуров и амплитуды внутренних дальнедействующих полей напряжений. В совокупности указанные процессы приводят к формированию в материале областей с критической субструктурой, способной к формированию микротрещин с последующим разрушением образца.

В работах [19, 20] показано, что углерод в структуре стали может находиться в следующих позициях: в частицах карбидной фазы, в твердом растворе на основе α - и γ -железа, на дефектах структуры (дислокации, субграницы, межфазные и внутрифазные границы). Оценки количества углерода по этим позициям осуществляли по выражениям, приведенным ниже:

Места расположения углерода	Оценочные выражения	Источник
Твердый раствор на основе α -железа	$\Delta C_\alpha = \Delta V_\alpha \frac{a_\alpha - a_\alpha^0}{39 \pm 4} 10^3$	[8]
Твердый раствор на основе γ -железа	$\Delta C_\gamma = \Delta V_\gamma \frac{a_\gamma - a_\gamma^0}{44} 10^3$	[10]
Частицы карбидных фаз	$\Delta C_k = \Delta V_k k;$ $k(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07$	[11]
Дефекты структуры	$\Delta C_d = C_0 - (\Delta C_\alpha + \Delta C_\gamma + \Delta C_k)$	[12]

Примечание. ΔV_α , ΔV_γ и ΔV_k – объемная доля α -, γ -железа и карбидных фаз; a_α и a_γ – текущий параметр решетки α - и γ -фазы; $a_\alpha^0 = 0,28668 \text{ нм}$; $a_\gamma^0 = 0,3555 \text{ нм}$; C_0 – среднее содержание углерода в стали.

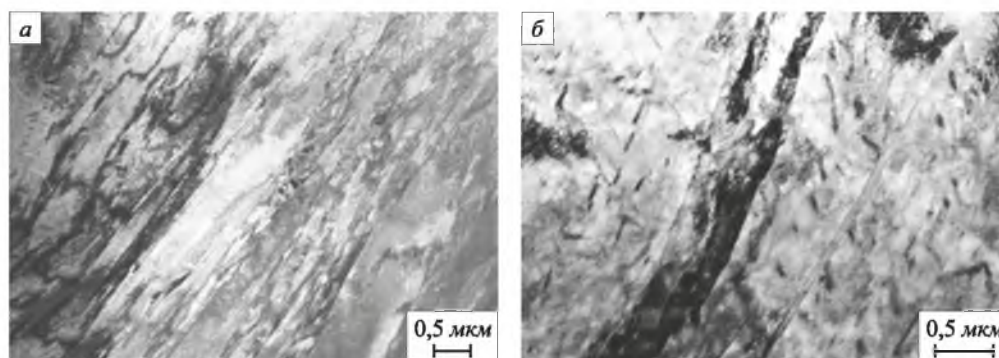


Рис. 1. ПЭМ изображение пакетного мартенсита стали 38ХНЗМФА (а) и нижнего бейнита стали 30Х2Н2МФА (б)

Fig. 1. TEM image of packet martensite of 38CrNi3MoV steel (a) and lower bainite of steel 30Cr2Ni2MoV (b)

Отметим, что оценку количества углерода, сосредоточенного в кристаллической решетке цементита, проводили в предположении стехиометрического состава данной фазы. Результаты выполненных оценок количества углерода, сосредоточенного на различных позициях структуры сталей, приведены на рис. 2.

Деформация закаленной стали 38ХНЗМФА сопровождается растворением (разрушением) частиц цементита [18]. С увеличением степени деформации (ε) суммарное количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе α - и γ -железа, снижается, а количество атомов углерода, расположенных на дефектах структуры, – увеличивается. Особенно интенсивно процесс ухода атомов углерода на дефекты протекает при $\varepsilon \geq 0,2$.

Полученные результаты показали, что с увеличением степени деформации стали с бейнитной структурой количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе α -железа (рис. 2, б, кривая 1), в частицах цементита, лежащих на внутрифазных границах (рис. 2, б, кривая 2), и расположенных на дефектах кристаллической структуры (рис. 2, б, кривая 3), увеличивается. Количество атомов углерода, формирующих частицы цементита, лежащих в объеме пластин бейнита (рис. 2, б, кривая 4), и расположенных в твердом растворе на основе γ -железа (рис. 2, б, кривая 5), снижается. Таким образом, пластическая деформация стали с бейнитной структурой сопровождается существенным перераспределением атомов углерода. Если в исходном состоянии основное количество атомов углерода было сосредоточено в частицах цементита, то на заключительной стадии деформирования основным местом расположения атомов углерода является кристаллическая решетка на основе α -железа.

