

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2017. Т.15, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Сведения о журналах содержатся в международных базах данных Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, а также в ВИНТИ и РИНЦ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

Колокольцев В.М. – ректор
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Члены редсовета:

Горлач И. – д-р наук в области машиностроения;
руководитель отделения мехатроники университета им. Нельсона
Манделы, Южная Африка;

Дабала М. – профессор, Факультет промышленного
инжиниринга Университета г. Падуа, Италия;

Дыя Х. – проф., д-р техн. наук, директор Института
обработки металлов давлением и инженерии безопасности,
Ченстоховский Технологический Университет,
Ченстохова, Польша;

Дюссан Р.О. – профессор, Руководитель факультета
металлургических технологий и наук о материалах,
Технологический институт, Мумбай, Индия;

Кавалла Р. – профессор, директор института обработки металлов
давлением, Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия;

Каплунов Д.Р. – член-кор. РАН, проф. ИПКОН РАН,
д-р техн. наук, Москва, Россия;

Мори К. – профессор Технологического
университета, Тойохаси, Япония;

Найзабеков А.Б. – академик, д-р техн. наук, проф., ректор
Рудненского индустриального института, Рудный, Казахстан;

Пьетшик М. – профессор горно-металлургической
академии, Краков, Польша;

Рашинов В.Ф. – Председатель совета директоров
ОАО «ММК», проф., д-р техн. наук,
Магнитогорск, Россия;

Счастливец В.М. – зав. лабораторией ИФМ
УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук,
Екатеринбург, Россия.

Главный редактор:

Чукин М.В. – первый проректор-проректор
по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Первый зам. главного редактора:

Гун Г.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Зам. главного редактора:

Гавришев С.Е. – проф., д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Корчунов А.Г. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Логунова О.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Храмшин В.Р. – доц., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Ответственные секретари:

Полякова М.А. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Шубина М.В. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Елесина В.И.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связей, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Тел.: (3519) 22-14-93. Факс (3519) 23-57-60

URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 27.03.2017. Заказ 111. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2017. Vol. 15, no. 1

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the Journal can be found in such international databases as Ulrich's Periodicals Directory and Crossref, as well as in the Russian VINITI database and the Russian Science Citation Index. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

Kolokoltsev V.M. – D. Sc., Prof., Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Honorary Board Members:

Gorlach I. – Ph.D., Head of Mechatronics Department, Nelson Mandela Metropolitan University, South Africa.

Dabalà M. – Prof., Department of Industrial Engineering, University of Padova, Italy.

Dyja H. – D.Sc., Prof., Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland.

Dusane R.O. – Prof., Head of Metallurgical Engineering & Materials Science Department, Institute of Technology Bombay, India.

Kaplunov D.R. – D.Sc., Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Moscow, Russia.

Kawalla R. – Prof., Director of the Metal Forming Institute, Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany.

Mori K. – Prof., Toyohashi University of Technology, Japan.

Nayzabekov A.B. – D.Sc., Prof., Member of the Academy of Sciences, Rector of Rudny Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan.

Pietrzyk M. – Prof., Akademia Gorniczo-Hutnicza, Krakow, Poland.

Rashnikov V.F. – D.Sc., Prof., Chairman of the OJSC MMK Board of Directors, Magnitogorsk, Russia.

Schastlivtsev V.M. – D. Sc., Chief of the Laboratory, Institute of Metal Physics, Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Editor-in-Chief:

Chukin M.V. – D.Sc., Prof., First Vice-Rector-Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

First Deputy Editor-in-Chief:

Gun G.S. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Deputy Editor-in-Chief:

Gavrishev S.E. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Korchunov A.G. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Logunova O.S. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Khramshin V.R. – D.Sc., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editors:

Polyakova M.A. – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Shubina M.V. – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Editor:

Kutekina N.V.

Technical Editor:

Gavruseva K.V.

Translated into English: **Elesina V.I.**

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Editorial office:

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Phone: +7 (3519) 221 493. Fax: +7 (3519) 235 760

URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.

Publication date: 27.03.2017. Order 111. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	4
<i>Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Рожков А.А.</i> Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца	4
<i>Чебан А.Ю., Хрунина Н.П.</i> Модернизация транспортно-перегрузочного оборудования при ведении открытых горных работ	10
<i>Филиппова Е.В.</i> Применение ионообменной электросорбции для извлечения коллоидного золота	15
Металлургия черных, цветных и редких металлов	20
<i>Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А.</i> Исследование влияния добавок серпентинитомagnesитов халиловского месторождения на показатели агломерационного процесса в АО «Уральская сталь»	20
<i>Мирзаев Д.А., Мирзоев А.А., Булдашев И.В., Окишев К.Ю.</i> Метастабильное равновесие тетрагонального бейнитного феррита и аустенита сталей с бескарбидным бейнитом	27
<i>Сибатауллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Селиванов В.Н., Чернов В.П.</i> Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена	37
Обработка металлов давлением.....	45
<i>Румянцев М.И.</i> Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопркатных технологических систем	45
<i>Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Швеева Т.В., Стебляко В.Л., Федосеев С.А.</i> Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков	56
Технологии обработки материалов	64
<i>Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С.</i> Исследование качества поверхности при локальной электрохимической обработке в электролитах, содержащих нитрат аммония	64
Материаловедение и термическая обработка металлов.....	70
<i>Шахназаров К.Ю.</i> Аномалии физико-механических свойств железа как следствие превращений в нем при ~650, ~450 и ~200°C	70
<i>Ефимов А.В., Чернов В.П.</i> Термовременная обработка отливок из стали марки 150XNM.....	79
Сведения об авторах.....	86

CONTENTS

Mining.....	4
<i>Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A.</i> Physical modelling of blasting in high-grade quartz mining	4
<i>Cheban A.Yu., Khrunina N.P.</i> Modernization of transportation and handling equipment in opencast mining	10
<i>Filippova E.V.</i> The use of ion exchange electrosorption for extraction of colloidal gold	15
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals.....	20
<i>Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N., Shevchenko E.A.</i> Studying the effect of the addition of serpentinite-magnesite from the khalilovo field on the performance of Ural steel's sintering plant	20
<i>Mirzayev D.A., Mirzoev A.A., Buldashev I.V., Okishev K.Yu.</i> Metastable equilibrium of tetragonal bainitic ferrite and austenite in carbide-free bainitic steels.....	27
<i>Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Selivanov V.N., Beginyuk V.A., Chernov V.P.</i> Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchnage stage	37
Metal Forming.....	45
<i>Rumyantsev M.I.</i> Some results of the development and application of the methodology for enhancing steel sheet production systems	45
<i>Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Shveeva T.V., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A.</i> Simulation of nonmonotonic metal flow during asymmetric sheet rolling with different velocities of the rolls	56
Materials Processing Technology	64
<i>Shestakov I.Ya., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S.</i> Looking at the surface quality during local ammonium nitrate electrolytic machining	64
Materials Science and Heat Treatment of Metals.....	70
<i>Shakhnazarov K.Yu.</i> Abnomal phisical and mechanical properties of iron resultant from transformations at ~650, ~450 and ~200°C.....	70
<i>Efimov A.V., Chernov V.P.</i> Transient heat treatment of 150KhNM steel castings	79
Information about authors.....	86

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.235

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ ВЫСОКОЦЕННОГО КВАРЦА

Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Рожков А.А.

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): существующая технология взрывной отбойки гранулированного кварца при подземной разработке Кыштымского месторождения характеризуется значительным выходом фракции –20 мм (до 20%), которая в дальнейшем не используется и теряется. Учитывая ограниченность запасов и уникальность месторождения – совершенствование технологии, изыскание и обоснование параметров буровзрывных работ (БВР) представляется актуальной научно-технической задачей. **Цель** данного этапа исследований – выявление характера разрушения массива при взрывании группы удлиненных взаимодействующих зарядов в зависимости от коэффициента их сближения. **Используемые методы:** физическое моделирование с соблюдением динамического, кинематического и геометрического подобия. **Результат:** получена качественная картина разрушения модели группами удлиненных взаимодействующих зарядов при различных параметрах их расположения. Установлено, что при одновременном взрывании всех зарядов они действуют как плоская система зарядов (ПСЗ), а в ближней зоне взрыва практически не происходит переизмельчения. **Практическая значимость:** полученные результаты учтены при проектировании технологии ведения буровзрывных работ на опытно-промышленном участке Кыштымского подземного рудника.

Ключевые слова: месторождение кварца, буровзрывные работы, гранулированные ВВ, переизмельчение, физическое моделирование, плоская система зарядов.

Исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0026).

Актуальность и цель исследований

Существующая технология взрывной отбойки гранулированного кварца при подземной разработке Кыштымского месторождения характеризуется значительным выходом фракции –20 мм (20%), которая в дальнейшем не используется и фактически теряется [1–3]. Учитывая ограниченность запасов и уникальность месторождения – совершенствование технологии, изыскание и обоснование параметров буровзрывных работ представляется актуальной научно-технической задачей [4–8]. Цель данного этапа исследований – выявление характера разрушения массива при различных способах взрывания группы удлиненных взаимодействующих зарядов в зависимости от коэффициента их сближения путем физического моделирования [9–11]. В частности, наиболее интересен характер разрушения в ближней

зоне взрыва. Обусловлено это предположением о негативном влиянии взрывания одиночных зарядов на выход мелких фракций при отбойке кварца [12–16]. Ставилась задача получить качественную картину разрушения без количественных зависимостей.

Методика моделирования

Опытные взрывы проводились в подземной выработке Кыштымского рудника на специальной выровненной площадке. Всего было взорвано 46 песчано-цементных образцов с размерами 400×300×200 мм при различных вариантах расположения минишпуров. Для полноты и максимальной информативности результатов коэффициент сближения зарядов принимался в широком диапазоне – 0,7–4. Минишпуры заряжались одинаковыми отрезками детонирующего шнура (ДШ). Блоки, для предотвращения разброса материала, со всех сторон и сверху засыпались песком и накрывались досками (рис 1).



Рис. 1. Подготовленные к взрыву блоки

В опытах с короткозамедленным взрыванием эффект замедления достигался за счет увеличения длины одного из отрезков ДШ на несколько метров относительно остальных зарядов блока. Ширина и высота отбиваемого слоя были значительно больше его толщины, что характерно для отбойки руды веерами скважин в подземных рудниках. Принципиальная схема расположения минишпуров в блоках приведена на **рис. 2**.

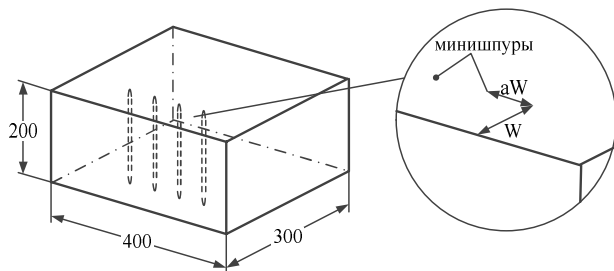


Рис. 2. Принципиальная схема расположения минишпуров: W – ЛНС (линия наименьшего сопротивления); а – коэффициент сближения

Для соблюдения физического подобия в качестве материалов для изготовления моделей разрушаемого массива использовались схожие с натурой по физическим свойствам [17], а именно по коэффициенту Пуассона ($\nu=0,20-0,25$) и плотности ($\rho=2-2,5$ т/м³). Геометрическое подобие конструктивных параметров минишпуров и их расположения в разрушаемом массиве соблюдалось в масштабе 1:10.

С учетом критического диаметра ВВ, используемого для разрушения моделей (4–5 мм), принят ТЭН, который при плотности $\rho_{\text{ВВ}}=0,95 \times 10^3$ кг/м³ и скорости детонации $D=6000$ м/с имеет теплоту взрыва 5,86 МДж. Промышленным ВВ принят граммонит 21ТМЗ, имеющий среднее значение теплоты взрыва 4,29 МДж при плотности $1,15 \times 10^3$ кг/м³.

Для соблюдения динамического и кинематического критерия подобия радиус модельного заряда, эквивалентный по энергии взрыва заряду Граммонита 21ТМЗ, определяется по формуле [18]

$$(R_{\text{ОЗ}}^*)_{\text{М}} = (R_{\text{ОЗ}})_{\text{М}} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{М}} \cdot Q_{\text{М}}}{(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{Н}} \cdot Q_{\text{Н}}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95 \cdot 5,86}{1,15 \cdot 4,29}} \approx 2,$$

где $(R_{\text{ОЗ}})_{\text{М}}$ – фактический радиус модельного заряда, мм; $Q_{\text{М}}$ и $Q_{\text{Н}}$ – теплота взрывчатого превращения соответственно модельного и натурального ВВ, МДж; $(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{М}}$ и $(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{Н}}$ – плотности модельного и промышленного ВВ, г/см³.

Таким образом, при проведении экспериментов в качестве заряда ТЭНа принят ДШ (ДШЭ-12, диаметр $5 \pm 0,5$ мм с оболочкой).

Использование детонирующего шнура ДШЭ-12 (ДШ) обеспечило удобство обращения, надежность инициирования и постоянство заряда по его длине.

Результаты моделирования

При одновременном взрывании взаимодействующих зарядов во всех вариантах расположения скважин была получена одинаковая картина разрушения – пробой массива по плоскости расположения скважин, образование общей полости взрыва и общей воронки отрыва на ЛНС (**рис. 3**) [19].

Во всех опытах на плоскости отрыва четко видны следы минишпуров, диаметр которых несколько увеличен, но зон мелкого дробления не наблюдается.

При короткозамедленном взрывании центрального заряда по отношению к двум крайним (330–500 мкс) в целом получена аналогичная картина разрушения блоков, т.е. происходит раскол массива по плоскости расположения минишпуров. Около зарядов наблюдается небольшая зона мелкого дробления и радиальных трещин вне зависимости от коэффициента сближения, а также, в отдельных случаях, собственная воронка взрыва центрального заряда (**рис. 4**). Это позволяет сделать вывод, что пробой массива по плоскости зарядов происходит не только при мгновенном одновременном взрывании зарядов, но и при взрывании их с некоторым замедлением.

Для дополнения картины разрушения песчано-цементных блоков взрывом одиночного удлиненного заряда на свободную поверхность выполнена следующая серия опытов с переменной ЛНС (50, 70, 90, 110 мм). Результаты показали закономерное ухудшение дробления в объеме воронки взрыва с увеличением ЛНС. Угол раскрытия воронки при увеличении ЛНС уменьшался от 150 до 90° (**рис. 5**).

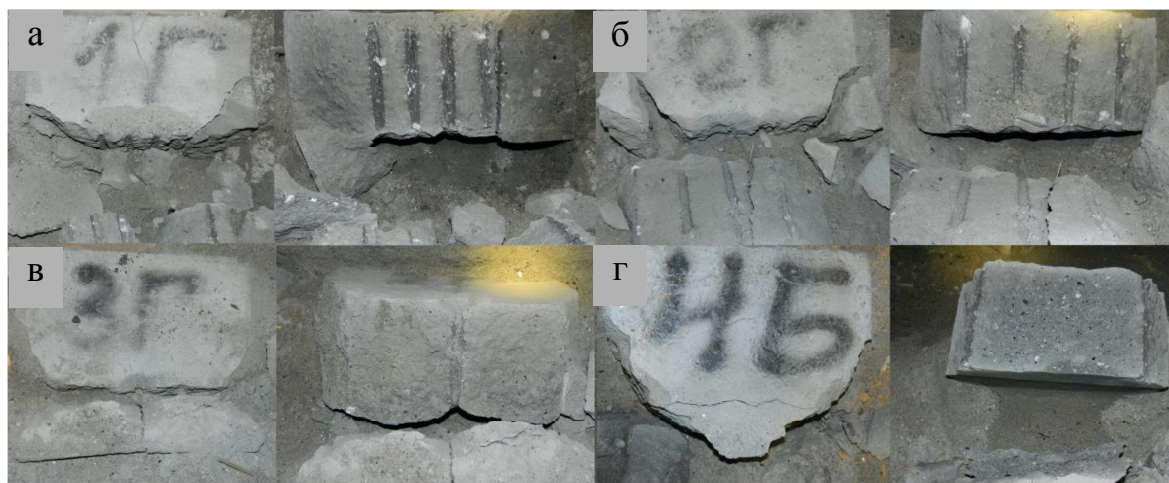


Рис. 3. Картина разрушения при взрыве: а – 4-х зарядов с коэффициентом сближения 0,7; б – 4-х зарядов с коэффициентом сближения 1; в – 3-х зарядов с коэффициентом сближения 2; г – 2-х зарядов с коэффициентом сближения 4



Рис. 4. Картина разрушения при взрыве 3-х зарядов с замедлением на центральный заряд: а – с коэффициентом сближения 1; б – с коэффициентом сближения 2

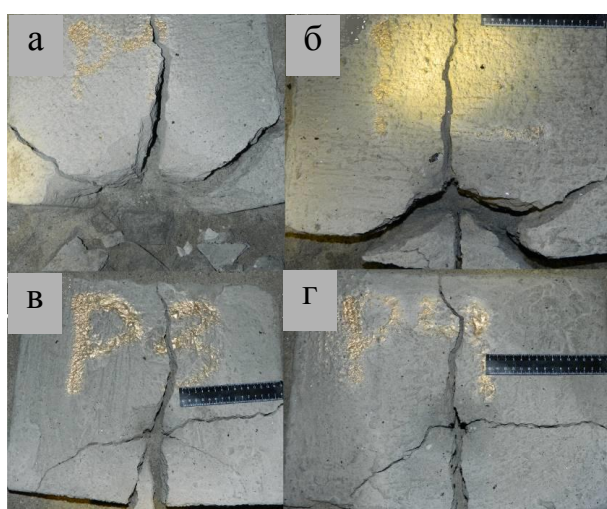


Рис. 5. Картина разрушения при взрыве одного заряда на свободную поверхность при ЛНС: а – 50 мм; б – 70 мм; в – 90 мм; г – 110 мм

При максимальной ЛНС 110 мм разрушение блока на свободную поверхность ограничилось двумя трещинами: одной радиальной, второй параллельной свободной поверхности.

По результатам данной серии можно говорить, что предельная величина ЛНС составляет примерно 100 мм, или 20–22 диаметров заряда.

Для оценки воздействия взрыва взаимодействующих зарядов непосредственно на кварц и проверки влияния на результаты экспериментов свойств отличного от остальных разрушаемого материала был проведен опытный взрыв в блоке из гранулированного кварца. Подготовлены и одновременно взорваны три заряда с коэффициентом сближения 1,0 (рис. 6).



Рис. 6. Взрывание кварца: а – негабаритный кусок гранулированного кварца с подготовленными мини-шпурами; б – картина разрушения при взрыве 3-х зарядов с коэффициентом сближения 1,0; в – полости минишпуров после взрыва

Картина **рис. 6, б** полностью идентична характеру разрушения песчано-цементных блоков. Показательным является и тот факт, что по плоскости своего расположения четко просматриваются полости минишпуров, вокруг которых полностью отсутствуют зоны мелкого дробления (**рис. 6, в**). Можно сделать вывод, что для эффективной отбойки кварца необходимо лишь отделить слой от массива, а его дальнейшее разрушение будет происходить при отбросе и падении слоя на естественные отдельности.

Особенность гранулированного кварца состоит в том, что при определенных уровнях ударной или взрывной нагрузки он может лавинообразно превращаться в совокупность мелких гранул размером 1–5 мм, минуя состояние разрушенности, когда преобладают фракции размером 10–40 см [4, 20]. Наш опыт показал, что при взрыве взаимодействующих зарядов вышеописанный эффект не наблюдается.

Полученные результаты хорошо коррелируются с результатами, полученными в работах [21, 22], где схожие эксперименты проводились на моделях из мрамора и органического стекла. Количество материалов, использованных для изготовления моделей и их различия в физических свойствах, дает основание считать полученную картину разрушения характерной для любого твердого массива. Обобщение всего вышесказанного позволяет сделать вывод, что систему удлиненных зарядов, расположенных в одной плоскости, взрываемых одновременно и взаимодействующих между собой, следует считать плоской системой зарядов, т.е. аналогичной по картине разрушения сплошному заряду плоской формы [23].

Заключение

Эксперименты показали, что при одновременном взрыве удлиненных зарядов, располо-

женных в одной плоскости, происходит опережающий раскол массива по этой плоскости в диапазоне изменения коэффициента сближения зарядов от 0,7 до 4. При расположении зарядов в виде веера скважин коэффициент сближения увеличивается от устьев скважин к их концам и практически не превышает 4. Следовательно, при одновременном взрывании зарядов веер скважин представляет собой плоскую систему зарядов.

Основываясь на результатах физического моделирования, при взрывной отбойке гранулированного кварца рекомендуется применять верные удлиненные заряды [24], взрываемые одновременно. Необходимо обеспечить надежный отрыв отбиваемого слоя и при этом не допустить лавинообразного превращения кварца в совокупность мелких фракций, что достигается оптимизацией удельного расхода ВВ. Поскольку кварцевый массив является сильнотрещиноватым, отбиваемый слой будет разрушаться по естественным трещинам [25] при падении на днище камеры [26].

В дальнейших исследованиях одной из главных задач является определение параметров сетки скважин, их диаметра и конструкции заряда для достижения оптимального удельного расхода ВВ, при котором обеспечится снижение выхода фракции –20 мм до 12–14% и выход негабарита не более 10%.

При одновременном взрыве всех зарядов в веере сейсмическое действие взрыва на целики и близлежащие выработки может превысить допустимый предел. В этом случае возможно использование внутривеерного замедления, при котором в каждой ступени замедления одновременно будет срабатывать не менее 3–4 зарядов. Каждая ступень в отдельности будет действовать как плоский заряд, обеспечивая требуемое качество дробления кварцевого сырья.

Список литературы

1. О формировании научно-технологического задела для внедрения комплексной геотехнологии добычи и переработки высокоценного кварца / И.В. Соколов, С.В. Корнилов, А.Д. Сашурин и др. // Горный журнал. 2014. №12. С. 44–48.
2. Оценка возможности рентгенорадиометрического обогащения кварцевого сырья Кыштымского месторождения / Шемякин В.С., Скопов С.В., Кузьмин В.Г., Соколов И.В. // Горный журнал. 2015. №11. С. 66–69.
3. Ресурсосберегающая технология подземной разработки месторождения высокоценного кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // ФТПРПИ. 2015. №6. С. 133–145.
4. Минералургия жильного кварца / под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
5. Furtney S. J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting. Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 10 / Edited by Pradeep K. Singh, Amalendu Sinha. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2013. P. 275–282.
6. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria // Geomaterials. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 28–37.
7. Burkle W. S. Optimum drilling and blasting procedures // Pit & Quarry. 1985. Vol. 77. P. 30–34.
8. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. №3. С. 4–11.
9. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. М.: Недра, 1990. 231 с.
10. Калмыков В.Н., Мещеряков Э.Ю., Волков П.В. Обоснование параметров геотехнологического модуля «очистные работы» при освоении запасов в приконтурных зонах карьеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 5–8.
11. Калмыков В.Н., Пергамент В.Х., Неугомонов С.С. Расчет параметров отбойки трещиноватых руд скважинными зарядами при системах разработки с твердеющей закладкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 1. С. 22–24.
12. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И. М.: Наука, 1975. 704 с.
13. Руппенейт К.В. Деформируемость трещиноватых массивов горных пород. М.: Недра, 1975. 223 с.
14. Тюпин В.Н., Лизункин М.В., Лизункин В.М. Определение размера зоны разрушения напряженного трещиноватого горного массива при одновременном взрывании нескольких параллельно сближенных зарядов ВВ // ГИАБ. 2015. №12. С. 46–51.
15. Белин В.А., Крюков Г.М. Итоги развития теории разрушения горных пород взрывом // Взрывное дело. 2011. №105/62. С. 3–17.
16. Воронов Е.Т., Бондарь И.А. Кристаллосберегающие технологии подземной разработки месторождений горного хрусталя // Горный журнал. 2011. №11. С. 23–25.
17. Любимов Н.И., Носенко Л.И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М.: Недра, 1978. 288 с.
18. Шалаев М.С., Парамонов Г.П. К вопросу повышения эффективности экранирующей щели за счет выбора рациональной конструкции контурного заряда // Взрывное дело. 2010. №103/60. С. 190–199.
19. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца // ГИАБ. 2016. № 7. С. 337–350.
20. Кутузов Б.Н., Безматерных В.А., Берсенева Г.П. Анализ дробящего действия зарядов ВВ с пористым промежутком // Изв. вузов. Горный журнал. 1988. №1. С. 53–58.
21. Горинов С.А. Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях // Изв. вузов. Горный журнал. 1985. №7. С. 68–73.
22. Смирнов А.А. Исследование и выбор рациональных параметров скважинной отбойки крепких руд: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1973. 172 с.
23. Горинов С.А., Смирнов А.А. Действие взрыва плоской системы зарядов ВВ при отбойке горного массива // ГИАБ. 2001. № 4. С. 42–50.
24. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Взрывные работы в горном деле и промышленности. М.: Горная книга; МГТУ, 2008. 512 с.
25. Барон Л.И., Личели Г.П. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке. М.: Недра, 1966. 136 с.
26. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10–17.

Материал поступил в редакцию 23.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

PHYSICAL MODELLING OF BLASTING IN HIGH-GRADE QUARTZ MINING

Igor V. Sokolov – D.Sc. (Eng.)

Head of Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. Phone: +7(343)350-71-28. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

Alexey A. Smirnov – Ph.D. (Eng.)

Senior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

Yuri G. Antipin – Ph.D. (Eng.)

Senior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Artem A. Rozhkov – Postgraduate Student

Junior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3007-1099>

Abstract

Problem Statement (Relevance): The blasting technology applied for granular quartz at the Kyshtym under-

ground mine produces a significant yield of -20 mm rock (up to 20%), which cannot be processed thus constituting waste. Optimization of the blasting technology and study

of the blasting parameters appear to present an important task considering the limited resources and the uniqueness of the deposit. **Objectives:** The objective of the current stage of the research is to identify the fragmentation pattern resulting from blasting a group of interacting column charges as related to the burden-to-spacing ratio. **Methods Applied:** Physical modeling was applied while securing dynamic, kinematic and geometric similarity. **Findings:** Quality results were obtained that show how the model is fractured when blasted with interacting column charges at different arrangements. It was found that when detonated at the same time interacting column charges act as flat charge and that there occurs almost no overgrinding in the nearest blast zone. **Practical Relevance:** The above modelling results are taken into account when designing the drilling and blasting technology for the test field of the Kyshtym underground mine.

Keywords: Quartz deposit, blasting and drilling, granulated explosives, overgrinding, physical modeling, flat charge.

This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project ID: RFMEF160714X0026).

References

1. Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Sashurin A.D. et al. On the provision of scientific basis for the introduction of a comprehensive mining and processing technology for high-grade quartz. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2014, no. 12, pp. 44–48. (In Russ.)
2. Shemyakin V.S., Skopov S.V., Kuzmin V.G., Sokolov I.V. Assessing the feasibility of using an X-ray recovery circuit for quartz from the Kyshtym mine. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2015, no. 11, pp. 66–69. (In Russ.)
3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranowski K.V., Rozhkov A.A. A resource saving high-grade quartz underground mining technology. *FTPRPI*. 2015, no. 6, pp. 133–145. (In Russ.)
4. *Mineralurgy of vein quartz*. Ed. by V.G. Kuzmin, B.N. Kravec. Moscow: Nedra, 1990. 294 p. (In Russ.)
5. Furtney S. J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting. *Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 10*. Edited by Pradeep K. Singh, Amalendu Sinha. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2013, pp. 275–282.
6. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria. *Geomaterials*. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 28–37.
7. Burkle W. S. Optimum drilling and blasting procedures. *Pit & Quarry*. 1985, vol. 77, pp. 30–34.
8. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Sokolov R.I. The impact of recovery on the efficiency of underground ore mining technology. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 2012, no. 3, pp. 4–11. (In Russ.)
9. Borovikov V.A., Vanyagin I.F. Simulation of explosion in rock fragmentation by blasting. Moscow: Nedra, 1990. 231 p. (In Russ.)
10. Kalmykov V.N., Meshcheryakov E.Yu., Volkov P.V. Justification of stoping parameters in near-field mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4, pp. 5–8. (In Russ.)
11. Kalmykov V.N., Pergament V.Kh., Neugomonov S.S. Calculating the breakage parameters of fractured ores broken by deep-hole charges in consolidated stowing systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.)
12. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P., Chelishev V.P., Schechter B.I. *The physics of explosions*. Moscow: Nauka, 1975, 704 p. (In Russ.)
13. Ruppeneyt K.V. The deformability of fractured rock massifs. Moscow: Nedra, 1975, pp. 121–191. (In Russ.)
14. Tyupin V.N., Lizunkin M.V., Lizunkin V.M. Determining the size of the fragmentation zone in stress-affected fractured rock when detonating several parallel charges. *GIAB*, 2015, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.)
15. Belin V.A., Kryukov G.M. A summary of the advanced theory of rock fragmentation by blasting. *Vzryvnoe delo* [Blasting]. 2011, no. 105/62, pp. 3–17. (In Russ.)
16. Voronov E.T., Bondar I.A. Crystal-saving technology in quartz underground mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2011, no. 11, pp. 23–25. (In Russ.)
17. Lyubimov N.I., Nosenko L.I. *Handbook on physical and mechanical parameters of rock found in ore districts*. Moscow, Nedra, 1988. (In Russ.)
18. Shalaev M.S., Paramonov G.P. On enhancing the efficiency of screenout fracturing by optimizing the contour-hole charge design. *Vzryvnoe delo* [Blasting]. 2010, no. 103/60, pp. 190–199. (In Russ.)
19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. Justification of optimum drilling and blasting parameters in quartz mining. *GIAB*, 2016, no. 7, pp. 337–350. (In Russ.)
20. Kutuzov B.N., Bezmaternykh V.A., Bersenev G.P. Studying the crushing action of porous explosives. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 1988, no. 1, pp. 53–58. (In Russ.)
21. Gorinov S.A. The effectiveness of flat charges in breaking heavily fissured ores in underground conditions. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 1985, no. 7, pp. 68–73. (In Russ.)
22. Smirnov A.A. Study and selection of optimum longhole stoping parameters for hard ores: Ph.D. dissertation. Sverdlovsk: IM MCM USSR, 1973, 172 p. (In Russ.)
23. Gorinov S.A., Smirnov A.A. The explosive action of flat charge in rock blasting. *GIAB*, 2001, no. 4, pp. 42–50. (In Russ.)
24. Kutuzov B.N. *Blasting methods. Blasting operations in mining and industry*. Moscow: Mining Book; Moscow State Mining University, 2008, 512 p.
25. Baron L.I., Lichely G.P. *Rock fracture during blasting*. Moscow: Nedra, 1966, 136 p. (In Russ.)
26. Sokolov I.V., Baranovsky K.V. Choosing an efficient technique for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 10–17. (In Russ.)

Received 23/03/16

Образец для цитирования

Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца / Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Рожков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

For citation

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. Physical modelling of blasting in high-grade quartz mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Чебан А.Ю., Хрунина Н.П.

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация

В России, как и во многих других странах, при добыче твердых полезных ископаемых наибольшее распространение получил открытый способ разработки месторождений. Известно, что с увеличением глубины карьеров расходы на транспортировку вынудой горной массы непрерывно возрастают, поэтому вопросы оптимизации карьерного транспорта при ведении открытых горных работ и перемещении сырья к месту его переработки имеют первостепенное значение для обеспечения эффективной работы добывающих предприятий. В настоящее время ряд горнодобывающих предприятий по технико-экономическим и социально-экологическим причинам переходят на отработку месторождений по безвзрывной технологии с использованием компактных роторных экскаваторов, карьерных комбайнов и землеройно-фрезерных машин. При разработке массива горных пород данными машинами практически отсутствуют крупные куски горной массы, в результате чего крупное дробление может быть исключено из производственного процесса. Предлагается конструкция мобильного перегрузочного комплекса, обеспечивающего перевалку горной массы из автосамосвалов на ленточный конвейер, отделение из горной массы отдельных крупнокусовых включений с отвалообразованием этих включений без остановки перегрузочного комплекса. Мобильный перегрузочный комплекс снабжен ходовым оборудованием, приводом, рамой, приемными бункерами, расположенными с двух сторон от рамы, просеивающей поверхностью с вибратором и питателем. Перемещение элементов рабочего оборудования осуществляется с помощью гидроцилиндров подъема приемных бункеров и гидроцилиндров поворота просеивающей поверхности. Отмечается, что предлагаемый комплекс позволит снизить капитальные и эксплуатационные издержки на транспортно-перегрузочное оборудование карьера, уменьшит простои оборудования, снизит затраты на перемещение горной массы из карьера и повысит рентабельность горного производства.

Ключевые слова: карьерные комбайны, горная масса, автосамосвалы, приемные бункеры, просеивающая поверхность, конвейер.

Введение

Российская Федерация обладает крупнейшими разведанными запасами различных полезных ископаемых, при этом вклад минерально-сырьевого комплекса в доходную часть Федерального бюджета составляет около 50%, а выручка от продажи минеральных ресурсов достигает 65–70% всех валютных поступлений в страну [1–2]. В настоящее время минерально-сырьевой комплекс исключительно важен для поддержания устойчивого состояния экономики России, а в будущем может создать условия для успешного технологического развития базовых отраслей перерабатывающей промышленности.

В России и других крупнейших горнодобывающих странах при освоении месторождений твердых полезных ископаемых распространен открытый способ разработки. В связи с появлением новых и усовершенствованных горных

машин, транспортного, бурового и погрузочного оборудования, оптимизацией транспортных систем глубина ведения открытых работ существенно возрастает [3]. С увеличением глубины карьеров расходы на транспортировку горной массы непрерывно увеличиваются и в отдельных случаях могут достигать 65–75% всех затрат на добычу полезного ископаемого [4]. В связи с этим вопросы оптимизации карьерного транспорта при ведении открытых горных работ и перемещении сырья к месту его переработки имеют первостепенное значение для обеспечения эффективной работы добывающих предприятий. Наряду с совершенствованием применения автомобильного, железнодорожного, конвейерного карьерного транспорта и их комбинированного использования, ведутся исследования по целесообразности применения скиповых и крутонаклонных конвейерных подъемников, размещаемых как на открытой поверхности, так и в наклонных стволах, а также контейнерной технологии подъема горной массы [5–7].

Постановка проблемы

На глубоких карьерах в основном используется автомобильный или комбинированный автомобильно-конвейерный транспорт. Наиболее перспективным и активно совершенствуемым является конвейерный транспорт. Создание различных конструкций крутонаклонных конвейеров значительно упрощает возможности использования конвейерного транспорта при подъеме горной массы со дна карьера на дневную поверхность [8]. Конвейерный транспорт обеспечивает высокую производительность, непрерывность и ритмичность перемещения грузов, небольшие эксплуатационные затраты, упрощение общей организации работ, малое количество обслуживающего персонала, улучшение условий и повышение безопасности труда, уменьшение объемов горнокапитальных работ и сокращение общей протяженности транспортных коммуникаций (особенно при использовании крутонаклонных конвейеров). Недостатками конвейерного транспорта являются строгое ограничение по величине куска перемещаемой горной массы и значительные капитальные затраты на строительство конвейера.

Для обеспечения необходимого фракционного состава транспортируемой конвейерами горной массы в карьерах размещаются дробильно-перегрузочные пункты (ДПП), обеспечивающие прием взорванной горной массы, погруженной одноковшовыми экскаваторами в автосамосвалы и перемещенной к ДПП, крупное дробление горной массы и погрузку ее на ленту конвейера [9–10]. Дробильно-перегрузочный пункт представляет собою крупногабаритную конструкцию высотой до 30 и более метров, при этом разница отметок между уровнями разгрузки автосамосвалов и лентой конвейера может достигать более 20 м [8]. Такая конструкция требует создания мощных подпорных стенок для удержания нагрузок от автосамосвалов. Это удорожает и осложняет строительство перегрузочного пункта, тем более, что в большинстве случаев указанные перегрузочные пункты должны периодически переноситься по мере углубления горных работ.

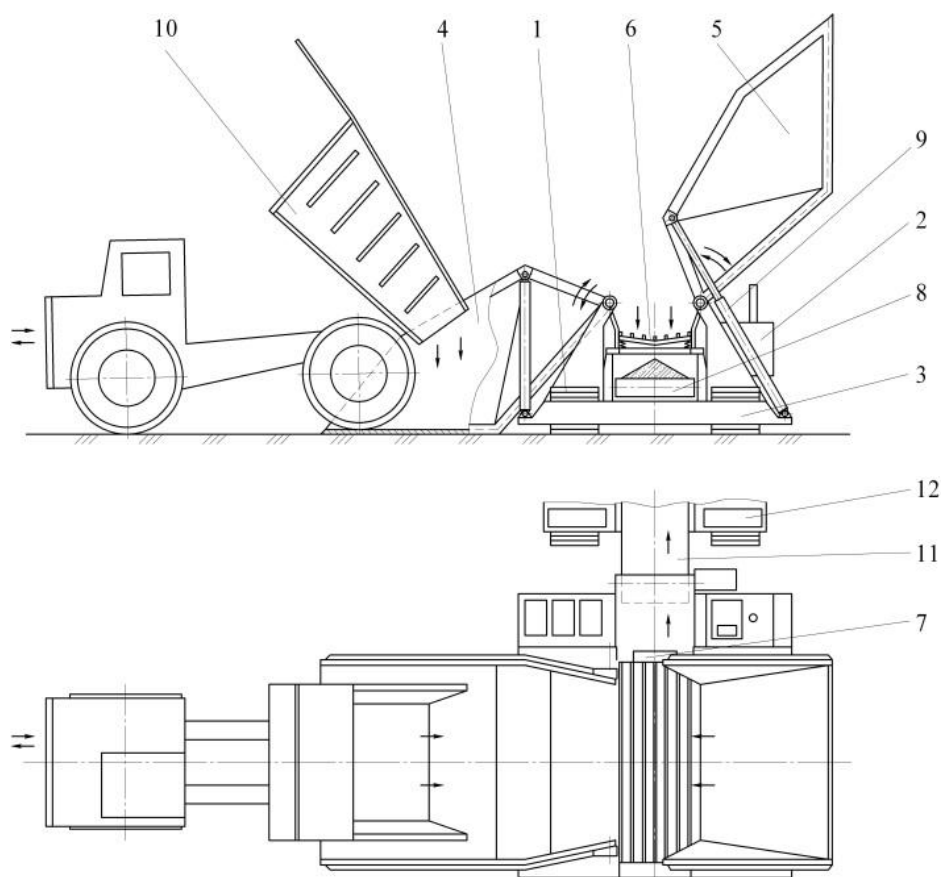
В настоящее время ряд горнодобывающих предприятий по технико-экономическим и социально-экологическим причинам переходят на разработку месторождений по безвзрывной технологии с использованием компактных роторных экскаваторов, карьерных комбайнов и землеройно-фрезерных машин [11–16]. При разработке мас-

сива горных пород данными машинами практически отсутствуют крупные куски горной массы, в результате чего крупное дробление может быть исключено из производственного процесса.

Одним из известных устройств, выполняющих функцию перегрузки, является конструкция, включающая приемные емкости, питатель, колосники и гидроцилиндры управления [17]. Разгрузка автосамосвалов обеспечивается на уровне стояния погрузочного устройства, что исключает перепробег автосамосвалов. Приемные емкости устройства в виде ковшей поочередно принимают груз от автосамосвалов и затем при подъеме гидроцилиндрами разгружают горную массу через колосники на питатель. На колосниках остаются имеющиеся в горной массе отдельные крупнокаменистые включения, которые сбрасываются с колосников назад в приемную емкость при ее опускании вниз специальной перемычкой. Недостатком данной конструкции является то, что крупные куски горной массы вновь возвращаются в приемную емкость, где постепенно скапливаются и требуют удаления или разрушения. Это приводит к периодическим остановкам погрузочного устройства, привлечению дополнительной техники и персонала, а главное – остановке непрерывного процесса подачи горной массы на конвейер, что снижает эффективность всего транспортного комплекса.

Результаты исследований и их обсуждение

Для решения проблемы снижения капитальных и эксплуатационных издержек на транспортно-перегрузочное оборудование карьера, уменьшения простоев, снижения затрат на перемещение горной массы из карьера разработана конструкция мобильного перегрузочного комплекса, обеспечивающего перевалку горной массы из автосамосвалов на ленточный конвейер, отделение из горной массы отдельных крупнокусковых включений с отвалообразованием этих включений без остановки перегрузочного комплекса. Мобильный перегрузочный комплекс снабжен ходовым оборудованием 1, приводом 2, рамой 3, приемными бункерами 4 и 5, расположенными с двух сторон от рамы 3 и шарнирно соединенными с ней, просеивающей поверхностью 6 с вибратором 7, питателем 8. Управление рабочим оборудованием осуществляется с помощью гидроцилиндров подъема 9 приемных бункеров 4, 5 и гидроцилиндров поворота просеивающей поверхности 6 (см. **рисунок**).



Мобильный перегрузочный комплекс для работы в комплекте с автосамосвалами и ленточным конвейером

Процесс перегрузки осуществляется в следующей последовательности. Автосамосвал 10 с горной массой задним ходом частично заезжает внутрь приемного бункера 4 и разгружается в нем, после чего выезжает из бункера. В это время приемный бункер 5 при помощи гидроцилиндров 9 поднимается и равномерно выгружает горную массу на просеивающую поверхность 6 с работающим вибратором 7. Горная масса проходит через просеивающую поверхность 6 и попадает на питатель 8, который транспортирует ее на ленту 11 конвейера 12. После разгрузки приемный бункер 5 опускается в исходное положение и загружается очередным автосамосвалом. Одновременно начинается подъем бункера 4 для выгрузки горной массы на просеивающую поверхность 6.

Встречающиеся в горной массе одиночные крупнокаменистые включения остаются на просеивающей поверхности 6 и по мере накопления периодически удаляются с нее в отвал. Удаление осуществляется путем поворота просеивающей поверхности с помощью гидроцилиндров пово-

рота. Данная операция производится во время опускания очередного бункера таким образом, что специальной остановки перегрузочного комплекса для удаления негабаритных включений не требуется. При углублении карьера мобильный перегрузочный комплекс легко может быть перемещен на новое место.

Разработанный мобильный перегрузочный комплекс можно использовать при перегрузке горной массы из автосамосвалов как на конвейерный транспорт, так и в железнодорожный транспорт при оснащении мобильного перегрузочного комплекса разгрузочной консолью.

Выводы

В связи со значительным падением мировых цен на некоторые виды минерального сырья рентабельность работы ряда горнодобывающих предприятий снизилась, поэтому важное значение приобретает возможность уменьшения себестоимости ведения горных работ путем совершенствования технических средств и технологических схем их

применения. Анализ развития производственно-транспортных систем при разработке месторождений глубокими карьерами показал эффективность автомобильно-конвейерного карьерного транспорта. Развитие схем перегрузочного процесса с использованием усовершенствованных мобильных перегрузочных комплексов, обеспечивающих автоматизацию производственного цикла, улучшит технико-экономические показатели горного производства. Предлагаемая конструкция мобильного перегрузочного комплекса позволит значительно снизить капитальные и эксплуатационные издержки, уменьшит простои горно-транспортного оборудования, а также снизит затраты на перемещение горной массы из карьера.

Список литературы

1. Мельников Н.Н., Бусырев В.М. Концепция ресурсосбалансированного освоения минерально-сырьевой базы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2005. №2. С. 58–64.
2. Яковлев В.Л. Состояние, проблемы и пути совершенствования открытых горных разработок // Горный журнал. 2009. №11. С. 11–14.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. I. Производственные процессы: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 509 с.
4. Трубецкой К.Н., Корнилов С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. 2012. №1. С. 15–19.
5. Гавришев С.Е., Бурмистров К.В., Кидяев В.А. Использование преимуществ карьерного комбинированного транспорта при открыто-подземной разработке месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №3. С. 5–7.
6. Оценка эффективности схем вскрытия законтурных запасов с применением карьерных подъемников / Гавришев С.Е., Калмыков В.Н., Бурмистров К.В., Томилина Н.Г., Заляднов В.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 7–10.
7. Осадчий В.И., Маулябаев Т.И., Кузьмин С.Л. Проектирование технологии обмена контейнеров на подъемных пунктах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №2. С. 16–18.
8. Санакулов К.С., Шелепов В.И. Глубокие вводы поточного звена ЦПТ в каптере «Мурунтау» // Рациональное освоение недр. 2011. №4. С. 52–57.
9. Special equipment for quarry operations. Zement-Kalk-Gips Int. 2014, vol. 67, no. 10, p. 12.
10. Mobil Anlagen von Sandvik in Kasachstan. AT Miner. Process. Eur. 2015, vol. 56, no. 1–2, pp. 40–41.
11. Улучшение качества угля за счет селективной разработки сложноструктурного Эльгинского каменноугольного месторождения / Ермаков С.А., Гаврилов В.Л., Хосоев Д.В., Холотанов Е.А. // Наука и образование 2012. №1. С. 24–29.
12. Чебан А.Ю. Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2. С. 159–163.
13. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus / Russia. Zement-Kalk-Gips Int. 2014, vol. 67, no. 10, p. 18.
14. Cheban A. Yu., Sekisov G. V., Khrunina N. P., Shemyakin S. A. Upgrading continuous and cyclic excavation and transportation during open-pit mining // Eurasian mining. 2014, no. 1, pp. 22–24.
15. Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 5–9.
16. Чебан А.Ю. К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2014. №3. С. 145–148.
17. Пат. 2084628 Украина, МПК E21C41/00. Погрузочное устройство / Слепян В.И. и др.