Выводы. Деформация закаленной стали сопровождается разрушением частиц цементита; высвобождающиеся атомы углерода переходят в твердый раствор на основе α -железа и на дефекты кристаллической структуры стали. В сталях с бейнитной структурой с ростом степени деформации количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе α -железа и дефектах кристаллической структуры, а также в частицах цементита, лежащих на внутрифазных границах, увеличивается; количество атомов углерода, формирующих частицы цементита в объеме пластин бейнита и расположенных в твердом растворе на основе γ -железа, снижается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
2. Speich G., Swann P.R. Yield strength and transformation substructure of quenched iron-nickel alloys // J. Iron and Steel Inst. 1965. Vol. 205. No. 4. P. 480 – 485.
3. Borgenstam A., Hillert M., Agren J. Metallographic evidence of carbon diffusion in the growth of bainite // Acta Materialia. 2009. Vol. 57. No. 11. P. 3242 – 3252.

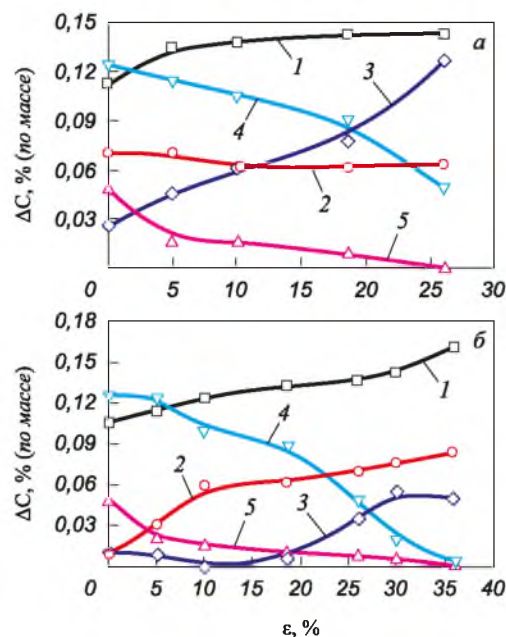


Рис. 2. Зависимости концентрации атомов углерода, расположенных в структуре стали, от степени деформации:

а – закаленная сталь 38ХНЗМФА; б – сталь 30ХН2МФА с бейнитной структурой [цифрами обозначена концентрация атомов углерода в кристаллической решетке α -Fe (1), в частицах Fe_3C на внутрифазных границах (2), на дефектах структуры (3), в частицах Fe_3C , лежащих в объеме пакетов мартенсита и пластин бейнита (4), в кристаллической решетке γ -Fe (5)]

Fig. 2. Dependences of concentrations of carbon atoms located in steel structure on deformation degree:

а – 38CrNi3MoV hardened steel; б – 30Cr2Ni2MoV steel with bainite structure [figures designate concentration of carbon atom in crystal lattice of α -Fe (1), in Fe_3C particles at intraphase boundaries (2), at defects of structure (3), in Fe_3C particles lying in the volume of martensite packets and bainite plates (4), in crystal lattice γ -Fe (5)]

4. Clarke A.J., Speer J.G., Miller M.K. etc. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition process: A critical assessment // Acta Materialia. 2008. Vol. 56. No. 1. P. 16 – 22.
5. Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. No. 7. P. 2639 – 2648.
6. Speich G.R. Tempering of low-carbon martensite // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. Vol. 245. No. 10. P. 2553 – 2564.
7. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite // Met. Trans. 1971. Vol. 2. No. 10. P. 2783 – 2790.
8. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon // Trans. Met. Soc. AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1818 – 1820.
9. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. Vol. 246. No. 8. P. 1834 – 1836.
10. Веселов С.И., Спектор Е.З. Зависимость параметра решетки аустенита от содержания углерода при высоких температурах // ФММ. 1972. Т. 34. № 5. С. 895, 896.
11. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 407 с.
12. Приданцев М.В., Давыдова Л.Н., Тамарина А.М. Конструкционные стали: Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
13. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
14. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., etc. Electron Microscopy of Thin Crystals. – Washington: Butterworth, 1965. – 549 p.

15. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels*. 2nd ed. The Institute of Materials London, 2001. – 460 p.
16. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в легированных сталях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – 236 с.
17. Ivanov Y.F., Kolubaeva Y.A., Kornet E.V., Gromov V.E. Formation of the fine structure and phase composition of structural steel on quenching // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39. No. 4. P. 302 – 306.
18. Корнет Е.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Громов В.Е. Эволюция структурно-фазовых состояний закаленной стали при деформации // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. № 6. С. 66 – 69.
19. Nikitina E.N., Gromov V.E., Alsaraeva K.V. Evolution of the Defect Subsystem of Structural Steel with Bainite Structure on Deformation // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 8. P. 571 – 574.
20. Ivanov Yu.F., Nikitina E.N., Gromov V.E. Carbon distribution in bainitic steel subjected to deformation // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1683. No. 020075.

Поступила 22 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 7, pp. 544–548.

CARBON REDISTRIBUTION UNDER DEFORMATION OF STEELS WITH BAINITE AND MARTENSITE STRUCTURES

K.V. Aksenova¹, V.E. Gromov¹, Yu.F. Ivanov^{2,3}, E.N. Nikitina¹, D.A. Kosinov¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract. In recent years, application of high duration steels, first of all, martensitic and bainitic steels used in manufacturing of parts and structures of crucial function has increased significantly. It is possible to achieve a high duration state by means of effective deformation hardening of steels of various classes at rational use. Understanding of quantitative laws and mechanisms of deformation hardening of steels of different structural classes under active plastic deformation is necessary in terms of targeted formation of structure-phase states and mechanical properties of material. In this work, comparative analysis of structure evolution, phase composition and state of defective substructure of steel with martensitic and bainitic structures under active plastic deformation prior to fracture was performed using transmission electron diffraction microscopy. It was shown that after austenitization at temperature of 950 °C (1.5 hours) and subsequent quenching in oil of 38CrNi3MoV steel and normalization of 30Cr2Ni2MoV steel, a multiphase structure (α phase, γ phase, cementite) is formed, based on martensite of packet morphology (38CrNi3MoV steel) and lower bainite (30Cr2Ni2MoV steel). Obtained quantitative regularities of changes in parameters of steel structure in process of plastic deformation made it possible to carry out studies aimed at analyzing the distribution of carbon atoms in structure of deformed steel. Localization of carbon atoms in martensite structure (38CrNi3MoV hardened steel) and bainite (30Cr2Ni2MoV normalized steel) are revealed. It was established that steels deformation is accompanied by destruction of cementite particles. For hardened martensitic steel, with an increase in degree of deformation, the total number of carbon atoms located in solid solution based on α - and γ -iron decreases, and on structural defects – increases. Redistribution of carbon atoms in steel with bainitic structure with increase in deformation degree consists in growth of number carbon atoms located in α -iron, in defects of the crystal structure, and in intraphase boundaries cementite and its' subsequent decrease in cementite particles within bainite plates and in γ -iron.

Keywords: steel, structure, carbon localization, deformation, defects.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-544-548

REFERENCES

1. Kurdymov G.V., Utevskii L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (In Russ.).
2. Speich G., Swann P.R. Yield strength and transformation substructure of quenched iron-nickel alloys. *J. Iron and Steel Inst.* 1965, vol. 205, no. 4, pp. 480–485.
3. Borgenstam A., Hillert M., Agren J. Metallographic evidence of carbon diffusion in the growth of bainite. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, no. 11, pp. 3242–3252.
4. Clarke A.J., Speer J.G., Miller M.K. etc. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition process: A critical assessment. *Acta Materialia*. 2008, vol. 56, no. 1, pp. 16–22.
5. Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 7, pp. 2639–2648.
6. Speich G.R. Tempering of low-carbon martensite. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969, vol. 245, no. 10, pp. 2553–2564.
7. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite. *Met. Trans.* 1971, vol. 2, no. 10, pp. 2783–2790.
8. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1818–1820.
9. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969, vol. 246, no. 8, pp. 1834–1836.
10. Veselov S.I., Spektor E.Z. Dependence of austenite lattice on carbon content at high temperatures. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 1972, vol. 34, no. 5, pp. 895–896. (In Russ.).
11. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 407 p. (In Russ.).
12. Pridantsev M.V., Davydova L.N., Tamarina A.M. *Konstruktsionnye stali: Spravochnik* [Construction steels: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 288 p. (In Russ.).
13. Utevskii L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in metal science]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p. (In Russ.).
14. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., Pashley D.W., Whelan M.J. *Electron Microscopy of Thin Crystals*. Washington: Butterworth, 1965, 549 p.
15. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels*. 2nd ed. London: The Institute of Materials, 2001, 460 p.
16. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A. *Ostatochnyi austenit v legirovannykh stalyakh* [Residual austenite in alloyed steels]. Ekaterinburg: Uro RAN, 2014, 236 p. (In Russ.).
17. Ivanov Y.F., Kolubaeva Y.A., Kornet E.V., Gromov V.E. Formation of the fine structure and phase composition of structural steel on quenching. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 4, pp. 302–306.
18. Kornet E.V., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Gromov V. E. Evolution of structure-phase states of hardened steel under deformation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 6, pp. 66–69. (In Russ.).
19. Nikitina E.N., Gromov V.E., Alsaraeva K.V. Evolution of the Defect Subsystem of Structural Steel with Bainite Structure on Deformation. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 8, pp. 571–574.
20. Ivanov Yu.F., Nikitina E.N., Gromov V.E. Carbon distribution in bainitic steel subjected to deformation. *AIP Conference Proceedings*. 2015, vol. 1683, no. 020075.

Acknowledgements. The work was financially supported by the RFBR grant (no. 16-32-60048 Mol_a_dk) and within the scholarships of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students who carry out advanced research and development in priority areas of the modernization of the Russian economy (Project SP1335.2016.1).

Information about the authors:

K.V. Aksenova, *Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair of Science named after V.M. Finkel* (alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru)

V.E. Gromov, *Dr Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel* (gromov@physics.sibsiu.ru)

Yu.F. Ivanov, *Dr Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher* (yuf55@mail.ru)

E.N. Nikitina, *Research Engineer of the Chair of Science named after V.M. Finkel* (nikitina_en@mail.ru)

D.A. Kosinov, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches* (kosinov.dima@rambler.ru)

Received November 22, 2016

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 26.07.2017. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,5. Заказ 5807. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

OPTIMIZATION OF MODIFYING MATERIAL DISTRIBUTION DURING LASER PROCESSING OF THE METAL SURFACE

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE CALIBRATION PROCESS ON BENDING STIFFNESS OF STEEL ROD

MATHEMATICAL MODELING OF BALLS ROLLING

CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION INSTALLATION FOR THE PRODUCTION OF STEEL PLATES FOR WELDED PIPES. REPORT 2

CLASSIFICATION OF PROTECTION DEVICES OF JAW CRUSHERS

METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS OF QUALITY OF WELDING SEAM OBTAINED BY SILICOMANGANESE SLAG FLUX WELDING

INFLUENCE OF RELAXATION PROCESSES ON MECHANICAL STRESS SHIFTS IN AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE RIBBON ALLOYS AT ELECTROPULSE EXPOSURE

CARBON REDISTRIBUTION UNDER DEFORMATION OF STEELS WITH BAINITE AND MARTENSITE STRUCTURES

STRAIN HARDENING OF MONOCRYSTALS OF ALLOY FCC AT MESOLEVEL

THERMODYNAMIC JUSTIFICATION OF OPPORTUNITY OF USING HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION FLANKS FOR OXIDATION OF MELT IMPURITIES IN AGGREGATES OF CONVERTER TYPE. REPORT 1. THERMODYNAMIC ANALYSIS OF PROCESSES IN COMBUSTION FLAME WHEN USING NATURAL GAS

PROCEDURES FOR STAGE PROCESSING OF IRON-ORE WASTES IN INDUSTRIAL MINING AREAS

WEB-TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTION OF AUTOMATED INFORMATION-MODELING SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN METALLURGY