Материал поступил в редакцию 11.07.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-10-14

MODERNIZATION OF TRANSPORTATION AND HANDLING EQUIPMENT IN OPENCAST MINING

Anton Yu. Cheban – Senior Researcher, Associate Professor

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia. Phone: +7(4212) 32-79-27. E-mail: chebanay@mail.ru

Natalya P. Khrunina – Senior Researcher

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia. Phone: +7(4212) 32-79-27. E-mail: npetx@mail.ru

Abstract

In Russia, like in many other countries, opencast mining proves to be the most popular mining method used in the sector of solid minerals. It is a known fact that as an open pit gets developed further, the haulage costs increase continuously. It means that the efficiency of mining companies largely depends on how optimized

their haulage systems are. Nowadays, certain technical, economical, social and environmental reasons make some of the mining companies adopt a blast-free technology, which implies the use of compact bucket wheel excavators, surface miners and excavating milling machines. The use of the above machinery helps prevent big rocks thus eliminating the need for a pri-

mary crusher. This article examines a mobile conveyor designed for conveying rock from dump trucks to the belt conveyor while removing big rocks on the run. The components of such mobile conveyor include a carriage, a drive, a frame, receiving hoppers located on both sides of the frame, and a screen with a vibrator and a feeder. The equipment also includes hydraulic cylinders responsible for lifting receiving hoppers and for turning the screening surface. It is noted that the benefits of the proposed plant design will include reduced capital and operating costs related to transportation and handling machinery, reduced downtime, reduced haulage costs and increased profitability of mining operations.

Keywords: Surface miners, rock mass, dump trucks, receiving hoppers, screening surface, conveyor.

References

1. Melnikov N.N., Busyrev V.M. Balanced resource development strategy. *Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management]. 2016, no. 2, pp. 58–64. (In Russ.)
2. Yakovlev V.L. Opencast mining: Current state, issues and optimization. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2009, no. 11, pp. 11–14. (In Russ.)
3. Rzhetskij V.V. Open pit mining. Part I. Production processes: Textbook for universities. 4th ed., revised and expanded. Moscow: Nedra, 1985. 509 p. (In Russ.)
4. Trubetskoy K.N., Kornilov S.V., Yakovlev V.L. On new approaches to ensuring sustainable development in mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2012, no. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
5. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kidyayev V.A. Capitalizing on the use of multifunctional mining machinery in combined opencast and underground mining operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 3, pp. 5–7. (In Russ.)
6. Gavrishchev S.E., Kalmykov V.N., Burmistrov K.V., Tomilina N.G., Zalyadnov V.Yu. Evaluating the performance of the off-field opening scheme that uses pit lifts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1, pp. 7–10. (In Russ.)
7. Osadchy V.I., Maulyanbaev T.I., Kuzmin S.L. Designing a container exchange technology for lifting points. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 2, pp. 16–18. (In Russ.)
8. Sanakulov K.S., Shelepov V.I. Implementation of continuous components of the cyclic-continuous technology at greater depths of the Muruntau Open Pit. *Racional'noe osvoenie nedr* [Mineral mining & conservation]. 2011, no. 4, pp. 52–57. (In Russ.)
9. Special equipment for quarry operations. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 12.
10. Mobil Anlagen von Sandvik in Kasachstan. *AT Miner. Process. Eur.* 2015, vol. 56, no. 1–2, pp. 40–41.
11. Ermakov S.A., Gavrilov V.L., Hosoev D.V., Hoyutanov E.A. Improved coal quality resultant from selective development of complex Elga coal deposit. *Nauka i Obrazovanie* [Science and Education]. 2012, no. 1, pp. 24–29. (In Russ.)
12. Cheban A.Yu. Classification of processes involving surface miners. *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2015, no. 2, pp. 159–163. (In Russ.)
13. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 18.
14. Cheban A. Yu., Sekisov G. V., Khrunina N. P., Shemyakin S. A. Upgrading continuous and cyclic excavation and transportation during open-pit mining. *Evraziiskaya dobycha* [Eurasian mining]. 2014, no. 1, pp. 22–24.
15. Cheban A.Yu. Enhancing the conveying technology in explosive-free mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 5–9. (In Russ.)
16. Cheban A.Yu. On determining the capacity level of surface miners under various operating conditions. *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2014, no. 3, pp. 145–148. (In Russ.)
17. Slepian V.I. et al. *Pogruzochnoe ustroystvo* [Loading device]. Patent UR, no. 2084628, 1997.

Received 11/07/16

Образец для цитирования

Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Модернизация транспортно-перегрузочного оборудования при ведении открытых горных работ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 10–14. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-10-14

For citation

Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Modernization of transportation and handling equipment in opencast mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 10–14. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-10-14

ПРИМЕНЕНИЕ ИОНООБМЕННОЙ ЭЛЕКТРОСОРБЦИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО ЗОЛОТА

Филиппова Е.В.

Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): проанализировать и обобщить опыт отечественных и зарубежных исследователей по миграции золота и химически связанных с ним элементов на биохимическом уровне; разработать эффективную комбинированную технологию доизвлечения полезных компонентов из техногенных отходов на основе направленных электрохимических воздействий и сорбции; минимизировать отходы за счет доизвлечения золота, химически связанных с ним элементов и активных выщелачивающих растворов; провести экспериментальные исследования влияния двухстадийной электросорбции при переработке упорных минеральных отходов с применением электросорбителей; оценить потенциальные возможности двухстадийной электросорбции золота, оставшегося в минеральных частицах, из растворов и пульпы и теоретически обосновать применение электросорбителей для интенсификации процессов извлечения дисперсного золота за счет эффективного использования способов подготовки к довыщелачиванию в зависимости от вещественного состава и форм нахождения золота в минеральной матрице. **Цель работы:** разработка эффективной комплексной геотехнологии минимизации отходов из техногенных образований горнодобывающей отрасли и восстановление экосистем в зоне действительных горно-добывающих предприятий с учетом специфики объектов. **Используемые методы:** применялись разнонаправленные методы, включающие теоретические исследования, обобщения, многофакторное планирование экспериментов, математическую обработку экспериментальных данных, гранулометрический, минералогический, спектральный, химический, рентгено-фазовый, оптический, электронно-микроскопический, микроскопический, бактериоскопический, атомно-абсорбционный, пробирный, рентгеноструктурный и другие методы анализа, технологическое тестирование, лабораторные исследования, укрупненные лабораторные и полупромышленные испытания довыщелачивания золота с предварительной подготовкой минерального сырья, находящегося в растворах и пульпах. **Новизна:** теоретически обоснована миграция золота, в том числе в тиосульфатной форме $S_2O_3^{2-}$. Предлагается гипотеза, по которой первоначально происходит окисление серы, а затем миграция комплекса. Экспериментально установлено, что способ извлечения золота, оставшегося в минеральных частицах, из растворов и пульпы отличается от известных тем, что до подачи в электросорбитель минеральные частицы пульпы подвергают доизмельчению для вскрытия дисперсного золота, ионообменный сорбент вводят в реактор в форме CN^- для довыщелачивания вскрытого дисперсного золота на начальных стадиях извлечения и в форме OH^- для извлечения циановых комплексов золота и цианидов на последующих стадиях извлечения, при этом процесс довыщелачивания и сорбции ведет к минимизации отходов. Электросорбитель для извлечения золота из пульпы на малых предприятиях выполнен в виде нескольких секций, расположенных вертикально, корпус каждой секции представлен в виде двух цилиндров, установленных концентрично и жестко скрепленных между собой, внутренний цилиндр выполнен перфорированным с размером ячейки перфорации менее размера гранул ионообменного сорбента, электроды установлены во внешнем цилиндре, при этом анод установлен за катодом по ходу движения пульпы, а днища каждой секции выполнены с отверстием в центре внутреннего цилиндра и снабжены перепускной трубой, соединяющей отверстие с внешним цилиндром следующей секции. Второй электросорбитель разработан для крупных предприятий, выполнен в виде двух секций, расположенных горизонтально, каждая секция снабжена выпускной сеткой, размер ячейки сетки менее размера гранул ионообменного сорбента, электроды выполнены в виде анодов, расположенных в первой по ходу пульпы секции, и катодов и анодов, расположенных во второй секции, при этом электроды установлены вертикально, днище второй секции снабжено патрубком для вывода сорбента. **Практическая значимость:** поданы заявки на варианты электросорбителей и способы извлечения золота из пульпы, растворов, минеральных частиц.

Ключевые слова: дисперсное золото, коллоидное золото, электросорбция, ионообменная электросорбция, извлечение золота из пульпы, растворов, хвостохранилища.

Введение

В золотодобывающей отрасли накоплено большое количество отходов. Вовлекая их в оборот, можно ускорить восстановление деградированных земель и предотвратить экологический кризис, который характеризуется, в первую

очередь, опасным загрязнением биосферы. Снизить негативное воздействие на экосистемы и повысить эффективность доизвлечения благородных металлов, химически связанных с ними элементов, выщелачивающих растворов из техногенных отходов можно, если подходить к решению вопроса комплексно [1], одновременно повышая эффективность извлечения компонен-

тов, утилизировать отходы, что существенно снизит антропогенную нагрузку.

Важно установить источник появления золота и связанных с ним элементов, а также пути и формы их миграции и накопления. По вопросу миграции существуют разные мнения. Общеизвестно, что источники рудного вещества – это вмещающие и материнские горные породы, подвергающиеся выветриванию, в том числе химическому, физическому и биологическому. Рудообразующие элементы в растворенном виде переносятся и накапливаются на геохимических барьерах или в трещинах и порах, образованных при нарушении структуры породы за счет антропогенных или природных воздействий. Такая схема миграции вызывает сомнение из-за недостаточного количества рудных элементов в породообразующих минералах и не объясняет наличие дисперсного золота в жилах и прожилках.

Кроме того, рудообразующие породы формируются за счет эндогенных процессов, при которых происходит взаимодействие вмещающих горных пород и подземных вод, остывание и кристаллизация при метаморфизме, отделение гидротермальных растворов, обогащенных кремнием, серой, галогенами, комплексными анионами и металлами. Эта схема объясняет наличие обогащенного рудными элементами источника, где впоследствии обнаруживается месторождение, однако не всегда такие источники трансформируются в рудные месторождения.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Миграция золота в твердой среде начинается на первых этапах рудообразования, при взаимодействии с доступной почвенной и грунтовой влагой, в результате чего происходит миграция в кристаллическую решетку минералов, образующихся положительно заряженных ионов и гидроксил-ионов.

А.Г. Секисовым и другими [2, 3] предложена конкретная модель рудообразования, основанная на миграционной активности элементов. В зоне повышенного геохимического образования формируются участки с повышенным напряжением, где протекают процессы твердофазной диффузии рассеянных эле-

ментов и образования микротрещин, метасоматических преобразований пород с появлением минералов, содержащих гидроксильную группу и химически связанную влагу. На втором этапе во время миграции происходит взаимодействие непосредственно металлов с почвенными, грунтовыми и подземными водами, заполняющими микротрещины, которые содержат соответствующие органические и неорганические примеси, а также отмечается циркуляция активированных высокоминерализованных вод, содержащих хлориды, цианиды, тиосульфаты.

Группой специалистов ЗабГУ и ЧФ ИГД СО РАН под руководством профессора А.Г. Секисова с участием автора проводились исследования миграционной активности золота. Предложена схема миграции золота в гипергенных условиях, где окислительное выщелачивание отходов и вынос элементов происходит в дренажный раствор. В золотосодержащем сульфатном растворе золото переносится в растворенной форме, представленной разнообразными комплексами (тиосульфатным, полиитонатным, хлоридным, гидроксильным). По мере удаления от отвалов в потоке формируется взвесь, включающая Al, Si и Fe^{3+} , осаждающая золото и другие элементы.

Накопление золота из раствора происходит в торфах в двух обстановках: окислительной и восстановительной. Первая характеризуется отложением соединений Fe^{3+} с выделением золота. Это происходит за счет непосредственного осаждения элемента из золототиосульфатного раствора соединениями Fe^{3+} при разрушении тиосульфатного комплекса до сульфата каталитическим влиянием микроорганизмов и переходных элементов (Fe^{3+}), которое происходит в среде с $pH < 5$. Восстановительная – характеризуется обилием новообразованных сульфидов, селенидов и резким преобладанием дисперсного золота.

Отмечается образование комплексов с органическими веществами, с последующим восстановлением ионной формы золота до нейтрального золота; биогенное концентрирование за счет деятельности сульфатредуцирующих бактерий, с восстановлением тиосульфатных комплексов до сульфидов и осаждением золота в виде наночастиц, рассеянных в сульфидах. Миграция золота в кислых растворах подтверждается наличием

тиосульфатных, полиитионатных и хлоридных комплексов (И.В. Миронов, 1989; M.F. Benedetti, 1991), а в природных – гидроксильными группами (А.Г. Секисов, 2007).

Очень высокая миграционная активность золота наблюдалась на Шахтаминском месторождении [4], где видимое мелкое золото представлено в кварце, а дисперсное – в пирите и халькопирите. Такое сочетание золота с кварцем имеет очень прочные связи. Такое золото для извлечения считается упорным, поэтому предполагается, что природные трансформации будут сложными. Однако исследования показали, что золото и сопутствующие элементы активно мигрируют в толще, несмотря на такие проявления, что наглядно видно из **таблицы**.

Распределение полезных компонентов по глубине хвостохранилища Шахтаминского рудника

Глубина подшвы слоя, м	Мощность слоя, м	Содержание элементов, г/т					
		Au	Ag	Mo	Cu	Pb	W
1	1	0,15 (0,66)	15,8	>300	577	1930	196
2	2	0,18	8,7	>300	407	1400	213
3	3	<0,10	5,4	>300	198	1100	244
4	4	<0,10	2,9	>300	267	668	201
9	5	<0,1	1,4	400	210	270	180
14	5	0,11	9,7	300	760	1420	277
16	2	0,11	12,3	300	914	1630	265
18	2	0,11	8,6	200	696	1540	242

При содержании золота в руде около 1 г/т в техногенных образованиях обнаруживается в среднем 0,2 г/т (теряется одна пятая часть). Отчетливо прослеживается миграционная активность элементов, которые в большом количестве накапливаются не только в верхнем слое, но и в нижних горизонтах хвостохранилища около почвенного слоя после продолжительного по мощности снижения. Это подтверждает, что золото и другие элементы, даже находясь в упорных рудах, способны к миграции. Если не учитывать данный факт, то большое количество элементов теряется из техногенных образований, что ведет не только к потере потенциального сырья, но и к экологическому загрязнению территории.

Многочисленные эксперименты, проведенные группой специалистов из ЗабГУ и ЧФ ИГД СО РАН с участием автора, показали, что миграция золота из техногенных образований, в частности из сульфидсодержащих типов месторождений протекает по-разному. Так, из Бaleyского хвостохранилища миграции золота не наблюдается, на это указывает его постоянное содержание в пробах. Данный эффект объясняется нахождением золота в виде вкрапленных в кварце, что осложняет его миграцию.

Золото в россыпи по реке Алея в Нерчинском Заводе Приаргунского района также находится в сочетании с кварцем, но в дисперсном виде, напротив, обладает высокой подвижностью в коллоидной форме. Это подтверждают пробы, взятые из хвостохранилища, где концентрация его падает с 2 до 0,15 г/т. Такая значительная разница наблюдается в пробах, взятых сразу после сброса хвостовой пульпы и по прошествии времени. Снижение объясняется миграцией золота в монослойной коллоидной форме либо в комплексе с кремнием. Несмотря на то, что данные месторождения относятся к одной формации, формы миграции золота различные.

К примеру, на гале-эфельных отвалах Кручининского месторождения россыпного золота обнаруживается активная миграция золота и сорбция его на илы. Кроме того, ил быстро образуется на новых прудках, в результате миграция только усиливается и значительно сказывается на дальнейшем вскрытии и доизвлечении из техногенных образований.

В ходе таких экспериментов сделан вывод, что некоторые хвостохранилища способны удерживать накопленные элементы, в том числе и поллютанты, а на других объектах необходимо предусматривать систему доулавливания, предложенную автором и рассмотренную ниже, для снижения экологической нагрузки на природные объекты.

Исследования показали, что золото способно мигрировать в разных формах, но доминирующей является коллоидная. Для извлечения в ходе экспериментов использовалась ионообменная сорбция. Для этого были разработаны два варианта электросорбителей. Эксперимент по электросорбции проводился на хвостах Учкудукского, Дарасунского, Бaleyского месторождений.

К примеру, на хвостах обогащения упорных руд Дарасунского месторождения был

опробован способ извлечения золота, оставшегося в минеральных частицах, из растворов и пульп, содержащих преимущественно дисперсное золото. Причем такое золото не извлекается из хвостов методом сорбционного выщелачивания и обычной подготовкой ионообменного сорбента.

Сбросная хвостовая пульпа направляется в зону расширения трубопровода, где установлены завихрители с рифленной поверхностью из износостойкой стали. Затем пульпа поступает в электросорбер, где взаимодействует с ионообменным сорбентом, подготовленным в форме CN^- . Сорбент заранее был размещен в верхних 3-х секциях реактора для довыщелачивания вскрытого дисперсного золота. Подготовка ионообменного сорбента проводилась раствором 3-процентного цианида натрия путем смешения его с раствором в чанах. При такой обработке ионы CN^- закрепляются на активных участках поверхности сорбента. На начальных стадиях в электросорбере продолжается довыщелачивание.

На последующих стадиях в двух нижних секциях реактора используется ионообменный сорбент в форме OH^- для извлечения циановых комплексов золота и самих цианидов. Подготовка сорбента проводилась аналогично, только применялся 4-процентный раствор щелочи. Такая обработка улучшает показатели процесса сорбционного цианирования. Ионы OH^- нейтрализуют на поверхности сорбента активные группы основного характера и ионизируют кислые поверхностные группы сорбента. Благодаря этому сорбент приобретает в целом отрицательный заряд, который вследствие проводниковых свойств сорбента распространяется на всю его матрицу. Гидроксил-ионы энергично обмениваются на цианид-ионы и золотоцианистые комплексы $[Au(CN)_2]^-$.

Заключение

В заключение можно сделать вывод, что ионообменная электросорбция способна извлекать золото из техногенных образований, предотвращать его миграцию и разубоживание хвостохранилищ, а следовательно, улучшать экологическую обстановку золотодобывающих регионов, к которым относится и Забайкальский край. Доизвлечение золота из хвостов обогащения упорной руды Дарасунского месторождения составило 57,5%. Это становится достижимо при использовании новых геотехнологий [5, 6], учитывающих миграционную способность элементов, с применением усовершенствованного оборудования, что, несомненно, влияет и на процент доизвлечения металла. В ходе таких экспериментов доказано, что некоторые хвостохранилища способны удерживать накопленные элементы, в том числе и поллютанты, а на других объектах необходимо предусматривать систему доулавливания, предложенную автором и рассмотренную выше, для снижения экологической нагрузки на природные объекты.

Список литературы

1. Filippova E.V. Development of ecological and protective geotechnology on the basis of ion-exchange sorption // The Strategies of Modern Science Development: X International scientific-practical conference. USA: CreateSpace, 2016, pp. 36–38.
2. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королев В.С. Дисперсное золото. Чита: ЧитГУ, 2007. 269 с.
3. Секисов А.Г., Манзырев Д.В. Цикличность твердофазной и жидкофазной миграции и кластеризации золота в зонах ТМА // Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений: материалы Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н.А. Шило. М.: ИГЕМ РАН, 2013.
4. Геотехнологии освоения Шахтаминского хвостохранилища / Секисов А.Г., Манзырев Д., Лавров А.Ю., Смолич К. // Золотодобывающая промышленность. 2013. № 3 (57). URL: <http://zolonews.ru/news/34560.htm> (дата обращения: 06.06.2016)
5. Terry McNulty. Cyanide Substitutes // Mining Magazine. Vol. 184. № 5. May 2001. P. 256–258, 260–261.
6. Vlassopoulos D., Wood S. Gold speciation in natural waters: 1. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution // Geochim. Cosmochim. Acta. 1990, v. 54, pp. 3–12.

Материал поступил в редакцию 11.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-15-19

THE USE OF ION EXCHANGE ELECTROSORPTION FOR EXTRACTION OF COLLOIDAL GOLD

Elena V. Filippova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Transbaikal State University, Chita, Russia. E-mail: filena78@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): The aim is to summarize the experience of Russian and international researchers looking at the migration of gold and combined elements at the biochemical level; to develop an efficient combination technique for recovery of valuable components from industrial waste with the help of electrochemical actions and sorption; to minimize waste due to additional recovery of gold and combined elements and active leach solutions; to carry out experiments to study the impact of two-stage electrosorption when processing refractory mineral waste using electrosorbers; to evaluate the potential of applying a two-stage electrosorption process to recover the remaining gold from the mineral particles, solutions and slurries and to obtain some theoretical evidence supporting the use of electrosorbers to intensify the extraction of dispersed gold through the efficient use of the preparation techniques depending on the material composition and on how gold is integrated in the mineral matrix. **Objectives:** The research aims to provide a comprehensive geotechnology that can effectively minimize mining waste and provide proper reclamation techniques for various types of mining sites. **Methods Applied:** The diverse methods applied in the research include theoretical research, synthesis, multifactorial design of experiments, mathematical treatment of experimental data, particle size distribution and mineralogical, spectroscopic, chemical, X-ray phase, optical, microscopic, bacterioscopic analysis, electron microscopy, atomic absorption, assay test, X-ray diffraction, as well as production testing, laboratory tests, large-scale laboratory and pilot tests for extraction of gold from pre-conditioned minerals present in solutions and slurries. **Originality:** This research offers theoretical evidence of the migration of gold, including its thiosulfate form ($S_2O_3^{2-}$). The proposed hypothesis states that the migration is preceded by the sulfur oxidation. Empirically, the following differentiators were established for the method of extracting the remaining gold from solutions and slurry: before being fed to the electrosorber the mineral particles are subjected to regrinding for recovery of dispersed gold; the ion exchange sorbent is introduced into the reactor in the form of CN^- for leaching the dispersed gold at the initial recovery stages and in the form OH^- - for extracting the cyanide complexes of gold and cyanides at the subsequent recovery stages, with minimized waste occurring due to leaching and sorption. Smaller plants have their electrosorber for extracting gold from slurry built as a vertical row of sections. Each section consists of two concentrically mounted cylinders

fixed to one another. The inner cylinder has openings the size of which is less than the size of ion exchange sorbent granules. The electrodes are installed in the outer cylinder, with the anode following the cathode as the slurry flow goes. The inner cylinder of each section has an opening at the bottom and is connected to the outer cylinder of the next section with a bypass pipe. The second electrosorber is designed for big plants. It consists of two horizontal sections, each section is provided with an outlet grid, the size of the openings in which is less than the size of ion exchange sorbent granules. The electrodes include anodes located in the first section and cathodes and anodes located in the second section. The electrodes have a vertical arrangement, and the second section has a nozzle at the bottom for sorbent removal. **Practical Relevance:** Applications have been submitted for various electrosorber options and methods of extracting gold from slurry, solutions and mineral particles.

Keywords: Dispersed gold, colloidal gold, electrosorption, ion exchange electrosorption, gold recovery from slurries, solutions, tailings.

References

1. Filippova E.V. Development of ecological and protective geotechnology on the basis of ion-exchange sorption. The Strategies of Modern Science Development: X International scientific-practical conference. USA: CreateSpace, 2016, pp. 36-38.
2. Sekisov A.G., Zykov N.V., Korolev V.S. *Dispersnoe zoloto* [Dispersed gold]. Chita: ChitGU, 2007. 269 p. (In Russ.)
3. Sekisov A.G., Manzyrev D.V. The cyclic nature of solid-phase and liquid-phase migration and clustering of gold tectonic-magmatic zones. *Rudoobrazuyushhie protsessy: ot geneticheskikh kontseptsij k prognozu i otkrytiyu novykh rudnykh provintsiy i mestorozhdenij: Materialy Vseros. konf., posvyashhennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya akad. N.A. Shilo* [Ore-forming processes: From genetic concepts to forecasting and the discovery of new ore deposits and provinces: Proceedings of the Conference marking the 100th birthday of Academic N.A. Shilo]. Moscow: IGEM RAN, 2013. 167 p. (In Russ.)
4. Sekisov A.G., Manzyrev D., Lavrov A.Yu., Smolich K. The geotechnology for the development of Shakhtama tailings. *Zolotodobyvayushhaya promyshlennost* [Gold industry]. 2013, no. 3(57). Available at: <http://zolotonews.ru/news/34560.htm> (Accessed June 6, 2016)
5. Terry McNulty. Cyanide Substitutes. *Mining Magazine*. Vol. 184, no. 5, May 2001, pp. 256-258, 260-261.
6. Vlassopoulos D., Wood S. Gold speciation in natural waters: 1. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990, vol. 54, pp. 3-12.

Received 11/10/16

Образец для цитирования

Филиппова Е.В. Применение ионообменной электросорбции для извлечения коллоидного золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 15-19. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-15-19

For citation

Filippova E.V. The use of ion exchange electrosorption for extraction of colloidal gold. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 15-19. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-15-19

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 622.785.5

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-20-26

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК
СЕРПЕНТИНИТОМАГНЕЗИТОВ ХАЛИЛОВСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ
АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА
В АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»**Ганин Д.Р.¹, Дружков В.Г.², Паныхев А.А.¹, Шаповалов А.Н.¹, Шевченко Е.А.¹¹ Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Новотроицк, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия**Аннотация**

Постановка задачи (актуальность работы): в статье приведен обзор литературных данных о положительном влиянии добавок серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения Оренбургской области на показатели производства агломерата и окатышей. Приведены результаты исследования по производству агломерата на основе железорудных материалов Курской магнитной аномалии с использованием серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения, вводимых в агломерационную шихту с расходом до 12,13 кг/т в виде пульпы при увлажнении агломерационной шихты в процессе её окомкования. **Цель работы:** совершенствование процесса агломерации железорудных материалов для повышения эффективности окомкования и спекания агломерационной шихты, качества агломерата. **Используемые методы:** исследования проводились в лабораторных условиях на агломерационной чаше диаметром 210 мм с использованием шихтовых материалов, применяемых для производства агломерата в условиях АО «Уральская Сталь». Расход опытного материала, подаваемого с водой в виде пульпы при окомковании агломерационной шихты, изменяли от 0,5 до 1,5% от массы сухой шихты, что соответствовало удельному расходу от 3,94 до 12,13 кг/т агломерата. **Новизна:** к элементам новизны относится способ агломерации железорудных материалов, в котором добавки серпентинитомagneзитов подают с водой в виде пульпы при увлажнении агломерационной шихты в процессе её окомкования, что позволило улучшить показатели окомкования и спекания шихты. **Результат:** установлено, что с ростом расхода серпентинитомagneзита увеличились: прочность гранул окомкованной агломерационной шихты на 53,46%, вертикальная скорость спекания шихты на 35,89%, выход годного агломерата из спёка на 6,53%, удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату на 25,59%, прочность на сбрасывание агломерата на 3,35%, прочность на удар агломерата на 22,32%. С ростом расхода серпентинитомagneзита содержание фракции 0–1 мм в шихте после окомкования уменьшилось на 48,71%, а сопротивление агломерата истиранию снизилось на 16,03%. **Практическая значимость:** подтверждены возможность и целесообразность введения в агломерационную шихту добавок серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения с водой в виде пульпы при окомковании с расходом до 12,13 кг/т. Установлено, что рациональный расход опытной добавки в условиях АО «Уральская Сталь» находится в диапазоне от 7,98 до 12,13 кг/т и должен уточняться в производственных условиях.

Ключевые слова: агломерационная шихта, окомкование, спекание, агломерация, серпентинитомagneзит.

Введение

Одним из способов воздействия на процесс агломерации является ввод в аглошихту минеральных добавок, которые улучшают окомкование шихты и способствуют активизации процессов минералообразования при спекании

[1, 2]. Известны сведения о положительном влиянии добавок серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения Оренбургской области на показатели производства окатышей в Лебединском ГОКе [3] и агломерата в АО «Уральская Сталь» [4], позволивших улучшить прочностные свойства окатышей и агломерата. Поэтому серпентинитомagneзиты Халиловского месторождения можно использовать в составе аглошихты в качестве упрочняющей магнези-

© Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паныхев А.А., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А., 2017

альной добавки. Так как широкий диапазон крупности шихтовых материалов (0–10 мм) и недостаточное время смешивания шихты на морально устаревшем оборудовании аглофабрики АО «Уральская Сталь», введённой в строй 29.03.1963 г. [5], снижают эффективность использования небольших добавок серпентинитомagneзитов в процессе агломерации, то в таких условиях добавки рациональнее подавать с водой в виде пульпы при увлажнении аглошихты в процессе её окомкования [6]. В связи с этим в данной работе исследовалось влияние на показатели аглопроцесса добавок серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения, вводимых в шихту с водой в виде пульпы при окомковании.

Материалы и методы исследования

При проведении исследования за базовый период были приняты усреднённые условия и показатели работы аглоцеха АО «Уральская Сталь» в зимнее время (с ноября по апрель) за 5

лет. В состав аглошихты входили: аглоруда Бакальского рудоправления (БРУ) и концентрат «доменный» (смесь аглоруды и концентрата Михайловского горнообогатительного комбината (МГОК) в соотношении 1:3). Из состава шихты, с целью обеспечения стабильных условий проведения экспериментов, были исключены: отсев брикетов, окалина, металлоконцентрат (продукт магнитной сепарации металлургических шлаков), колошниковая пыль, шлам участка обезвоживания. Известь, в связи с непостоянством степени обжига, была заменена известняком Аккермановского месторождения. Возврат (агломератом от предыдущих спеканий крупностью 0–5 мм) был заменён отсеком агломерата и окатышей. Содержание возврата в аглошихте составляло 25% от массы сухой железорудной смеси (ЖРС), перешедшей в агломерат. При подготовке аглошихты производился отсев фракций аглоруды (+10 мм), известняка (+3 мм) и коксика (+3 мм). Характеристики аглошихты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Физико-химические свойства материалов аглошихты

Наименование вида сырья	Влажность, %	Насыпная плотность, т/м ³	Содержание фракции, %				п.п.п., %
			5–10 мм	3–5 мм	1–3 мм	0–1 мм	
Аглоруда БРУ	1,5	1,75	17,7	17,4	37,4	27,5	34,53
Концентрат МГОКа (доменный)	3,0	2,05	4,35	3,2	3,92	88,53	0,5
Известняк	0,5	1,6	–	–	45,7	54,3	42,05
Возврат	0	1,75	–	47,7	45,60	6,7	0,5
Коксовая мелочь	10	0,5	–	–	53,9	46,1	–
Серпентинитомagneзит	1,61	2,05	–	–	–	100	16,2

Таблица 2

Химический состав материалов аглошихты

Наименование вида сырья	Химический состав сухих материалов, %												
	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
Аглоруда БРУ	29,8	31,4	7,68	11,0	4,22	1,9	10,00	0,93	0,17	0,057	0,12	0,12	0,42
Концентрат МГОКа (доменный)	62,2	19,6	67,2	10,6	0,78	0,29	0,48	0,02	0,067	0,033	0,034	0,11	0,11
Известняк	1,3	–	1,84	0,9	53,8	0,19	0,65	–	0,012	0,046	–	0,1	0,03
Возврат	51,82	11,69	61,04	9,19	14,70	0,86	2,0	0,14	0,046	0,042	0,039	0,12	0,12
Серпентинитомagneзит	5,02	–	7,17	27,2	1,68	1,00	33,3	0,12	0,03	0,16	–	–	–
Твёрдое топливо коксовая мелочь: зола коксика	Углерод – 84,0% Зола – 13, 0% Сера – 0,5%.												
	8,51	–	12,16	46,0	7,4	15,0	3,15	0,72	1,36	–	–	–	–

В качестве исходных данных для расчёта аглошихты использовали: содержание углерода в шихте 4,2%; содержание MgO в агломерате 2,0%; основность агломерата по отношению $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ед. Количество серпентинитомгнезита (крупностью 0–0,063 мм), вводимого с пульпой в аглошихту при окомковании, составляло по опытам, %: 0; 0,5; 1,0; 1,5 (от массы сухой ЖРС без учёта сидерита БРУ и возврата).

Подготовка аглошихты к спеканию производилась в смесителе-окомкователе диаметром 0,6 м при $n = 9$ об/мин. Время обработки шихты в барабане включало: смешивание шихты (2,5 мин); смешивание шихты с её увлажнением до 3–4% пневмораспылением воды (2,5 мин); окомкование шихты с её увлажнением до 6–8% пневмораспылением пульпы (2,5 мин); окомкование шихты без её увлажнения (2,5 мин). После каждой стадии подготовки шихты проводился отбор проб шихты для определения её влажности, насыпной плотности, гранулометрического состава и среднего эквивалентного (среднемассового) диаметра.

Для определения прочности гранул окомкованной аглошихты на сжатие отбирали пробу массой 1 кг, выделяли из неё рассевом фракцию 5–10 мм, из которой отбирали 60 гранул с формой, близкой к сферической. Далее определяли прочность гранул с помощью установки для определения прочности гранул окомкованной аглошихты одноосным сжатием между параллельными поверхностями неподвижной подложки и движущегося ей навстречу поршня. Гранулы помещали по одной на подложку установки (поверхность электронных весов) и создавали постоянно возрастающую нагрузку до их разрушения, после чего рассчитывали среднюю крупность гранул на сжатие (Н/гранула) в опыте.

Спекание проводили на аглошаше диаметром 210 мм (постелью служил возврат фракции 5–10 мм массой 2 кг) при среднем разрежении 6 кПа. После спекания определяли выход годного агломерата (+5 мм), который далее подвергался стабилизации трёхкратным сбрасыванием с определением прочности на сбрасывание (ГОСТ 25471-82). После сбрасывания годный агломерат крупностью 5–40 мм подвергался барабанному испытанию для определения прочности на удар и сопротивления истиранию (ГОСТ 15137-77). Кроме того, по окончании каждого спекания рассчитывались вертикальная скорость спекания и удельная производительность установки по годному агломерату, а также отбирались пробы для определения химического и минералогического состава агломерата.

Результаты исследования и их обсуждение

Условия и усреднённые результаты экспериментов (каждый опыт повторялся не менее 3 раз) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Условия и усреднённые результаты экспериментов

Параметры	Доля серпентинитомгнезита с пульпой (% от массы сухой ЖРС без учёта сидерита БРУ и возврата)			
	0%	0,5%	1,0%	1,5%
Расход серпентинитомгнезита, кг/т	0	3,94	7,98	12,13
CaO/SiO_2 (расч.), ед.	1,5			
MgO в агломерате (расч.), %	2,0			
$\text{Fe}_{\text{общ}}$ в агломерате (расч.), %	51,46	51,45	51,44	51,43
Содержание углерода в шихте, %	4,2			
Расход шихты, кг/т:				
аглоруда БРУ	134,23	120,64	106,69	92,38
концентрат МГОКа (доменный)	788,87	795,07	801,43	807,96
возврат	252,53	252,53	252,53	252,53
известняк	246,89	248,24	249,64	251,06
коксик	62,60	62,46	62,32	62,17
Влажность аглошихты, %	7,20	6,83	6,55	6,45
Содержание фр. 0–1 мм в шихте после окомкования, %	14,76	11,22	9,44	7,57
Прочность на сжатие окомкованной аглошихты, Н/гран.	2,6	2,64	3,43	3,99
Высота слоя шихты, мм	329,2	330,66	328,00	330,00
Скорость спекания, мм/мин	13,54	14,10	16,10	18,40
Выход годного из спёка, %	65,27	68,88	69,53	69,50
Производительность по годному агломерату, т/(м ² ·ч)	0,852	0,9	0,99	1,07
Прочность на сбрасывание, %	83,59	85,32	85,71	86,39
Прочность на удар, %	62,95	69,77	71,69	77,00
Сопротивление истиранию, %	5,80	5,68	5,57	4,87
$\text{Fe}_{\text{общ}}$ в агломерате (факт.), %	52,08	52,00	52,40	52,53
FeO в агломерате (факт.), %	14,27	12,96	13,62	13,45
CaO/SiO_2 (факт.), ед.	1,51	1,55	1,56	1,51
MgO в агломерате (факт.), %	1,98	1,97	1,94	1,98

Полученные данные позволили сделать выводы о влиянии добавок серпентинитомгнезита на эффективность окомкования аглошихты, результаты её спекания, качество агломерата.

На рис. 1 представлены зависимости гранулометрического состава окомкованной аглошихты от расхода серпентинитомгнезита, вводимого с пульпой при окомковании. С ростом расхода серпентинитомгнезита содержание в агло-

шихте мелкого класса 0–1 мм, который обычно используют для сравнительной оценки результатов окомкования [7], снижается, а содержание фракции 1–3 мм увеличивается (рис. 1, а). Содержания фракций 5–10 мм, +10 мм в аглошихте с повышением расхода добавки увеличиваются, стабилизируясь в интервале 7,98–12,13 кг/т, а содержание фракции 3–5 мм в исследуемом интервале монотонно снижается (рис. 1, б). В результате с увеличением расхода серпентинитомagneзита при уменьшении содержания в шихте мелкой фракции 0–1 мм и относительно небольшом количестве фракции +10 мм получается более благоприятный для спекания гранулометрический состав аглошихты.

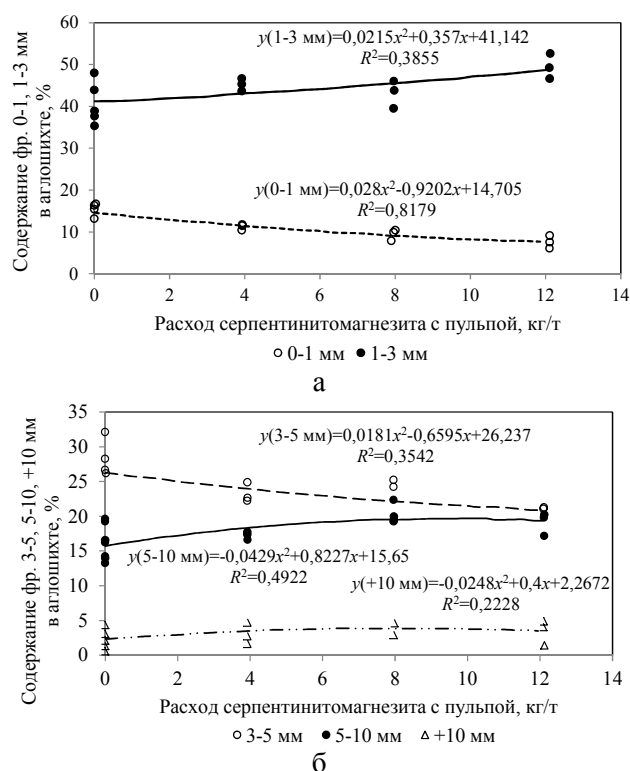


Рис. 1. Зависимости гранулометрического состава окомкованной аглошихты от расхода серпентинитомagneзита, вводимого с пульпой при окомковании: содержание фр. 0–1 мм, 1–3 мм (а), 3–5 мм, 5–10 мм, +10 мм (б)

С увеличением расхода серпентинитомagneзита увеличивается прочность гранул окомкованной аглошихты, что способствует сохранению их целостности при транспортировке и перегрузках, а также уменьшает потери напора просасываемого через шихту газа при спекании (рис. 2). Наибольший упрочняющий эффект проявляется при расходе серпентинитомagneзита 8–12 кг/т.

Изменение гранулометрического состава окомкованной аглошихты (в наибольшей степени в результате снижения содержания в аглошихте мелочи класса 0–1 мм [8]), увеличение прочности гранул окомкованной аглошихты улучшают исходную газопроницаемость спекаемого слоя [9], повышая вертикальную скорость спекания шихты (рис. 3). При этом добавки серпентинитомagneзита, находящиеся на поверхности гранул аглошихты, по-видимому, влияют на ускорение процессов минералообразования.

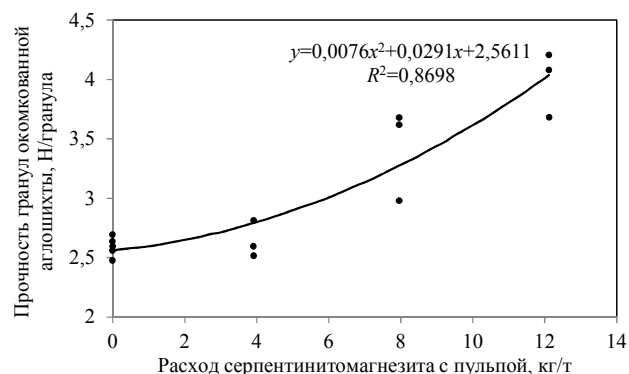


Рис. 2. Влияние расхода серпентинитомagneзита, вводимого с пульпой при окомковании, на прочность гранул окомкованной аглошихты

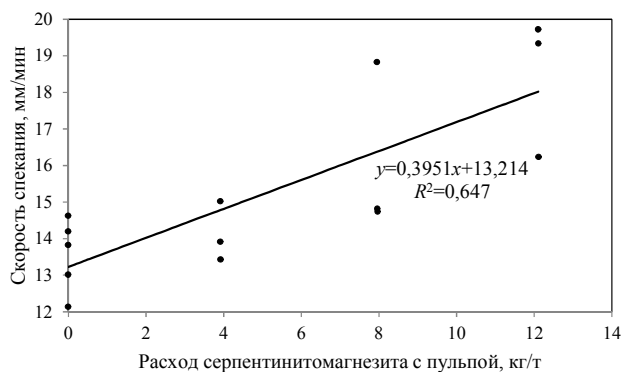


Рис. 3. Влияние расхода серпентинитомagneзита, вводимого с пульпой при окомковании, на вертикальную скорость спекания аглошихты

Согласно линии тренда с увеличением расхода серпентинитомagneзита до 9 кг/т повышается выход из спёка годного агломерата, чему способствует более однородный фракционный состав аглошихты и более устойчивые тепловые условия формирования аглоспёка (рис. 4, а). При повышении расхода серпентинитомagneзита растёт удельная производительность аглоустановки по годному агломерату вследствие увеличения вертикальной скорости спекания аглошихты [10] и выхода из спёка годного агломерата (рис. 4, б).

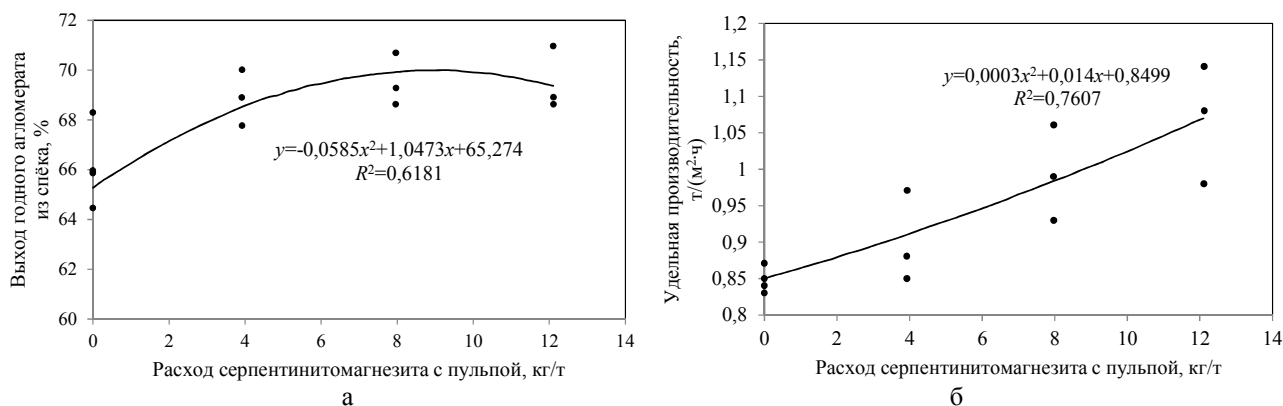


Рис. 4. Влияние расхода серпентинитомagnetита, вводимого с пульпой при окомковании, на выход годного из спёка (а) и удельную производительность аглоустановки по годовому агломерату (б)

Оптимизация гранулометрического состава окомкованной аглошихты (снижение содержания мелочи класса 0–1 мм, повышение однородности фракционного состава) способствует стабилизации тепловых условий её спекания, обеспечивая более однородное протекание процессов, увеличивая прочность агломерата на сбрасывание (рис. 5, а). С ростом расхода серпентинитомagnetита (доля фракции 5–40 мм) повышается прочность агломерата на удар (рис. 5, б), а сопротивление агломерата истиранию (доля фракции 0–0,5 мм) снижается (рис. 5, в).

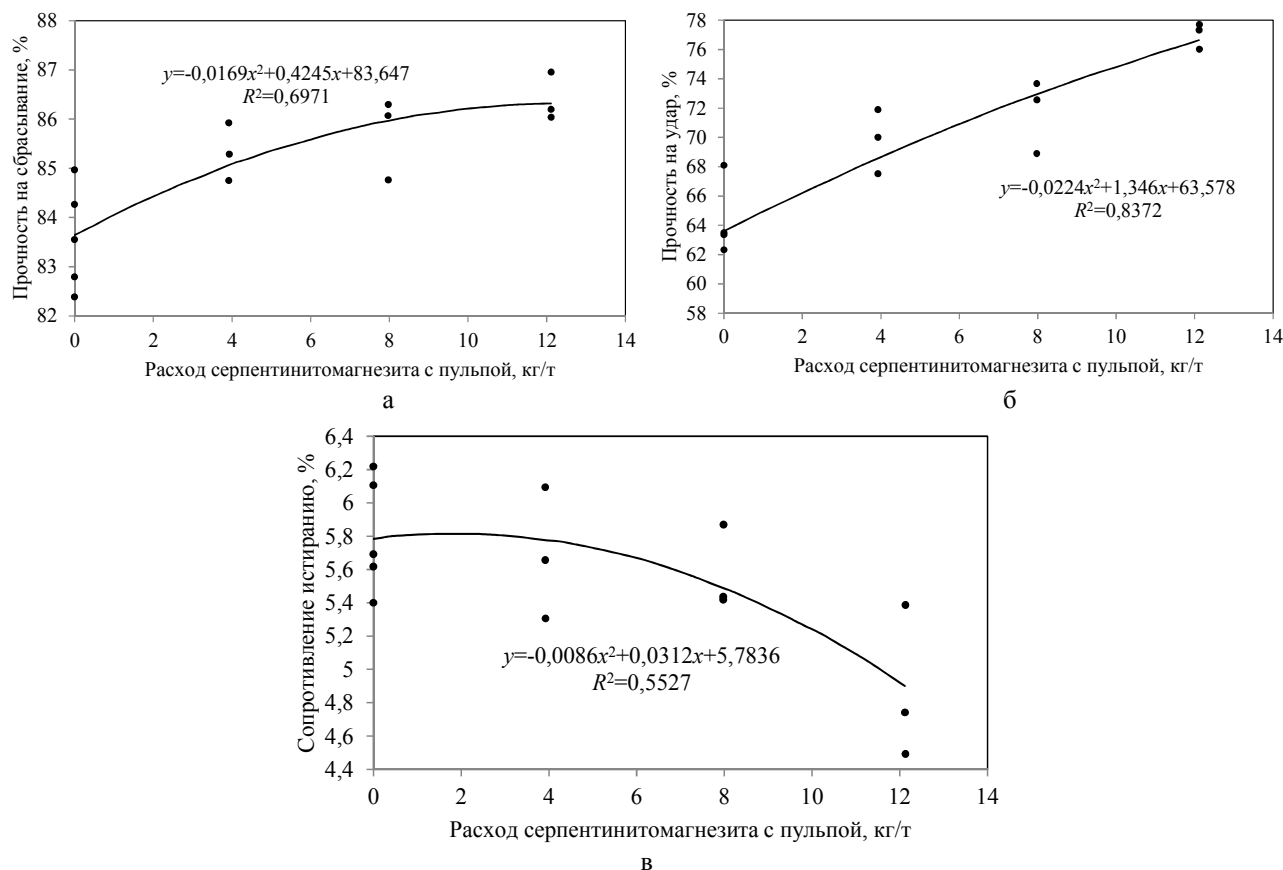


Рис. 5. Влияние расхода серпентинитомagnetита, вводимого с пульпой при окомковании, на прочность на сбрасывание агломерата (а), прочность на удар агломерата (б), сопротивление истиранию агломерата (в)

Заклучение

Исследование влияния добавок серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения на показатели аглопроцесса позволило сделать вывод, что введение их в аглошихту с пульпой при окомковании улучшает показатели окомкования и спекания шихты. Предлагаемая технология позволила снизить содержание фракции 0–1 мм в аглошихте на 48,71%; позволила увеличить: прочность гранул окомкованной аглошихты (Н/гранула) на 53,46%, вертикальную скорость спекания шихты (мм/мин) на 35,89%, выход годового агломерата из спёка на 6,53%, удельную производительность аглоустановки (т/(м²·ч)) на 25,59%, прочность агломерата на сбрасывание на 3,35%, прочность агломерата на удар на 22,32%; позволила уменьшить сопротивление агломерата истиранию на 16,03%. С учётом достигаемого эффекта рациональный расход опытной добавки в условиях АО «Уральская Сталь» находится в диапазоне от 7,98 до 12,13 кг/т и должен уточняться в производственных условиях. Измельчение добавок серпентинитомagneзитов до размеров 0–0,063 мм активизирует их, а ввод добавок с пульпой в аглошихту при её окомковании благоприятствует их нанесению на поверхность гранул при окомковании, что влияет на процессы минералообразования при спекании агломерата.

Список литературы

1. Возможности совершенствования технологии производства агломерата в ОАО «Уральская Сталь» / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов // *Металлургия, технологии, инновации, качество: труды XIX международной научно-практической конференции* / под ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. Ч. 1. С. 98–102.
2. Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская Сталь» / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. № 1. С. 34–40. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40.
3. Бойко С.В. Применение халиловского серпентинитомagneзита в металлургии. URL: http://orma.boxmail.biz/cgi-bin/guide.pl?action=article&id_razdel=85978&id_article=217598
4. Применение серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения в агломерационном производстве / А.Н. Шаповалов, А.В. Заводяный, Е.В. Братковский // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2011. № 3. С. 25 – 29.
5. Шпарбер Л.Я. Металлургия железа и чугуна. В 2 кн. Кн. 1. История. Состояние. Тула: АССОД, 1996. 416 с.
6. Заявка на изобретение 2016122289 Российская Федерация, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов; заявители и патентообладатели О.Н. Скубаков и С.В. Кольчугин. Заявлено 03.06.2016.
7. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Основы формирования функциональных свойств железорудных агломератов. Екатеринбург, 2015. 352 с.
8. Коршиков Г.В. Энциклопедический словарь – справочник по металлургии. Липецк: Липецкое издательство Госкомпечати РФ, 1998. 780 с.
9. Коротич В.И.Ю. Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург, 2003. 400 с.
10. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. М.: Металлургия, 1967. 368 с.

Материал поступил в редакцию 30.11.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-20-26

STUDYING THE EFFECT OF THE ADDITION OF SERPENTINITE-MAGNESITE FROM THE KHALILOVO FIELD ON THE PERFORMANCE OF URAL STEEL'S SINTERING PLANT

Dmitriy R. Ganin – Engineer

Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: dmrgan@mail.ru

Vitaly G. Druzhkov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)298430. E-mail: shirshov1989@mail.ru

Anatoliy A. Panychev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: a.pan1939@mail.ru

Aleksey N. Shapovalov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: alshapo@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0888-814X>

Evgeny A. Shevchenko – Ph.D. (Eng.), Senior Lecturer

Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: ShevchenkoE.A@yandex.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): The article gives an overview of published data attesting to the positive effect produced by serpentinite-magnesite from the Khalilovo field in the Orenburg Region on the performance indicators in sinter and pellets production. The article presents the results of research on sinter production. The authors looked at the sinter produced from iron ore coming from the Kursk Magnetic Anomaly and the serpentinite-magnesite from the Khalilovo field. The above were introduced into the sinter mix in the form of slurry at the rate of up to 12.13 kg/t during the pelletizing stage. **Objectives:** The objective is to improve the iron ore agglomeration process for better pelletizing and sintering and a greater sinter quality. **Methods Applied:** The research was conducted in a laboratory with the help of a 210 mm sinter pot. The raw materials used for the sinter production at Ural Steel JSC were taken for the lab experiments. The flow of the material, which was introduced as slurry during the pelletizing stage, varied from 0.5 to 1.5 % of dry mix by weight, which corresponds to the specific consumption of sinter of 3.94 to 12.13 kg/t. **Originality:** The research offers an original iron ore sintering process which involves the addition of serpentinite-magnesite mixed with water as slurry during the pelletizing stage resulting in better pelletizing and sintering. **Findings:** It was found that the increased consumption of serpentinite-magnesite resulted in the following gains: the pellet hardness increased by 53.46%, the vertical sintering velocity speed increased by 35.89%, the sinter yield increased by 6.53%, the specific productivity of the sinter plant by yield increased by 25.59%, the drop strength increased by 3.35 %, the impact strength increased by 22.32%. The higher flow of serpentinite-magnesite led to a 48.71% decrease of 0-1 mm material in the charge after pelletization and a 16.03% decrease of abrasion resistance. **Practical Relevance:** The research proved the feasibility of using serpentinite-magnesite from the Khalilovo field as a sintering additive when introduced during pelletization mixed with water as slurry at the flow rate of up to 12.13 kg/t. The optimum consumption rate of the experimental additive for the Ural Steel site was found to be between 7.98 and 12.13 kg/t and need to be verified under actual production conditions.

Keywords: Sinter charge, pelletizing, agglomeration, sintering, serpentinite-magnesite.

References

1. Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Sinter production improvement opportunities of Ural Steel JSC. *Metallurgiya, tehnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Metallurgy, technology, innovation, quality: Proceedings of the 19th International Scientific Conference]. Ed. by E.V. Protopopov. Novokuznetsk: Publishing Centre of Siberian State Industrial University, 2015, Part 1, pp. 98-102. (In Russ.)
2. Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. The use of local mineral resources by the sintering plant of Ural Steel JSC. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 34-40. (In Russ.). doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40.
3. Boiko S.V. The application of serpentinite-magnesite from the Khalilovo field in steel industry. URL: http://orma.boxmail.biz/cgi-bin/guide.pl?action=article&id_razdel=85978&id_article=217,598
4. Shapovalov A.N., Zavodyany A.V., Bratkovsky E.V. Serpentine-magnesite from the Khalilovo field used in sinter production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya* [Bulletin of Russian universities. Ferrous metallurgy]. 2011, no. 3, pp. 25-29. (In Russ.)
5. Shparber L.Ya. *Metallurgiya zhelesa i chuguna. Spravochnoe izdanie. V 2-h knigah. Kniga 1-ya. Istoriya. Sostoyaniye*. [Metallurgy of iron and cast iron. In 2 books. Book 1. History. Status.]. Tula: ASSOD, 1996, 416 p. (In Russ.)
6. Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Iron ore sintering process. Application 2016122289 Russian Federation, IPC C22B 1/16, 2016.
7. Puzanov V.P., Kobelev V.A. *Osnovy formirovaniya funktsionalnykh svoystv zhelezorudnykh aglomeratov* [Basic techniques for obtaining functional properties in iron ore sinter]. Yekaterinburg: 2015, 352 p. (In Russ.)
8. Korshikov G.V. *Entsiklopedicheskiy slovar-spravochnik po metallurgii* [Encyclopaedia – Handbook in Metallurgy]. Lipetsk, 1998, 780 p. (In Russ.)
9. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskiy G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Agglomeration of ore materials]. Yekaterinburg, 2003, 400 p. (In Russ.)
10. Bazilevich S.V., Wegman E.F. *Agglomeratsiya* [Agglomeration]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 368 p. (In Russ.)

Received 30/11/16

Образец для цитирования

Исследование влияния добавок серпентинитомagnesитов Халиловского месторождения на показатели агломерационного процесса в АО «Уральская сталь» / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №1. С. 20–26. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-20-26

For citation

Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N., Shevchenko E.A. Studying the effect of the addition of serpentinite-magnesite from the khalilovo field on the performance of Ural steel's sintering plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 20–26. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-20-26

МЕТАСТАБИЛЬНОЕ РАВНОВЕСИЕ ТЕТРАГОНАЛЬНОГО БЕЙНИТНОГО ФЕРРИТА И АУСТЕНИТА СТАЛЕЙ С БЕСКАРБИДНЫМ БЕЙНИТОМ

Мирзаев Д.А., Мирзоев А.А., Булдашев И.В., Окишев К.Ю.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация

Постановка задачи: известно, что в сталях, легированных алюминием и кремнием, при распаде переохлаждённого аустенита возможно образование бескарбидного бейнита. В последние годы кремнистые стали с «бескарбидным бейнитом» начали использовать для производства труб после того, как Бхадешия в ряде работ обнаружил высокий потенциал увеличения их конструкционной прочности. Основной особенностью подобных сталей является превращение аустенита в феррит, который имеет не кубическую, а тетрагональную решетку. Используя методы первопринципного моделирования, Бхадешия рассчитал диаграмму равновесия тетрагонального феррита (α') и аустенита (γ), причем оказалось, что равновесная концентрация углерода в феррите многократно превосходит таковую в кубическом феррите, чем и объяснялась причина роста прочности. Однако указанный расчет имеет ряд серьезных недостатков и скорее является качественным. **Цель работы, новизна:** в настоящей работе впервые проведен термодинамический анализ равновесия тетрагонального феррита и аустенита на примере сплавов Fe-C, но при запрете на выделение карбида в ходе бейнитного превращения. **Используемые методы:** Анализ основан на модели регулярного твердого раствора внедрения Чипмана. Химические потенциалы вычислялись суммированием соответствующих выражений для α -фазы с кубической решеткой и «тетрагональных» добавок по теории Зинера-Хачатуряна. Условие равенства химических потенциалов компонентов для двух фаз позволило рассчитать граничные концентрации углерода в α - и γ -фазах. **Результаты:** установлено, что в тетрагональной α -фазе рассчитанная концентрация углерода в 40-60 раз выше, чем для обычного кубического феррита, находящегося в равновесии с γ -фазой. **Практическая значимость:** это подтверждает качественные выводы Бхадешии и открывает новые возможности конструирования высокопрочных сталей со структурой бескарбидного бейнита.

Ключевые слова: тетрагональность, бейнитный феррит, химическое равновесие, теория Зинера-Хачатуряна

Введение

Существует несколько температурных интервалов распада переохлажденного аустенита углеродистых и легированных сталей, различающихся структурной формой и фазовым составом продуктов превращения [1]. Бейнит, возникающий на промежуточной ступени, похож на мартенсит, однако рейки верхнего бейнита содержат выделения Fe_3C параллельно боковой грани, тогда как в пластинах нижнего бейнита выделения цементита ориентированы под углом $60-70^\circ$ к оси пластины. Выделение частиц цементита, по-видимому, не является необходимым признаком бейнитной реакции, так как во многих сталях, в особенности легированных алюминием и кремнием, вообще возникает бескарбидный верхний и нижний бейнит [1-3]. Появление бескарбидного верхнего бейнита как будто наблюдали в сталях 18X2H2M, 15XH3MФ и им подобных.

Образование бескарбидного бейнита α' должно проходить по реакции $\gamma \rightarrow \gamma' + \alpha'$, где γ – аустенит исходного состава, γ' -фаза обогащена углеродом, а ферритная α' -фаза обеднена им. При изотермической выдержке составы γ' - и α' -фаз приближаются к граничным концентрациям двухфазной области $\gamma' + \alpha'$. Следовательно, устойчивость γ -фазы нарастает при увеличении длительности выдержки. Если мартенситная точка остаточного аустенита лежит ниже комнатной температуры, то бескарбидный бейнит фактически оказывается аустенитно-ферритной структурой. Последующий отпуск приводит к дополнительному перераспределению углерода между аустенитом и ферритом, что влияет на количество остаточного аустенита, содержание в нем углерода, устойчивость и уровень свойств. Изотермически закаленная сталь с бескарбидным бейнитом обладает [1-3] высоким уровнем конструкционной прочности, тогда как появление частиц карбида приводит к резкому снижению сопротивления удару.

Таким образом, в сталях с бескарбидным бейнитом возникает равновесие феррит-аустенит, которое можно изучать при низких температурах.

Бхадешия одним из первых обратил внимание [4–5] на отмеченные свойства кремнистых сталей. Им были разработаны новые высокоуглеродистые Mn-Si-стали, в которых при изотермической закалке возникают тонкие (до 20 нм) пластины или рейки бейнитного феррита и сохраняется остаточный аустенит, который при пластической деформации превращается в мартенсит, что обеспечивает прекрасное сочетание пластичности и прочности.

Удивительным явилось то обстоятельство, что бейнит в этих сталях имеет тетрагональную кристаллическую решетку, что ранее не наблюдалось, вероятно, вследствие выделения карбидов. Факт тетрагональности подтвержден прямыми экспериментами в работе [6]. Бхадешия представил [7] диаграмму равновесия тетрагонального феррита (α') и аустенита (γ) при различных температурах. Оказалось, что равновесная концентрация углерода в феррите увеличилась при этом многократно. Однако проведенный автором расчет изменения энергии растворения углерода при переходе от кубического к тетрагональному ферриту имеет ряд серьезных недостатков. В кубическом феррите углерод равномерно распределен между тремя подрешетками октапор (x -, y -, z -типа). Бхадешия, как обычно при первопринципных расчетах, использовал периодические граничные условия, а в суперячейку помещал единственный атом углерода. Такие условия «транслируют» данный атом всегда в подрешетку одного вида. Поэтому фактически Бхадешия рассчитал энергию растворения углерода в кубическом феррите с содержанием углерода 1,3 мас.%. В естественных условиях такой кубический феррит не стабилен; подобно мартенситу он должен приобрести тетрагональную решетку, вытянутую вдоль оси z с отношением $c/a=1,059$ [8]. В реальности, чтобы создать такой кубический феррит, необходимо к тетрагональному кристаллу приложить сжимающее вдоль оси z и растягивающие вдоль осей x и y напряжения, которые увеличат полную энергию системы за счет дополнительного вклада упругой энергии. Эта добавочная энергия должна приводить к увеличению энергии растворения углерода в кубической ферритной фазе. Второй недостаток подхода состоит в том, что не был выполнен учет изменения энтропии углерода при переходе от неупорядоченного распределения к упорядоченному в z -подрешетке для тетрагонального феррита. Полученная Бхадешия фазовая диаграмма важна для понимания направлений развития данного класса сталей. Од-

нако точный расчет такой диаграммы возможен только при знании химических потенциалов углерода и железа применительно на первых шагах к углеродистым сталям. В связи с этим данная статья посвящена анализу химических потенциалов тетрагонального феррита (α') и строгому расчету диаграммы равновесия $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$.

Химические потенциалы компонентов кубического феррита

Теория идеальных растворов внедрения, в том числе углерода в железе, была разработана в работах [9–10]. На ее основе получено выражение для термодинамической вероятности W и энтропии S распределения n атомов углерода по βN октаэдрическим порам решетки железа:

$$S = k_B \ln W = -k_B \left(n_C \ln \frac{n_C}{\beta N - n_C} + \beta N \ln \frac{\beta N - n_C}{\beta N} \right), \quad (1)$$

где n_C и N – количество растворенных атомов углерода и атомов растворителя, а β – число октаэдрических пор, приходящихся на атом железа ($\beta=1$ для ГЦК и $\beta=3$ для ОЦК решетки железа).

Энтропийные вклады в молярные химические потенциалы компонентов составят:

$$\begin{aligned} \mu_{C(S)}^{\alpha} &= RT \ln \frac{x_C^{\alpha}}{3 - 4x_C^{\alpha}}; \\ \mu_{C(S)}^{\gamma} &= RT \ln \frac{x_C^{\gamma}}{1 - 2x_C^{\gamma}}; \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \mu_{Fe(S)}^{\alpha} &= RT \ln \frac{3 - 4x_C^{\alpha}}{3(1 - x_C^{\alpha})}; \\ \mu_{Fe(S)}^{\gamma} &= RT \ln \frac{1 - 2x_C^{\gamma}}{1 - x_C^{\gamma}}, \end{aligned} \quad (2b)$$

где x_C и x_{Fe} – атомные доли углерода и железа в α - или γ -растворах.

Если за стандартное состояние углерода в растворе принять графит, то его растворение в железе формально можно разделить на ряд этапов: 1) диссоциация графита на отдельные атомы C с учетом энергии нулевых колебаний; 2) помещение атомов C в октаэдрические поры железа, при котором возникает потенциальная энергия E связи $C-Fe$, кинетическая энергия и энтропия колебаний атомов углерода; 3) включение взаимодействия ΔU атомов углерода друг с другом в образце, содержащем N атомов железа, которое изменит и вибрацион-

ную энтропию ΔS^* . Поскольку два первых вклада пропорциональны числу атомов C , то они войдут только в химический потенциал атомов углерода. Обозначим их сумму как ${}^0\phi_C$. Третье слагаемое при точном расчете имеет вид $\beta \left(\frac{x_C}{\beta(1-x_C)} \right)^2 (\Delta U - T\Delta S^*)$, поэтому после дифференцирования оно войдет в выражения для химических потенциалов обоих компонентов [10]:

$$\mu_{Fe} = {}^0G_{Fe} + \beta \left(\frac{x_C}{\beta(1-x_C)} \right)^2 (\Delta U - T\Delta S^*) + \beta \cdot RT \ln \frac{\beta(1-x_C) - x_C}{\beta(1-x_C)}; \quad (3a)$$

$$\mu_C = {}^0G_C^{\text{гп}} + \phi_C^0 - 2 \frac{x_C}{(1-x_C)} (\Delta U - T\Delta S^*) + RT \ln \frac{x_C}{\beta(1-x_C) - x_C}, \quad (3б)$$

где ${}^0G_{Fe}$ – свободная энергия чистого α - или γ -железа, а ${}^0G_C^{\text{гп}}$ – свободная энергия графита. Уравнения (3а, б) отражают модель регулярных растворов внедрения, использованную в работах Чипмана, Агрена и др. В отечественной литературе широкое распространение получила также модель блокировки, разработанная Темкиным, Шварцманом и Могутновым [10]. Согласно ей

$$\mu_C = {}^0G_C^{\text{гп}} + \phi_C^0 + \frac{\beta}{m} \ln \left(\frac{x_C}{\beta(1-x_C) - mx_C} \right); \quad (4a)$$

$$\mu_{Fe} = {}^0G_{Fe} + \frac{\beta}{m} \ln \left(\frac{\beta(1-x_C) - mx_C}{\beta(1-x_C)} \right), \quad (4б)$$

где ${}^0\phi_C$ – свободная энергия перехода 1 моля атомов углерода из графита в бесконечно разбавленный раствор углерода в железе; ${}^0G_{Fe}$ – молярная свободная энергия чистого α - или γ -железа. Для аустенита принимают $m^\gamma = 4$, что соответствует образованию кластеров Fe_4C . Для феррита мы примем также $m^\alpha = 4$, поскольку первопринципное моделирование также выявило отталкивание центрального атома C от окружающих его атомов углерода [11].

В этой модели химические потенциалы компонентов, рассчитанные Могутновым [10], имеют следующий вид:

$$\tilde{\mu}_{Fe}^\gamma = {}^0G_{Fe}^\gamma + \frac{1}{4} RT \ln \frac{1-5x_C^\gamma}{1-x_C^\gamma} - 3035 \left(\frac{x_C^\gamma}{1-x_C^\gamma} \right)^2; \quad (5a)$$

$$\tilde{\mu}_C^\gamma = {}^0G_C^{\text{гп}} + 40290 - 12,89T + 6070 \frac{x_C^\gamma}{1-x_C^\gamma} + RT \ln \frac{x_C^\gamma}{1-5x_C^\gamma}; \quad (5б)$$

$$\tilde{\mu}_{Fe}^\alpha = {}^0G^\alpha + \frac{3}{4} RT \ln \frac{1-\frac{7}{3}x_C^\alpha}{1-x_C^\alpha}; \quad (5в)$$

$$\tilde{\mu}_C^\alpha = {}^0G_C^{\text{гп}} + 95818 - 41,92T + RT \ln \frac{x_C^\alpha}{1-\frac{7}{3}x_C^\alpha}. \quad (5г)$$

Химические потенциалы компонентов тетрагонального феррита

При переходе к тетрагональному ферриту возникают поправки к выражениям (5в) и (5г): $\Delta\mu_C^{\alpha'}$ и $\Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$, обусловленные упорядочением атомов углерода в одной (z -) из существующих подрешеток внедрения. Следовательно, для полных химических потенциалов компонентов имеем

$$\mu_C^{\alpha'} = \mu_C^\alpha + \Delta\mu_C^{\alpha'}; \quad \mu_{Fe}^{\alpha'} = \mu_{Fe}^\alpha + \mu_{Fe}^{\alpha'}. \quad (6)$$

Такое разделение удобно еще и потому, что в теории К. Зинера [12] и А. Хачатуряна [13] свободная энергия сплава в упорядоченном состоянии также разделена на два аналогичных слагаемых.

Идея их теории заключается в том, что избыток атомов C в октапорах одного, например, z -типа по сравнению с хаотическим распределением создает анизотропную деформацию кубической решетки или «эффективное» напряжение, которое заставляет упругие диполи ориентироваться вдоль оси z . Согласно данной теории свободная энергия системы атомов углерода в альфа-фазе железа при z -упорядочении с параметром порядка η и заданных температуре и концентрации углерода имеет вид

$$\Delta G(c, T, \eta) = G^{\alpha'}(c, T, \eta) - G^{\alpha'}(c, T, 0) = -\frac{1}{3} Nc^2 \lambda_0 \eta^2 + \frac{k_B T n_C}{3} [2(1-\eta) \ln(1-\eta) + (1+2\eta) \ln(1+2\eta)], \quad (7)$$

где $\eta = \frac{n_c^z - \frac{1}{3}n_c}{\frac{2}{3}n_c}$ есть параметр порядка, отражающий избыток атомов углерода в z -октаэдрических порах по сравнению с тем количеством, которое должно быть при равномерном

заполнении атомами углерода пор типа z , x , и y ($n_c^x = n_c^y = n_c^z = \frac{n_c}{3}$). В выражении (7) λ_0 – параметр

деформационного взаимодействия, $c = \frac{n_c}{N} = \frac{x_c}{1-x_c}$,

T – абсолютная температура, k_B – постоянная Больцмана; $G(c, T, 0)$ – свободная энергия раствора при $\eta = 0$, т.е. в неупорядоченном состоянии. Для того чтобы свободную энергию отнести к одному молю твердого раствора, следует положить $N = N_0(1-x_c^a)$, а $n_c = N_0 \cdot x_c^a$, где N_0 – число Авогадро. Отметим, что при точном расчете энтропийного слагаемого в квадратных скобках выражения (7) для свободной энергии $G(c, T, \eta)$

возникает слагаемое $-RT \cdot x_c^a \ln 3$, где число 3 отражает количество октаэдрических пор, приходящихся на атом железа в ОЦК-решетке. Именно это слагаемое обеспечивает требуемую отрицательность энтропийного вклада. Несомненно, что такое слагаемое появлялось в расчетах Зинера и Хачатуряна, однако в явном виде в их работах оно не записано. По-видимому, авторы полагали, что аналогичный вклад содержится и в функции $G(c, T, 0)$ для неупорядоченного феррита, а потому эти вклады взаимно сокращаются. Следуя традиции, мы также опустили данное слагаемое. Ошибки при этом не возникает, потому что эта величина, содержащаяся в уравнении для свободной энергии неупорядоченного феррита, автоматически переходит и в термодинамическую функцию тетрагонального феррита.

В равновесном состоянии степень порядка η имеет [13] температурную и концентрационную зависимость вида

$$\frac{k_B T(1-x_c^a)}{\lambda_0 x_c^a} = \frac{\eta}{\ln\left(\frac{1+2\eta}{1-\eta}\right)}. \quad (8)$$

Детальный анализ устойчивости процесса упорядочения [14] показал, что зависимость (8) проявляется только на интервале $0,5 \leq \eta \leq 1$. Значение $\eta=0,5$ является критическим. При соответствующей этому значению температуре T_C

$$T_C = 0,361 \frac{\lambda_0}{k_B} \frac{x_c^a}{1-x_c^a} \quad (9)$$

должен проявиться фазовый переход типа порядок-беспорядок. Прохождение через эту температуру в условиях нагрева будет сопровождаться скачкооб-

разным снижением степени порядка от 0,5 до нуля. В случае охлаждения порядок также возникает скачкообразным образом. При расчете добавок к химическим потенциалам, вызванных возникновением тетрагональности, важно учесть, что оба слагаемых в (7) являются произведением функций от концентрации x_C^a (или x_{Fe}^a) и степени порядка η , которая в свою очередь согласно (8) зависит от концентрации, то есть

$$\Delta G = \Lambda_1(x_C^a)R_1(\eta) + \Lambda_2(x_C^a)R_2(\eta).$$

По правилу дифференцирования произведений

$$\frac{\partial}{\partial x_C^a} \Delta G = \frac{\partial \Lambda_1}{\partial x_C^a} R_1(\eta) + \frac{\partial \Lambda_2}{\partial x_C^a} R_2(\eta) + \left(\Lambda_1 \frac{\partial R_1}{\partial \eta} + \Lambda_2 \frac{\partial R_2}{\partial \eta} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x_C^a}.$$

Но так как функции Λ_1 и Λ_2 не зависят от η , их можно внести под знак дифференцирования, и тогда в скобках окажется производная $\left(\frac{\partial \Delta G_y}{\partial \eta} \right)_{x_C^a}$,

которая для равновесных условий равна нулю. Следовательно, дифференцирование по η при расчетах химических потенциалов снимается. Результаты расчета «тетрагональных» добавок к химическим потенциалам компонентов таковы:

$$\begin{aligned} \Delta \mu_C^a = & -\frac{2}{3} \eta^2 N_0 \lambda_0 \frac{x_C^a}{1-x_C^a} + \\ & + \frac{1}{3} RT [2(1-\eta) \ln(1-\eta) + \\ & + (1+2\eta) \ln(1+2\eta)]; \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\Delta \mu_{Fe}^a = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{x_C^a}{1-x_C^a} \right)^2 \lambda_0 \eta^2. \quad (10б)$$

Уравнения равновесия и расчет фазовой диаграммы

Используя условия химического равновесия двух неупорядоченных фаз

$$\mu_C^a = \mu_C^y; \quad (11a)$$

$$\mu_{Fe}^a = \mu_{Fe}^y \quad (11б)$$

и подставив в них выражения (5а–г), получим систему двух трансцендентных уравнений относительно x_C^a и x_C^y :

$${}^0G_{Fe}^{\gamma} - {}^0G_{Fe}^{\alpha} + \frac{RT}{4} \left(\ln \left(\frac{1-5x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right) - 3 \ln \left(\frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right) \right) - 3035 \left(\frac{x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right)^2 = 0; \quad (12a)$$

$$55528 - 29,03T - 6070 \frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} - RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-5x_C^{\gamma}} \cdot \frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{x_C^{\alpha}} \right) = 0. \quad (12b)$$

Аналогичные условия

$$\mu_C^{\alpha'} = \mu_C^{\gamma}; \quad \mu_{Fe}^{\alpha'} = \mu_{Fe}^{\gamma} \quad (13)$$

для случая равновесия тетрагонального бейнита с аустенитом приводят при использовании выражений (6), (9а, б) и (11а, б) к следующей системе трансцендентных уравнений:

$${}^0G_{Fe}^{\gamma} - {}^0G_{Fe}^{\alpha} + \frac{RT}{4} \left(\ln \left(\frac{1-5x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right) - 3 \ln \left(\frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha'}}{1-x_C^{\alpha'}} \right) \right) - 3035 \left(\frac{x_C^{\alpha'}}{1-x_C^{\alpha'}} \right)^2 - \frac{1}{3} N_A \left(\frac{x_C^{\alpha'}}{1-x_C^{\alpha'}} \right) \lambda_0 \eta^2 = 0; \quad (14a)$$

$$55528 - 29,03T - 6070 \frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} - RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-5x_C^{\gamma}} \cdot \frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha'}}{x_C^{\alpha'}} \right) - \frac{2}{3} \eta^2 N_A \lambda_0 \frac{x_C^{\alpha'}}{1-x_C^{\alpha'}} + \frac{1}{3} RT (2(1-\eta) \ln(1-\eta) + (1+2\eta) \ln(1+2\eta)) = 0. \quad (14b)$$

Решение систем уравнений (10а, б) и (14а, б) для различных значений температуры было выполнено численно в программном пакете Mathcad.

Значения разности свободных энергий гам-

ма- и альфа-фаз чистого железа взяты из монографии [10]. Как известно, значение константы деформационного взаимодействия λ_0 достоверно неизвестно. Расчеты методами компьютерного моделирования [15–19] дают значения от 5,5 до 10,7 эВ/атом, причем первое относится к ситуации, когда углерод уже способен образовывать плоские кластеры [17]. Поэтому первый расчет был проведен для значения $\lambda_0=8,5$ эВ/атом (отметим, что энергия деформационного взаимодействия в формуле (7) входит со знаком минус, поэтому λ_0 – величина положительная). Результаты расчета граничных концентраций углерода в феррите с кубической решеткой и в аустените показаны на рис. 1. В области температур $1184 > T > 996$ К они совпадают с данными [10]. Однако для случая равновесия тетрагонального бейнита и аустенита в области температур 500–900 К уравнения (14а, б) не имели действительных решений, что связано с присутствием в них слагаемого $\ln(1-5x_C^{\gamma})$, поскольку в этой области температур корень $x_C^{\gamma} > 0,2$, и тогда в уравнении (14а) возникает логарифм отрицательного числа.

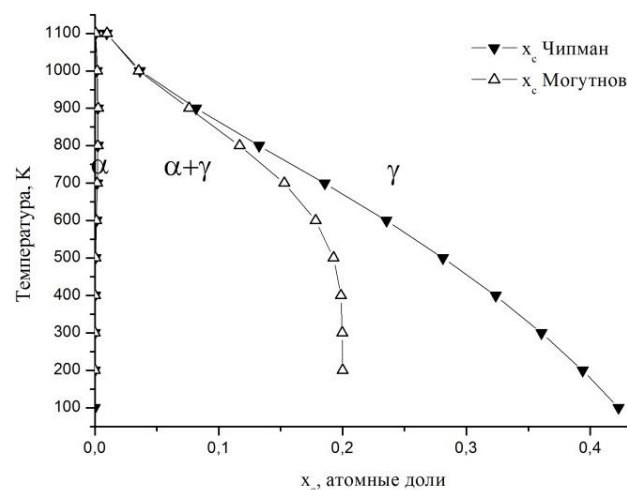


Рис. 1. Результаты расчетов равновесных составов феррита и аустенита в сплавах железо-углерод. Термодинамические функции из (12а) и (12б)

Поэтому для аустенита пришлось отказаться от модели блокировки, тем более что в последнее время против нее выдвинуты серьезные принципиальные возражения. Первопринципные расчеты показали [20, 21], что отталкивание в первой координационной сфере существенно слабее, чем во второй. Поэтому применительно к аустениту модель блокировки была заменена на известную модель регулярных растворов Чипмана [15], в которой выражения для химических потенциалов содержат более приемлемое для нашего случая слагаемое $\ln(1-2x_C^{\gamma})$.

Модель Чипмана [22] можно рассматривать как приближение регулярного твердого раствора внедрения [10]. Согласно ей химические потенциалы для компонентов раствора углерода в ГЦК-железе определяются выражениями:

$$\mu_{Fe}^{\gamma} = {}^0G_{Fe}^{\gamma} - 8830 \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right)^2 + RT \left(\frac{1-2x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right); \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} \mu_C^{\gamma} = & {}^0G_C^{\gamma} + 72118,6 + 2,72RT \ln T - \\ & - 201,35T + 8885,72 \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right) + \\ & + RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \right). \end{aligned} \quad (15b)$$

Для феррита выражения химических потенциалов сохранены без изменений (см. (5в) и (5г)).

После приравнивания химических потенциалов углерода и железа для неупорядоченных α - и γ -растворов получим вместо (14а) и (14б) новую систему уравнений, связывающую x_C^{α} и x_C^{γ} :

$${}^0G_{Fe}^{\gamma} - {}^0G_{Fe}^{\alpha} - \frac{3}{4}RT \ln \left(\frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right) - \quad (16a)$$

$$\begin{aligned} & - RT \ln \left(\frac{1-x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \right) - 8830 \left(\frac{x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right)^2 = 0; \\ & 23699,4 + 159,43T - 2,72RT \ln T - \\ & - 8885,72 \frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} - \\ & - RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \cdot \frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{x_C^{\alpha}} \right) = 0. \end{aligned} \quad (16b)$$

Результаты расчетов пограничных концентраций углерода в аустените и кубическом феррите в соответствии с (15а, б) и (16а, б) приведены на **рис. 1**. Для альфа-фазы результаты расчетов граничных концентраций обоими методами практически совпадают. Они также близки данным Могутова [10] для рассмотренного им интервала температур. Для аустенита рассчитанные концентрации углерода, как и следовало ожидать, несколько отличаются, причем различие увеличивается по мере понижения температуры.

Уравнения равновесия тетрагонального фер-

рита и аустенита принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} & {}^0G_{Fe}^{\gamma} - {}^0G_{Fe}^{\alpha} - \frac{3}{4}RT \ln \left(\frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right) - \\ & - RT \ln \left(\frac{1-x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \right) - 8830 \left(\frac{x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right)^2 - \\ & - \frac{1}{3}N_A \left(\frac{x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} \right)^2 \lambda_0 \eta^2 = 0; \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} & 23699,4 + 159,43T - 2,72RT \ln T - \\ & - 8885,72 \frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} - RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \cdot \frac{1-\frac{7}{3}x_C^{\alpha}}{x_C^{\alpha}} \right) - \end{aligned} \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{2}{3} \eta^2 N_A \lambda_0 \frac{x_C^{\alpha}}{1-x_C^{\alpha}} + \\ & + \frac{1}{3} RT (2(1-\eta) \ln(1-\eta) + (1+2\eta) \ln(1+2\eta)) = 0. \end{aligned}$$

При использовании модели Чипмана для гамма-фазы систему уравнений равновесия тетрагонального феррита и аустенита (17а) и (17б) удастся решить. Результаты расчета для значения энергии деформационного взаимодействия $\lambda_0=8,5$ эВ приведены на **рис. 2**, а в **таблице** даны равновесные пограничные концентрации углерода в вариантах кубического и тетрагонального бейнита и аустенита (в % по массе).

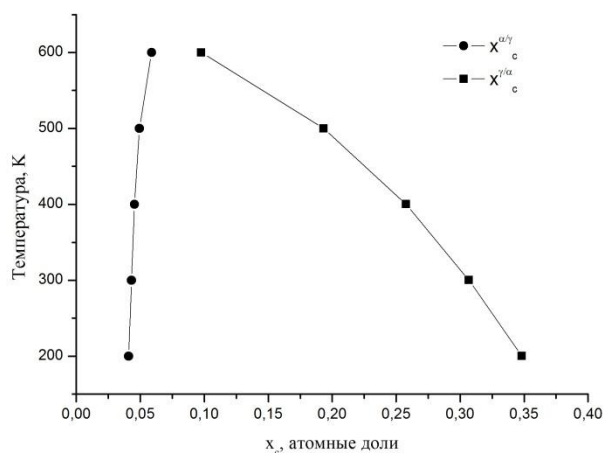


Рис. 2. Граничные концентрации углерода в тетрагональном феррите и аустените, полученные решением системы уравнений (17а)–(17б) в сплавах железо-углерода в условиях, когда выделение Fe_3C подавлено ($\lambda_0=8,5$ эВ)

Результаты расчета равновесных концентраций углерода (масс.%) в кубическом и тетрагональном феррите, граничащем с альфа-фазой, полученные решением системы уравнений (14а)–(14б) в условиях, когда выделение Fe_3C подавлено

Температура, К	Нететрагональный феррит		Тетрагональный феррит							
			$\lambda_0=10,5$ эВ/атом		$\lambda_0=8,5$ эВ/атом		$\lambda_0=6,5$ эВ/атом		$\lambda_0=2,73$ эВ/атом	
	C_α	C_γ	C_α	C_γ	C_α	C_γ	C_α	C_γ	C_α	C_γ
100	$7,99 \cdot 10^{11}$	13,609								
200	0,000007	12,267	0,722	10,43	0,909	10,30	1,222	10,08	3,296	7,999
300	0,000398	10,816	0,754	8,85	0,959	8,694	1,309	8,402	3,977	4,170
400	0,0032	9,3325	0,785	7,15	1,015	6,947	1,406	6,550		
500	0,01097	7,7566	0,842	5,21	1,105	4,904	1,578	4,222		
600	0,0242	6,2130	0,962	3,02	1,328	2,276				
700	0,03933	4,6720								
800	0,0497	3,1802								
900	0,04989	1,8749								
1000	0,03427	0,8035								
1100	0,01402	0,2084								

По отношению к кубическому, содержание углерода в тетрагональном феррите многократно увеличилось. Например, при $T=600$ К для кубического феррита оно составляет 0,024 масс.%, тогда как в тетрагональном бейните – 1,3%, т.е. увеличилось в 60 раз! Этот результат качественно подтверждает вывод Бхадешиа о том, что деформационные взаимодействия атомов С в тетрагональном бейните являются главной причиной повышенного содержания углерода в нем. Изменения температуры от 500 до 800 К приводят к относительно небольшому росту концентрации углерода в бейните. Полученный результат в какой-то мере является удивительным. Если исходный аустенит имеет концентрацию углерода 1,3% или меньше, то образование бейнита при этих температурах вообще не будет сопровождаться изменением содержания углерода, подобно образованию массивного феррита. Несомненно, что данный эффект требует экспериментальной проверки.

Следует учитывать, что легирующие элементы, взаимодействующие с углеродом, такие как Si, Mn, Al и др., могут изменять константу деформационного взаимодействия. Поэтому было изучено влияние величины λ_0 на граничные концентрации. Результаты расчета равновесных концентраций для различных значений

λ_0 показаны на **рис. 3** и в приведены в таблице, представленные в масс.%. Увеличение λ_0 до 10,5 эВ привело к уменьшению концентрации углерода в тетрагональном бейните, при этом равновесная концентрация углерода в аустените заметно уменьшилась. Отметим, что в этом случае корни системы уравнений (17а) и (17б) были получены для всех температур от 200 до 600 К. Для более низкого значения параметра деформационного взаимодействия 6,5 эВ/атом корни системы уравнений были найдены только для температур в диапазоне 200–500 К (см. **таблицу**). Мы считаем, что исчезновение корней связано с жестким условием устойчивости: $\eta \geq 0,5$. И в этом случае по-прежнему продолжается увеличение равновесной концентрации углерода в альфа-фазе при уменьшении параметра λ_0 . При значении $\lambda_0=2,73$ эВ/атом, принятого Хачатуряном [13], корни уравнения были получены лишь в температурном интервале ниже 300 К. Но для этой области наблюдается самая высокая равновесная концентрация углерода в феррите 3,3% по массе, т.е. возрастание равновесной концентрации углерода при уменьшении параметра λ_0 продолжается. Вероятно, при дальнейшем уменьшении этого параметра будет наблюдаться максимум, а затем резкий спад до значений, соответствующих кубическому ферриту.

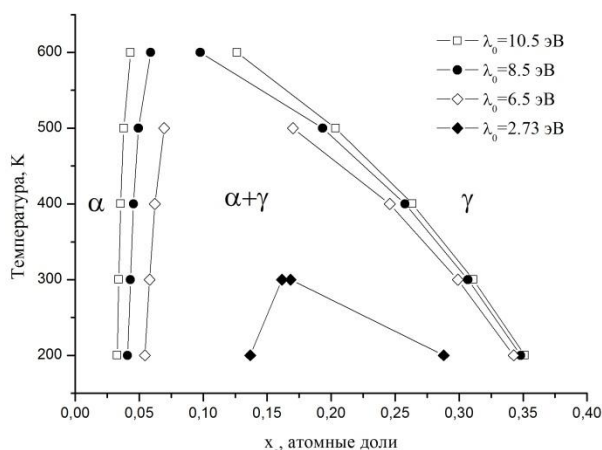


Рис. 3. Равновесные составы тетрагонального феррита и аустенита в сплавах железо-углерод, полученные решением системы уравнений (17а)–(17б) для различных значений λ_0

Итоги работы

Основываясь на физической термодинамике сплавов железо-углерод и теории Зинера–Хачатуряна для деформационного взаимодействия атомов углерода в мартенсите, построены химические потенциалы углерода и железа для тетрагонального феррита. Отличие представленной теории от теории Бхадешиа состоит в том, что в ней корректно учтено не только изменение энергии при α -упорядочении атомов углерода, но и энтропии, связанной с этим процессом. Основываясь на условии равенства химических потенциалов, записаны уравнения равновесия компонентов и найдены их решения для различных температур и значений параметра деформационного взаимодействия, а также построены диаграммы фазового равновесия $\alpha_{\text{tet}} \rightleftharpoons \gamma$.

Проведенный расчет подтверждает гипотезу Бхадешиа о том, что подавление карбидообразования при формировании бейнита (бескарбидный бейнит) приводит к тому, что растворимость углерода в нем значительно увеличивается. Наши результаты показывают 60–кратное повышение растворимости углерода, которая может составлять до 1,3 масс.%, что открывает новые возможности конструирования высокопрочных сталей на основе бескарбидного бейнита. Величина растворимости углерода в тетрагональном бейните зависит от температуры и параметра деформационного взаимодействия атомов углерода λ_0 , на которую, вероятно, можно воздействовать целенаправленным легированием.

Список литературы

1. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. М.: Металлургия, 1994. 228 с.
2. Влияние скорости охлаждения на количество остаточного аустенита при бейнитном превращении / В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина и др. // ФММ. 2014. Т. 18. № 10. С. 1052–1063.
3. Получение структуры нижнего бескарбидного бейнита в результате изотермической обработки сталей типа ХЗГМФС и ХНЗМФС / Ю.Н. Симонов, М.Ю. Симонов, Д.О. Панов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 2. С. 4–12.
4. Bhadeshia H.K.D.H., 2015, Bainite in steels: theory and practice. Maney Publishing, Leeds, UK. 2015. 616.
5. Bhadeshia H.K.D.H., 2013, Carbon in cubic and tetragonal ferrite, Philosophical Magazine, 93, (28–30), 2013, 3714–3725.
6. Caballero F.G., Miller M.K., Garcia-Mateo C., 2010, Carbon supersaturation of ferrite in a nanocrystalline bainitic steel, Acta Materialia, 58, (7), 2010, 2338–2343.
7. Jang J.H., Bhadeshia H.K.D.H., Suh D.W., 2013, Solubility of carbon in tetragonal ferrite in equilibrium with austenite, Scripta Materialia, 68, (3–4), 2013, 195–198.
8. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали. М.: Металлургия, 1960, 65 с.
9. Kaufman L., Radcliffe S.V., Cohen M., 1967, Thermodynamics of the Bainite Reaction, Trans TMS-AIME, 239, 1967, 313–352.
10. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 328 с.
11. Чирков П.В., Мирзоев А.А. Межчастичный потенциал в системе железо-углерод и проблема мартенситного перехода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2013. Т. 5. № 5. С. 114–118.
12. Zener C., 1946, Kinetics of the decomposition of austenite, Trans. AIME, 167, 1946, 550–595.
13. Khachaturyan A.G., 1983, Theory of structural phase transformations in solids. John Wiley, New York, NY, 17, 1983, 1733–1743.
14. Mirzayev D.A., Mirzoev A.A., Chirkov P.V., 2016, Ordering of Carbon Atoms in Free Martensite Crystals and When Enclosed in Elastic Matrix, Metallurgical and Material Transactions A, 47, (2), 2016, 637–640.
15. Ruban A.V., 2014, Self-trapping of carbon atoms in α -Fe during the martensitic transformation. A qualitative picture from ab initio calculations, Physical Review B, 90, (14), 2014, 144106.
16. Chirkov P.V., Mirzoev A.A., Mirzaev D.A. Investigation of the process of martensite tetrahedral distortion formation by molecular dynamics // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2014. Т. 14. № 2. С. 54–58.
17. Udyansky A., Pezold J., Bugaev V.N., et al., 2009, Interplay between long-range elastic and short-range chemical interactions in Fe-C martensite formation, Physical Review B, 79, 2009, 224112.
18. Udyansky A., Pezold J., Dick A., et al., 2011, Orientational ordering of interstitial atoms and martensite formation in dilute Fe-based solid solutions, Physical Review B, 83, (18), 2009, 184112.
19. Fan Zh., Xiao L., Jinxiu Zh., et al., Long-wavelength variation with carbon content of martensite. II. Lattice-parameter theory of the cubic-to-tetragonal transition, Physical Review B, 52, (14), 2011, 9979–9987.
20. Ponomareva A.V., Gornostyrev Y.N., Abrikosov I.A., 2014, Ab initio calculation of the solution enthalpies of substitutional and interstitial impurities in paramagnetic fcc Fe, Physical Review B, 90, (1), 2014, 014439.
21. Ридный Я.М., Мирзоев А.А., Мирзаев Д.А. Примеси углерода в парамагнитном ГЦК-железе: ab initio моделирование энергетических параметров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2015. Т. 7. № 2. С. 56–63.
22. Chipman J., 1972, Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system, Metallurgical Transactions, 3, (1), 1972, 55–64.

Материал поступил в редакцию 27.02.17

METASTABLE EQUILIBRIUM OF TETRAGONAL BAINITIC FERRITE AND AUSTENITE IN CARBIDE-FREE BAINITIC STEELS

Dzhalal A. Mirzayev – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. Phone: +7-312-65-47-13. E-mail: mirzaevda@susu.ru.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4696-8258>

Aleksandr A. Mirzoev – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. Phone: +7-312-65-47-13. E-mail: mirzoevaa@susu.ru.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1527-371X>

Ivan V. Buldashev – Postgraduate Student

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. Phone: +7-312-65-47-13. E-mail: buldashev.ivan@mail.ru

Konstantin Yy. Okishev – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation. Phone: +7-312-65-47-13. E-mail: k.okishev@inbox.ru.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6331-3050>

Abstract

Problem Statement: It is a known fact that steels alloyed with aluminium and silicon may see carbide-free bainite form during the process of supercooled austenite decomposition. In recent years silicon steels with “carbide-free bainite” have been used in pipe production. This followed Bhadeshia’s discovery of such steels’ potential for increased structural strength, which was reflected in a number of his papers. The main feature of such steels is the transformation of austenite into ferrite which has a tetragonal rather than a cubic lattice. With the help of first-principles modelling, Bhadeshia came up with a diagramme of tetragonal ferrite (α') and austenite (γ) equilibrium. It turned out that the equilibrium concentration of carbon in ferrite is times higher than in cubic lattice ferrite, which would explain higher strength. However, the above calculation has some major drawbacks and is rather of qualitative nature. **Objectives, Originality:** This paper provides the first thermodynamical analysis of the tetragonal ferrite and austenite equilibrium in Fe-C alloys with no carbides allowed during the bainitic transformation stage. **Methods Applied:** The analysis is based on Chipman’s model of regular interstitial solid solution. The chemical potentials were calculated by adding the corresponding expressions for α -phase with cubic lattice and “tetragonal” additives under the Zener-Khachaturian theory. With the help of the condition of equal chemical potentials of the components of the two phases the authors were able to calculate the borderline concentrations of carbon in α - and γ -phases. **Findings:** It was established that the calculated concentration of carbon in tetragonal α -phase is 40 to 60 times higher than in the case of common cubic lattice ferrite which is in equilibrium with the γ -phase. **Practical Relevance:** These findings support Bhadeshia’s qualitative conclusions and open up possibilities for designing high-strength carbide-free bainitic steels.

Keywords: Tetragonality, bainitic ferrite, chemical equilibrium, the theory of Zener-Khachaturian.

References

- Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. The structure of heat treated steel. Moscow: Metallurgiya, 1994. 228 p. (In Russ.)
- Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A. et al. The effect of cooling rate on the amount of residual austenite in the bainitic transformation. *Fizika metallov i metallovedenie* [The physics of metals and metallurgy], 2014, vol. 18, no. 10, pp. 1052–1063. (In Russ.)
- Simonov Yu.N., Simonov M.Yu., Panov D.O. et al. Obtaining the structure of lower carbide-free bainite through isothermal treatment of Kh3G3MFS and KhN3MFS steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals]. 2016, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.)
- Bhadeshia H.K.D.H., 2015, Bainite in steels: theory and practice. Maney Publishing, Leeds, UK. 2015. 616.
- Bhadeshia H.K.D.H., 2013, Carbon in cubic and tetragonal ferrite, *Philosophical Magazine*, 93, (28-30), 2013, pp. 3714–3725.
- Caballero F.G., Miller M.K., Garcia-Mateo C., 2010, Carbon supersaturation of ferrite in a nanocrystalline bainitic steel, *Acta Materialia*, 58, (7), 2010, pp. 2338–2343.
- Jang J.H., Bhadeshia H.K.D.H., Suh D.W., 2013, Solubility of carbon in tetragonal ferrite in equilibrium with austenite, *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, (3-4), pp. 195–198.
- Kurdyumov G.V. *Yavleniya zakalki i otpuska stali* [The phenomena of quenched and tempered steel]. Moscow: Metallurgiya, 1960, 65 p. (In Russ.)
- Kaufman L., Radcliffe S.V., Cohen M., 1967, Thermodynamics of the Bainite Reaction, *Trans TMS-AIME*, 239, 1967, pp. 313–352.
- Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. *Termodinamika zhelezouglerodistych splavov* [Thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 328 p. (In Russ.)
- Chirkov P.V., Mirzoev A.A. Interparticle potential in the iron-carbon system and the problem of martensitic transition. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2013, vol. 5, no. 5, pp. 114–118. (In Russ.)
- Zener C., 1946, Kinetics of the decomposition of austenite, *Trans. AIME*, 167, 1946, pp. 550–595.
- Khachaturyan A.G., 1983, Theory of structural phase transformations in solids. John Wiley, New York, NY, 17, 1983, pp. 1733–1743.
- Mirzayev D.A., Mirzoev A.A., Chirkov P.V., 2016, Ordering of Carbon Atoms in Free Martensite Crystals and When En-

- closed in Elastic Matrix, Metallurgical and Material Transactions A, 47, (2), 2016, 637–640.
15. Ruban A.V., 2014, Self-trapping of carbon atoms in α -Fe during the martensitic transformation. A qualitative picture from ab initio calculations, Physical Review B, 90, (14), 2014, P. 144106.
 16. Chirkov P.V., Mirzoev A.A., Mirzaev D.A. Investigation of the process of martensite tetrahedral distortion formation by molecular dynamics. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2014, vol. 14, no. 2, pp. 54–58. (In Russ.)
 17. Udyansky A., Pezold J., Bugaev V.N., et al., 2009, Interplay between long-range elastic and short-range chemical interactions in Fe-C martensite formation, Physical Review B, 79, 2009, P. 224112.
 18. Udyansky A., Pezold J., Dick A., et. al., 2011, Orientational ordering of interstitial atoms and martensite formation in dilute Fe-based solid solutions, Physical Review B, 83, (18), 2009, P. 184112.
 19. Fan Zh., Xiao L., Jinxiu Zh., et. al., Lattice-parameter variation with carbon content of martensite. II. Long-wavelength theory of the cubic-to-tetragonal transition, Physical Review B, 52, (14), 2011, P. 9979–9987.
 20. Ponomareva A.V., Gornostyrev Y.N., Abrikosov I.A., 2014, Ab initio calculation of the solution enthalpies of substitutional and interstitial impurities in paramagnetic fcc Fe, Physical Review B, 90, (1), 2014, P. 014439.
 21. Ridny Ya.M., Mirzoev A.A., Mirzaev D.A. Carbon impurities in the paramagnetic FCC lattice iron: ab initio simulation of the energy parameters. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2015, vol. 7, no. 2, pp. 56–63.
 22. Chipman J., 1972, Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system, Metallurgical Transactions, V. 3, (1), 1972, pp. 55–64.

Received 27/02/17

Образец для цитирования

Метастабильное равновесие тетрагонального бейнитного феррита и аустенита сталей с бескарбидным бейнитом / Мирзаев Д.А., Мирзоев А.А., Булдашев И.В., Окишев К.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №1. С. 27–36. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-27-36

For citation

Mirzaev D.A., Mirzoev A.A., Buldashev I.V., Okishev K.Yy. Metastable equilibrium of tetragonal bainitic ferrite and austenite in carbide-free bainitic steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 27–36. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-27-36

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХОДА ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЕМ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО ГАЗОДИНАМИКЕ В ВЕРХНЕЙ СТУПЕНИ ТЕПЛООБМЕНА

Сибгатуллин С.К.¹, Харченко А.С.¹, Бегинюк В.А.², Селиванов В.Н.¹, Чернов В.П.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задач (актуальность работы): для выплавки чугуна в доменной печи при минимальном удельном расходе дефицитного и дорогостоящего кокса целесообразно максимально заменять его природным газом. Поскольку изменение хода доменного процесса при повышении расхода газа создаёт угрозу подвисания шихты в пределах верхней ступени теплообмена, необходимо одновременно использовать мероприятия, исключающие нарушения в движении шихты. **Цель:** разработка режимов работы доменных печей, обеспечивающих снижение удельного расхода кокса дополнительным увеличением расхода природного газа в условиях верхней лимитирующей зоны по силовому взаимодействию встречных потоков. **Используемые методы (эксперименты):** на доменных печах ОАО «ММК» № 2 и 10, работающих с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию встречных потоков шихты и газа, провели исследования по снижению удельного расхода кокса увеличением потребления природного газа. На доменной печи № 10 в базовом периоде наблюдали низкую дренажную способность горна печи. Поэтому для улучшения условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой коксовой насадки в исследуемых периодах использовали марганцевую руду в количестве 650 кг/подачу. При проведении экспериментов увеличили расход природного газа на 800 м³/ч и дутья от 3328 до 3491 м³/мин. Ухудшение условий для движения шихты в верхней части печи компенсировали изменением ряда параметров плавки: повышением давления колошникового газа от 133 до 142 кПа, понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м и увеличением содержания окатышей в составе сырья от 31 до 34 %. На доменной печи № 2 возможности для роста расхода природного газа на 1900 м³/ч обеспечили совместно повышением давления колошникового газа на 4 кПа и заменой части окатышей ССГПО на окатыши Михайловского ГОКа. Увеличение горячей прочности окатышей по LTD_{+6,3} при этом составило 16,4% абс. **Новизна:** выявлены возможности совершенствования хода доменного процесса со снижением удельного расхода кокса путём повышения расхода природного газа в условиях определяющей роли силового взаимодействия встречных потоков в пределах верхней ступени теплообмена. **Результаты:** использованием мероприятий, компенсирующих негативное влияние повышения расхода природного газа на газодинамику доменной печи № 10, снизили коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи, повысили степени использования H₂ и CO. Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,76 кг/м³. На доменной печи № 2 повысили степень использования водорода и монооксида углерода соответственно на 5,9 и 0,7 % отн. Приведенный расход кокса снизили на 7,0 кг/т чугуна. Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,78 кг/м³. Дальнейшее увеличение расхода природного газа на 1000 м³/ч без компенсации его отрицательного действия на газодинамику верхней части печи сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты в этой зоне на 7,3 % отн. Опускание шихты происходило с подстоями и обрывами. Для устранения неровного схода материалов расход дутья уменьшили с 3210 до 3138 м³/мин. Увеличение расхода природного газа без учёта особенностей его действия на ход доменного процесса сопровождалось увеличением удельного расхода кокса на 8,3 кг/т чугуна. Производительность печи сократилась на 88 т/сут. **Практическая значимость:** эффективным использованием увеличенного расхода природного газа на доменных печах № 2 и 10 ОАО «ММК» снизили в период исследований среднюю величину удельного расхода кокса, приведенного к условиям базовых периодов, на 4,5 кг/т чугуна.

Ключевые слова: доменная печь, кокс, природный газ, окатыши, горячая прочность, показатель LTD, давление колошникового газа, коэффициент сопротивления шихты.

Постановка проблемы

Для обеспечения минимального удельного расхода дефицитного и дорогостоящего кокса при выплавке чугуна в доменной печи целесообразно поддерживать на максимально возможном уровне

расход природного газа. Его использование смещает процессы восстановления и при исключении нарушений в ровности схода шихты уменьшает долю эндотермических реакций [1, 2]. Расход газа может ограничиваться различными факторами. Имеют значение содержание кислорода в дутье [3-7], температура дутья [8], газодинамика процесса [9]. Изменения в ходе процессов часто учитывают через теоретическую температуру горения в фур-

менных очагах. Оптимальную величину её [10, 11] можно достигать различными способами, в том числе перераспределением между печами природного газа [12] или кислорода [13], подогревом природного газа [14]. Эффективность использования газа можно увеличивать за счет повышения его расхода в период выпуска жидких продуктов плавки и снижения в межвыпускной период [15, 16], перераспределением газа между фурмами в зависимости от расхода дутья на каждую фурму [17, 18]. При этом работа печи на оптимальных параметрах по теоретической температуре горения не устраняет проблему, связанную с увеличением объема газов в пределах верхней ступени теплообмена. Сгорание единицы метана по массе в воздушном дутье дает в 2,44 раза больше объема газа по сравнению с горением единицы массы углерода. В условиях работы печи с определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в верхней ее части рост расхода природного газа осложнит работу печи по газодинамике в зоне протяженностью 4-8 м от поверхности засыпи, что может сопровождаться подстоями столба шихты и неровным сходом материалов [19]. В связи с этим необходимо использовать мероприятия, компенсирующие отрицательное действие расхода природного газа на газодинамику верхней части печи.

Экспериментальная часть

Повышение давления газа на колошнике относится к таким мероприятиям [20–22]. Оно обеспечивает снижение его скорости и уменьшение динамического напора газа:

$$g = g_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0}; \quad (1)$$

$$h_0 = \frac{g^2 \rho T P_0}{2 P T_0}, \quad (2)$$

где g_0 – скорость газа в исходных условиях по температуре T_0 и давлению P_0 ; P и T – давление и температура газа в новых условиях его движения.

Это позволяет уменьшить степень уравнивания шихты подъёмной силой газового потока в соответствии со снижением потерь напора [23]:

$$h = \frac{\psi \cdot g^2 \rho}{2 d_{\text{ш}} \cdot \Phi \cdot \varepsilon^3}, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент сопротивления; Φ – фактор формы.

На доменных печах № 2, 10 изучили совместное действие увеличения расхода природного газа и мероприятий, позволяющих это реали-

зовать, на показатели их работы, в том числе на эффективность использования добавленного количества природного газа.

На каждой из печей исследовали по 3 периода длительностью 7–8 суток. На доменной печи № 10 в базовом периоде I наблюдали низкую дренажную способность горна печи. Количество остающегося шлака в печи составило 22,4 т (табл. 1).

Таблица 1
Показатели дренажной способности горна доменной печи № 10 в периодах I–III

Наименование показателей	Период		
	I	II	III
Длительность периода, сут	8	8	7
Расчетная вязкость шлака, Па·с	0,54	0,48	0,37
Количество остающегося в печи шлака, т	22,4	16,0	12,8

Для улучшения условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой коксовой насадки в периодах II и III использовали марганцевую руду в количестве 650 кг/подачу. Содержание марганца в чугуна и его оксида в шлаке увеличилось (табл. 2). Использование промывочного материала сопровождалось улучшением дренажной способности горна печи, на что указывает уменьшение количества остающегося в печи шлака от 22,4 т в периоде I до 16,0 т в периоде II и 12,8 т в периоде III. Вязкость шлака в периодах II и III составляла соответственно 0,48 и 0,37 против 0,5 Па·с в периоде I, что также указывает на улучшение фильтрующей способности коксовой насадки в периодах II и III.

Таблица 2
Химический состав чугуна и шлака в периоды I–III

Показатель		Период		
		I	II	III
Содержание в чугуна, %	Si	0,76	0,72	0,68
	Mn	0,36	0,49	0,41
	S	0,025	0,026	0,023
	C	4,67	4,61	4,65
Содержание в шлаке, %	SiO ₂	37,75	37,55	37,54
	Al ₂ O ₃	12,2	12,2	11,52
	CaO	36,99	36,94	37,57
	MnO	0,378	0,552	0,577
	MgO	8,71	8,66	8,24
	S	0,80	0,79	0,80
	FeO	0,25	0,25	0,27

В базовом периоде расход природного газа составил 13,4 тыс. м³/ч (76 м³/т чугуна, табл. 3). В периоде II его расход увеличили до 14 тыс. м³/ч

(79 м³/т чугуна), ориентируясь на компенсацию негативных сторон его действия на отдельные стороны хода доменного процесса повышением содержания кислорода в дутье и его температуры. Однако увеличение содержания фракции 0–5 мм в агломерате на 9,8% отн. (табл. 4) повысило коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи на 5,6 % (табл. 5) и сопровождалось признаками неровного схода материалов и

надвигающегося подвисания их. Для предотвращения неровного схода шихты снизили расход дутья от 3420 до 3328 м³/мин (см. табл. 3). В таких условиях повышение расхода природного газа оказалось неэффективным. Степень использования водорода снизилась от 32,8 до 32,5% (табл. 7). Приведенный удельный расход кокса увеличился на 3 кг/т чугуна. Однако удалось увеличить производительность печи на 45 т/сут (табл. 6).

Таблица 3

Параметры дутья в исследуемые периоды

Наименование показателей	Номер доменной печи					
	10			2		
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Длительность периода, сут	8	8	7	7	8	5
Расход: дутья						
м ³ /мин	3420	3328	3491	3113	3210	3138
м ³ /т чугуна	1229	1182	1153	1534	1457	1462
природного газа						
м ³ /т чугуна	77,0	79,0	79,5	70,1	79,1	89,7
тыс. м ³ /ч	13,4	14,0	14,8	8,4	10,3	11,3
Давление горячего дутья, кПа	249	250	263	250	257	254
Температура дутья, °С	1077	1093	1077	1155	1165	1162
Расход водяного пара, г/м ³	2,56	2,04	2,18	4,24	3,72	3,29
Содержание кислорода, %	26,1	27,1	26,8	24,7	26,0	26,6
Коэффициент равномерности соотношения расходов природного газа и обогащённого кислородом воздушного дутья по фурмам	0,81	0,83	0,83	0,71	0,73	0,71

Таблица 4

Показатели качества шихтовых материалов в исследуемые периоды

Наименование показателей	Номер доменной печи					
	10			2		
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Содержание фракции 0–5 мм в агломерате, %	9,1	10,0	8,0	8,5	8,5	8,5
Эквивалентная по поверхности крупность агломерата, мм	10,1	9,9	10,2	10,6	10,0	10,1
Содержание окатышей в шихте, %	31	33	34	39	32	31
Качество кокса %:						
по М10	9,3	9,3	9,2	8,9	9,0	8,9
по М25	86,6	86,5	87,1	86,8	86,1	86,3
Коэффициент однородности агломерата	0.55	0.55	0.58	0.56	0.56	0.54

Таблица 5

Показатели газодинамического режима

Наименование показателей	Номер доменной печи					
	10			2		
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:						
	на колошнике	0,54	0,57	0,56	0,69	0,67
в горне	7,41	7,85	7,93	7,76	7,95	7,83
Динамический напор газа на пустое сечение колошника в рабочих условиях по температуре и давлению. Н/м ²	1,80	1,77	2,05	1,54	1,59	1,62

Таблица 6

Основные технологические показатели работы доменных печей

Наименование показателей	Номер доменной печи					
	10			2		
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический	474,5	475,8	474,9	490,3	485,1	495,0
приведенный	-	477,5	472,6	-	483,3	492,5
Расход коксовой фракции, кг/т чугуна	13,5	6,4	-	-	-	-
Производительность, т/сут: по фактическому количеству загруженных подач	4007	4052	4362	2923	3173	3091
приведенная	-	4034	4202	2923	3108	3021
Эквивалентный расход кокса, кг/т чугуна	486,0	481,2	474,9	490,3	485,1	495,0
Фактический удельный расход всего топлива ($K_{удф} + K_{фр} + ПГ_{уд}$), кг/т чугуна	544,1	539,8	532,9	541,4	542,8	560,4
Показатели интенсивности хода: по дутью, м ³ /(м ³ мин)	1,70	1,65	1,73	2,27	2,34	2,29
по суммарному углероду т/(м ³ сут)	0,81	0,79	0,85	0,87	0,91	0,90
Рудная нагрузка, т/т	3,50	3,57	3,54	3,40	3,48	3,40
Содержание Fe в шихте, %	56,8	57,2	57,7	58,3	57,5	57,6

Таблица 7

Параметры колошниковога газа

Наименование показателей	Номер доменной печи					
	10			2		
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Состав колошникового газа, %:						
CO ₂	18,2	18,4	19,6	18,4	18,8	18,9
CO	25,9	26,1	24,8	24,8	25,0	25,2
H ₂	7,3	7,5	7,5	6,9	7,7	8,0
Степень использования, %:						
CO	41,2	41,3	44,1	42,6	42,9	42,8
H ₂	32,8	32,5	34,0	30,3	32,1	32,1
Температура в газоотводах, °С	189	186	181	174	158	151
Давление колошникового газа, кПа	133	133	142	146	150	150
Градиент температур по периферии, °С	275	260	160	244	284	397
Уровень засыпи фактический, м	1,20	1,20	1,36	1,32	1,39	1,39

В третьем периоде для увеличения расхода природного газа устраняли его отрицательное действие на газодинамику верха печи, руководствуясь изменением скорости газов под действием влияющих на нее факторов:

$$g_g = \frac{V_{zg} \cdot \Pi \cdot (t_{zg} + 273) \cdot P_{z0}}{S_g \cdot 273 \cdot P_{zg}}, \quad (4)$$

где V_{zg} – количество газа в верхней ступени теплообмена (м³/т чугуна), Π – производительность печи (т/сут), t_{zg} – средняя температура газа (°C), S_g – площадь сечения печи в пределах верхней ступени теплообмена (м²), P_{z0} и P_{zg} – давление газа в нормальных и рабочих условиях.

Отрицательное действие на газодинамику верхней зоны увеличения расхода природного газа на 800 м³/ч и дутья от 3328 до 3491 м³/мин в периоде III по сравнению с периодом II устранили изменением ряда параметров плавки. В том числе повышением давления газа на колошнике на 9 кПа от 133 до 142 кПа (см. табл. 7), понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м (см. табл. 7) и увеличением доли окатышей от 31 до 34%. Благоприятное действие на газодинамику верхней части печи в периоде III оказало снижение содержания мелочи в агломерате от 10 до 8% и улучшение его однородности по крупности от 0,55 до 0,58 (см. табл. 4).

В результате коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи в периоде III по сравнению с периодом II снизился на 1,75%. Увеличение расхода природного газа сопровождалось повышением степени использования H_2 и CO (см. табл. 7). Это обеспечило экономию приведенного удельного расхода кокса в периоде III по сравнению с периодом I, равную 1,9 кг/т чугуна (см. табл. 6). Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,76 кг/м³.

На доменной печи № 2 в периоде IV расход природного газа составлял 8,37 тыс. м³/ч, в периоде V – 10,26 тыс. м³/ч и в периоде VI – 11,30 тыс. м³/ч (см. табл. 3). Увеличение расхода природного газа в периоде V сопровождалось значительным повышением расхода технологического кислорода. Поскольку печь работала с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа, то негативное действие на газодинамику процесса от увеличения расхода природного газа в периоде V дополнительно компенсировали повышением давления газа на колошнике от 146 до 150 кПа (см. табл. 7).

Расчет скоростей газа в верхней части печи в периодах IV–V для различных условий процесса показал, что увеличение $P_{кт}$ на 4 кПа не обеспечит равноценного уменьшения скорости движения газового потока при росте расхода природного газа на 1900 м³/ч. Увеличение динамического напора газа на колошнике в периоде V по сравнению с периодом IV составило 3,2% (см. табл. 5). Кроме этого, в направлении ухудшения газодинамики верхней части печи действовало уменьшение содержания окатышей в шихте от 39 до 32% при снижении эквивалентной по поверхности крупности агломерата от 10,6 до 10 мм (см. табл. 4). Несмотря на это, коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи снизили в периоде V по сравнению с периодом IV на 2,9% (см. табл. 5). Одной из основных причин тому явилось увеличение прочности окатышей по LTD_{+6,3} на 16,4% абс. (29,5% отн.) в результате замены части окатышей ССГПО окатышами Михайловского ГОКа (табл. 8).

В периоде V по сравнению с периодом IV увеличились степень использования водорода и CO соответственно на 5,9 и 0,7 % отн. (см. табл. 7). Приведенный расход кокса снизился на 7,0 кг/т чугуна (см. табл. 6). Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,78 кг/м³.

Дальнейшее увеличение расхода природного газа в периоде VI по сравнению с периодом V на 1000 м³/ч без компенсации его отрицательного действия на газодинамику верхней части печи сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты в этой зоне на 7,3 % отн. (см. табл. 5). Опускание шихты происходило с подстоями и обрывами. Для устранения неровного расхода материалов расход дутья снизили с 3210 до 3138 м³/мин. Степень использования водорода осталась на прежнем уровне – 32,2 %. Неэффективное использование природного газа сопровождалось увеличением удельного расхода кокса в периоде VI по сравнению с периодом V на 8,3 кг/т чугуна (см. табл. 6). Производительность печи уменьшилась на 88 т/сут.

Таблица 8

Показатели горячей прочности железорудного сырья

Наименование показателей	Период	
	IV	V
Горячая прочность окатышей по LTD _{+6,3} , %	55,6	72,02
в том числе: ССГПО	55,6	58,62
михайловские	–	84,9
Горячая прочность агломерата по LTD _{+6,3} , %	55,5	56,2
Горячая прочность железорудных материалов по LTD _{+6,3} , %	55,5	61,3

Выводы

Совместное воздействие на доменный процесс повышением давления колошникового газа от 133 до 142 кПа, понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м и увеличением содержания окатышей в сырье от 31 до 34% позволило снизить удельный расход кокса дополнительным увеличением расхода природного газа на 2,5 м³/т чугуна. Эквивалент замены кокса газом составил 0,76 кг/м³. Уменьшение коэффициента сопротивления шихты движению газа в верхней части печи составило 1,75%, увеличились степени использования H_2 и CO.

Совместное повышение давления колошникового газа на 4 кПа и увеличение горячей прочности загружаемых окатышей по LTD_{+6,3} на 16,4% абс. обеспечило возможность увеличения расхода природного газа на 9 м³/т чугуна. Снижение коэффициента сопротивления шихты движению газа составило 2,9 %, повышение степени использования H_2 и CO – соответственно 5,9 и 0,7% отн. Получен эквивалент замены кокса природным газом, равный 0,78 кг/м³.

Список литературы

1. Bahgat, M., Abdel Halim, K.S., El-Kelesh, H.A., Nasr, M.I. Blast furnace operating conditions manipulation for reducing coke consumption and CO₂ emission // *Steel Research International*. 2012. № 83(7). P. 686–694.
2. Сибгатуллин С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // *Сталь*. 1997. № 4. С. 1–5.
3. Лялюк В.П., Товаровский И.Г. Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменных зон // *Черные металлы*. 2003. № 11. С. 13–16.
4. Анализ процессов доменной плавки при обогащении дутья кислородом / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк, А.Е. Меркулов и др. // *Бюл. ин-та «Черная металлургия»*. 2011. № 5. С. 20–33.
5. Mansheng Chu, Zhenggen Liu. Mathematical modeling and exergy analysis of blast furnace operation with natural gas // *Steel Research International*. 2013. № 84 (4). P. 333–343.
6. Интенсификация работы доменных печей подбором оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, А.В. Чевычелов и др. // *Сталь*. 2012. № 2. С. 7–11.
7. Интенсификация работы доменных печей путем оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, Н.С. Штафиев и др. // *Бюл. ин-та «Черная металлургия»*. 2011. № 6. С. 16–22.
8. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Анализ процессов доменной плавки при варьировании температуры дутья в широком диапазоне // *Бюл. ин-та «Черная металлургия»*. 2011. № 4. С. 36–49.
9. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи: монография / под ред. С.К. Сибгатуллина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 161 с.
10. Khaled S Abdel-Halim, V. N. Andronov, M. I. Nasr. Blast furnace operation with natural gas injection and minimum theoretical flame temperature // *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. № 36(1). P. 12–18.
11. Khaled S Abdel-Halim. Effective utilization of using natural gas injection in the production of pig iron // *Materials Letters*. 2007. № 61(14-15). P. 3281–3286.
12. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилева, В.В. Лавров и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. № 6. С. 45–49.
13. Спирин Н.А., Федулов Ю.В., Овчинников Ю.Н. Распределение технологического кислорода между печами доменного цеха // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. № 11–12. С. 68–72.
14. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева / С.А. Фещенко, В.И. Плешков, Б.Н. Лизунов и др. // *Металлург*. 2007. № 11. С. 44–48.
15. Овчинников Ю.Н., Мойкин В.И., Спирин Н.А. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки: монография. Челябинск, 1989. 120 с.
16. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко, Сибгатуллина М.И., Миникаев С.Р. // *Бюл. ин-та «Черная металлургия»*. 2017. № 2 (1406). С. 16–20.
17. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов и др. // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 1 (14). С. 26–26.
18. Андронов В.Н., Белов Ю.А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // *Сталь*. 2002. № 9. С. 15–17.
19. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А. Технологические решения для организации доменного процесса // *Металлург*. 2014. № 4. С. 64–71.
20. Донсков Е.Г., Лялюк В.П. Расход дутья и роль повышенного давления на современных доменных печах // *Сталь*. 2012. № 12. С. 2–6.
21. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 1. С. 14–16.
22. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В. К расчету показателей хода доменного процесса при повышенном общем перепаде давления газов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 3. С. 16–18.
23. Тарасов В.П., Тарасов П.В. Теория и технология доменной плавки. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 384 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44

IMPROVING THE BLAST FURNACE PROCESS BY RAISING THE NATURAL GAS FLOW RATE IN THE UPPER HEAT EXCHANGE STAGE

Salavat K. Sibgatullin – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519) 29-84-30. E-mail: 10skt@mail.ru

Aleksandr S. Kharchenko – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 29-84-30. E-mail: as.mgtu@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0454-6399>

Vitaly A. Beginyuk – lead specialist of the process group of the blast furnace plant

Magnitogorsk Iron & Steel Works, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 24-10-38. E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Valentin N. Selivanov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 29-84-30. E-mail: mcm@magtu.ru

Viktor P. Chernov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519) 29-84-30.

Abstract

Problem Statement (Relevance): Considering the short supply and high prices for coke it would be reasonable to minimize the consumption of coke in the production of cast iron in blast furnaces by substituting it with natural gas as much as practicable. As the higher gas flow rate changes the blast furnace process, it can create the risk of the burden suspended within the upper heat transfer stage making it necessary to take measures to prevent any irregularities in burden movement. **Objectives:** The objective is to develop operating modes that would ensure a lower specific consumption of coke together with a higher consumption of natural gas within the top zone limiting the interaction of counterflows. **Methods Applied:** Blast Furnaces ##2 and 10 of MMK with the top zone limiting the interaction of counterflows of stock and gas provided a ground for research into finding ways to reduce the specific consumption of coke by increasing the consumption of natural gas. Low hearth drainage was observed in Blast Furnace #10 during the reference period. For this reason manganese ore was added at the rate of 650 kg/charge in order to improve the filtration conditions. For experiments, the natural gas flow rate was increased by 800 m³/h, and the wind rate was increased from 3328 to 3491 m³/min. To compensate for the impacted burden movement a number of heat parameters were modified. Thus, the top gas pressure was increased from 133 to 142 kPa, the stockline was lowered from 1.2 to 1.36 m, the pellet concentration was increased from 31 to 34 %. For Blast Furnace #2, the raise of the gas flow rate by 1900 m³/h became possible due to the top gas pressure increase by 4 kPa and a partial substitution of pellets from Sokolovsk-Sarbayk Mining and Processing Plant with those from Mikhailovsky GOK. The hot strength of the pellets increased by 16.4% abs. under LTD_{+6,3}. **Originality:** The authors identified ways to improve the blast furnace process and decrease the specific consumption of coke by raising the natural gas flow rate under the conditions when the interaction of counterflows within the upper heat exchange stage is a crucial factor. **Findings:** A number of measures which compensated the impact of natural gas flow rate increase on the gas dynamics in Blast Furnace #10 helped bring down the burden resistance to gas flow at the top of the furnace and improved the H₂ and CO utilization. The coke-to-gas substitution rate amounted to 0.76 kg/m³. For Blast Furnace #2, the H₂ and CO utilization rates were raised by 5.9 and 0.7 % rel. correspondingly. The reduced rate of coke was decreased by 7.0 kg per ton of cast iron. The coke-to-gas substitution rate amounted to 0.78 kg/m³. Further increase of the gas flow rate by

1000 m³/h without compensating its impact on gas flow at the top of the furnace would result in a 7.3 % rel. increase in burden resistance in that zone and irregular stock movement. To eliminate irregular stock movement the wind rate was reduced from 3210 to 3138 m³/min. Increasing the gas flow rate without accounting for its impact on the blast furnace process resulted in the increase in the specific consumption of coke of 8.3 kg per ton of cast iron. The production rate of the furnace dropped by 88 t/day. **Practical relevance:** A decrease of 4.5 kg per ton of cast iron in the average specific consumption of coke was obtained through the efficient use of the higher natural gas flow rate in Blast Furnaces ##2 and 10 of MMK during the experimental period.

Keywords: Blast furnace, coke, natural gas, pellets, hot strength, LTD indicator, top gas pressure, the resistance coefficient of charge.

References

1. Bahgat, M., Abdel Halim, K.S., El-Kelesh, H.A., Nasr, M.I. Blast furnace operating conditions manipulation for reducing coke consumption and CO₂ emission. *Steel Research International*. 2012, no. 83(7), pp. 686–694.
2. Sibagatullin S.K. The optimum process of the direct reduction of iron from oxides. *Stal'* [Steel]. 1997, no. 4, pp. 1–5. (In Russ.)
3. Lyalyuk V.P., Tovarovsky I.G. Selecting the smelting modes for a blast furnace with a fuel enriched blast while analyzing the tuyere zone parameters. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2003, no. 11, pp. 13–16. (In Russ.)
4. Tovarovsky I.G., Lyalyuk V.P., Merkulov A.E. The analysis of the blast furnace melting process with an oxygen enriched blast. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya* [Bulletin. Ferrous Metallurgy]. 2011, no. 5, pp. 20–33. (In Russ.)
5. Mansheng Chu, Zhenggen Liu. Mathematical modeling and exergy analysis of blast furnace operation with natural gas. *Steel Research International*. 2013, no. 84 (4), pp. 333–343.
6. Gostenin V.A., Pishnograev S.N., Chevychelov A.V. et al. Intensifying the blast furnace operation through an optimum combination of natural gas and oxygen flow rates. *Stal'* [Steel]. 2012, no. 2, pp. 7–11. (In Russ.)
7. Gostenin V.A., Pishnograev S.N., Shtafienko N.S. et al. Intensifying the blast furnace operation through an optimum combination of natural gas and oxygen flow rates. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya* [Bulletin. Ferrous Metallurgy]. 2011, no. 6, pp. 16–22. (In Russ.)
8. Tovarovsky I.G., Merkulov A.E. The analysis of the blast-furnace processes with largely varying blast air temperatures. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya* [Bulletin. Ferrous Metallurgy]. 2011, no. 4, pp. 36–49. (In Russ.)
9. Sibagatullin S.K. *Zakonomernosti dvizheniya shihty i gaza v domennoj pechi: monografiya* [Blast furnace charge material and gas movement patterns: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 161 p. (In Russ.)
10. Khaled S Abdel-Halim, V. N. Andronov, M. I. Nasr. Blast furnace operation with natural gas injection and minimum theoretical flame temperature. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009, no. 36(1), pp. 12–18.

11. Khaled S Abdel-Halim. Effective utilization of using natural gas injection in the production of pig iron. *Materials Letters*. 2007, no. 61(14–15), pp. 3281–3286.
12. Spirin N.A., Gileva L.Yu., Lavrov V.V. et al. Optimizing the natural gas distribution in a blast furnace shop following a change in the smelting parameters. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 2014, no. 6, pp. 45–49. (In Russ.)
13. Spirin N.A., Fedulov Yu.V., Ovchinnikov Yu.N. The distribution of the process oxygen between the blast furnaces within a single shop. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 1993, no. 11–12, pp. 68–72. (In Russ.)
14. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N. et al. Improving the blast furnace process by injecting natural gas due to it being heated. *Metallurg* [Metallurgist]. 2007, no. 11, pp. 44–48. (In Russ.)
15. Ovchinnikov Yu.N., Moykin V.I., Spirin N.A. *Nestacionarnye processy i povyshenie jeffektivnosti domennoj plavki. Monografija* [Non-stationary processes and optimized blast furnace operation: Monograph], Chelyabinsk, 1989. 120 p. (In Russ.)
16. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Kharchenko E.O., Sibagatullina M.I., Minikaev S.R. Improving blast furnace short-term reduction in natural gas consumption. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya* [Bulletin. Ferrous Metallurgy]. 2017, no. 2(1406), pp. 16–20. (In Russ.)
17. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. et al. Stabilizing the ratios of natural gas and wind flow rates by tuyere. *Teoriya i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva* [Metallurgical theory and technology]. 2014, no. 1(14), pp. 26–26. (In Russ.)
18. Andronov V.N., Belov Yu.A. Analysing the efficiency of blast and natural gas distribution by tuyere. *Stal'* [Steel]. 2002, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.)
19. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Technological solutions for the blast furnace process. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 4, pp. 64–71. (In Russ.)
20. Donskov E.G., Lyalyuk V.P. Blast consumption and the role of high pressure in modern blast furnaces. *Stal'* [Steel]. 2012, no. 12, pp. 2–6. (In Russ.)
21. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. Intensified gas flow in a blast furnace with an increased overall differential pressure. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 14–16. (In Russ.)
22. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. On the calculation of process indicators for a blast furnace with an increased overall differential pressure of gases. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 3, pp. 16–18. (In Russ.)
23. Tarasov V.P., Tarasov P.V. *Teoriya i tekhnologiya domennoj plavki* [Blast furnace theory and technology]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2007. 384 p. (In Russ.)

Received 30/01/17

Образец для цитирования

Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Селиванов В.Н., Чернов В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 37–44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44

For citation

Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Selivanov V.N., Chernov V.P. Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchnage stage. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 37–44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ УЛУЧШЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Румянцев М.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Актуальность работы: для черной металлургии Российской Федерации важное значение имеет задача внедрения технологий, которые позволят повысить эффективность существующих производств и конкурентоспособность выпускаемой продукции, а также освоить производство современных видов металлопроката. В связи с потребностью в ускоренном выполнении и реализации соответствующих разработок актуальна проблема выявления и внедрения методов, которые минимизируют время поиска рационального комплексного решения при достаточно высокой его достоверности. **Цель работы:** в статье представлены результаты исследований, выполненных с целью развития методов для оперативной разработки режимов прокатки, а также создания и совершенствования средств математического моделирования и оценивания результативности технологических процессов и операций листопрокатного производства с целью улучшения эффективности листопрокатных технологических систем за счет расширения сортамента, улучшения качества продукции, ресурсо- и энергосбережения. **Используемые методы:** при выполнении исследований применялись теория систем, математическое и компьютерное моделирование; статистические методы анализа, а также контроля и управления качеством продукции; наблюдения за объектами листопрокатного производства с целью изучения и обобщения опыта их функционирования; производство экспериментальных партий проката. **Новизна:** одним из результатов исследования является универсальный алгоритм и метод автоматизированного проектирования режима прокатки. Также разработаны математические модели горячей и холодной прокатки стальных листов и полос разнообразного назначения на станах различных типов. При создании компонентов математического обеспечения был разработан и применен метод построения аккомодационных моделей. С целью повышения надежности и объективности выводов рекомендован и адаптирован метод оценки соответствия характеристик как технологического процесса, так и качества продукции. **Практическая значимость:** обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования реализован в виде компьютерных программ автоматизированного проектирования режимов прокатки на листопрокатных станах различных типов. С применением этих программ, в сочетании с методом оценки соответствия, получены технологические решения, направленные как на совершенствование производства выпускаемой продукции, так и на освоение новых видов листового проката (например, из HSLA-стали).

Ключевые слова: листовой прокат, технологическая система, технологический процесс, режим прокатки, обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки, конструирование моделей, аккомодационная модель, качество продукции, результативность процесса, статистическое оценивание, момент прокатки толстых листов, режим деформации на широкополосном стане горячей прокатки, горячекатаный прокат из HSLA-стали.

Введение

В стратегии развития отечественной черной металлургии на период 2012–2030 гг. [1] сформулированы задачи совершенствования сортамента продукции, повышения требований к ее служебным характеристикам и конкурентоспо-

собности. Также указывается на необходимость роста импортозамещения и поставок на экспорт продукции с увеличением глубины переработки. При этом прогнозируется рост доли листового проката от 43,7% в 2014 г. до 46,9–53,4% в 2030 г. Для достижения указанных целей предусмотрено как совершенствование технологий и пуск новых агрегатов на существую-

© Румянцев М.И., 2017

щих предприятиях, так и строительство новых заводов, т.е. совершенствование действующих и создание новых технологических систем (ТС).

Основополагающее определение ТС было введено применительно к машиностроительной отрасли [2]. Возможность подхода с таких позиций к производству проката впервые успешно реализована В.С. Зайцевым в разработанной им методологии проектирования прокатных цехов [3]. Здесь прокатный цех рассматривается как система, в которой осуществляется производственный процесс превращения ресурсов (физических, технических и трудовых) в готовую продукцию (прокат), предусмотренную его производственной программой. Такой подход получил развитие в работах В.Ф. Рашникова при решении задач повышения эффективности прокатного производства ОАО «ММК» [4]. При этом естественным образом предметом исследования становятся не только производственные процессы отдельных прокатных цехов, но и взаимосвязи результатов этих процессов в технологической последовательности их осуществления (в технологическом маршруте) как существенные факторы достижения цели функционирования системы в целом.

С таких позиций листопрокатную технологическую систему (ЛПТС) рассматриваем как совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций с целью получения листового проката заданного качества в требуемом количестве. Выделили следующие задачи улучшения ЛПТС:

- Совершенствование режимов прокатки выпускаемой продукции и разработки режимов прокатки новых видов проката.
- Повышение достоверности и объективности оценок результативности технологических процессов
- Подготовка высококвалифицированных исполнителей.

В.Н. Заверюха указал на два основных принципа улучшения системы: эволюции (лучшие системы возникают улучшением предыдущих) и характеристики (улучшение системы есть изменение множеств, ее характеризующих). При этом выделяются 5 групп

методов. К первой относятся методы оптимизации, которые изменяют только множество значений состояний элементов системы. Другие четыре группы составляют методы улучшения системы путем развития, т.е. за счет изменения иных множеств: элементов; состояний элементов; преобразований одних состояний элементов в другие; воздействий элементов друг на друга [5].

Любой метод улучшения системы должен быть нацелен на поиск решения, которое является если не оптимальным, то рациональным, что требует рассматривать несколько вариантов и выбирать наиболее приемлемый из них на основании определенного критерия. В указанных аспектах проявляется объективно существующая аналогия между поиском решения, направленного на улучшение ТС, и процессом проектирования, в котором на любом уровне декомпозиции объекта реализуется единый алгоритм, включающий процедуры синтеза и анализа [6–7]. С учетом усиления потребностей практики в ускорении поиска и реализации новых эффективных разработок, методы синтеза и анализа должны минимизировать время поиска рационального решения при достаточно высокой его достоверности.

Метод совершенствования режимов прокатки выпускаемой продукции и разработки режимов прокатки новых видов проката

Задача разработки режима прокатки имеет важное значение как при создании и совершенствовании технологий, так и при оценивании возможностей оборудования для выпуска новых видов листового проката и наиболее эффективно решается с применением автоматизированного проектирования. Как объект проектирования режим прокатки есть совокупность конкретных значений тех параметров системы, ее реализующей, регламентация которых обеспечивает достижение цели прокатки – при заданном расходе ресурсов получить прокат заданного качества в заданном количестве. Такая концепция отображает возможность влиять на достижение цели прокатки не только деформационными, скоростными, температурными параметрами и натяжением, но также исходным состоянием полосы и некоторыми

параметрами обрабатывающей подсистемы (например, профилировками и состоянием поверхности рабочих валков, свойствами технологической смазки и т.д.) [8].

С точки зрения алгоритмизации, задача проектирования режима прокатки рассматривается инвариантно по отношению к виду прокатываемого профиля. Особенности, присущие прокатке профилей конкретного вида, отображаются, прежде всего, в математических моделях и в комплексе ограничений, используемых в том или ином случае. Исходя из обобщенного алгоритма проектирования [6] и сформулированной концепции режима прокатки как объекта проектирования, разработаны инвариантный (обобщенный) алгоритм (рис. 1) и структура программы автоматизированного проектирования режимов прокатки. Отображаемая ими информационная система обладает большей общностью и может быть

реализована для решения задач разработки режимов прокатки профилей любого вида на любом стане.

Особенности процесса получения проката различных видов и применяемого оборудования (обрабатывающей системы) учитываются в специальном математическом обеспечении, которое необходимо не только для реализации процедур 9 и 10, но и для описания первого приближения режимов прокатки, которое синтезируется в начале проектирования последовательным исполнением процедур 4–8 (см. рис. 1). Так как точность первого приближения в значительной мере определяет и точность окончательного решения [6], является актуальной задача разработки на основании имеющегося опыта формализованных рекомендаций по выбору начальных значений параметров, характеризующих режим прокатки – суммарной и частных деформаций, скоростей прокатки, натяжений (если они используются) и т.д.

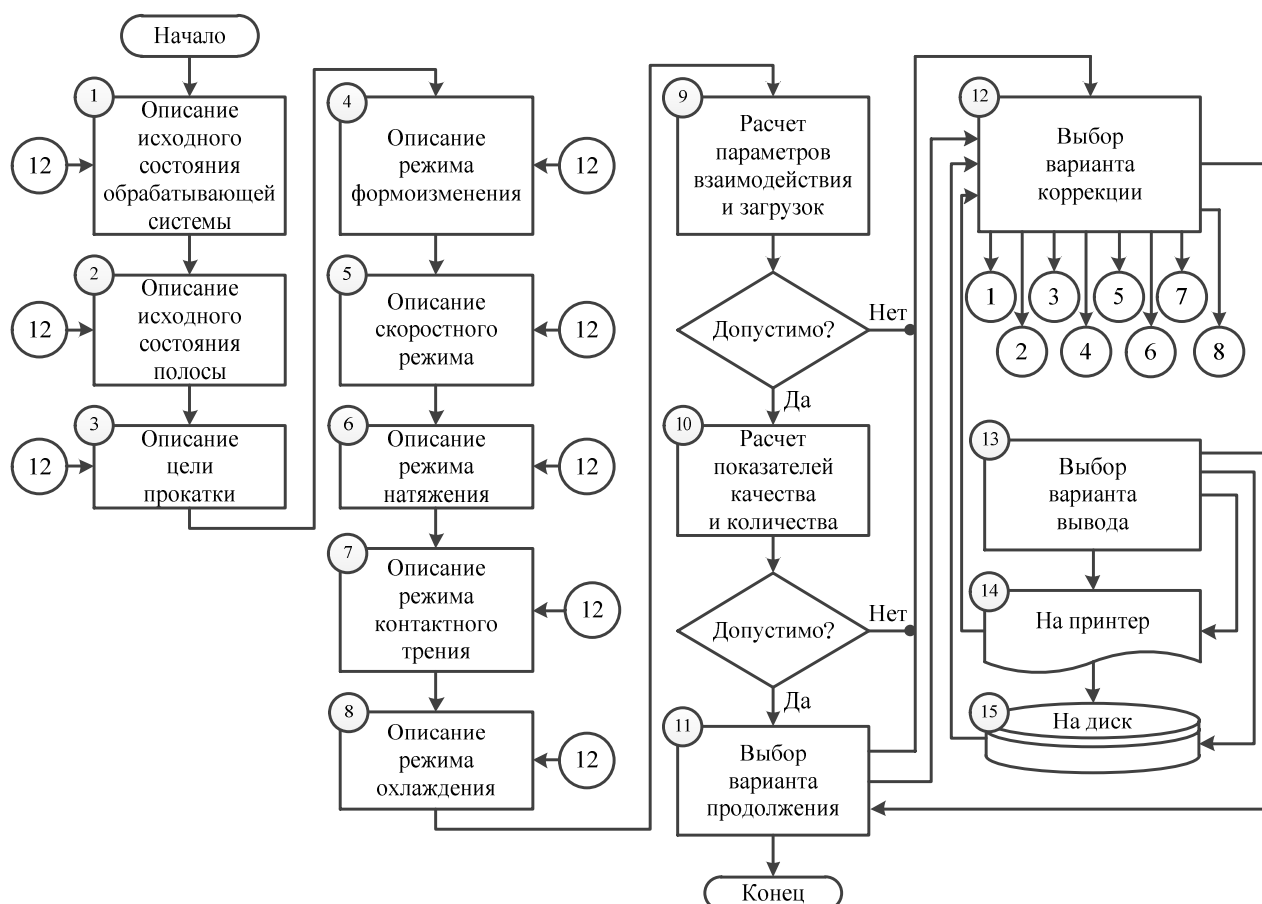


Рис. 1. Обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки

Развитие специального математического обеспечения для автоматизированного проектирования режимов прокатки

При разработке математического обеспечения для расчета параметров взаимодействия и нагрузок в системе «рабочая клеть-полоса» применяли метод конструирования моделей на основе известных теоретических решений с уточнением как отдельных формул, так и областей их применения.

Например, с целью отображения непостоянства сопротивления деформации прокатываемого металла в связи с вариациями плавочного химического состава, а также для разработки режимов прокатки марок стали, особенности сопротивления деформации которых еще не известны, разработаны модели прогноза предела текучести стали с произвольной химической композицией. Применительно к горячей прокатке за основу модели выбрана методика Андреюка-Тюленева, которая учитывает одновременное влияние 13 химических элементов и поэтому является более общей, чем распространенные за рубежом формулы S. Shida, F. Siciliano, R. Bruna, а также частные модификации формулы Y. Misaka [9–10]. Дополнение формулы Андреюка-Тюленева коэффициентом влияния фазового превращения и коэффициентом коррекции по степени и скорости деформации позволило понизить нижнюю границу доверительного интервала прогнозирования по температуре с 800 до 700°C и повысить верхнюю границу доверительного интервала по обжатиям с 30 до 55% [11].

Известные теоретические решения в связи с уточненными областями их применения интегрированы в аккомодационные модели, каждая из которых отображает одно свойство моделируемой системы несколькими известными соотношениями, а алгоритм модели предусматривает выбор одного из них в зависимости от особенностей граничных условий. Наибольшая точность прогнозирования достигается, если выбор осуществляется в зависимости от значений существенных факторов [12].

Такой вывод подтверждается также опытом построения и применения аккомодационной модели момента прокатки крупногабаритных листов*. И в отечественной (например, [13]) и в зарубежной (например, [14]) практике наиболее распространены модели, в которых момент прокатки $M_{пр}$ связан с усилием прокатки P через ко-

эффициент плеча ψ . Используя результаты наблюдений при прокатке на стане 5000 раскатов толщиной 12,0–25,4 мм и шириной 2620–4500 мм из сталей СтЗсп, 15ХСНДА, К65 и Х65 сравнили значения ψ , рассчитанные по тринадцати различным формулам, представленным в работе [13], с фактическими значениями $\psi = M_{пр} / \left[2P \sqrt{R(h_0 - h_1)} \right]$, где R – радиус вал-

ков; h_0 и h_1 – толщины раската до и после прохода. Указанные значения, а также $M_{пр}$ и P принимали по отчетам АСУ ТП стана. Стан 5000 одноклетьевого, но прокатка производится в две стадии. Для черновой стадии характерно нарастание относительных обжатий по проходам, а на чистовой относительные обжатия от первого прохода к последнему снижаются. Существенным фактором коэффициента плеча является характеристика высоты очага деформации

$m = l_x / h_{ср} = 2 \sqrt{R(h_0 - h_1)} / (h_0 + h_1)$, которая изменяется в пределах 0,36–1,72 на черновой стадии и 1,28–2,89 на чистовой. На каждой стадии с увеличением m значения ψ уменьшаются (рис. 2, а): от 0,65 до 0,47 при черновой прокатке и от 0,57 до 0,43 при чистовой. Для случаев $m < 1,4$ наименьшую погрешность дает формула, полученная Д.И. Суяровым и Ф.С. Гилевичем: $\psi = 0,4915 + 0,518m - 0,7068m^2 + 0,258m^3 - 0,02m^4$.

В диапазоне от 1,4 включительно до 2 предпочтительно использовать формулу З. Вусатовского $\psi = h_1 / (2\Delta h) \ln(h_0/h_1)$, а для случаев, когда $m \geq 2$, можно применять формулу М.М. Сафьяна и В.И. Мелешко $\psi = 0,498 - 0,0283m$. Степень соответствия момента прокатки, рассчитанного с учетом высказанных рекомендаций, и фактического момента достигает практически 99% (рис. 2, б).

Первые приближения режимов прокатки синтезированы с применением статистического анализа и аппроксимации закономерностей, наблюдаемых на практике. Например, для черновой группы широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП), где металл обжимается от толщины сляба $H_{сл}$ до толщины промежуточного раската h_p , из предположения линейного распределения коэффициентов обжатия $\eta_{Ri} = h_{0,i}/h_{1,i}$ по черновым проходам ($i=1, \dots, N_R$) получили [8]

$$\eta_{Ri} = \eta_{R1} + 2(i-1) \frac{\sqrt[N_R]{H_{сл}/h_p} - \eta_{R1}}{N_R - 1} \quad (1)$$

* Совместно с инженером И.А. Разгулиным и канд. техн. наук Д.Н. Чикишевым.

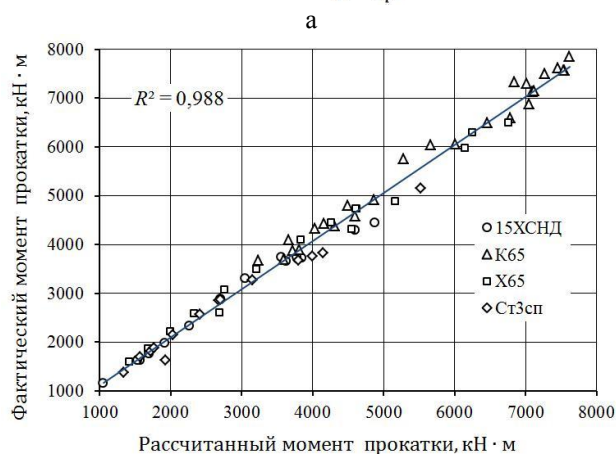
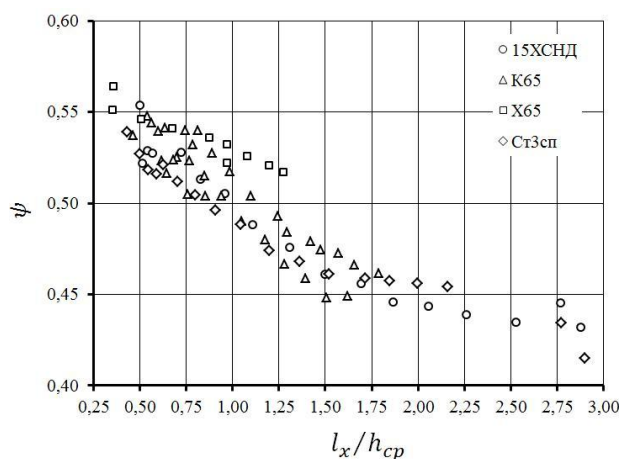


Рис. 2. Влияние высоты очага деформации на коэффициент плеча при прокатке толстых листов (а) и диаграмма соответствия рассчитанного и фактического момента прокатки (б)

Статистический анализ показал, что величина коэффициента обжатия в первом проходе, где слаб толщиной $H_{сл}$ обжимается на величину Δh_{R1} , $\eta_{R1} = H_{сл} / (H_{сл} - \Delta h_{R1})$ зависит от стратегии черновой прокатки. Так, при прокатке относительно мягких марок стали (σ_0 не более 85 МПа) а также узких раскатов характерно, что в первой клетке применяется пониженное абсолютное обжатие $\Delta h_{R1} \approx 0,135 \cdot H_{сл}$. При прокатке прочных марок стали ($\sigma_0 > 85$ МПа), а также при прокатке широких раскатов в первой клетке производится наибольшее абсолютное обжатие и его величина $\Delta h_{R1} \approx 0,037 \cdot D_p$.

Первое приближение рациональной толщины промежуточного раската h_p необходимо выбирать при заданной толщине полосы h_k , исходя из коэффициента суммарного обжатия в чистовой группе $\eta_{\Sigma F} = h_p / h_k$, значение которого определяется с применением множественной аппроксимации

$$\eta_{\Sigma F} = c_0 \cdot \sigma_0^{c_1} \cdot (b_k / L_p)^{c_2} \cdot (b_k / h_k)^{c_3} \quad (2)$$

где c_0, c_1, c_2, c_3 зависят от числа активных чистовых клеток N_F (табл. 1). Для выбора N_F разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 3.

Таблица 1
Коэффициенты аппроксимации (2)

N_F	c_0	c_1	c_2	c_3
5	0,0038	0,4814	-0,9103	0,8713
6	0,0303	-0,0498	-0,9896	0,9158
7	0,0925	-0,356	-1,0277	0,9632

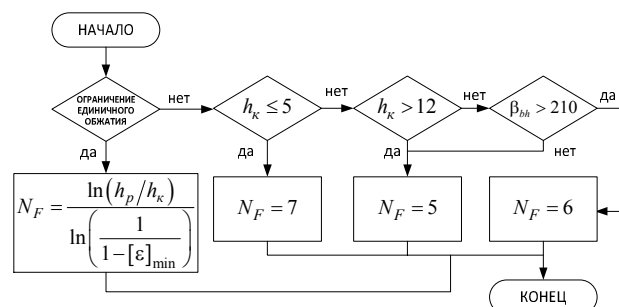


Рис. 3. Алгоритм выбора числа клеток для прокатки в чистовой группе ШСГП

Если технология предусматривает, что чистовая прокатка должна производиться с относительными обжатиями не менее чем $[\epsilon]_{\min}$, выбор числа активных клеток производится по известному соотношению между числом проходов и характеристиками суммарной и средней деформации $N_F = \ln \eta_{\Sigma F} / \ln \bar{\eta}_F$, где $\bar{\eta}_F = 1 / (1 - [\epsilon]_{\min})$ – коэффициент среднего обжатия. Если же прокатка производится без регламентации минимальной степени деформации за проход, N_F определяется следующим образом. Полосы толщиной не более 5 мм необходимо прокатывать в семи чистовых клетях, а при толщине более 12 мм использовать пять клеток. Если должна быть прокатана полоса толщиной от 5 до 12 мм, то критерием для выбора числа клеток является отношение $\beta_{bh} = b_k / h_k$. При $\beta_{bh} > 210$ используется шесть чистовых клеток, а в противном случае – пять.

Для синтеза режима обжатий в чистовой группе ШСГП применяется формула Имаи $h_{li} = h_p h_k / \sqrt[im]{\beta_{wi} h_p^{im} + (1 - \beta_{wi}) h_k^{im}}$, где $im = 0,30 + 0,21 / h_k$; β_{wi} – коэффициенты использования мощности главных приводов. Чтобы повысить обоснованность режимов обжатий, получае-

мых на основе формулы Имаи с учетом отчетливо выраженных особенностей режимов деформации при различном числе активных чистовых клетей, были исследованы распределения коэффициентов (табл. 2).

В совокупности изложенные подходы позволили обеспечить достаточно высокую степень соответствия прогнозируемых и действительных абсолютных обжатий как в черновых (рис. 4, а), так и в чистовых (рис. 4, б–в) клетях.

Таблица 2

Типовые распределения коэффициентов загрузки приводов чистовых клетей ШСГП при прокатке полос различной толщины

Вариант	Толщина полосы, мм	N_F	Клеть						
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1,2–2,5	7	0,19	0,32	0,52	0,67	0,81	0,92	1,00
2	2,6–5,0	7	0,17	0,34	0,49	0,65	0,78	0,89	1,00
3	5,1–8,0	6	0,19	0,35	0,52	0,68	0,84	1,00	–
4	8,1–12,0	6	0,16	0,30	0,47	0,62	0,80	1,00	–
5	8,1–12,0	5	0,18	0,36	0,57	0,75	1,00	–	–
6	Св. 12,1	5	0,17	0,33	0,52	0,71	1,00	–	–

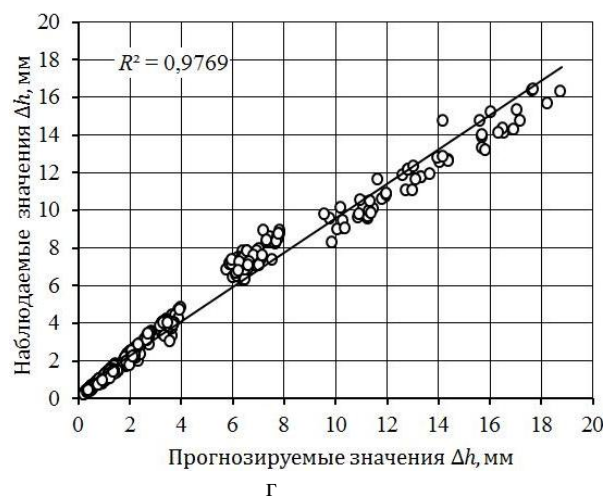
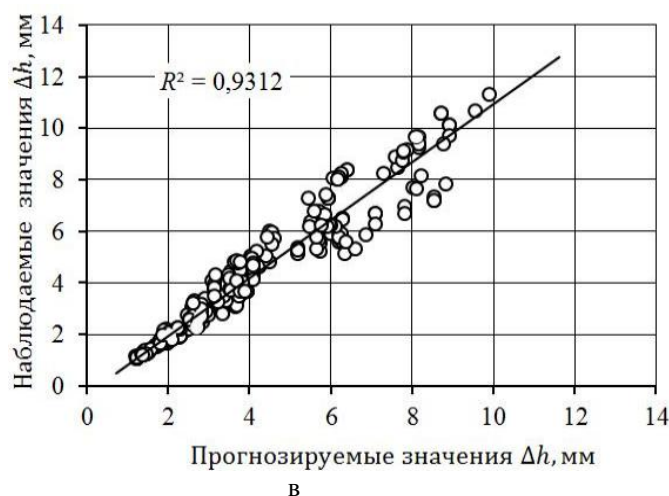
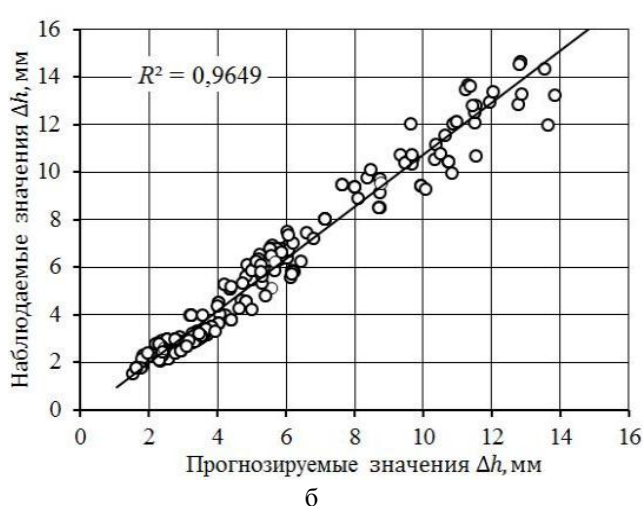
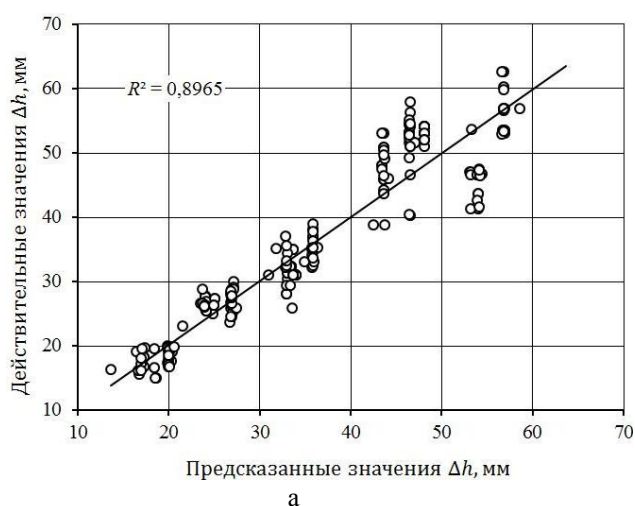


Рис. 4. Диаграммы соответствия прогнозируемых и наблюдавшихся абсолютных обжатий при прокатке в черновых (а) и чистовых (б–г) клетях при $N_F=5$ (б), $N_F=6$ (в) и $N_F=7$ (г)

Метод повышения достоверности и объективности оценок результативности технологических процессов

В связи с неизбежностью изменчивости параметров ТС для повышения объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей необходимо использовать статистические методы и квалиметрическое оценивание. Методология квалиметрии [15] и методология статистического управления процессами (SPC – Statistical Process Control) [16] были разработаны достаточно давно. Известен положительный опыт их использования в производстве различной металлопродукции (например, [17–22]). Нами было предложено [23] применить концепцию статистического анализа возможностей процесса [24] к построению дифференциальных оценок качества продукции, которые назвали оценками (показателями) соответствия. В случае регламентации, например, характеристики качества только наибольшим допустимым значением USL (верхняя оценка соответствия)

$$q_{USL} = (USL - \bar{x}) / (3s). \quad (3)$$

а в случае регламентации только наименьшим допустимым значением LSL (нижняя оценка соответствия)

$$q_{LSL} = (\bar{x} - LSL) / (3s). \quad (4)$$

Если характеристика регламентирована наибольшим и наименьшим допустимыми значениями (двухсторонняя оценка соответствия)

$$q_{Pk} = \min(q_{LSL}; q_{USL}). \quad (5)$$

В (3) и (4) $\bar{x} - LSL = \Delta_{LSL}$ и $USL - \bar{x} = \Delta_{USL}$ представляют собой допустимые интервалы варьирования оцениваемого параметра, а $3s$ – доля его фактической изменчивости, приходящаяся на допустимый интервал (рис. 5). Характеристиками фактической изменчивости и соответствующего ей центра рассеяния приняты стандартное отклонение S и выборочное среднее $\bar{x}$. Используются оценки результативности технологии «отличная», «хорошая» и «удовлетворительная», которым соответствуют значения показателей (3)–(5): более 1,67; 1,33–1,67 и 1,00–1,33. Чем выше q_{Pk} , тем результативнее процесс.

Например, при разработке технологии производства микрелегированного конструкционного горячекатанного проката для холодного деформирования со свойствами по DIN EN 10149-2 [25] применялись различные химические композиции стали и были получены следующие значе-

ния механических свойств: $\sigma_T = 320\text{--}600$ МПа, $\sigma_B = 390\text{--}660$ МПа и $\delta = 25\text{--}43\%$. Анализ соответствия свойств нормам для различных классов прочности показал следующее (рис. 6).

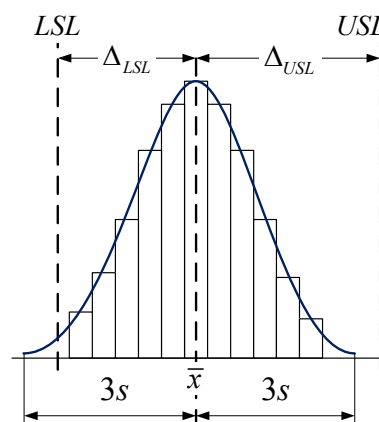


Рис. 5. К расчету показателя (оценки) соответствия при двустороннем ограничении параметра

При любой из рассмотренных химических композиций достигается высокое соответствие по относительному удлинению для всех групп прочности (рис. 6, в), а также по σ_T (рис. 6, а) и σ_B (рис. 6, б) для марок S315MC и S355MC. Для производства проката марки S420MC наиболее подходит химическая композиция VIII, при которой коэффициенты соответствия по σ_T и σ_B равны 2,31 (см. рис. 6, а) и 3,83 (см. рис. 6, б). Ни в одном из анализируемых случаев не обеспечивается получение проката классов прочности 460 и выше. Наиболее близки к характеристикам прочности, заданным в DIN EN 10149-2 применительно указанным классам, результаты прокатки металла с химической композицией IX. С увеличением толщины полосы достижение высокой прочности затрудняется (рис. 6, г).

Множественным регрессионным анализом построили аппроксимации зависимостей механических свойств от характеристик химического состава стали, параметров режима прокатки и толщины полос, с применением которых, используя инструмент «Поиск решения» MS EXCEL, нашли первые приближения рациональных химических композиций и ключевых контрольных характеристик получения проката S315MC-S500MC на ИСГП. Автоматизированное проектирование режимов прокатки показало возможность реализации найденных технологий, а результаты экспериментальных прокаток (табл. 3) обнаружили достаточно хорошее соответствие свойств опытных полос требованиям DIN EN 10149-2:1995 [26].

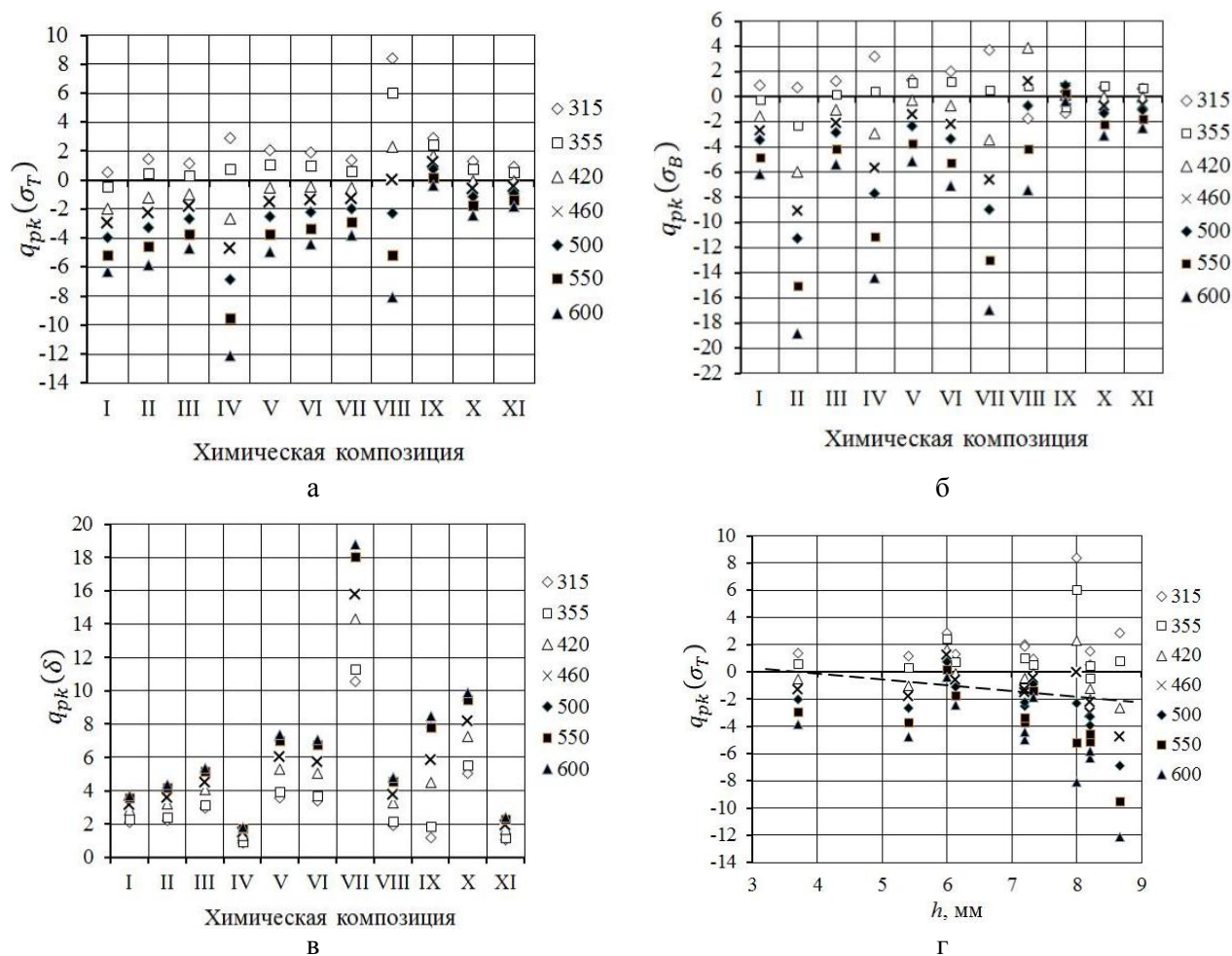


Рис. 6. Влияние химической композиции стали (а–в) и толщины полосы (г) на показатели соответствия свойств различным классам прочности

Таблица 3

Химический состав стали, температурный режим прокатки и оценки соответствия проката классов прочности S315MC-S500MC требованиям DIN EN 10149-2:1995

Марка стали	Содержание химических элементов, %							Температура, °C			Оценки соответствия свойств			
	C	Si	Mn	Al	V	Nb	Ti	t_{Rk}	t_{kn}	t_{cm}	σ_T	σ_B	δ	KV^{20}
S315MC	0,07	–	0,45	0,04	–	0,025	–	1050–1080	840–860	590–630	1,54	1,66	1,57	–
S355MC	0,09	–	0,50	0,06	–	0,025	0,02	1030–1090	810–850	540–610	0,91	1,01	2,42	–
S420MC	0,07	0,25	1,1	0,05	–	0,065	–	1030–1090	820–850	560–620	1,94	7,02	0,74	–
S460MC	0,07	0,25	1,1	0,05	–	0,065	–	1060–1090	820–870	550–600	1,28	7,71	1,41	–
S500MC	0,08	0,34	1,5	–	0,03	0,075	0,018	1010–1050	820–860	550–590	1,17	1,09	2,40	2,23

Примечание. t_{Rk} – температура конца черновой прокатки; t_{kn} – температура конца чистовой прокатки; t_{cm} – температура смотки

Заключение

Разработан метод синтеза технологических решений, в основе которого лежит обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки профиля любого вида на стане произвольной структуры. Обобщенный алгоритм и его математическое обеспечение для отображения особенностей листовой прокатки реализованы в виде различных компьютерных программ автоматизированного проектирования, например [27–28].

Повышение объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей ЛПТС и ее элементов, как на стадии разработки, так и на стадии внедрения решений, достигается при дополнении методики улучшения методом оценивания соответствия прогнозируемых или фактических значений характеристик функционирования системы, в том числе показателей качества продукции, заданным требованиям с учетом прогнозируемой или фактической вариации целевых характеристик. Сочетание такого метода с автоматизированным проектированием способствует минимизации времени поиска рационального решения при достаточно высокой его достоверности.

С учетом полученных результатов составлены, обеспечены учебно-методическими изданиями (например, [29–31]) и реализуются рабочие программы профилирующих дисциплин по направлениям подготовки «Металлургия» для обучающихся по профилю «Обработка металлов и сплавов давлением» и «Стандартизация и метрология» для обучающихся по профилю «Стандартизация и сертификация». Разработаны и прочитаны специальные курсы в рамках сотрудничества с предприятиями черной металлургии по повышению квалификации персонала.

Значительная часть выполненных исследований соответствует тематике направления по созданию аппаратных средств, алгоритмического и программного обеспечения обработки информации для решения прикладных задач высокой сложности (п. а, п. 18) «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988. Разработаны теоретические положения, а также научно обоснованные проектные и технологические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в развитие экономики страны.

Список литературы

1. Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года: Приказ Министерства промышленно-

- сти и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (дата обращения: 02.05.2015).
2. ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ, 2009. 9 с.
3. Зайцев В.С. Основы технологического проектирования прокатных цехов. М.: Металлургия, 1987. 336 с.
4. Рашников В.Ф. Развитие технологических систем на основе комплексного моделирования для производства конкурентоспособного стального проката: автореф. дис. ... д-ра техн. наук в форме научного доклада. Магнитогорск: МГМА, 1988. 56 с.
5. Заверюха В.Н. Развитие и применение методов исследования и методов улучшения листовой прокатки на основе системного подхода: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1990. 442 с.
6. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Машиностроение, 1980. 312 с.
7. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход: пер. с пол. М.: Мир, 1981. 456 с.
8. Румянцев М.И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали разнообразного назначения на станах различных типов // Труды девятого конгресса прокатчиков, Череповец, 15–18 апреля 2013 г. Т. 2. Череповец: Череповец. гос. ун-т, 2013. С. 43–54.
9. Dimatteo A., Vannucci M. and Colla V. Prediction of Mean Flow Stress during Hot Strip Rolling Using Genetic Algorithms // ISIJ International, vol. 54 (2014), no. 1, pp. 171–178.
10. Recalculation of Flow Stresses from Industrial Process Data for Heavy Plate Rolling Using a 2D Finite Element Model / Erik Parteder, Klaus Zeman, Huiying Du, and Rainer Grill // Steel Research Int. 83 (2012), no. 2, pp. 124–130.
11. Rumyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided design hot rolling sheet and strips pattern // METAL 2015 Conference proceedings. Ostrava: TANGER Ltd. 2015. P. 395–403.
12. Румянцев М.И. Аккомодационные модели – опыт построения и применения для анализа и совершенствования листовой прокатки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегион. науч.-техн. конф. / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Т. 1. № 1. С. 153–156.
13. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
14. Wusatowski Z. Fundamentals of Rolling. Pergamon Press Ltd., Printed in Poland. Katowice: «ŚLĄSK», 2012. 692 p.
15. Азгальдов Г.Г. Управление качеством и квалиметрия. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2004.
16. Oakland J. S. Statistical Process Control. Fifth Edition. Bodmin: MPG Books Limited. 2003. 445 p.
17. Гун Г.С. Управление качеством высокоточных профилей. М.: Металлургия, 1984. 152 с.
18. Жадан В.Т., Маневич В.А. Совершенствование технологии прокатки на основе комплексных критериев качества. М.: Металлургия, 1989. 96 с.
19. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун, М.А. Полякова. М.: Издат. дом «Руда и металлы». 2012. 164 с.
20. Ganguly K. Improvement process for rolling mill through the dmaic six sigma approach // International Journal for Quality research. Vol 6, 2012, no. 3, pp. 221–231.
21. Noskievichova D., Kucharczyk R. Effective application of statistical process control (SPC) on the lengthwise onsure rolled plates process // Metalurgija. Vol. 51, 2012, no. 1, pp. 81–84.
22. Noskievichova D., Woska B. Design of methodology for application of statistical control on short run processes in metallurgy // Metalurgija. Vol. 53, 2014, no. 1, pp. 81–84.
23. Румянцев М.И., Цепкин А.С., Оплачко Т.В. Унифицированный подход к расчету дифференциальных оценок при квалимет-

- рическом оценивании качества проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 61–64.
24. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Sixth Edition. Jefferson City: John Wiley & Sons. Inc. 2009. 754 p.
 25. Практика освоения технологии производства в условиях ОАО «ММК» горячекатаных микрелегированных высокопрочных сталей для автомобильной промышленности и строительства / С.В. Денисов, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М.А. Молостов, Э.М. Голубчик, Г.В. Щуров, М.И. Румянцев // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2009. С. 39–44.
 26. Разработка технологии и режимов прокатки высокопрочных сталей для автомобилестроения на широкополосном стане горячей прокатки / М.И. Румянцев, В.В. Галкин, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М. А. Молостов, А.О. Попов // Труды Восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11–15 октября 2010 г. Т. 1. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. С. 35–45.
 27. Разработка технологий горячей прокатки широкополосной стали разнообразного назначения на станах различных типов: Свид. о гос. рег. прогн. для ЭВМ. № 2013612426 от 27.02.2013 / М.И. Румянцев, А.В. Горбунов, А.О. Попов, А.Г. Ветренко, М.А. Молостов // ОБПБТ. 2013. №1.
 28. CR CAD: Свид. о гос. рег. прогн. для ЭВМ. № 2013611300 от 09.01.2013 / М.И. Румянцев, А.В. Горбунов, В.С. Митасов // ОБПБТ. 2013. № 5. Ч. 3. С. 982.
 29. Салганик В.М., Румянцев М. И. Технология производства листовой стали: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321304908.
 30. Румянцев М. И., Ручинская Н. А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством продукции: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321303451.
 31. Румянцев М. И., Локотунина Н. М., Моллер А.Б. Обработка металлов давлением и характеристики качества продукции: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321303454.

Материал поступил в редакцию 17.08.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

SOME RESULTS OF THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR ENHANCING STEEL SHEET PRODUCTION SYSTEMS

Mikhail I. Rumyantsev – Ph.D. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)-29-85-70. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru; mir@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0608-0446>

Abstract

Problem Statement (Relevance): One of the crucial challenges facing Russian iron-and-steel industry today includes the introduction of technologies that will enhance the efficiency of existing operations, make the products more competitive and help develop the production capacity for advanced rolled steel products. Due to the need to quickly find and implement solutions for the above, it is important to identify and adopt techniques that will help find a comprehensive solution in the shortest time and with a high degree of reliability. **Objectives:** This article describes the results of the research that sought to develop methods that would help create operating rolling schedules, create and enhance mathematical modeling tools and provide an enhanced tool for assessing the efficiency of processes and operations involved in the production of steel sheets. The expected benefits of the above include an expanded product assortment, improved quality and reduced resource costs. **Methods Applied:** The methods applied included systems theory, mathematical modeling and computer simulation; statistical methods of analysis and quality control; observation carried out at a number of rolling facilities; production of pilot lots. **Originality:** The results of the research include a genetic algorithm and a method for computer-aided design of rolling schedules. Mathematical models were developed for various hot and cold rolling mills producing steel sheets and strips meant for different applications. The method of building accommodation models was developed and applied for creating mathware components. To improve the reliability and objectivity of the conclusions the method of analyzing the compliance of the process and product quality was recommended and adjusted. **Practical Relevance:** The genetic algorithm of

computer-aided design is implemented as CAD software for creating rolling schedules for different types of rolling mills. The above software, together with the compliance assessment method, helped come up with the solutions intended to improve the existing production process and adopt new types of flat products (for example, HSLA steel products).

Keywords: Flat products, technological system, production process, rolling schedule, genetic algorithm of computer-aided design for creating rolling schedules, model building, accommodation model, product quality, process performance, statistical estimation, plate rolling, the reduction mode of a hot wide-strip mill, hot-rolled flat products from HSLA steel.

References

1. *Ob utverzhenii Strategii razvitiya chernoy metallurgii Rossii na 2015-2020 gody i na perspektivu do 2030 goda i Strategii razvitiya cvetnoj metallurgii Rossii na 2015-2020 gody na perspektivu do 2030 goda* [On approval of the Russian Iron and Steel Industry Development Strategy for 2014-2020 and for a longer term (up to 2030) and the Russian Non-Ferrous Industry Development Strategy for 2014-2020 years and for a longer term (up to 2030)]. Order by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, no. 839, dated May 5, 2014. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (Accessed: 02/05/2015).
2. GOST 14.004-83. *Tekhnologiya podgotovki proizvodstva. Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatiy* [State standart 14.004-83. Production engineering. Terms and definitions of basic concepts]. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 9 p. (In Russ.)
3. Zajtsev V.S. *Osnovy tekhnologicheskogo proektirovaniya prokatnikov tsekhov* [Fundamentals of rolling mill engineering]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 336 p. (In Russ.)
4. Rashnikov V.F. *Razvitie tekhnologicheskikh sistem na osnove kompleksnogo modelirovaniya dlya proizvodstva konkurentosposobnogo stalnogo prokata: avtoreferat dis. d-ra tekhn. nauk v*

- forme nauchnogo doklada [Developing simulation based production systems for competitive steel products. Extended abstract of D.Sc. dissertation presented in the form of a scientific paper]. Magnitogorsk: MGMA, 1988. 56 p. (In Russ.)
5. Zaveryukha V.N. *Razvitie i primeneniye metodov issledovaniya i metodov uluchsheniya listovoy prokatki na osnove sistemnogo podkhoda*: dis. d-ra tekhn. nauk [Development and application of research methods and techniques for improving steel sheets based on system approach. D.Sc. (Eng.) dissertation. Magnitogorsk, 1990. 442 p. (In Russ.)]
 6. Norenkov I.P. *Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovaniye tekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Introduction into computer-aided design of technical devices and systems]. Moscow: Machinery, 1980. 312 p. (In Russ.)
 7. Ditrikh J. *Proektirovaniye i konstruirovaniye. Sistemnyy podhod* [Design and engineering: system approach]. Moscow: Mir, 1981. 456 p. (In Russ.)
 8. Rumyantsev M.I. Some experience in the development and application of computer-aided design for rolling schedules for hot and cold rolling mills of various types. *Trudy devyatogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the ninth Congress of Rolling Specialists], Cherepovets, 2013, vol. 2, pp. 43–54. (In Russ.)
 9. Dimatteo A., Vannucci M. and Colla V. Prediction of Mean Flow Stress during Hot Strip Rolling Using Genetic Algorithms. *ISI International*, vol. 54 (2014), no. 1, pp. 171–178.
 10. Erik Parteder, Klaus Zeman, Huiying Du, and Rainer Grill. Recalculation of Flow Stresses from Industrial Process Data for Heavy Plate Rolling Using a 2D Finite Element Model. *Steel Research Int.* 83 (2012), no. 2, pp. 124–130.
 11. Rumyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided design hot rolling sheet and strips pattern. *METAL 2015 Conference proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd, 2015, pp. 395–403.
 12. Rumyantsev M.I. Accommodation models: Development and application for analyzing and improving sheet rolling processes. *Actualnyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71-j mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Important problems of contemporary science, technology and education]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014, vol. 1, no. 1, pp. 153–156. (In Russ.)
 13. Kononov Yu.V., Ostapenko A.L., Ponomarev V.I. *Raschet parametrov listovoy prokatki* [Sheet rolling parameters calculation]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 430 p. (In Russ.)
 14. Wusatowski Z. *Fundamentals of Rolling*. Pergamon Press Ltd., Printed in Poland. Katowice: «ŚLĄSK», 2012. 692 p.
 15. Azgaldov G.G. *Upravleniye kachestvom i kvalimetriya* [Quality management and quality control]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2004. (In Russ.)
 16. Oakland J. S. *Statistical Process Control*. Fifth Edition. Bodmin: MPG Books Limited. 2003. 445 p.
 17. Gun G.S. *Upravleniye kachestvom vysokotochnykh profilej* [Quality management for precision steel sections]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 152 p. (In Russ.)
 18. Zhadan V.T., Manevich V.A. Using comprehensive quality criteria to improve the rolling process. Moscow: Metallurgiya, 1989. 96 p. (In Russ.)
 19. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravleniye kachestvom produkcii v tekhnologiyah melznogo proizvodstva* [Quality management in metalware production]. Moscow: «Ruda i Metally» Publishing House, 2012. 164 p. (In Russ.)
 20. Ganguly K. Improvement process for rolling mill through the dmaic six sigma approach. *International Journal for Quality research*. 2012, vol 6, no. 3, pp. 221–231.
 21. Noskievichova D., Kucharczyk R. Effective application of statistical process control (SPC) on the lengthwise rolled plates process. *Metalurgiya*. 2012, vol. 51, no. 1, pp. 81–84.
 22. Noskievichova D., Woska B. Design of methodology for application of statistical control on short run processes in metallurgy. *Metalurgiya*. 2014, vol. 53, no. 1, pp. 81–84.
 23. Rumyantsev M.I., Tsepkin A.S., Oplachko T.V. A unified approach to the calculation of differential indices of rolled product quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 3, pp. 61–64. (In Russ.)
 24. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Sixth Edition. Jefferson City: John Wiley & Sons. Inc. 2009. 754 p.
 25. Denisov S.V., Gorbunov A.V., Vetrov A.G., Molostov M.A., Golubchik E.M., Shchurov G.V., Rumyantsev M.I. MMK practice of developing the manufacturing technology for hot-rolled microalloyed high strength steels for automotive and construction industries. *Modelirovaniye i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Simulation and development of metal forming processes]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, pp. 39–44.
 26. Rumyantsev M.I., Galkin V.V., Gorbunov A.V., Vetrov A.G., Molostov M.A., Popov A.O. Developing the production process and the rolling schedules for hot wide-strip mill producing high strength steels for automotive industry. *Trudy vosmogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the eighth Congress of Rolling Specialists]. Magnitogorsk, Oktober 11-15, 2010. Vol. 1. Magnitogorsk: Magnitogorsk Printing House, 2010, pp. 35–45. (In Russ.)
 27. Rumyantsev M.I., Gorbunov A.V., Popov A.O., Vetrov A.G., Molostov M.F. Development of hot rolling processes for various types of rolling mills producing steel strips for various applications. Certificate of State Registration for Computer Software. No. 2013612426 dated 27/02/2013. OBPBT. 2013. No. 1.
 28. Mitsov V.S., Rumyantsev M.I., Gorbunov A.V. CR CAD. *Svid. o gos. reg. prog. dlya EC [computer]* [Certificate of State Registration for Computer Software]. No. 2013611300 dated 09/01/2013. OBPBT. 2013, no. 5, part 3, p. 982.
 29. Salganik V.M., Rumyantsev M.I. *Tekhnologiya proizvodstva listovoy stali: uchebnoye posobie* [Flat steel production process: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321304908.
 30. Rumyantsev M.I., Ruchinskaya N.A. *Statisticheskiye metody dlya obrabotki i analiza chislovoj informatsii, kontrolya i upravleniya kachestvom produkcii: uchebnoye posobie* [Statistical methods for numerical data processing and analysis and for product quality management: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321303451.
 31. Rumyantsev M.I., Lokotunina N.M., Moller A.B. *Obrabotka metallov davleniem i kharakteristiki kachestva produkcii: uchebnoye posobie* [Metal forming and product quality characteristics: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321303454.

Received 17/08/16

Образец для цитирования

Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 45–55 doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

For citation

Rumyantsev M.I. Some results of the development and application of the methodology for enhancing steel sheet production systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 45–55. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕМОНОТОННОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С РАССОГЛАСОВАНИЕМ СКОРОСТЕЙ ВАЛКОВ

Песин А.М.¹, Пустовойтов Д.О.¹, Швеева Т.В.¹, Стеблянка В.Л.¹, Федосеев С.А.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) применяются для получения ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов повышенной прочности. Однако известные методы ИПД представляются мало подходящими для практического применения, особенно для обработки конструкционных металлических материалов больших размеров, таких как лист или полоса. К методам ИПД иногда относят обычные методы обработки металлов давлением, например листовую прокатку, которая при определенных условиях также позволяет обрабатывать металлы с большой интенсивностью деформации. Однако между обычной листовой прокаткой и ИПД существует принципиальное отличие, которое заключается в том, что в первом случае реализуется монотонная деформация, а во втором – немонотонная. В этой связи актуальным является разработка нового процесса листовой прокатки, обеспечивающего немонотонный характер течения металла при его обработке. Перспективным с этой точки зрения является метод асимметричной тонколистовой прокатки с рассогласованием окружных скоростей валков. Целью работы являлось математическое моделирование и анализ взаимосвязи немонотонности течения металла с интенсивностью деформации при холодной асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков. Математическое моделирование проводили методом конечных элементов в объемной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса DEFORM 3D. В работе показано, что поворотная деформация и сдвиги обеспечивают значительное приращение интенсивности деформации металла при асимметричной тонколистовой прокатке, что является отличительной особенностью этого процесса как метода ИПД. Показано, что немонотонность течения металла, создаваемая при асимметричной прокатке, приводит к дополнительному увеличению интенсивности деформации (в 1,9 раза) в сравнении с обычной прокаткой при прочих равных условиях. Однако немонотонность течения металла является причиной вертикального изгиба полосы. Теоретические результаты данной работы могут быть использованы при разработке деформационных режимов асимметричной тонколистовой прокатки металлических материалов для получения в них УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, метод конечных элементов, немонотонность деформации, асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, алюминиевый сплав.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10030).

Введение

Для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов повышенной прочности применяют методы ИПД, позволяющие достичь больших деформаций материалов при относительно низких температурах [1]. Известные методы ИПД, как, например, равноканальное угловое прессование или кручение под высоким давлением, к настоящему времени достаточно хорошо изучены, однако, представляются мало подходящими для практического применения, особенно для обработки конструкционных металлических материалов больших размеров, таких как лист или полоса.

К методам ИПД иногда относят обычные методы обработки металлов давлением (ОМД), напри-

мер листовую прокатку, которая при определенных условиях также позволяет обрабатывать металлы с большой степенью деформации [1–3]. Однако между обычным методом деформации и ИПД существует принципиальное отличие, которое заключается в том, что первый приводит к формированию преимущественно субзернистой структуры, а второй – зернистой, что наделяет такие металлы особенно высокими механическими свойствами [1–3]. Указанное отличие обусловлено тем, что при ИПД применяется немонотонная деформация, а в обычных методах ОМД – монотонная [1–3].

В механике сплошной среды деформированное состояние материальной точки описывается тензором, представляющим собой сумму симметричного тензора деформации и кососимметричного тензора поворота, которые, в общем случае, учитывают все составляющие деформации: линейные, угловые и поворотные [1–3]. В теории ОМД во вни-

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Швеева Т.В., Стеблянка В.Л., Федосеев С.А., 2017

мание принимают лишь симметричный тензор деформации. Это обусловлено тем, что во многих процессах, например при обычной листовой прокатке, повороты малы и практически не влияют на формоизменение заготовки. Однако при больших немонотонных деформациях поворотная мода ответственна за формирование угловых разориентировок границ и получение ультрамелких зерен с равноосной формой [1–3]. Значительный вклад поворотной моды в общую деформацию и отличает методы ИПД от обычных методов монотонной деформации. Поэтому после ИПД металлы приобретают более изотропный и повышенный уровень механических свойств, чем после монотонного деформирования, приводящего к формированию анизотропной субзеренной структуры [1–3].

Перспективным методом ИПД с точки зрения возможности его практического применения является метод асимметричной тонколистовой прокатки [4–11]. Целенаправленная асимметрия процесса достигается за счет рассогласования окружных скоростей валков, при этом холодную прокатку осуществляют в условиях высокого контактного трения с большими разовыми деформациями. Фактор асимметрии, с одной стороны, приводит к снижению отрицательного влияния контактных сил трения и, как следствие, возможности увеличения деформаций сжатия при прокатке. С другой стороны, силы контактного трения становятся противоположно направленными, что обеспечивает создание значительных сдвиговых деформаций [4–11].

Целью данной работы является математическое моделирование и анализ взаимосвязи немонотонности течения металла с интенсивностью деформации при холодной асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков.

Материалы и метод исследования

Одним из эффективных методов численного решения задач механики и кинематики деформируемого твердого тела является метод конечных

элементов. Математическое моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки проводили в объемной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса DEFORM 3D. При математическом моделировании процесса были приняты следующие допущения: 1) деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; 2) рабочие валки – абсолютно жесткие; 3) условия – изотермические, поэтому прокатку проводили при низкой скорости деформирования (10 мм/с). Контактное трение описывали согласно закону Кулона:

$$\tau = \mu p \text{ при } \mu p < k, \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение трения; μ – коэффициент трения; p – контактное нормальное напряжение; k – предел текучести на сдвиг.

Деформируемый материал – алюминиевый сплав 5083, кривую текучести которого (при 20°C) задавали из библиотеки материалов DEFORM 3D. Реверсивную прокатку проводили без натяжений за два прохода с обжатиями по 50% по двум вариантам: 1) симметричная прокатка; 2) асимметричная прокатка. Исходные данные для моделирования процесса (рис. 1): 1) начальные размеры заготовки: толщина 2,0 мм, ширина 20 мм; длина 25 мм; 2) исходная заготовка состояла из 7110 восьмиузловых конечных элементов (brick) толщиной 0,33 мм; 3) температура деформируемого металла 20°C; 4) радиус валков $R=100$ мм; 5) коэффициент трения $\mu=0,1$ при симметричной прокатке и $\mu=0,4$ при асимметричной прокатке. При симметричной прокатке окружные скорости нижнего (V_1) и верхнего (V_2) валков были одинаковые в каждом проходе и составляли 10 мм/с. При асимметричной прокатке задавали рассогласование окружных скоростей валков за счет снижения скорости верхнего валка V_2 на 50% относительно окружной скорости нижнего валка $V_1=10$ мм/с.

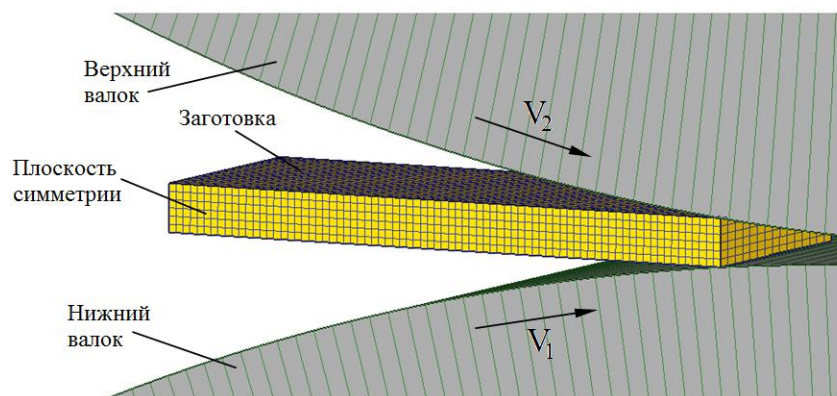


Рис. 1. Схема процесса тонколистовой прокатки

Результаты моделирования и их обсуждение

Монотонность и немонотонность течения металла могут быть продемонстрированы на примере известных геометрических образов деформации. Образом симметричного тензора деформации является эллипс, а образом кососимметричного тензора – аксиальный вектор поворота, пронизывающий этот эллипс [1–3]. Если деформация монотонная, то вектор поворота мал, и он практически не оказывает существенного влияния на деформированное состояние металла. Оси эллипса в этом случае не изменяют своего положения в пространстве, заготовка вытягивается в направлении, совпадающем с большим диаметром эллипса (рис. 2). Этот случай соответствует обычному процессу симметричной тонколистовой прокатки, для которого справедлива формула оценки степени деформации в виде значения натурального логарифма

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2)$$

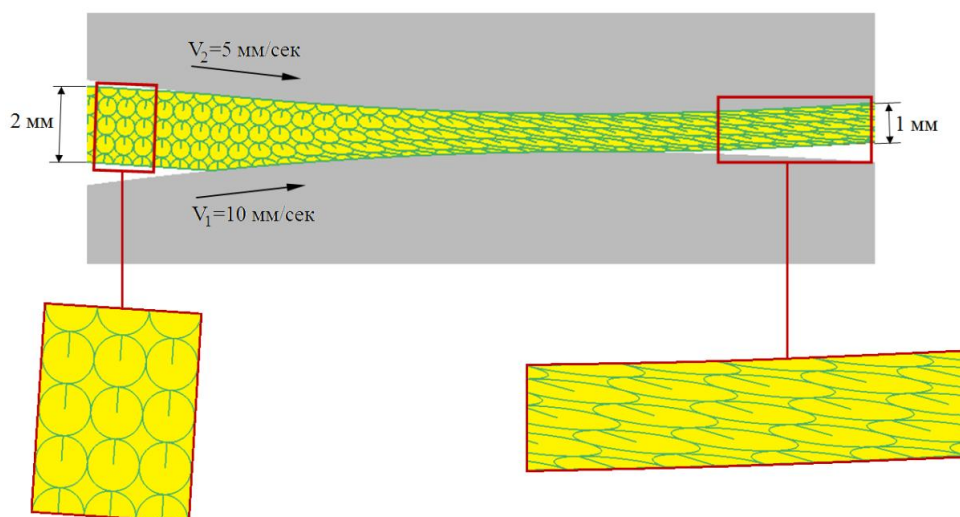


Рис. 2. Немонотонный характер течения металла при асимметричной прокатке (первый проход)

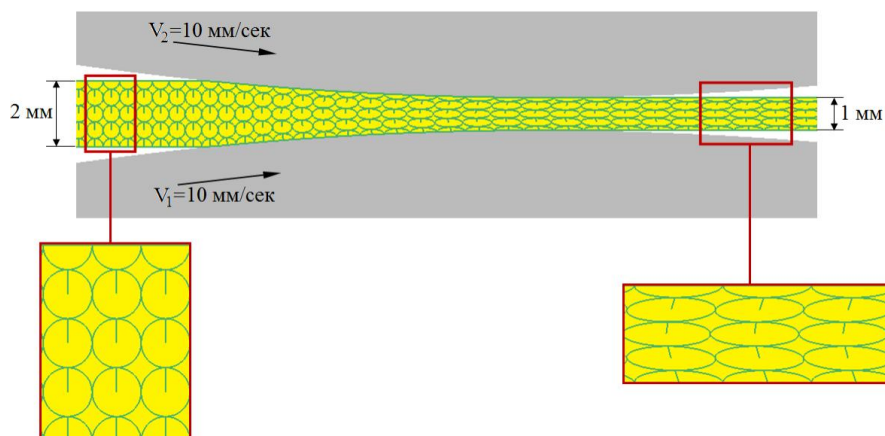


Рис. 3. Монотонный характер течения металла при симметричной прокатке (первый проход)

где h_0 – начальная толщина полосы; h_1 – конечная толщина полосы.

Если же вектор поворота большой, деформация немонотонная, тогда эллипс непрерывно изменяет не только форму, но и направление своих осей в соответствии с изменением направления вытяжки заготовки (рис. 3). Этот случай соответствует процессу асимметричной тонколистовой прокатки, для которого при плоской деформации справедлива следующая формула оценки степени деформации, учитывающая угол сдвига (поворота) [11]:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

где φ – угол сдвига (поворота).

Характер деформации металла при симметричной и асимметричной прокатке существенно отличается (рис. 4).

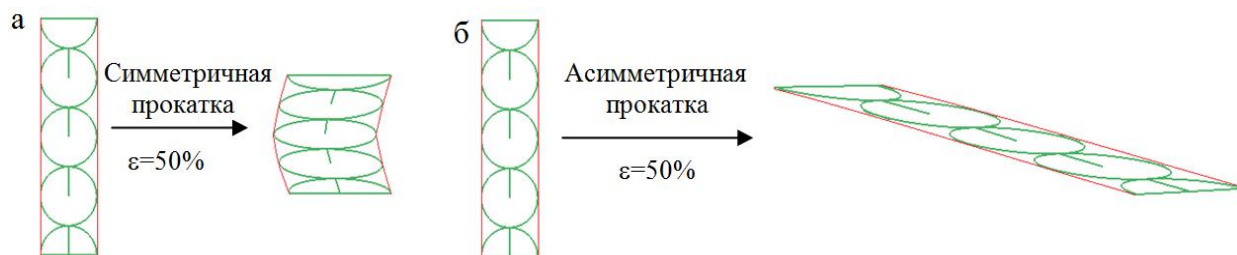


Рис. 4. Характер деформации металла при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (первый проход)

На практике деформированное состояние металла при обработке давлением удобно оценивать не тензорами, а более простой инвариантной скалярной величиной – интенсивностью деформации. Известно, что основная роль в формировании структуры и свойств материала принадлежит механике процесса деформации. Значительная немонотонность течения металла при асимметричной прокатке приводит к существенному увеличению интенсивности деформации с 0,8 до 1,5 в сравнении с обычной прокаткой (рис. 5). Полученные значения интенсивности деформации металла для случая симметричной прокатки полностью согласуются с величиной, рассчитанной по формуле (2). В свою очередь, значения интенсивности деформации металла для случая асимметричной прокатки согласуются с формулой (3) при величине угла сдвига (поворота) 65° .

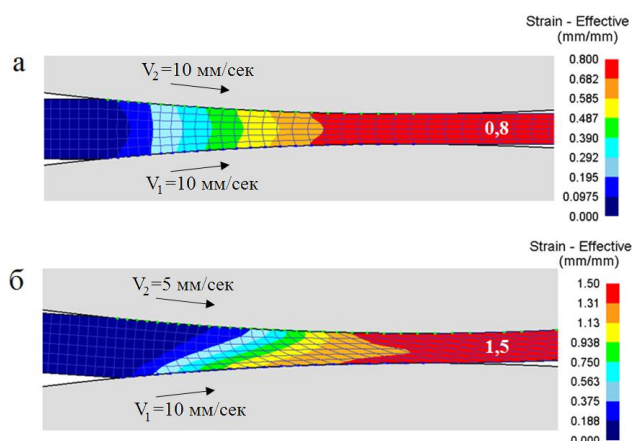


Рис. 5. Интенсивность деформации при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (первый проход с относительным обжатием 50%)

Монотонный (ламинарный) характер течения металла сохраняется и во втором проходе при симметричной прокатке (рис. 6), хотя суммарное относительное обжатие составляет 75%. Такое течение металла, как указано в работах [1–3], приводит к образованию продольных деформационных полос. В свою очередь, при асимметричной прокатке после второго прохода немонотонность деформации только возрастает (рис. 7). Изменение направления максимального удлинения соответствует изменению положения большей оси эллипса. Характер деформации при больших сдвигах становится подобным турбулентному течению.

Немонотонность течения металла при асимметричной прокатке во втором проходе также приводит к существенному увеличению интенсивности деформации с 1,6 до 3,0 в сравнении с обычной прокаткой (рис. 8). Таким образом, существенная немонотонность течения металла достигается в наибольшей степени при использовании процесса асимметричной прокатки, основанного на схеме сдвига.

Однако следует отметить, что в сравнении с обычным процессом при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков объемное деформированное состояние металла становится неоднородным по ширине полосы (рис. 9, 10). Максимальное значение интенсивности деформации наблюдается в центральной части полосы, что, очевидно, связано с плоскодеформированным состоянием металла в этой области. С увеличением ширины полосы равномерность распределения деформации будет возрастать. Кроме того, немонотонность течения металла, создаваемая за счет больших сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке, приводит к вертикальному изгибу полосы (рис. 9, б и 10, б).

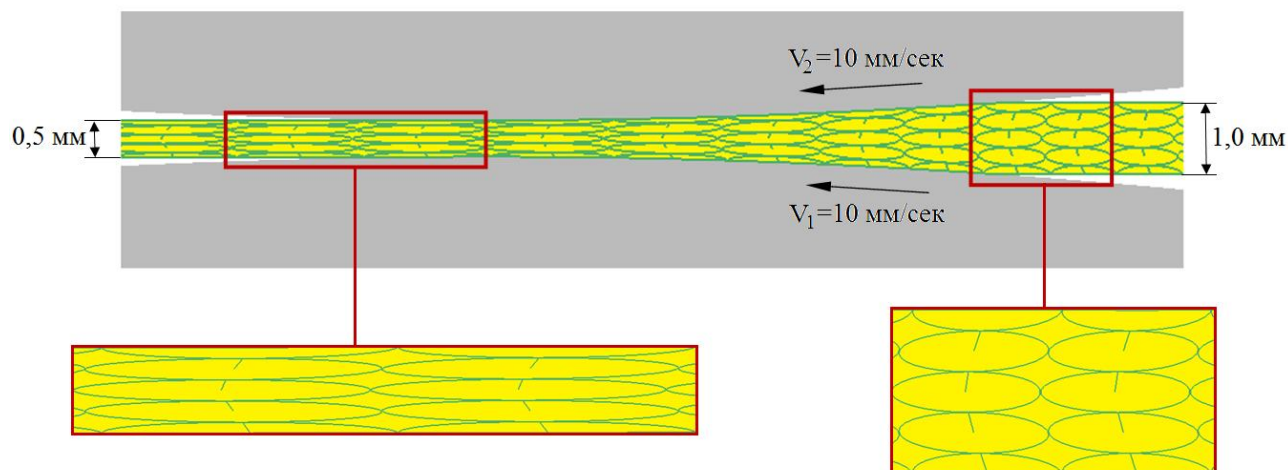


Рис. 6. Монотонный характер течения металла при симметричной прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

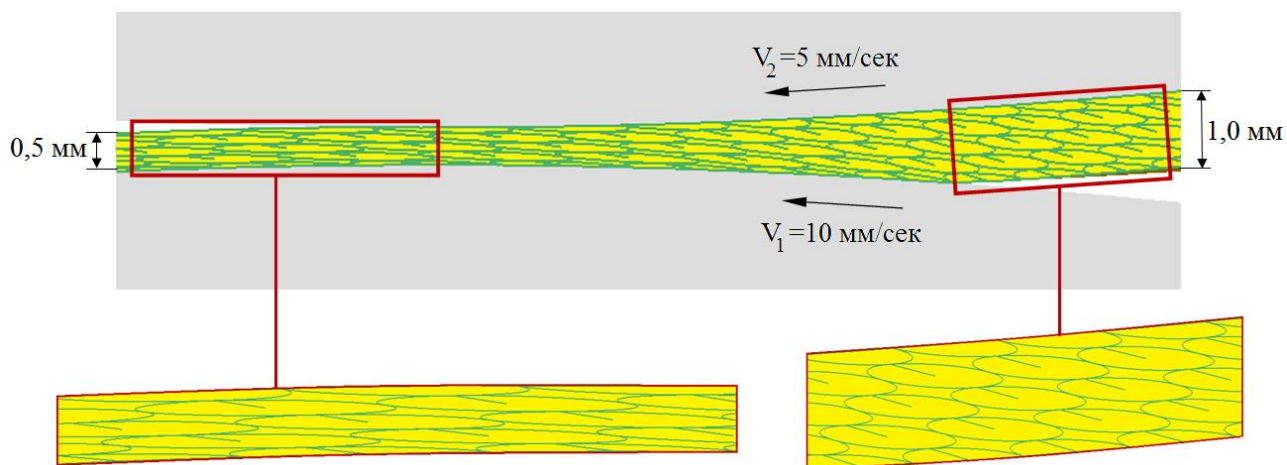


Рис. 7. Немонотонный характер течения металла при асимметричной прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

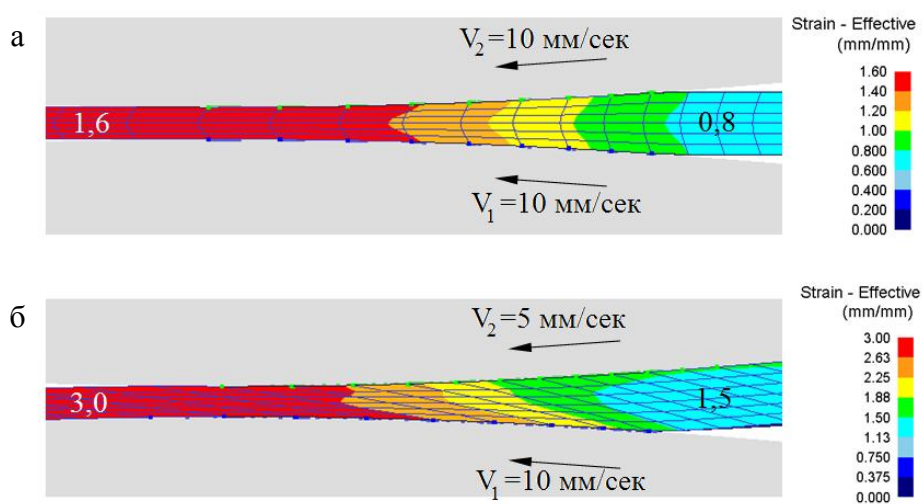


Рис. 8. Интенсивность деформации металла при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

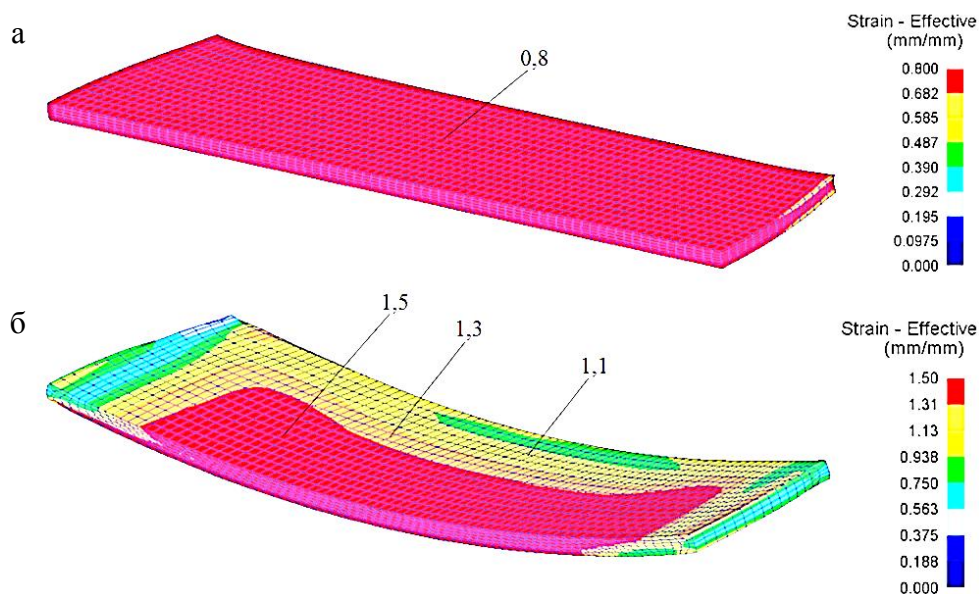


Рис. 9. Распределение интенсивности деформации в объеме заготовки после первого прохода: а – после симметричной прокатки; б – после асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков (относительное обжатие 50%)

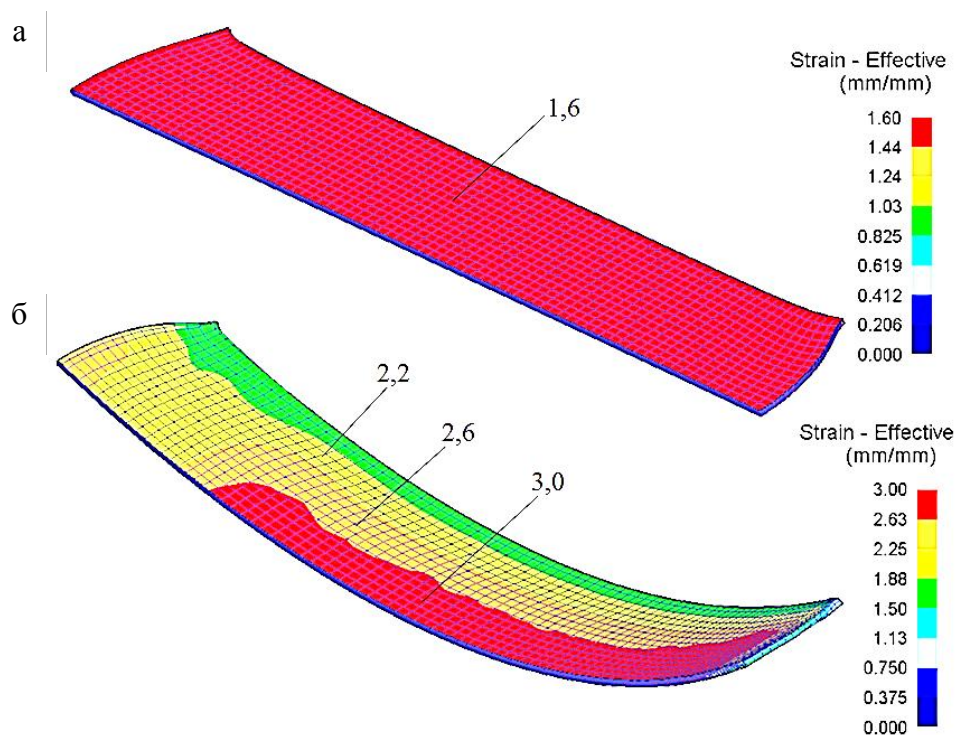


Рис. 10. Распределение интенсивности деформации в объеме заготовки после второго прохода: а – после симметричной прокатки; б – после асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков (суммарное относительное обжатие 75%)

Выводы

1. В работе рассмотрена роль сдвиговой и поворотной составляющих деформации при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей валков. Показано, что поворотная деформация и

сдвиги обеспечивают значительное приращение интенсивности деформации металла, что является отличительной особенностью процесса асимметричной прокатки как метода ИПД.

2. Немонотонность течения металла при асимметричной прокатке приводит к дополни-

тельному увеличению интенсивности деформации в 1,9 раза (с 1,6 до 3,0) в сравнении с обычной прокаткой при равном суммарном относительном обжатии 75%.

3. При асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков объемное деформированное состояние металла становится неоднородным по ширине полосы. Максимальное значение интенсивности деформации наблюдается в центральной части полосы, находящейся в условиях плоскодеформированного состояния металла.

4. Немонотонность течения металла, создаваемая за счет больших сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке, приводит к вертикальному изгибу полосы.

5. Теоретические результаты данной работы могут быть использованы при разработке деформационных режимов асимметричной тонколистовой прокатки металлических материалов для получения в них УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

Список литературы

1. Утяшев Ф.З. Кинематика течения и структурообразование металла при интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2013. Т. 23. № 1. С. 45–55.
2. Утяшев Ф.З. Теоретические и прикладные аспекты получения и применения объемных ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. №9. С. 12–18.
3. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Т. 20. № 1. С. 7–25.
4. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // Materials Science and Engineering: A. Vol. 499. 2009. P. 14–17.
5. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // Mechanical Engineering. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
6. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // Scripta Materialia. Vol. 60. 2009. P. 905–908.
7. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // Journal of Alloys and Compounds. Vol. 536S. 2012. P. S122–S125.
8. Cui Q., Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // Materials Science and Technology. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
9. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 18. 2008. P. 774–777.
10. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
11. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // Key Engineering Materials. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.

Материал поступил в редакцию 19.07.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63

SIMULATION OF NONMONOTONIC METAL FLOW DURING ASYMMETRIC SHEET ROLLING WITH DIFFERENT VELOCITIES OF THE ROLLS

Aleksander M. Pesin – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5443-423X>

Denis O. Pustovoytov – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pustovoytov_den@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0496-0976>

Tatiana V. Shveeva – Research Engineer

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: asttv@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4726-6215>

Valery L. Steblyanko – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Sergei A. Fedoseev – D.Sc. (Eng.), Professor

Perm State National Research Polytechnic University, Russia. E-mail: fsa@gelicon.biz

Abstract

Problem Statement (Relevance): Severe plastic deformation (SPD) techniques are used in the production of high-strength ultrafine-grained (UFG) metals and alloys. However, the existing SPD techniques seem to

be lacking in practicality, especially when processing large-size construction materials such as steel sheets or strips. Conventional metal forming processes (for example, sheet rolling) can sometimes be described as SPD techniques because, under certain conditions, they

can also cause high strains. However, there is an essential difference between the conventional sheet rolling and SPD as the former implies monotonic strain whereas the latter – nonmonotonic strain. Therefore, it appears to be important to develop a new sheet rolling process that would provide nonmonotonic flow of metal under processing. In this regard, an asymmetric sheet rolling process with different peripheral velocities of the rolls offers a great potential. **Objectives:** The aim of the research was to apply mathematical modeling to analyse the relationship between nonmonotonic metal flow and strain intensity during a process of cold asymmetric sheet rolling with different peripheral velocities of the rolls. **Methods Applied:** The finite element method was applied for mathematical modeling together with the DEFORM 3D specialized software. **Findings:** It is demonstrated that rotation strain and shear strain provide a significant increment to the intensity of strain during asymmetric sheet rolling, which differentiates this process as an SPD technique. It is shown that nonmonotonic metal flow caused by asymmetric rolling results in an increased strain intensity (1.9 times) versus conventional rolling, all other conditions being equal. At the same time, nonmonotonic metal flow can cause the strip to sweep. **Practical Relevance:** The results of this research can be used to develop deformation scenarios for asymmetric sheet rolling aimed at obtaining UFG structure and high strength in metallic material.

Keywords: Severe plastic deformation, finite element method, nonmonotonic strain, asymmetric rolling, shear strain, aluminum alloy.

This research was carried out as part of the grant awarded by the Russian Science Foundation (Project #15-19-10030).

References

1. Utyashev F.Z. Metal flow and structure formation during severe plastic deformation. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and technology]. 2013, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. (In Russ.)
2. Utyashev F.Z. The theoretical and applied aspects of production and application of bulk ultrafine-grained and nanostructured materials. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and aerospace technology]. 2010, no. 9, pp. 12–18. (In Russ.)
3. Utyashev F.Z. The nanostructuring of metallic materials by severe plastic deformation. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and technology]. 2010, vol. 20, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.)
4. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 499, pp. 14–17.
5. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mechanical Engineering*. 2012, vol. 56, pp. 111–115.
6. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. 2009, vol. 60, pp. 905–908.
7. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012, vol. 536S, pp. S122–S125.
8. Cui Q., Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materials Science and Technology*. 2000, vol. 16, pp. 1095–1101.
9. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008, vol. 18, pp. 774–777.
10. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32–40. (In Russ.)
11. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 622–623, pp. 929–935.

Received 19/07/16

Образец для цитирования

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Швеева Т.В., Стеблянка В.Л., Федосеев С.А. Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 56–63. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63

For citation

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Shveeva T.V., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A. Simulation of nonmonotonic metal flow during asymmetric sheet rolling with different velocities of the rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 56–63. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 629.7.021:621.7.015

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
В ЭЛЕКТРОЛИТАХ, СОДЕРЖАЩИХ НИТРАТ АММОНИЯ**

Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация

В данной статье приводятся результаты исследований электрохимической обработки (ЭХО) алюминиевого сплава 1201 в водных растворах нитрата аммония. Анализ различных отечественных и зарубежных исследований в области электрохимической обработки материалов показал, что изучение и моделирование формы электрода-инструмента является актуальной задачей. Форма электрода-инструмента подбирается с учетом множества факторов: скорости потока электролита, температуры электролита, плотности тока. Кроме того, важную роль играет электродное покрытие, использование которого позволяет повысить качество обработки деталей.

В ходе проведенных исследований определено влияние состава электролита, плотности тока, скорости потока на качество поверхности по длине межэлектродного канала. Эксперименты показали, что скорость потока электролита $\sim 0,55$ м/с обеспечивает минимальное значение шероховатости. Превышение скорости потока электролита приводит к существенному снижению качества поверхности детали. Выявлено, что при применении катода-инструмента, имеющего в сечении круглую форму, происходит растекание тока по поверхности обрабатываемого материала, что снижает точность обработки и шероховатость поверхности в переходной зоне. Использование катода с плоской рабочей поверхностью позволит увеличить степень локализации плотности тока на обрабатываемой поверхности и повысить точность обработки. Установлено, что катод-инструмент с плоской рабочей поверхностью из окислов титана позволяет уменьшить шероховатость обрабатываемой детали.

В результате исследований выявлен оптимальный режим ЭХО тонкостенных крупногабаритных деталей при использовании катода инструмента из титана с полупроводниковым покрытием на его поверхности. Рекомендуемые параметры процесса ЭХО: плотность тока в диапазоне от 14 до 26 А/см², скорость потока электролита от 0,3 до 0,6 м/с, температура электролита 25–30°C. В качестве электролита целесообразно применять водный раствор 15% NH_4NO_3 + 2,5% $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, электрод-инструмент, катод, шероховатость, электролит, скорость потока, плотность тока.

Введение

В последние годы методы электрохимической обработки материалов, позволяющие изменять форму, размеры, шероховатость обрабатываемых поверхностей, находят все большее применение для обработки деталей летательных аппаратов, как наиболее эффективные и экономичные способы размерного формообразования. Отличительной особенностью данных методов, составляющей их специфику и сущность, является использование электрической энергии непосредственно для технологических целей без промежуточного преобразования ее в другие виды энергии [1, 2].

Электрохимическая обработка (ЭХО) материалов является эффективным методом для обработки деталей практически из любых металлов и сплавов. ЭХО характеризуется тем большей эффективностью, чем сложнее форма обрабатываемой детали, выше механические свойства (твердость) и значительнее количество технологических проблем, возникающих при обработке другими методами.

В современной промышленности при обработке деталей летательных аппаратов часто используют электроды специальных конструкций, позволяющие проводить ЭХО крупногабаритных сборочных единиц, в том числе деталей, имеющих форму тел вращения.

Наиболее известны в этой области работы [3–

8], в которых представлены разнообразные конструкции электродов различной формы рабочей поверхности. При анализе зарубежных научных статей, описывающих различные результаты исследования процесса электрохимической обработки, установлено, что серьезное внимание уделяется не только таким факторам, как скорость потока, температура электролита, плотность тока. Особое место занимает изучение и моделирование формы электрода-инструмента, применяемого при ЭХО. Форма электрода-инструмента подбирается с учетом множества факторов, в том числе краевого эффекта, возникающего при обработке поверхности. Результаты исследований показывают, что возможные микроскопические пустоты, несплошности, газонасыщенность и прочие дефекты обрабатываемого материала являются ключевыми факторами в выборе формы электрода-инструмента.

Немаловажным фактором является наличие нанесенного на электрод покрытия в виде различных оксидов и их соединений, улучшающих широкий спектр характеристик от увеличения срока службы анодов до увеличения возможной плотности тока и получения в итоге более высокого качества поверхности. Примерами таких покрытий для различных материалов анодов служат: $\text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$, $\text{RuO}_2 + \text{IrO}_2 + \text{TiO}_2$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12} + \text{TiO}_2$, IrO_2 , $\text{IrO}_2 + \text{TiO}_2$, $\text{IrO}_2 + \text{RuO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ и наночастицами платины [9-19]. Однако такие покрытия дороги и поэтому не находят широкого применения в ЭХО. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку и внедрение электрода-инструмента, позволяющего локально обрабатывать крупногабаритные тонкостенные детали летательных аппаратов с требуемым качеством поверхности.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Для исследования распределения шероховатости при схеме обработки, максимально приближенной к реальным условиям, использовали установку, изображенную на рис. 1.

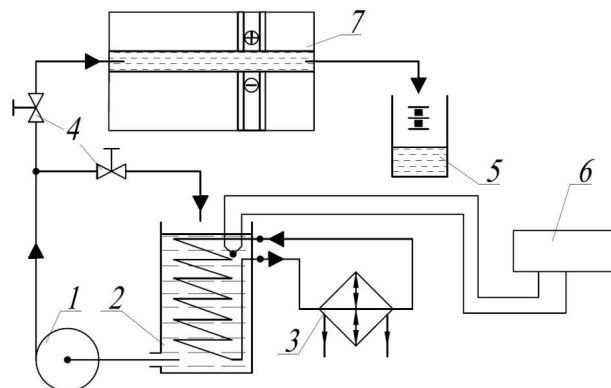


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса ЭХО: 1 – насос; 2 – бак; 3 – термостат; 4 – вентили; 5 – мерная емкость; 6 – потенциометр; 7 – ячейка Ландольта

В качестве анода применен алюминиевый сплав 1201 в виде пластины размером 40×40 мм, толщиной 4 мм, с токоподводом через корпус ячейки. Зазор между анодом и катодом обеспечивается набором резиновых прокладок, позволяющих в широких пределах (0,5–3 мм) изменять его величину. Катод-инструмент (рис. 2) представляет собой фторопластовую втулку 1 с запрессованной в нее медной пластиной 2 и по форме рабочей поверхности выполнен двух типов: а – круглый, б – плоский. Формы катода-инструмента выбраны с целью имитации реальных условий обработки.

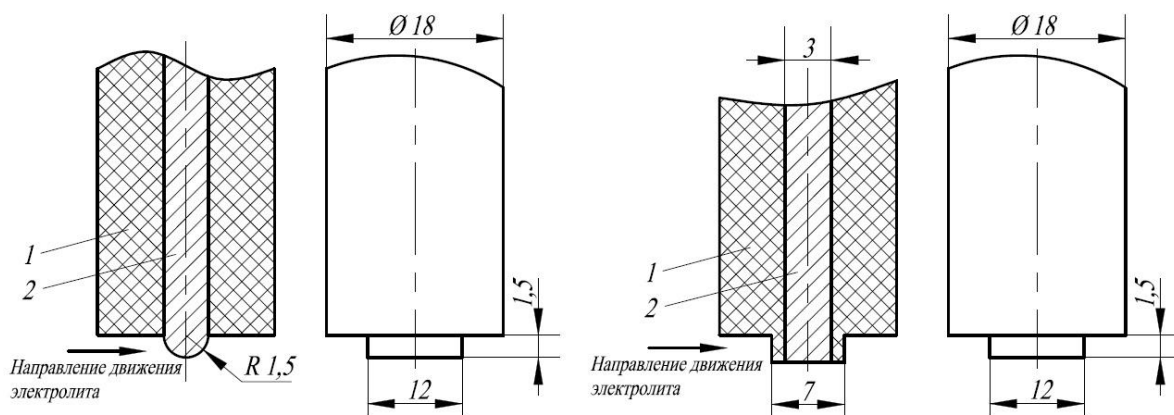


Рис. 2. Форма катода-инструмента: а – выпуклая рабочая поверхность; б – плоская рабочая поверхность

Центробежный насос позволяет создать поток электролита со скоростью до 2,2 м/с.

Перед началом исследования каждый образец взвешивается на аналитических весах ED423S-RCE, а также контролируется исходная шероховатость профилометром 170623. Значение базовой длины при этом составляет 0,08 мм.

После обработки образцы промывают, взвешивают, на профилометре замеряют шероховатость в 13 точках, равноудаленных друг от друга.

В качестве электролитов использовали следующие водные растворы:

- 1 – 15% NH_4NO_3 + 5% NH_4Cl ;
- 2 – 15% NH_4NO_3 ;
- 3 – 5% NH_4NO_3 + 2,5% $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования влияния скорости потока электролита на шероховатость обработанной поверхности первоначально проводили, используя катод-инструмент с выпуклой рабочей поверхностью (рис. 2, а), в качестве электролита применяли 15% NH_4NO_3 + 5% NH_4Cl , при этом плотность тока составляла 10,7 А/см². На рис. 3 представлен график зависимости шероховатости поверхности по длине межэлектродного канала от скорости потока электролита.

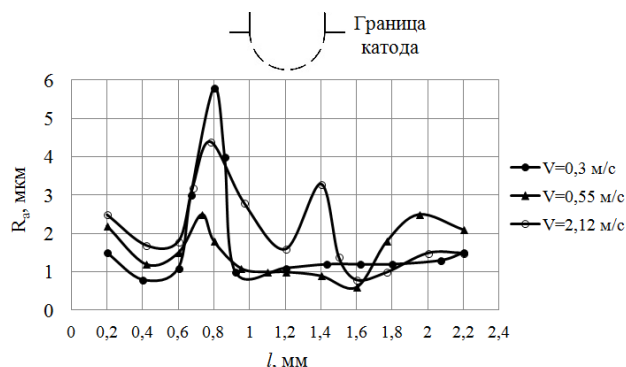


Рис. 3. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от скорости потока электролита

Необходимо отметить, что явно выражены две переходные зоны, на входе и выходе электролита в межэлектродный канал, где шероховатость поверхности образца значительно выше, чем в зоне обработки. В ходе экспериментов выявлено, что скорость потока электролита ~0,55 м/с обеспечивает минимальное значение шероховатости, что делает целесообразным проведение дальнейших опытов при данной скорости.

Изучение зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от плотности тока (рис. 4)

при постоянной скорости электролита (0,55 м/с) проводилось с использованием электролита 15% NH_4NO_3 + 5% NH_4Cl , при этом плотность тока изменялась в диапазоне от 0,4 до 26 А/см².

Установлено, что при повышении плотности тока на катоде шероховатость обрабатываемой поверхности существенно снижается, а ее распределение становится равномернее по длине межэлектродного канала. Однако с увеличением плотности тока зона растравливания на образцах сохраняется. Это можно объяснить отрицательным влиянием введенного в состав электролита NH_4Cl на шероховатость поверхности за счет содержания в нем ионов хлора.

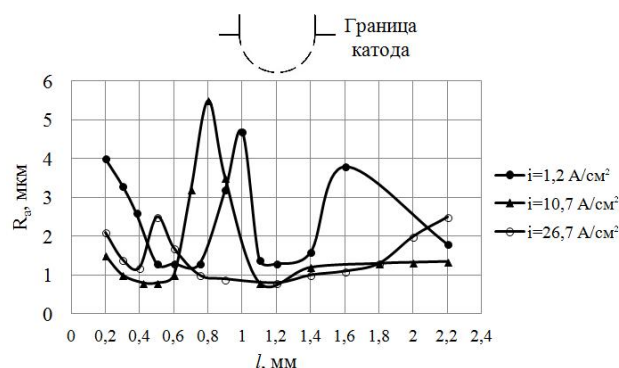


Рис. 4. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от плотности тока

Исследование шероховатости обрабатываемой поверхности при постоянной плотности тока и скорости потока электролита показало, что с применением электролита 15% NH_4NO_3 зона растравливания на поверхности образца сохраняется, но смещается в сторону выхода электролита из межэлектродного канала, причем шероховатость поверхности, расположенной напротив поверхности катода, не изменяется в диапазоне плотностей тока от 14 до 26 А/см².

Вследствие того, что катод-инструмент (рис. 2, а) имеет в сечении круглую форму, происходит растекание тока по поверхности обрабатываемого материала. Это снижает точность обработки и шероховатость поверхности в переходной зоне. Таким образом, целесообразно применение катода-инструмента, имеющего плоскую рабочую поверхность (рис. 2, б), с целью повышения степени локализации плотности тока на обрабатываемой поверхности.

Кроме того, в процессе ЭХО деталей происходит образование большого количества шлама, который, находясь в межэлектродном канале и

оседающая на обрабатываемой поверхности, снижает производительность, точность обработки, ухудшается шероховатость поверхности. Для устранения вредного влияния шлама и увеличения прорабатываемости электролита в него введен комплексообразователь 2,5% $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$.

Исследования показали, что при ЭХО с помощью катода-инструмента с плоской рабочей поверхностью степень локализации выше, следовательно, увеличивается точность обработки. Однако, несмотря на более высокую локализацию обработки, растравливание поверхности на входе в межэлектродный канал и на выходе из него сохраняется. В диапазоне плотностей тока от 7 до 26 А/см^2 значения шероховатости в переходной зоне значительно отличаются друг от друга.

Одним из путей повышения качества обработки является использование титанового (ВТ1-0) катода с полупроводниковым покрытием. Из литературы известно [20], что оксид титана обладает полупроводниковыми свойствами. Это может быть использовано для повышения качества обработки, что, в свою очередь, должно привести к снижению переходной зоны на входе в межэлектродный канал и на выходе из него. Покрытие из оксида титана получено путем наложения положительного потенциала на анод из титана в водном растворе.

На рис. 5 приведены графики изменения шероховатости по длине межэлектродного канала при обработке с использованием медного и титанового катода.

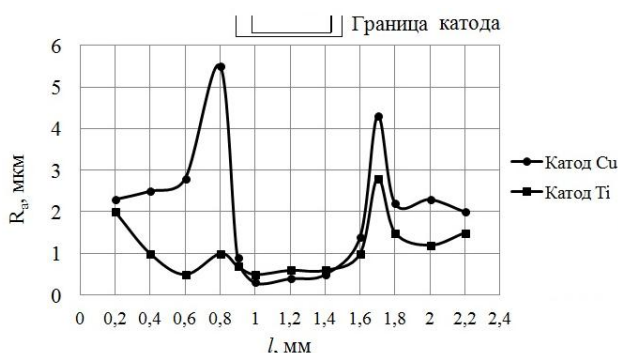


Рис. 5. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от материала катода-инструмента

Из графиков видно, что использование титанового катода-инструмента с плоской рабочей поверхностью, которая имеет полупроводниковое покрытие, при ЭХО деталей позволяет повысить качество обработки, т.к. шероховатость поверхности обработанной титановым катодом меньше

в переходной зоне, и сама зона короче по сравнению с результатами, полученными при использовании медного катода-инструмента. Необходимо отметить, что применение данной конструкции катода и режима обработки дает возможность избежать растравливания поверхности анода и получать тонкостенные детали летательных аппаратов с требуемым качеством поверхности.

Заключение

Таким образом, при исследовании ЭХО тонкостенных деталей был выявлен оптимальный режим обработки с плотностью тока в диапазоне от 14 до 26 А/см^2 , скоростью потока электролита от 0,3 до 0,6 м/с, температурой электролита 25–30°C. В качестве электролита целесообразно применять водный раствор 15% NH_4NO_3 + 2,5% $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$. Данный режим обработки дает возможность получать требуемое качество поверхности (R_a не более 2,6 мкм). В качестве материала катода перспективно использование титана с полупроводниковым покрытием на его поверхности, т.к. оно позволяет избежать растравливания обрабатываемой поверхности и улучшить ее качество.

Список литературы

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; под общ. ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ие, 1988. 719 с.
2. Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Смоленцев Е.В. Теория электрохимических и физико-химических методов обработки. Воронеж: ГОБУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. 376 с.
3. Chang C.S., Hourng L.W. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. Journal of Applied Electrochemistry. Volume 31, Issue 2, 2001, pp. 145-154.
4. Zhou Y., Derby J.J. The cathode design problem in electrochemical machining. Chemical Engineering Science. Volume 50, Issue 17, September 1995, pp. 2679-2689.
5. Jain V.K. Tooling design for ECM. Precision Engineering. Volume 2, Issue 4, October 1980, pp. 195-206.
6. Reddy M.S., Jain V.K., Lal G.K. Tool design for ECM: Correction factor method. Journal of engineering for industry. Volume 110, Issue 2, May 1988, pp. 111-118.
7. Chang C.S., Hourng L.W., Chung C.T. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties. Journal of Applied Electrochemistry. Volume 29, Issue 3, March 1999, pp. 321-330.
8. Purcar M., Bortels L., Van Den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. Journal of Materials Processing Technology. Volume 149, Issue 1-3, 10 June 2004, pp. 472-478.
9. Shibli S.M.A., Dilimon V.S., Saji V.S. $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$ mixed oxide composite coating for improvement of Al-alloy sacrificial anodes. Journal of Solid State Electrochemistry. 2007, Volume 11, Issue 2, pp. 201-208. doi: 10.1007/s10008-005-0088-5.
10. Shrivastava P., Moats Michael S. Wet film application techniques

- and their effects on the stability of RuO₂-TiO₂ coated titanium anodes. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009, Volume 39, Issue 1, pp. 107–116. doi: 10.1007/s10800-008-9643-y.
11. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A., Alyab'eva V.I. Titanium anodes with an active coating based on iridium oxides: the effect of the coating's thickness, porosity, and morphology on its stability, selectivity, and catalytic activity. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2005, Vol. 41, No. 10, pp. 1111–1117.
 12. Wang Y., Liao Y., Li W., Tang X., Li X. Carbon coating of Li₄Ti₅O₁₂-TiO₂ anode by using cetyl trimethyl ammonium bromide as dispersant and phenolic resin as carbon precursor. *Ionics*. 2015, Volume 21, Issue 6, pp. 1539–1544. doi: 10.1007/s11581-014-1309-7.
 13. Nikolic B.Z., Panic V.V., Dekanski A.B. Intrinsic potential-dependent performances of a sol-gel-prepared electrocatalytic IrO₂-TiO₂ coating of dimensionally stable anodes. *Electrocatalysis*. 2012, Volume 3, Issue 3, pp. 360–368. doi: 10.1007/s12678-012-0086-1.
 14. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A. Titanium anodes with active coatings based on iridium oxides: the chemical composition of the coatings and the distribution of their components over depth on anodes made of IrO₂, IrO₂ + TiO₂, IrO₂ + RuO₂ + TiO₂, and IrO₂ + RuO₂ + TiO₂ + Ta₂O₅. *Russian Journal of Electrochemistry*. Vol. 39, No. 10, 2003, pp. 1116–1123.
 15. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A. Tantalum Oxide Effect on the Surface Structure and Morphology of the IrO₂ and IrO₂ + RuO₂ + TiO₂ Coatings and on the Corrosion and Electrochemical Properties of Anodes Prepared from These. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2007, Vol. 43, No. 2, pp. 223–228.
 16. Moradi F., Dehghanian C. Influence of heat treatment temperature on the electrochemical properties and corrosion behavior of RuO₂-TiO₂ coating in acidic chloride solution. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 699–704. doi: 10.1134/S2070205113060245.
 17. Dengyong W., Zengwei Z., Ningfeng W., Di Z. Effects of shielding coatings on the anode shaping process during counter-rotating electrochemical machining. *Chinese journal of mechanical engineering*. 2016, Vol. 29, No. 5, pp. 971–976. doi: 10.3901/CJME.2016.0419.055.
 18. Lee D.E., Soper S.A., Wang W. Fabrication and mathematical analysis of an electrochemical microactuator (ECM) using electrodes coated with platinum nano-particles. *Microsystem Technologies*. 2010, Volume 16, Issue 3, pp. 381–390. doi: 10.1007/s00542-009-0940-0.
 19. Wang D., Zhu Z., Bao J., Zhu D. Reduction of stray corrosion by using iron coating in NaNO₃ solution during electrochemical machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, Volume 76, Issue 5, pp 1365–1370. doi: 10.1007/s00170-014-6351-0.
 20. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Самсонов Г.В., Борисова А.Л. и др. М.: Металлургия, 1978. 472 с.

Материал поступил в редакцию 07.11.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

LOOKING AT THE SURFACE QUALITY DURING LOCAL AMMONIUM NITRATE ELECTROLYTIC MACHINING

Ivan Ya. Shestakov – D.Sc. (Eng.), Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-78. E-mail: yakovlevish@mail.ru

Marina V. Voroshilova – Assistant Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-18. E-mail: aniram1988@yandex.ru

Denis S. Voroshilov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31. E-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

Abstract

This article describes the results of the research into electrolytic machining of 1201 aluminium alloy in aqueous solutions of ammonium nitrate. Having analysed some of Russian and international research papers on electrolytic machining, the authors came to the conclusion that studying the shape of an EDM tool (including its simulation) presents an important problem. A variety of factors determine the shape of an EDM tool, such as the electrolyte flow rate, the electrolyte temperature, the current density. The electrode coating is also important as it helps improve the quality of machining. The research conducted helped determine the effect of the electrolyte composition, current density and flow rate on the surface quality along the anode-to-cathode distance. The experiments showed that the flow rate of ~0.55 m/s provides the minimum roughness and the excessive flow rate largely affects the surface quality. It was found that the use of a circular cross-section cathode tool leads to the

current spreading across the surface of the workpiece which reduces the machining accuracy and surface roughness in the transition zone. The use of a cathode with a flat face helps localize the current density on the treated surface thus increasing the machining accuracy. It was established that a cathode tool with a titanium oxide flat face helps reduce the surface roughness. The research helped identify the best electrolytic machining technique for large thin-walled parts when using a titanium cathode tool with a semiconductor coating. Below are the recommended electrolytic machining parameters: current density between 14 and 26 A/cm², flow rate between 0.3 and 0.6 m/s, electrolyte temperature 25 – 30°C. The following aqueous solution is recommended for electrolyte: 15% NH₄NO₃ + 2,5% Na₃C₆H₅O₇.

Keywords: Electrolytic machining, EDM tool, cathode, roughness, electrolyte, flow rate, current density.

References

1. Amitan G.L., Baysupov I.A., Baron Yu.M. et al. *Spravochnik po elektrokhimicheskim i electrophizicheskim metodam obrabotki*. [Handbook of electrochemical and electrophysical machining techniques]. Leningrad, 1988, 719 p. (In Russ.)
2. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. *Teoriya elektrokhimicheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki* [The theory of electrochemical and chemo-physical machining techniques]. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2007. 376 p. (In Russ.)
3. Chang C.S., Hourng L.W. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol.31, iss. 2, 2001, pp. 145–154.
4. Zhou Y., Derby J.J. The cathode design problem in electrochemical machining. *Chemical Engineering Science*. Vol. 50, iss. 17, September 1995, pp. 2679–2689.
5. Jain V.K. Tooling design for ECM. *Precision Engineering*. Vol. 2, iss. 4, October 1980, pp. 195–206.
6. Reddy M.S., Jain V.K., Lal G.K. Tool design for ECM: Correction factor method. *Journal of engineering for industry*. Vol. 110, iss. 2, May 1988, pp. 111–118.
7. Chang C.S., Hourng L.W., Chung C.T. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 29, iss. 3, March 1999, pp. 321–330.
8. Purcar M., Bortels L., Van Den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 149, iss. 1-3, 10 June 2004, pp. 472–478.
9. S.M. A. Shibli, V.S. Dilimon, V.S. Saji. RuO₂–TiO₂ mixed oxide composite coating for improvement of Al-alloy sacrificial anodes. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2007, Vol. 11, iss. 2, pp. 201–208. doi: 10.1007/s10008-005-0088-5.
10. P. Shrivastava, Michael S. Moats. Wet film application techniques and their effects on the stability of RuO₂–TiO₂ coated titanium anodes. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009, Vol. 39, iss. 1, pp. 107–116. doi: 10.1007/s10800-008-9643-y.
11. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov, V.I. Alyab'eva. Titanium anodes with an active coating based on iridium oxides: the effect of the coating's thickness, porosity, and morphology on its stability, selectivity, and catalytic activity. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1111–1117.
12. Y. Wang, Y. Liao, W. Li, X. Tang, X. Li. Carbon coating of Li₄Ti₅O₁₂-TiO₂ anode by using cetyl trimethyl ammonium bromide as dispersant and phenolic resin as carbon precursor. *Ionics*. 2015, vol. 21, iss. 6, pp. 1539–1544. doi: 10.1007/s11581-014-1309-7.
13. B.Z. Nikolic, V.V. Panic, A.B. Dekanski. Intrinsic potential-dependent performances of a sol-gel-prepared electrocatalytic IrO₂–TiO₂ coating of dimensionally stable anodes. *Electrocatalysis*. 2012, vol. 3, iss. 3, pp. 360–368. doi: 10.1007/s12678-012-0086-1.
14. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov. Titanium anodes with active coatings based on iridium oxides: the chemical composition of the coatings and the distribution of their components over depth on anodes made of IrO₂, IrO₂ + TiO₂, IrO₂ + RuO₂ + TiO₂, and IrO₂ + RuO₂ + TiO₂ + Ta₂O₅. *Russian Journal of Electrochemistry*. Vol. 39, no. 10, 2003, pp. 1116–1123.
15. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov. Tantalum Oxide Effect on the Surface Structure and Morphology of the IrO₂ and IrO₂ + RuO₂ + TiO₂ Coatings and on the Corrosion and Electrochemical Properties of Anodes Prepared from These. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2007, vol. 43, no. 2, pp. 223–228.
16. F. Moradi, C. Dehghanian. Influence of heat treatment temperature on the electrochemical properties and corrosion behavior of RuO₂–TiO₂ coating in acidic chloride solution. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 699–704. doi: 10.1134/S2070205113060245.
17. W. Dengyong, Z. Zengwei, W. Ningfeng, Z. Di. Effects of shielding coatings on the anode shaping process during counter-rotating electrochemical machining. *Chinese journal of mechanical engineering*. 2016, vol. 29, no. 5, pp. 971–976. doi: 10.3901/CJME.2016.0419.055.
18. D.E. Lee, S.A. Soper, W. Wang. Fabrication and mathematical analysis of an electrochemical microactuator (ECM) using electrodes coated with platinum nano-particles. *Microsystem Technologies*. 2010, vol. 16, iss. 3, pp. 381–390. doi: 10.1007/s00542-009-0940-0.
19. D. Wang, Z. Zhu, J. Bao, D. Zhu. Reduction of stray corrosion by using iron coating in NaNO₃ solution during electrochemical machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 76, iss. 5, pp. 1365–1370. doi: 10.1007/s00170-014-6351-0.
20. Samsonov G.V., Borisova A.L. et al. *Fiziko-khimicheskie svoystva oksidov. Spravochnik* [The physical and chemical properties of oxides. Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1978. 472 p. (In Russ.)

Received 07/11/16

Образец для цитирования

Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С. Исследование качества поверхности при локальной электрохимической обработке в электролитах, содержащих нитрат аммония // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 64–69. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

For citation

Shestakov I.Ya., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S. Looking at the surface quality during local ammonium nitrate electrolytic machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 64–69. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 539.2

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-70-78

АНОМАЛИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗА КАК СЛЕДСТВИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НЕМ ПРИ ~ 650 , ~ 450 И $\sim 200^\circ\text{C}$

Шахназаров К.Ю.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): необходимость тщательного исследования температурной зависимости свойств железа обусловлена следующим: оно является «главной» основой «главных» промышленных сплавов (сталей); его низкотемпературная ОЦК-конфигурация атомов уникальна и не имеет право на существование, но существует; его теплоемкость «не подчиняется» теории Дебая вблизи не только точки Кюри ($\sim 770^\circ\text{C}$), но и при ~ 200 , ~ 450 и $\sim 650^\circ\text{C}$, что приводит к предположениям о превращениях в нем вблизи этих температур.

Цель работы: на основании литературных и собственных экспериментальных данных обосновано превращение в железе при ~ 200 , ~ 450 и $\sim 650^\circ\text{C}$ для объяснения свойств сталей. **Используемые методы:** исследование проводили на образцах из практически чистого железа (0,008% C). Эксперимент (рентгеноструктурный анализ, сопротивление осадке (установка Gleeble-3800) проводили через каждые 20°C . Методика основана на следующих суждениях. Б.Г. Лившиц: «При изучении фазового равновесия можно пользоваться любым свойством»; А.А. Вертман, А.М. Самарин: «В качестве структурно чувствительных свойств можно выбрать любое примерно из 50 свойств, используемых ныне в физико-химическом анализе»; А.А. Бочвар: «В качестве измеряемого физического свойства можно взять твердость..., электропроводность..., плотность, коэффициент линейного расширения и т.д.». **Новизна:** на основании собственных экспериментальных и литературных данных по аномалиям физико-механических свойств железа (и его производного сталей) обосновывается превращение в нем при ~ 650 , ~ 450 , $\sim 200^\circ\text{C}$. Признание превращений при этих температурах позволяет дать объяснение природы многочисленных аномалий свойств железа и сталей. **Результат:** в статье на основании экстремумов на кривых: усилия сопротивления осадки, тонкой структуры железа в зависимости от температуры, а также многочисленных литературных данных по физико-механическим свойствам железа (и сталей) декларируются превращения при ~ 200 , ~ 450 и $\sim 650^\circ\text{C}$. **Практическая значимость:** признание предполагаемых превращений позволяет объяснить многочисленные аномалии свойств железа и сталей, а также дает возможность прогнозирования свойств сталей, термическая обработка которых включает их пребывание при вышеуказанных температурах.

Ключевые слова: железо, сталь, полиморфизм, превращение, трип-эффект, твердость, прочность, пластичность, теплоемкость.

Введение

Максимум ударной вязкости железа не нашел и не может найти, на наш взгляд, безупречного объяснения, т.к. сингулярная точка может находиться на шести кривых, по данным разных исследований, при ~ 590 , 600 , 630 , 650 , 660 или 670°C [1]. Можно до бесконечности очищать железо от примесей (даже возможно, согласно Йенсену, лишить его полиморфизма [2]) и, наконец-то, получить истинную кривую вязкости,

но ценность этой кривой ничтожна, т.к. производные железа – стали – никогда не были «чистыми» от углерода, кислорода и других примесей в процессе металлургического передела [2].

Максимум вязкости может и не быть, если испытания провести при ~ 360 , 460 , 580 и 760°C [3]. Тогда делается вывод: «вязкость постепенно падает... из-за постепенного размягчения материала» [3]. Этот вывод обусловлен, на наш взгляд, нежеланием Э. Гудремона обсуждать парадоксальную ситуацию: нет единой точки зрения о температурной зависимости вязкости самого

«главного» металла – железа. Тем не менее позиция Гудремона странна: автор предшествующей гудремоновской [3] «энциклопедии стали» – П. Обергоффер показывает абсолютный максимум вязкости сталей при $\sim 625^\circ\text{C}$, хотя не оговаривает содержание углерода и дважды подчеркивает, что кривая «схематическая» [4, с. 227, 228]. Приведенные ниже многочисленные аномалии свойств железа и сталей при ~ 650 , ~ 450 и $\sim 200^\circ\text{C}$ могут быть свидетельством о существенном изменении в ансамблях атомов железа при этих температурах.

Диаграмма Робертса-Аустена (1899 г.) с тепловыми эффектами при A_3 , A_2 , A_1 , ~ 620 , ~ 450 и $\sim 200^\circ\text{C}$ показывают направление поиска вышеперечисленных аномалий свойств.

Теория, материалы и методы исследования

Усилие осадки Р образцов ($\varnothing 10 \times 15$ мм) на половину высоты определяли на установке «Greeble – 3800»: скорость нагрева 5° в секунду, выдержка при температуре (t) деформации 1 мин, скорость деформации $0,5 \text{ с}^{-1}$; температура осадки от 80 до 740°C через каждые 20°C . Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре общего назначения (ДРОН-2), на образцах кубической формы, изготовленных из железа, концентрация углерода в котором составляет $0,008\%$, размерами $10 \times 10 \times 10$ мм.

На температурной зависимости вязкости железа есть две сингулярные точки (минимумы) при ~ 450 и $\sim 900^\circ\text{C}$ [1, 5]. Первая точка может быть связана с предполагаемым превращением в железе и стали [7], а вторая – с безусловным полиморфизмом железа. Это позволяет рассматривать экстремум (максимум) вязкости при $\sim 650^\circ\text{C}$, как следствие превращения при этой температуре.

Основанием для такого предположения является явная аномалия: относительное удлинение δ ($\sim 40\%$) при 600°C больше, чем относительное сужение ψ ($\sim 38\%$) [5]. (Ближайшие температуры испытания 500 и 700°C .)

Отметим, что кривые δ и ψ проведены мимо экспериментальных точек при 600°C , что сделало менее выразительным минимум на кривой ψ и максимум на кривой δ . Оба экстремума соответствуют максимуму вязкости при 600°C [8], то есть не связаны со скоростью деформации. (Все три экстремума вязкости, δ и ψ не были обсуждены.)

Между тем признаком наличия превращения являются более высокие (или почти равные) значения δ , чем ψ . Например, в *trip*-сталях (ПНП-

сталях; ПНП – пластичность, наведенная превращением) это имеет место [8] из-за неоспоримого полиморфного превращения аустенита в мартенсит деформации во время растяжения. Другой пример: в межкуритическом интервале $A_{c1} - A_{c3}$, где полиморфное превращение неоспоримо, максимуму δ ($\sim 90\%$) стали 12ХН3А соответствует минимуму ψ ($\sim 85\%$), а у стали 35 такие же экстремумы на кривых δ ($\sim 88\%$) и ψ ($\sim 92\%$) [9]. То же – в межкуритическом интервале $A_{T3} - A_{T1}$, где превращение неоспоримо, если испытания стали 35 проводить после предварительного нагрева до 980°C и охлаждения до заданной температуры [9]. Особо обратим внимание на ключевое слово «аномалия» в названии работы [9].

Отметим также, что при всех температурах испытания (до 1100°C , через каждые 100°C) разница между ψ и δ значительна, только при 600 , 800 и 900°C она меньше 5% [5]. Последние две температуры находятся вблизи A_2 и A_3 , что делает температуру 600°C равнозначной температурам магнитного и полиморфного превращений.

Такой же вывод можно сделать из рассмотрения температурной зависимости динамической пластичности ($\epsilon_{\text{дин}}$ – укорочение образца при ударном осаживании). Если проводить кривую по экспериментальным точкам, то $\epsilon_{\text{дин}}$ почти не зависит от температуры в интервалах $20-600$ и $900-1100^\circ\text{C}$ и скачкообразно (в $\sim 2,5$ раза) [5] возрастает в интервале $600-900^\circ\text{C}$. Это создает изгибы кривой при 900 и 600°C , т.е. вблизи неоспоримого и предполагаемого в настоящей работе превращений.

Самым убедительным доводом наличия превращения при 600°C является четкий изгиб при 600°C кривой «величины внутренних напряжений, возникающих в армо-железе при нагревании» [5]. (Эта зависимость в интервале $300-920^\circ\text{C}$ названа монотонной, хотя в интервале $300-600^\circ\text{C}$ внутренние напряжения возрастают от 0 до $0,1 \text{ кг/мм}^2$, а в интервале $600-900^\circ\text{C}$ – от $0,1$ до $0,4 \text{ кг/мм}^2$, что означает трехкратную разницу).

Четкий максимум на кривой внутренних напряжений при 900°C (в точке A_3) позволяет рассматривать изгиб этой кривой при 600°C , как следствие превращения в железе.

Таким образом, на всех пяти обсуждаемых температурных зависимостях вязкости, δ , ψ , $\epsilon_{\text{дин}}$ и внутренних напряжений железа [5] есть монотонности или аномалии при 600 или 650°C , как и при $\sim A_3$ (900°C).

Обратимся к физическим свойствам железа.

Доводами в пользу наличия превращения в железе при $\sim 650^\circ\text{C}$ являются: максимум на кривой температурной зависимости числа Лоренца при $\sim 600^\circ\text{C}$ и минимум при $\sim 670^\circ\text{C}$ [10]; максимум на температурной зависимости коэффициента линейного расширения при $\sim 650^\circ\text{C}$ [3]; изгиб кривой температурной зависимости теплоемкости при $\sim 650^\circ\text{C}$ [11]; изгиб кривой (данные Шелтона) температурной зависимости теплопроводности при 600°C , в интервале $600\text{--}700^\circ\text{C}$ она перестает понижаться, если кривую, конечно, проводить по экспериментальным точкам [12]; максимум магнитострикции при $\sim 600\text{--}625^\circ\text{C}$ [13].

Впрочем, превращение в железе при $\sim 650^\circ\text{C}$ было установлено еще в 1886 году Пионшоном: для нагрева железа выше 660°C требуется «гораздо больше калорий» [2], чем ниже 660°C . «Воззрения Пионшона подтвердил в том же году французский ученый Ле Шателье, изучая совсем другое явление» [2] (термоэлектродвижущую силу пар, в состав которых входило железо).

Выделял температуру 670°C и А. Шульце, считавший, что магнитное превращение железа распространяется на интервал температур $720\text{--}783^\circ\text{C}$, а на 50°C ниже температуры начала магнитного превращения, т.е. при 670°C , наблюдается ускоренный рост температурного коэффициента электросопротивления, линейно изменявшегося в интервале $600\text{--}670^\circ\text{C}$ [14]. Так же изменяется максимальная магнитная проницаемость [13].

Поскольку стали, особенно углеродистые и низколегированные, являются производными железа – в них примерно 95 атомов железа из 100 – полагаем допустимым рассмотреть некоторые аномалии механического поведения сталей, которые могут быть связаны с превращением в железе при $\sim 650^\circ\text{C}$:

1. Несмотря на разупрочнение, имеет место «некоторое снижение ударной вязкости при температурах отпуска выше 600°C » [15], выше 640°C [16], выше 650°C [3], ψ – выше 600°C [17]. Эта явная аномалия никак не комментируется [3], связывается с грубыми частицами цементита по границам ферритных зерен [15], объясняется «увеличением размеров кристалликов α -железа и мозаичных блоков вследствие собирательной рекристаллизации» [17], связывается с «оптимальными размерами блоков феррита, карбидов и межкарбидных расстояний» [16].

Полагаем, к перечисленному можно добавить и декларируемое превращение в железе при $\sim 650^\circ\text{C}$.

2. «В классической работе М. Гензамера с соавторами, приводимой во многих монографиях и учебниках, например в [3]» [18] показана явная аномалия: понижение температуры изотермического перлитного превращения стали с 0,78% C от 700 до 600°C повышает $\sigma_{0.2}$ в $\sim 2,5$ раза, σ_B в $\sim 1,2$ раза, HRC в $\sim 2,5$ раза, δ в $\sim 1,2$ раза, ψ в ~ 2 раза [3, 18].

По-видимому, объяснение Гудремона [3] этой аномалии («несмотря на повышение твердости и прочности, возрастают также относительное удлинение и поперечное сужение») настолько не устраивает авторов работы [18], что они ограничились обсуждением только прочностных свойств.

Полагаем, при обсуждении этой аномалии можно использовать развиваемую в настоящей работе концепцию.

3. Крупнозернистость, т.е. хрупкость стали 38ХНЗМ после закалки от 1300°C , не устраняется ни обычной закалкой от 880°C , ни ступенчатым сорбитизирующим нагревом под закалку ($20 \rightarrow 675 \rightarrow 880 \rightarrow 20^\circ\text{C}$). Но стоит после 675°C сделать подстуживание до 600°C , а затем уже нагревать под закалку от 880°C ($20 \rightarrow 675 \rightarrow 600 \rightarrow 880 \rightarrow 20^\circ\text{C}$), крупнозернистость исчезает полностью [19].

Обсуждение этого эксперимента В.Д. Садовский заканчивает так: «Но с еще большей определенностью можно сказать, однако, что проблема структурной наследственности не может быть сведена к описанному действию остаточного аустенита» [19].

Полагаем допустимым предположить, что измельчение зерна происходит в результате рекристаллизации аустенита, для которой нужен стимул – «внутренний (фазовый) наклеп» [19]. Этот стимул мог бы появиться во время подстуживания ($675 \rightarrow 600^\circ\text{C}$), если, конечно, допустить превращение при $\sim 650^\circ\text{C}$.

4. Разохрупчивание стали, находящейся в состоянии обратимой отпускной хрупкости (закалка + отпуск при $\sim 650^\circ\text{C}$ с последующим медленным охлаждением), может быть осуществлено «независимо от степени развития отпускной хрупкости, кратковременным (несколько минут) повторным нагревом до температуры выше 600°C с последующим быстрым охлаждением»

[15]. По-видимому, за «несколько минут» при $\sim 650^\circ\text{C}$ могут пройти процессы только в условиях аномальной диффузионной подвижности, а она характерна, например, для магнитного превращения «вблизи точки Кюри» [20].

Нам больше импонирует изложенная В.Д. Садовским версия М.В. Якутовича: гипертрофированное внимание к границам зерен («усиленная травимость границ», чаще, но не всегда, межкристаллитный излом [21]) охрупченной стали не должно исключать внимания к телу зерна – «строго говоря, межзеренное разрушение еще не обязательно означает, что вызывающие его явления происходят на границах зерен» [21]. Полагаем, охрупченные границы могут себя проявить, если только основная масса металла – тело зерна – не способна к деформации. Этой неспособностью может не обладать быстроохлажденная от $\sim 650^\circ\text{C}$ сталь, т.е. закаленная от субкритической температуры. (После такой закалки «иногда наблюдают незначительное повышение твердости» [3].) Закалка без полиморфного превращения, как известно, фиксирует высокотемпературное состояние. Если придерживаться версии о превращении в железе при $\sim 650^\circ\text{C}$, то разохлаждение можно связать с фиксированием высокотемпературной ($> \sim 650^\circ\text{C}$) подмодификации железа.

5. На температурных зависимостях $\sigma_{0,2}$ и σ_B стали АК29 (низкоуглеродистая среднелегированная сталь, состав не указан) отчетливые изгибы при $\sim 650^\circ\text{C}$ (как и при $\sim 450^\circ\text{C}$). При $\sim 650^\circ\text{C}$ пересекаются кривые, полученные при скоростях растяжения $0,4$ и $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [22], что означает исключение влияния второго влияющего фактора – скорости; первым является температура растяжения. Полагаем такое возможно в случае превращения при $\sim 650^\circ\text{C}$. Это превращение может быть доминирующим фактором, нивелирующим различие в механическом поведении при указанных скоростях растяжения.

6. С превращением при $\sim 650^\circ\text{C}$ можно связать и «удивительный факт» [18]: «в процессе эвтектоидного превращения эвтектоидной стали из высокотемпературной фазы – всего за несколько секунд образуются пластины феррита, содержащего от 0,02 до 0,015% С, и пластины цементита, содержащего 6,67% С» [18]. Происходит эта реакция в «узком температурном интервале» [18], «как правило, при $670...630^\circ\text{C}$ » [18].

Полагаем, превращение при $\sim 650^\circ\text{C}$ может

обеспечить аномально быструю диффузию при $670-630^\circ\text{C}$ и объяснить «удивительный факт» [18], а также гораздо более удивительный: отсутствие следов крупных по сравнению с железом атомов сурьмы в Оже-спектрах изломов с устраненной обратимой хрупкостью, хотя «время, требуемое для устранения сегрегаций, очень мало» [23].

М.Г. Лозинский в своей монографии [24] приводит кривую «горячей твердости карбонильного железа в интервале температур $20-750^\circ\text{C}$ (рис. 1). На кривой твердости видны отчетливые максимумы при ~ 250 и 450°C . При $\sim 650^\circ\text{C}$ угол наклона кривой резко уменьшается.

Нами проведено исследование влияния температуры на сопротивление осадки (Р) образцов из железа (0,008% С) при температуре $540-740^\circ\text{C}$ (рис. 2).

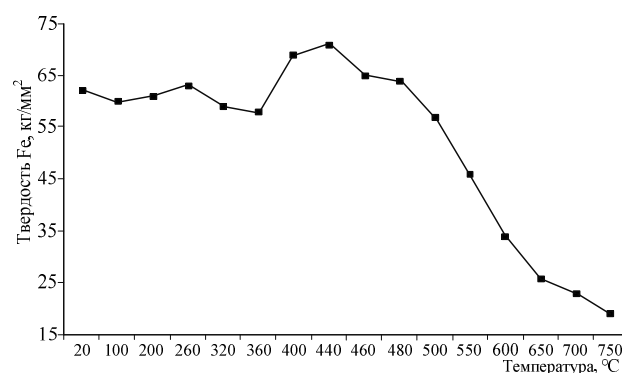


Рис. 1. Зависимость твердости железа от температуры испытания (по М.Г. Лозинскому)

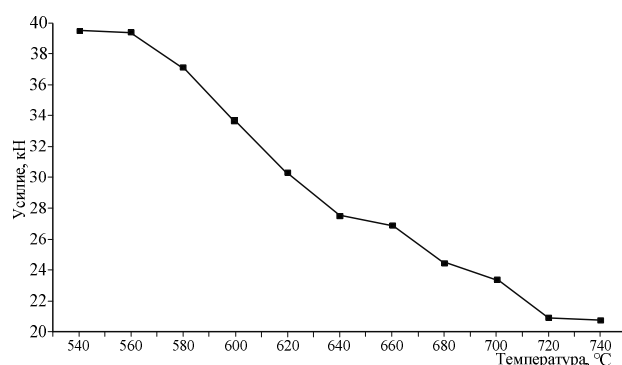


Рис. 2. Зависимость усилия при деформации на половину высоты образца железа при температуре от 540 до 740°C

В районе $\sim 650^\circ\text{C}$ наблюдается снижение темпа усилия деформации, повторяя кривую твердости М.Г. Лозинского. Такое же снижение темпа уменьшения твердости и изгиб кривых наблюдается выше температур бесспорных полиморфных

превращений у кобальта ($\sim 470^\circ\text{C}$), лантана ($\sim 600^\circ\text{C}$) и церия ($\sim 450^\circ\text{C}$) [9]. Изгибы кривых твердости вблизи температур полиморфного превращения циркония и титана отмечены в [10]. Изгибы качественно такие же, как у железа при $\sim 650^\circ\text{C}$. Таким образом, при $\sim 650^\circ\text{C}$ в Fe происходят изменения, характерные для полиморфных металлов, что подтверждается, например, изгибом кривой коэффициента диффузии (как в точке Кюри) [10], магнитной проницаемости [13], острым минимумом теплоемкости [27] и т.д.

Исследование параметров тонкой структуры железа (0,008% C) проводили на предварительно закаленных от 1050°C в воду образцах железа (0,008% C). Каждому режиму отпуска (через 20°C) подвергали по три образца, исследование проводили дважды на одних и тех же образцах. По стандартным методикам определяли ширину рентгеновских линий 110(B_{110}) (рис. 3), 220(B_{220}) (рис. 4) и параметра решетки (a) (рис. 5).

На рис. 3, 4, 5 показаны минимумы при $\sim 650^\circ\text{C}$ ширины линий (110) и (220), а также параметра решетки (a), что может свидетельствовать об изменениях тонкой структуры железа при $\sim 650^\circ\text{C}$.

Особо отметим: если эксперимент вести с «шагом» в $40\text{--}50^\circ\text{C}$, то минимум не обнаруживается. Следовательно, изменения тонкой структуры происходят в очень узком температурном интервале. Резкое падение теплоемкости железа при $\sim 650^\circ\text{C}$ также обнаруживается в очень узком температурном интервале [30].

Интерес к происходящему в железе при $\sim 450^\circ\text{C}$ вызван максимумами δ и ψ при росте σ_B и $\sigma_{0.2}$ продуктов изотермического превращения аустенита [3, 18], хрупкостью продуктов отпуска закаленной и наклепанной стали, полным растворением карбида железа при отпуске [25], хрупкостью после субкритической закалки от 680°C [25].

Интересна реакция на происходящее в железе при 450°C : Б.Г. Лившиц в учебнике [26] опустил кривую термоЭДС – t с отчетливыми эффектами при $\sim 450^\circ\text{C}$, A_2 и A_3 . Е.М. Савицкий [3] скрыл минимум δ при снижении σ_B при 400°C , проводя кривую мимо экспериментальной точки. Диаграмма Fe-C Робертса – Аустена фундаментальна, но тепловые эффекты при ~ 420 и $\sim 470^\circ\text{C}$ (на разных сортах железа) забыты. Б.М. Могутнов и другие [27] показывают отчетливые максимум и минимум теплоемкости вблизи $\sim 450^\circ\text{C}$, но без единой ссылки объявляют их ошибкой эксперимента, проводя кривую теплоемкости мимо экспериментальных точек. Карл Бенедикс поддержал

идею Феликса Робина о превращении в железе «между $400\text{--}450^\circ\text{C}$ », но это забыто. Забыто также суждение Обергоффера: «Имеем ли мы здесь (при $\sim 450^\circ\text{C}$) дело с дальнейшими превращениями в чистом железе, должны показать дальнейшие исследования».



Рис. 3. Зависимость усредненного по трем точкам уширения дифракционных максимумов линии 110 (B_{110}) от температуры отпуска чистого железа. Серия эксперимента №1 и 2

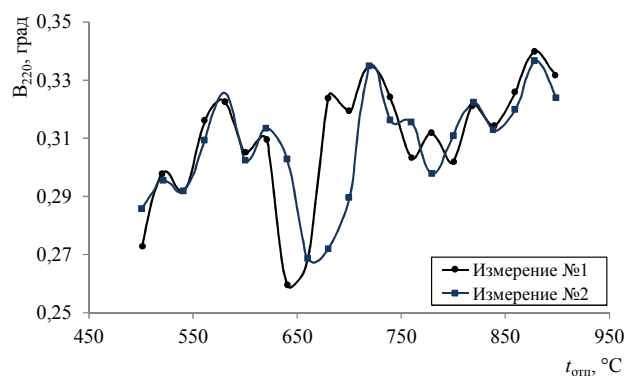


Рис. 4. Зависимость усредненного по трем точкам уширения дифракционных максимумов линии 220 (B_{220}) от температуры отпуска чистого железа. Серия эксперимента №1 и 2

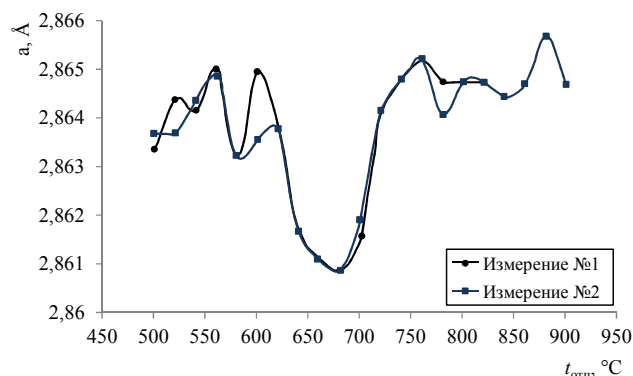


Рис. 5. Зависимость усредненного по трем точкам параметра решетки (a) от температуры отпуска чистого железа. Серия эксперимента №1 и 2

Нами проведено исследование влияния температуры на сопротивление осадки (P) образцов из железа (0,008% C) при температуре 540–740°C (рис. 6).

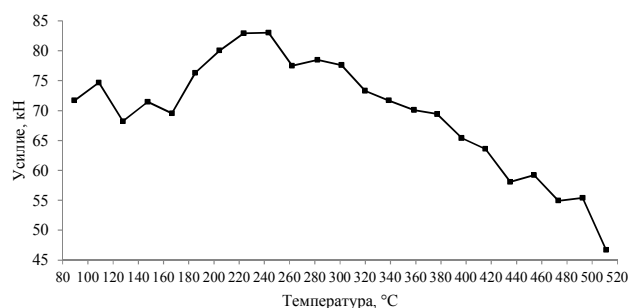


Рис. 6. Зависимость усилия при деформации на половину высоты образца железа при температуре от 80 до 520°C

Локальный максимум P при $\sim 450^\circ\text{C}$ (см. рис. 6) соответствует изгибу кривой магнитной проницаемости, максимуму твердости (М.Г. Лозинский (см. рис. 1)), что характерно для полиморфного урана. При $\sim 450^\circ\text{C}$ заметно меняется растворимость водорода и углерода в железе, что является показателем сил связи в решетке, «позволяющей» растворяться в ней до ~ 5 ат. % углерода [25].

Нами исследованы параметр решетки, ширина (B) линий (110) и (220) закаленного от 1050°C железа (0,008% C) после отпуска. При $t_{\text{отп}} \sim 450^\circ\text{C}$ наблюдается еле выраженный максимум параметра решетки. Какой-либо закономерности в изменении ширины линий установить не удалось. Отсутствие корреляции между твердостью и шириной линии следует из обработки данных Г.В. Курдюмова и Н. Ослона в [28]: при $t_{\text{отп}} \sim 430^\circ\text{C}$ отчетливый изгиб кривой $B - \text{HRC}$ у закаленных сталей с $\sim 0,1$, $\sim 0,4$ и $\sim 1,0\%$ C. Отсутствие корреляции между B и HB после отпуска ниже 380°C отмечается [29]. То же – для продуктов изотермического превращения аустенита при 420°C [18]. Отсутствие корреляции может свидетельствовать о существенном изменении в ансамблях атомов железа при $\sim 450^\circ\text{C}$.

Обратимся к происходящему при $\sim 200^\circ\text{C}$.

Самый мощный эффект – изгиб кривой температурной ($0-1100^\circ\text{C}$) зависимости числа Лоренца – находится при $\sim 200^\circ\text{C}$ [10]. Это подтверждается резким снижением остаточной индукции перлита и сорбита при 180°C , которое Бозорт [30] назвал «неожиданным». На кривой коэрцитивной силы, максимальной индукции и потерь на гистерезис изгиб при $\sim 200^\circ\text{C}$ [12]. «В районе 200°C характер хода кривой» коэффици-

ента диффузии «изменяется» (авторов [31], которые излагают чужую версию о «ловушках» (дефектах строения), которые при 200°C вряд ли меняются). «Неожиданно» площадка текучести на кривой растяжения наклепанной стали с $0,2\%$ C (97% феррита) исчезает после старения ($20-650^\circ\text{C}$) только при 200°C [32], что, согласно Б.Г. Лившицу, является признаком отсутствия деформационного старения у Fe. Пик внутреннего трения Кёстера, «относительно природы» которого «существуют различные мнения», от содержания углерода ($0,7-1,25\%$) и остаточного аустенита почти не зависит [33]. Находится он при 200°C , т.е. вблизи характеристической температуры Дебая ($\sim 150^\circ\text{C}$), вычисленной по теплоемкости. Даркен, уничтоживший 200 -градусный пик «горячей» твердости железа отжигом при 910°C (54 часа) в водороде, не учел, что он, будучи в расплаве, а затем улетучившийся при горячем переделе, оставляет «след» в пониженной пластичности при 20°C . В паре Cu – Fe кривая термоЭДС «имеет точку поворота при $\sim 250^\circ\text{C}$ ». По аналогии с кривой термоЭДС пары Fe – Ni, имеющей изгиб в точке Кюри никеля (360°C) [12], можно предполагать превращение в Fe при $\sim 200^\circ\text{C}$. Робертс-Аустен показал отчетливый тепловой эффект у Fe не только при A_3 , A_1 , ~ 620 , ~ 450 , но и при $\sim 220^\circ\text{C}$. «Закон роста окисной пленки на Fe является логарифмическим (200°C) и становится параболическим при температуре, превышающей эту величину». «При температуре 200°C , по-видимому, механизм окисления претерпевает глубокие изменения» [3]. При $\sim 230^\circ\text{C}$ имеет место мощный изгиб модуля сдвига мягкой стали [35]. Второй изгиб при $\sim 110^\circ\text{C}$ может быть связан тоже с превращением, т.к. у закаленных [3] или наклепанных [36] сталей после отпуска при 100°C максимальная твердость.

Нами изучено влияние температуры отпуска железа (0,008% C) после закалки в воду от 1050 и 1220°C и отпуска в интервале температур $100-350^\circ\text{C}$ на параметры тонкой структуры. Несмотря на большой разброс экспериментальных данных, что, возможно, связано с трудностью соблюдения температурного режима в печи вблизи $\sim 200^\circ\text{C}$, после отпуска при 210°C наблюдается максимум параметра решетки и ширины линии (110); у ширины линии (220) максимум после отпуска при 180°C . Эти данные подтверждают заметные изменения в железе при этих температурах, которым Обергоффер приписывает раздвоение точки Кюри цементита эвтектоидной

стали, которого в нашем железе нет.

При 220°C явный максимум сопротивления осадки (см. **рис. 6**) образцов из чистого железа (0,008% C), повторяющий максимум горячей твердости железа [24] (см. **рис. 1**).

По-видимому, эти изменения свойств железа находят свое продолжение в изгибах при ~200°C: удлинения при нагреве стали с 0,25% C [12] и стали 70, предварительно наклепанной при 300°C [33]; кривой коэрцитивной силы после отпуска при 200°C закаленной стали с ~1,0% C [3]; в минимуме δ и ψ при ~200°C нормализованной и термоулучшенной стали с 0,47% C, несмотря на снижение σ_s [3]; в максимуме теплоемкости стали с 1,23% C после отпуска при 200°C [37]; в изгибе фундаментальной дилатогаммы закаленной стали при ~180°C [38].

Заключение

Аномалии на температурных зависимостях механических и физических свойств могут быть следствием превращения в железе при ~200, ~450 и ~650°C, которое, возможно, определяет аномалии механического поведения сталей. Признание превращений при этих температурах позволяет объяснить: экстремальные свойства продуктов изотермического превращения аустенита, ступенчатой закалки, отпуска мартенсита, аномально высокую диффузию, появление стимула к рекристаллизации аустенита, природу обратимой отпускной хрупкости (~650°C); экстремальные значения свойств продуктов изотермического превращения аустенита, продуктов отпуска мартенсита после наклепа и субкритической закалки, исчезновение карбида железа, природу осмондита (~450°C); причину снижения намагниченности перлита, сорбита и мартенсита, максимумов ударной вязкости и твердости железа, исчезновение площадки текучести на кривой растяжения наклепанной стали после старения, природу необратимой отпускной хрупкости (природа последней, как и обратимой до сих пор дискуссионна) (~200°C) и др.

Список литературы

1. Гаев И.С., Шеянова Е.В. Полиморфизм и его влияние на свойства железа // *Металловедение: материалы симпозиума по металлургии и металлостроению, посвященного 100-летию открытия Д.К.Черновым полиморфизма железа*. М.: Наука, 1971. С. 26 – 35.
2. Тырпель Е. История развития диаграммы железо – углерод. М.: Машиностроение, 1968. 280 с.
3. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Т.1. М.: Металлургиздат, 1959. 952 с.

4. Обергоффер Э. Техническое железо. М.; Л.: Металлургиздат, 1940. 535 с.
5. Савицкий Е.М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 294 с.
6. Морозов О.П. О некоторых закономерностях превращения в железе при охлаждении с высокими скоростями / О.П. Морозов, Д.А. Мирзаев, М.М. Штейнберг // *ФММ*. 1971. Т.32. №6. С. 1290–1296.
7. Шахназаров К.Ю., Шахназаров А.Ю. 430±30°C – узловая (критическая) температура железа и углеродистой стали // *Митом*. 2001. №11. С. 24–25.
8. Малышев К.А. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железоникелевой основе / К.А. Малышев, В.В. Сагарадзе, И.П. Сорокин, Н.Д. Земцова, В.А. Теплов, А.И. Уваров. М.: Наука, 1982. 260 с.
9. Васильева А.Г., Погодин-Алексеев Г.И. Аномалия прочности и пластичности в межкритическом интервале // *Митом*. 1957. №1. С. 23–29.
10. Powell R.W. Further measurements of the thermal and electrical conductivity of iron at high temperatures // *The proceedings of the physical society*. 1939. V. 51. Part 3. №285. P. 407–418.
11. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 328 с.
12. Лившиц Б.Г. Физические свойства сплавов. М.: Металлургиздат, 1946. 320 с.
13. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 784 с.
14. Schulze A. Über eine besondere erscheinung bei umwandlungen, die sich über ein temperaturegebiet erstrecken // *Zeitschrift für metallkunde*. 1935. Bd. 27. №11. S. 251–255.
15. Новиков И.И. Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1978. 392 с.
16. Крамаров М.А., Шахназаров Ю.В. Сопротивление распространению трещины стали 40Х в зависимости от температуры отпуска // *Митом*. 1971. №7. С. 76–77.
17. Мороз Л.С. Тонкая структура и прочность стали. М.: Металлургиздат, 1957. 159 с.
18. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табатчикова, Ю.В. Хлебникова. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 311 с.
19. Садовский В.Д., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в закаленной стали. М.: Наука, 1968. 113 с.
20. Григорович В.К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа. М.: Наука, 1970. 292 с.
21. Садовский В.Д. Итоги дискуссии по отпускной хрупкости // *Митом*. 1957. №6. С. 24–42.
22. Рудницкий Н.П. Статические механические свойства стали АК29 в диапазоне температур 290–1500 К // *Металлы*. 2003. №1. С. 57–62.
23. Устиновщиков Ю.И., Банных О.А. Природа отпускной хрупкости сталей. М.: Наука, 1984. 240 с.
24. Лозинский М.Г. Высокотемпературная металлография. М.: Машгиз, 1956. 312 с.
25. Гринев В.Н., Петров Ю.Н., Трефилов В.И. Вопросы физики металлов и металлостроения. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. №10.
26. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
27. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 328 с.

28. Шахназаров Ю.В., Андреева В.Д. Твердость и ширина рентгеновской линии углеродистых и среднелегированных сталей после отпуска при 20–670°C // Материаловедение, пластическая и термическая обработка. СПб., 2001. С. 34–36.
29. Физическое металловедение / Я.С. Уманский, Б.Н. Финкельштейн, М.Е. Блантер, С.Т. Кишкин М.: Metallurgizdat, 1955. 724 с.
30. Мороз Л.С., Чечулин Б.Б. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgiya, 1967. 256 с.
31. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное упрочнение стали. М.: Metallurgiya, 1972. 320 с.
32. Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращение при отпуске стали. М.: Metallurgiya, 1973. 323 с.
33. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1965. 429 с.
34. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 1. 600 с.
35. Кутяйкин В.Г. Влияние деформации и термической обработки при металлургическом переделе на искажения кристаллической решетки и механических свойств сталей // Металл. 2002. №8. С. 13–17.
36. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
37. Лившиц Б.Г. Физические свойства сплавов. М.: Metallurgizdat, 1946. 320 с.

Материал поступил в редакцию 22.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-70-78

ABNORMAL PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF IRON RESULTANT FROM TRANSFORMATIONS AT ~650, ~450 AND ~200°C

Karen Yu. Shakhnazarov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia. E-mail: karen812@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7501-6590>

Abstract

Problem Statement (Relevance): The need for a thorough study of the relationship between the temperature and the properties of iron is due to the following: iron is the "main" base of the "main" industrial alloys (steels); the body-centered cubic lattice characteristic of iron at low temperatures is unique and theoretically impossible, but it still exists; the heat capacity of iron «is contradictory to» Debye theory not only when it reaches Curie point (~ 770°C), but also at ~ 200°C, ~ 450°C and ~ 650°C, which leads to the assumptions that transformations may occur in iron when it reaches the above temperatures. **Objectives:** The aim of the research is to use the literature and empirical data to justify the transformations that occur in iron at ~200°C, ~450°C and ~650°C in order to explain the properties of steels. **Methods Applied:** The specimens used in the research were almost pure iron (0.008% C). A 20°C step was used for the experiment, which included an x-ray diffraction analysis and identifying the resistance to sinking strain (with the help of Gleeble 3800). The methodology is based on the following propositions by B.G. Livshits: «Any property can be used for analyzing the phase equilibrium»; by A.A. Vertman, A.M. Samarin: «One can choose any from around 50 properties currently used in physical and chemical analysis as structure-sensitive properties»; by A.A. Bochvar: «As a measured physical property, one can be take hardness..., electrical conductivity..., density, linear expansion coefficient and so on». **Originality:** Based on the empirical and theoretical data on abnormal physical and mechanical properties of iron (and steel as its derivative) the article describes why transformations occur in iron at ~ 650°C, ~ 450°C, ~ 200°C. By recognizing the transformations that occur in iron at the above temperatures one can explain the nature of multiple abnormal properties of iron and steel. **Findings:** Using the following curves: «resistance to sinking strain» and «fine structure of iron depending on the temperature» – and abundant literary evidence describing the physical and mechanical properties of iron (and steel), the

article states that transformations occur in iron at ~200°C, ~450°C and ~650°C. **Practical Relevance:** By recognizing that the suggested transformations do take place, one can find the explanation for multiple abnormal properties demonstrated by iron and steel, as well as predict the properties of steels that are exposed to the above mentioned temperatures as part of the heat treatment process.

Keywords: Iron, steel, polymorphism, transformation, TRIP effect, hardness, strength, ductility, heat capacity.

References

1. Gaev I.S., Sheyanova E.V. Polymorphism and his impact on the properties of iron. *Metallovedenie. Materialy simpoziuma po metallurgii i metallovedeniyu, posvyashchennogo 100-letiyu otkrytiya D.K. Chernovym polimorfizma zheleza* [Proceedings of the Symposium on Metallurgy and Science of Metals marking the 100th anniversary of Chernov's discovery of polymorphism in iron]. Moscow: Nauka, 1971, pp. 26–35. (In Russ.)
2. Tyrkel E. *Istoriya razvitiya diagrammy zhelezo – uglerod* [The history of Iron-Carbon Diagram]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968. 280 p. (In Russ.)
3. Gudremont E. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Vol. 1. Moscow: Metallurgizdat, 1959. 952 p. (In Russ.)
4. Obergoffer E. *Tekhnicheskoe zhelezo* [Technical iron]. Moscow, Leningrad: Metallurgizdat, 1940. 535 p. (In Russ.)
5. Savitsky E.M. *Vliyaniye temperatury na mekhanicheskiye svoystva metallov i spлавov* [The effect of temperature on the mechanical properties of metals and alloys]. Moscow, 1957. 294 p. (In Russ.)
6. Morozov O.P., Mirzaev D.A., Steinberg M.M. On some regular transformations that occur in iron under rapid cooling conditions. *FMM*, 1971, vol. 32, no. 6, pp. 1290–1296. (In Russ.)
7. Shakhnazarov K.Yu., Shakhnazarov A.Yu. 430± 30°C – a nodal (critical) temperature of iron and carbon steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals]. 2001, no.11, pp. 24–25. (In Russ.)
8. Malyshev K.A., Sagaradze V.V., Sorokin I.P., Zemtsova N.D., Teplov V.A., Uvarov A.I. *Fazoviy naklep austenitnykh spлавov na zhelezonikelevoy osnove* [The phase hardening of austenitic iron-

- nickel alloys]. Moscow: Nauka, 1982. 260 p. (In Russ.)
9. Vasilieva A.G., Pogodin-Alekseev G.I. The anomaly of strength and ductility in the intercritical range. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals]. 1957, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
 10. Powell R.W. Further measurements of the thermal and electrical conductivity of iron at high temperatures. The proceedings of the physical society. 1939, vol. 51, part 3, no. 285, pp. 407–418. (In Russ.)
 11. Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. *Termodinamika zhelezouglerodistykh spлавov* [The thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 328 p. (In Russ.)
 12. Livshits B.G. *Fizicheskie svoystva spлавov* [The physical properties of alloys]. Moscow: Metallurgizdat, 1946. 320 p. (In Russ.)
 13. Bozorth R. *Ferromagnetizm* [Ferromagnetism]. Moscow, 1956. 784 p. (In Russ.)
 14. Schulze A. On a special phenomenon in transformations that extend over a temperature range. *Journal of metallurgy*. 1935, no.11, pp. 251–255. (In Russ.)
 15. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki* [The theory of heat treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1978. 392 p. (In Russ.)
 16. Kramarov M.A., Shakhnazarov Yu.V. The crack resistance of 40X steel determined by the tempering temperature. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals]. 1971, no.7, pp 76–77. (In Russ.)
 17. Moroz L.S. *Tonkaya struktura i prochnost' stali* [The fine structure and strength of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1957. 159 p. (In Russ.)
 18. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Perlit v uglerodistykh stalyakh* [Perlite in carbon steels]. Ekaterinburg, 2006. 311 p. (In Russ.)
 19. Sadvovsky V.D., Fokina E.A. *Ostatochnyi austenit v zakalennoy stali* [Retained austenite in hardened steel]. Moscow: Nauka, 1968. 113 p. (In Russ.)
 20. Grigorovich V.K. *Elektronnoe stroenie i termodinamika spлавov zheleza* [The electronic structure and the thermodynamics of iron alloys]. Moscow: Nauka, 1970. 292 p. (In Russ.)
 21. Sadvovsky V.D. The results of the discussion on temper brittleness. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals], 1957, no. 6, pp. 24–42. (In Russ.)
 22. Rudnitskiy N.P. The static mechanical properties of AK29 steel in the temperature range of 290 to 1500 K. *Metally*, 2003, no. 1, pp. 57–62. (In Russ.)
 23. Ustinovshchikov Yu.I., Bannykh O.A. *Priroda otpuschnoy khrupkosti staley* [The nature of temper embrittlement in steels]. Moscow: Nauka, 1984. 240 p. (In Russ.)
 24. Lozinskiy M.G. *Vysokotemperaturnaya metallografiya* [High-temperature metallography]. Moscow: Mashgiz, 1956. 312 p. (In Russ.)
 25. Gridnev V.N., Petrov Yu.N., Trefilov V.I. *Voprosy fiziki metallov i metallovedeniya* [Some Problems of Physics of Metals and Metallurgy]. Kiev, 1960, no. 10. (In Russ.)
 26. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Linetskiy Ya.L. *Fizicheskie svoystva metallov i spлавov* [The physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 320 p. (In Russ.)
 27. Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. *Termodinamika zhelezouglerodistykh spлавov* [The thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 328 p. (In Russ.)
 28. Shakhnazarov Yu.V., Andreeva V.D. The hardness and the width of the X-ray line of carbon and medium-alloy steels after tempering at 20–670°C. *Materialovedenie, plasticheskaya i termicheskaya obrabotka*. [Materials Science, Shaping and Heat Treatment]. St. Petersburg, 2001, pp. 34–36. (In Russ.)
 29. Umanskiy Ya.S., Finkelstein B.N., Blanter M.E., Kishkin S.T. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow: Metallurgizdat, 1955. 724 p. (In Russ.)
 30. Moroz L.S., Chechulin B.B. *Vodorodnaya khrupkost' metallov* [Hydrogen embrittlement of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1967. 256 p. (In Russ.)
 31. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.E. *Deformatsionnoe uprochnenie stali* [Strain hardening of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 320 p. (In Russ.)
 32. Belous M.V., Cherepin V.T., Vasiliev M.A. *Prevrashchenie pri otpuske stali* [Transformation of steel during tempering]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 323 p. (In Russ.)
 33. Kubaschewski O., Hopkins B. *Okislenie metallov i spлавov* [Oxidation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1965. 429 p. (In Russ.)
 34. Bell. J.F. *Eksperimentalnye osnovy mekhaniki deformiruemyykh tverdykh tel* [Basic experiments of deformable solid mechanics]. Moscow: Nauka, 1984, part 1, 600 p. (In Russ.)
 35. Kutaykin V.G. The impact of deformation and heat treatment on lattice strain and the mechanical properties of steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals]. 2002, no. 8, pp. 13–17. (In Russ.)
 36. Kurdyumov G.V., Utevsky L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977. 236 p. (In Russ.)
 37. Livshits B.G. *Fizicheskie svoystva spлавov* [The physical properties of alloys]. Moscow: Metallurgizdat, 1946. 320 p. (In Russ.)

Received 22/10/16

Образец для цитирования

Шахназаров К.Ю. Аномалии физико-механических свойств железа как следствие превращений в нем при ~650, ~450 и ~200°C // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 70–78. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-70-78

For citation

Shakhnazarov K.Yu. Abnormal physical and mechanical properties of iron resultant from transformations at ~650, ~450 and ~200°C. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 70–78. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-70-78

ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ МАРКИ 150ХНМ

Ефимов А.В., Чернов В.П.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): термическая обработка металлических изделий является неотъемлемой частью технологического процесса любого машиностроительного предприятия. Она может являться как промежуточной операцией в производственном цикле, так и основной конечной операцией при создании деталей машин. Это энергетически затратная операция, требующая немалых ресурсов. **Цель работы:** изучение оптимальных режимов термовременной обработки для изделий из различных марок сталей. Термовременная обработка также является одним из видов термической обработки металлов. Представляет собой кратковременное тепловое воздействие на металл при невысоких температурах, улучшая его механические характеристики при небольших энергетических затратах вследствие кратковременного воздействия. Задачей данных исследований является поиск рациональных режимов термовременной обработки для отливок из стали марки 150ХНМ. **Используемые методы:** для анализа химического состава стали применялся спектральный метод определения содержания химических элементов. Для термического анализа отливок – метод дифференциальной сканирующей калориметрии. **Новизна:** среднеуглеродистая валковая сталь данной марки подвергается очень сложной и энергоемкой термической обработке. Термовременная обработка позволяет упростить режимы термической обработки отливок и снизить энергетические затраты. Сталь марки 150ХНМ является заэвтектоидной, используется для изготовления кованных и литых валков горячей прокатки, а также применяется для изготовления валков холодной прокатки. Режим термической обработки для данной марки стали состоит из предварительного тройного отжига и окончательной термической обработки по режиму двойной нормализации с высоким отпускком. Существенным недостатком данной стали после прохождения такой термической обработки является невысокая твердость металла. Это связано с низкой скоростью охлаждения после аустенизации, процесса, аналогичного закаливанию углеродистых сталей, состоящего из нагрева до 1050–1100°C, кратковременного (в течение 10 мин) выдерживания при этой температуре и последующего быстрого охлаждения. **Результат:** проведенные эксперименты показали, что, используя термовременную обработку для данной марки, можно повысить твердость металла, не прибегая к сложным и энергозатратным режимам термической обработки. **Практическая значимость:** получены исходные данные для проведения режимов термовременной обработки для отливок из марки 150ХНМ.

Ключевые слова: сталь, термовременная обработка, структура, твердость, износостойкость, температура, нагрев, охлаждение.

Введение

Термическая обработка металлов в твердом состоянии представляет собой целую совокупность различных нагревов, а также охлаждений и выдержек при различных температурах. Данная операция является неотъемлемым обязательным звеном технологического процесса производства полуфабрикатов и деталей машин [1]. На металлургических и машиностроительных заводах термическая обработка выступает как промежуточная операция технологического цикла, так и конечная операция для придания определенного комплекса механических свойств. Термическая обработка стали включает в себя нагрев деталей или изделий до опреде-

ленной температуры, выдержку при этой температуре определенное время и последующее охлаждение [2]. Применяя различные режимы термической обработки, т. е. изменяя температуру, длительность нагрева, время выдержки изделия в нагретом состоянии и скорость охлаждения, получают желаемую структуру стали, а следовательно, ее свойства. Термическая (тепловая) обработка – самый распространенный в современной технике способ изменения свойств металла. На металлургических и машиностроительных заводах термическая обработка является одним из важнейших звеньев технологического процесса производства полуфабрикатов и деталей машин [3, 4]. Термообработку применяют как промежуточную операцию для улучшения технологических свойств металла (обрабатываемости давлением, резанием и др.), так и оконча-

тельную операцию для придания металлу такого комплекса механических, физических и химических свойств, который обеспечивает необходимые служебные характеристики изделия. Чем ответственнее конструкция, тем, как правило, больший удельный вес в ней занимает термически обработанный металл [5]. При нагревах и охлаждениях в металле возникают изменения структуры, которые обуславливают полезные или вредные изменения механических, физических и химических свойств и влияют на его поведение при обработке и службе. По глубине и разнообразию структурных изменений, создаваемых термообработкой, с ней не могут сравниться механические или какие-либо другие внешние воздействия на металл. Среди основных видов термической обработки следует отметить следующие несколько операций. Отжиг (гомогенизация и нормализация). Целью является получение однородной зёрненной микроструктуры и растворение включений. Последующее охлаждение является медленным, препятствующим образованию неравновесных структур типа мартенсита. Закалку проводят с повышенной скоростью охлаждения с целью получения неравновесных структур типа мартенсита. Критическая скорость охлаждения, необходимая для закалки, зависит от материала. Отпуск необходим для снятия внутренних напряжений, внесённых при закалке. Материал становится более пластичным при некотором уменьшении прочности. Дисперсионное твердение (старение). После проведения отжига проводится нагрев на более низкую температуру с целью выделения частиц упрочняющей фазы. Иногда проводится ступенчатое старение при нескольких температурах с целью выделения нескольких видов упрочняющих частиц. Термическая обработка придает стальным изделиям определенные механические свойства: высокую твердость, повысив этим сопротивление износу, меньшую хрупкость для улучшения обработки или повышения ударной вязкости и т. д. Это достигается нагревом и последующим охлаждением стали по строго определенному температурному режиму. В результате в нужном направлении изменяется структура стали, которая и определяет ее механические свойства. Термообработка позволяет улучшить характеристики металлов, продлив тем самым срок эксплуатации деталей, уменьшить массу и габариты металлических изделий, увеличить значения допустимых напряжений. Целью дан-

ного исследования является разработка параметров термовременной обработки для отливок в твердом виде как одной из современных видов термической обработки стали [6, 7].

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Для определения основных параметров термовременной обработки для отливок из стали марки 150XHM использовался термический и химический анализ образцов стали. Из готовой стали отбирали образец для определения химического состава на эмиссионном спектрометре «SPECTROMAX» фирмы «SPECTRO».

Одним из методов термического анализа, позволяющим фиксировать температурные интервалы фазовых превращений и получать информацию о значении критических точек в металлах и сплавах, является дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

Исследования проводились на приборе синхронного термического анализа STA (inpiriter 449 F3) фирмы «NETZSCH». Прибор предназначен для одновременного проведения дифференциальной сканирующей калориметрии и термogravиметрического анализа (ТГ). При анализе в одной системе за одно определение измеряются изменение массы (ТГ) и тепловые эффекты (ДСК) исследуемого образца. Для проведения исследований тигли – один с образцом стали, другой пустой (контрольный) – устанавливаются в трубчатой печи вертикально на держателе образца. После установки и герметичного закрытия печь нагревается со скоростью 20°C/мин до температуры 1000°C в атмосфере инертного газа (аргона). Материал, из которого изготовлен тигель с образцом и контрольный тигель, – оксид алюминия.

Изменения в ходе исследований тепловых потоков между двумя тиглями регистрируются и анализируются с помощью программного обеспечения. Полученные данные сравниваются с контрольным тиглем, материал которого во время исследований не претерпевает химических или фазовых превращений. При этом определяют вид реакции (экзотермические или эндотермические) и фазовые превращения, которые приводят к изменениям теплового потока в тигле с образцом [8, 9].

Термограмма стали 150XHM представлена на рис. 1.

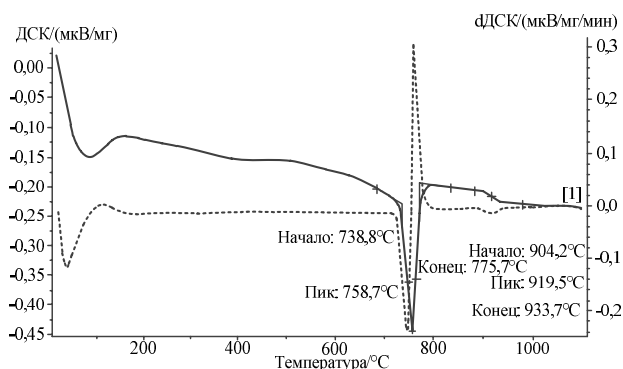


Рис. 1. Термограмма стали 150XНМ

В диапазоне температур от 738 до 775°C имеется область, которая характеризуется периодом зарождения новой фазы. При этом происходит растворение уже имеющихся карбидов и зарождение центров кристаллизации новой фазы (аустенита). Минимальный пик при 759°C характеризует максимальную скорость образования центров кристаллизации.

Химический состав стали (масс. %): C – 1,45; Si – 0,29; Mn – 0,65; P – 0,018; S – 0,015; Cr – 0,995; Ni – 1,05; Cu – 0,13; V – 0,016; W – 0,011; Al – 0,03; Mo – 0,18; Nb – 0,003. Прибор SPECTROMAX позволяет определить содержание всех химических элементов, нормируемых в металлургии, включая следовые содержания углерода, фосфора, серы и азота. Калибровочные модули разработаны для наиболее важных матричных элементов, таких как Fe, Al, Cu, Ni, Co, Ti, Mg, Zn, Sn и Pb. Калибровки включают в себя полный диапазон элементов.

Анализ структурных составляющих производился на микроскопе фирмы «ТЕХОМЕТ» при различных увеличениях. Микроструктура стали марки 150XНМ в исходном (литом) состоянии представляет смесь тонкодисперсного перлита и цементита, располагающегося по границам зерен в виде сетки с участками грубого игольчатого строения. Средняя твердость стали составляет 300–340 НВ.

Структура состоит из перлитной матрицы и вторичного цементита, выделившегося по границам дендритных ветвей и первичных зерен аустенита в виде сетки и грубых пластин, растущих от пограничной сетки внутрь дендритных ветвей. В междуветвиях дендритов образуются участки эвтектического карбида. Вдоль сетки и пластин вторичного карбида образуется ферритная оболочка. В зависимости от скорости охлаждения ниже точки A_1 эвтектидный аустенит превращается либо в пластинчатый, либо частично в пластинчатый, а частично в зернистый перлит (рис. 2).

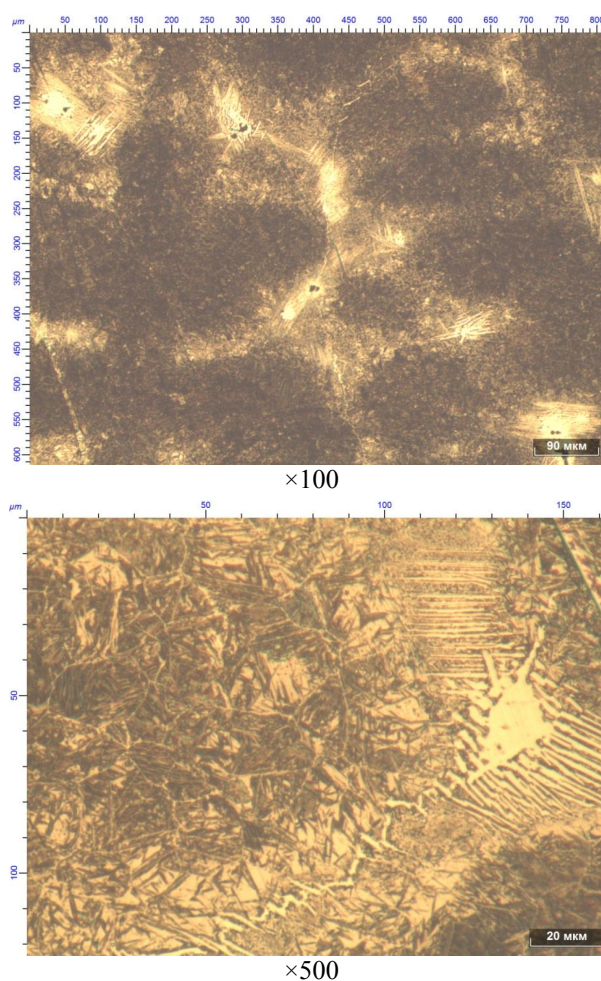


Рис. 2. Структура литой стали 150XНМ

Термовременная выдержка производилась в печи сопротивления «Накал» модели ПЛ 20/12,5 мощностью 3 кВт и максимальной температурой 1350°C.

В предварительно нагретую до температуры 760°C печь помещали два образца стали. При заданной температуре образцы выдерживались в печи в течение 19 мин. Данное время выдержки рассчитывается в зависимости от толщины стенки отливки. После термической обработки первый образец охлаждался в воде, второй образец спокойно охлаждался на воздухе до комнатной температуры. Первый испытуемый образец стали имеет твердость в литом состоянии 38 HRC, второй образец – 35 HRC. Пройдя первый цикл термовременной обработки, твердость первого составила 55 HRC, твердость второго 30 HRC. Значительно повысилась твердость первого образца, охлажденного в воде, в то время как твердость второго образца, охлаждаемого на воздухе, понизилась. Произошла перекристаллизация структуры первого образца стали. Выявилась новая мелкодисперсная фаза (рис. 3, 4).

В структуре второго образца стали, прошедшего спокойное охлаждение на воздухе до комнатной температуры, особых изменений не выявлено. Далее те же самые образцы прошли аналогично второй цикл термовременной обработки при тех же равных условиях. В обоих случаях произошло укрупнение структуры, как в первом, так и во вто-

ром образцах. Первый образец имеет твердость 63–64 HRC. Происходит дальнейшая перекристаллизация, рост зерна. Выявилась новая фаза пластинчатого перлита. Второй образец имеет более мелкую, слегка иную структуру. На данном этапе твердость второго образца повысилась до 39–41 HRC. Структура представлена на **рис. 5, 6**.

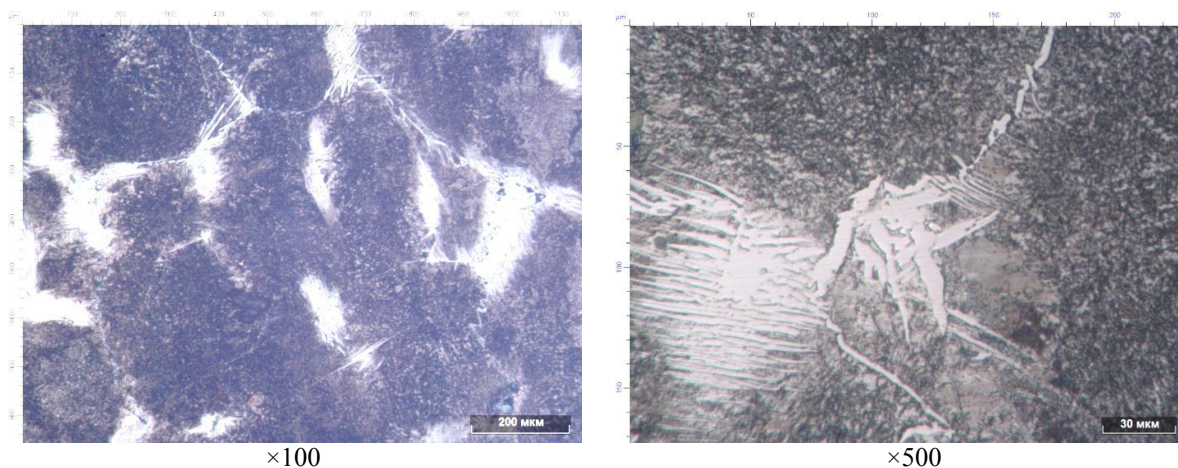


Рис. 3. Структура первого образца после первого цикла

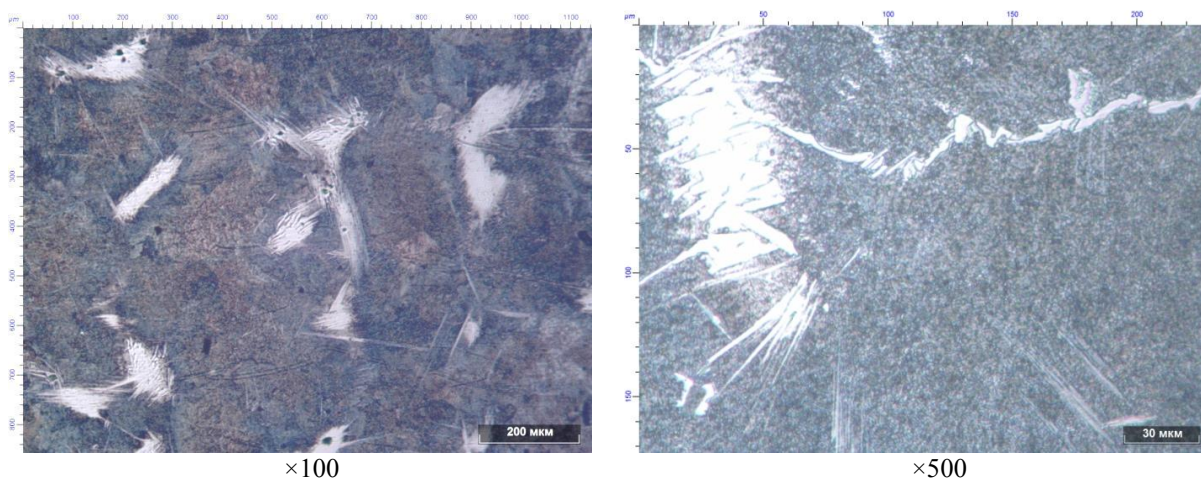


Рис. 4. Структура второго образца после первого цикла

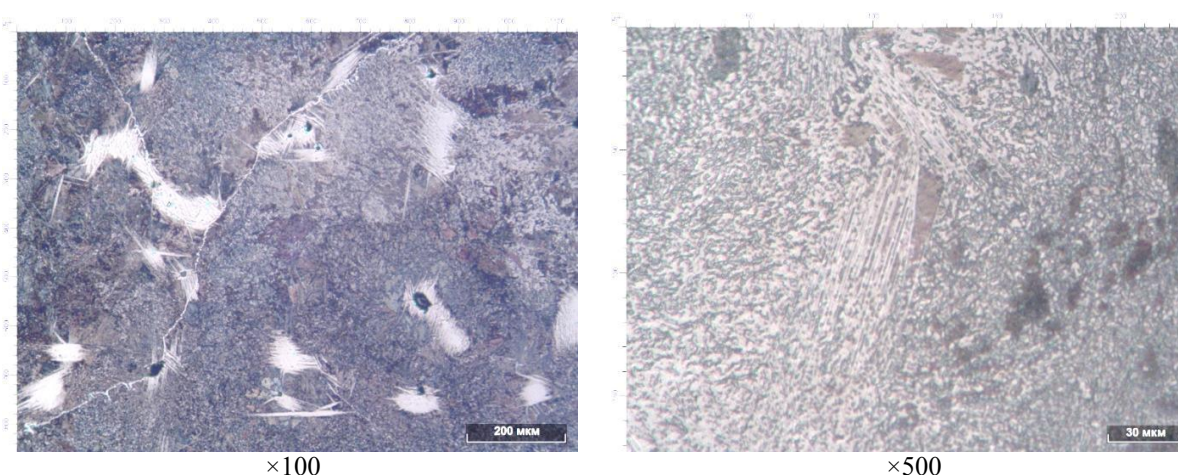


Рис. 5. Структура первого образца после второго цикла

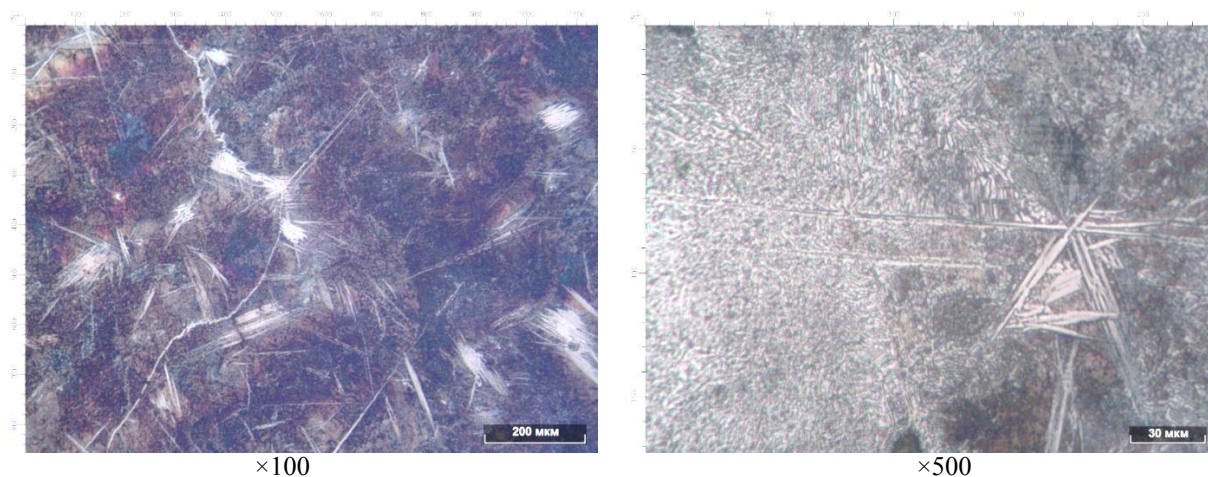


Рис. 6. Структура второго образца после второго цикла

Результаты исследований

Для сравнения механических характеристик был взят образец той же марки стали, прошедший стандартную закалку при 1150°C с охлаждением в воде. Данный образец имеет твердость 64 HRC. Структура данного образца представлена на рис. 7.

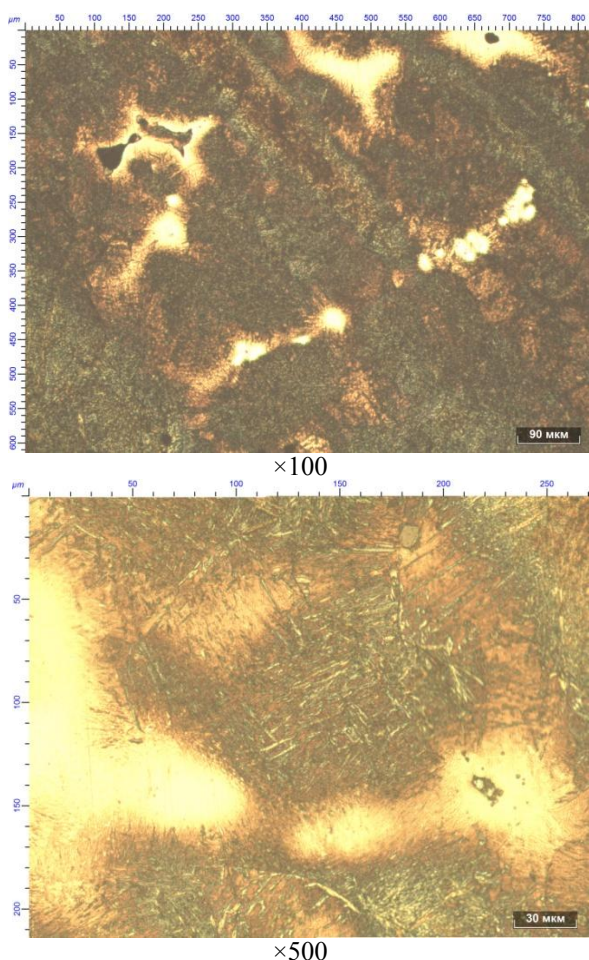


Рис. 7. Структура образца, прошедшего закалку при 1150°C

В таблице приведены данные механических свойств, твердости и абразивной износостойкости образцов, прошедших различные режимы обработки. Испытания по износостойкости проводились в соответствии с ГОСТ 23.2080-079 [10].

Механические свойства

Образец	Твердость, HRC	Ки
Литой	38–39	0,44
(ТВО) охл. воздух	39–41	0,36
(ТВО) охл. в воде	63–64	0,69
Закалочный	61–64	0,70

Исходя из полученных результатов испытаний, можно сделать вывод о том, что образец стали 150ХНМ, прошедший термовременную обработку с охлаждением в воде, имеет аналогичные механические свойства твердости и износостойкости, как у образца стали, который прошел стандартную закалку. Закалочный образец имеет грубую игольчатую разнородную структуру. В отличие от него образец, прошедший термовременную обработку, имеет совсем иную зернистую равномерную структуру. Данная структура состоит из равномерно упорядоченных зерен округлой формы по их краям. Теоретически такая структура предполагает более высокие механические свойства стали, способность стали сопротивляться различным переменным нагрузкам. Термовременная обработка стали позволяет значительно упростить и сократить режим термической обработки стали марки 150ХНМ.

Заключение

При использовании проведенных исследований были разработаны определенные параметры режима термовременной обработки в твердом виде для отливок из стали марки 150ХНМ.

Термовременная обработка позволяет в значительной степени сократить и упростить режимы термической обработки и снизить энергетические затраты на термообработку стальных отливок. При этом твердость сохраняется на том же уровне, а структура становится более равномерной, что позволяет получать более высокие механические свойства отливок из данной марки стали. Происходит рекристаллизация и упорядочивание зерен металла. Такая структура способствует повышению твердости и износостойкости стали, которые практически не уступают тем, которые получают при стандартной закалке.

Список литературы

1. Будагьянц Н.А., Карсский В.Е. Литые прокатные валки. М.: Металлургия, 1983. 245 с.
2. Образование горячих трещин в низколегированной стали: исследование критических режимов / Брунелли К., Бруски С., Джотти А., Ленчина Р., Дабала М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №1. С. 79–87.
3. Влияние режимов термовременной выдержки на структуру и свойства стальных отливок / Емельянов А.А., Чернов В.П., Ефимов А.В., Данилюк К.А. // Литейные процессы / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. С. 12–16.
4. Пат. 2540241 Российская Федерация. Сталь для изготовления кованных прокатных валков / А.Г. Орлов, Е.Н. Шестакова, Г.А. Орлов, А.И. Потапов. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения» Уральского отделения Российской академии наук; заявл. 2012; опубл. 2014.
5. Гудцов Н.Т., Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник. М.: Металлургиздат, 1956. С. 1204.
6. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 648 с.
7. Свойства и стойкость валков из заэвтектоидной стали / Т.С. Скобло, В.А. Воронина, Н.И. Сандлер и др. // БНТИ ЧМ. 1971. Вып. 3(647). С. 35–37.
8. Повышение износостойкости стали 150ХНМ высокотемпературной закалкой / Филиппов М.А., Гервасьев М.А., Худорожкова Ю.В., Юровских В.В., Легчило В.В., Гаранин Н.А.; ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург, 2010. 115 с.
9. Ефимов А.В., Чернов В.П. Изменение структуры литой стали при термовременной обработке // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 125 с.
10. Коршунов Л.Г. Изнашивание металлов при трении // Металловедение и термическая обработка стали / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1991. Т. 1, кн. 2. С. 289–424.

Материал поступил в редакцию 03.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

TRANSIENT HEAT TREATMENT OF 150KhNM STEEL CASTINGS

Andrey V. Efimov – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Unspok@mail.ru

Viktor P. Chernov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Problem Statement (Relevance): Heat treatment of metal products is an integral part of any machine building process. Heat treatment can either be an intermediate operation in the production cycle or the main final operation in machine part manufacturing process. Heat treatment is an energy consuming operation that requires considerable resources. **Objectives:** This research aims to study the optimum transient heat treatment modes for products made from various steel grades. Transient heat treatment is another type of heat treatment applicable to metals when metal is exposed to low heat for a short period of time resulting in enhanced mechanical properties at low energy costs. The objective of this research is to identify the optimum transient heat treatment modes for 150KhNM steel castings. **Methods Applied:** Spectroscopy was applied to analyse the chemical composition of the steel. Differential scanning calorimetry was applied

for the thermal analysis of the steel castings. **Originality:** The heat treatment technique applied to medium-carbon roller steel of the above grade is quite complex and energy-intensive. Transient heat treatment provides a simpler heat treatment operation enabling to reduce the energy costs. 150KhNM is a hypereutectoid steel grade used for the manufacture of forged and cast rolls for hot rolling mills, as well as for cold rolling mill rolls. The heat treatment process applied to the 150KhNM steel includes preliminary triple annealing followed by final double normalizing and high-temperature tempering. A significant drawback of the steel after the heat treatment procedure described above includes the resultant low hardness caused by the low cooling rate after austenitization. Austenitization is a process similar to quench hardening of carbon steel when steel is heated to 1050–1100 °C followed by a short-term soaking (for 10 min.) and subsequent rapid cooling. **Findings:** The results of the experi-

ments show that transient heat treatment applied to the 150KhNM steel can result in an increased hardness while saving the need for complex and energy-intensive heat treatment operations. **Practical Relevance:** As a result of the research, initial data were obtained for transient heat treatment modes applicable to 150KhNM steel castings.

Keywords: Steel, transient heat treatment, structure, hardness, wear resistance, temperature, heating, cooling.

References

1. Budagyants N.A., Karsskiy V.E., *Litue prokatnue valki* [Cast rolls for rolling mills]. Moscow: Metallugiya, 1983, 245 p.
2. Brunelli K., Bruschi S., A. Giotti A., Lencina R., Dabala M. Hot cracking in low alloy steel: A study of critical conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, no. 1, pp. 79–87.
3. Emelyanov A.A., Chernov V.P., Efimov A.V., Danilyuk K.A. The effect of short-term soaking on the structure and properties of steel castings. *Casting processes*. Ed. by V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, pp. 12–16.
4. Orlov A.G., Shestakova E.N., Orlov G.A., Potapov A.I. *Stal dlya izgotovleniya prokatnuyh valkov* [Steel to produce forged rolling mill rolls]. Patent RF, no. 2540241, 2014.
5. Gudtsov N.T., Bernstein M.L., Rahstadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali i chuguna* [Metal science and heat treatment of steel and cast iron]. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 1204 p.
6. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow: Metallurgy, 1978, 648 p.
7. Skoblo T.S., Voronina V.A., Sandler N.I. et al. The properties and durability of hypereutectoid steel rolls. BNTI ChM, 1971, vol. 3 (647), pp. 35–37.
8. Filippov M.A., Gervasiev M.A., Khudorozhkova Yu.V., Yurovskikh V.V., Legchilo V.V., Gagarin N.A. *Povushenie iznosostoykosti stali 150HNM vysokotemperaturnoy zakalkoy* [Increasing the wear resistance of 150KhNM steel by high-temperature quenching]. Yekaterinburg, 2010, 115 p.
9. Efimov A.V., Chernov V.P. Changes in the structure of cast steel during transient heat treatment. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. [Important problems of contemporary science, technology and education]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016, pp. 125–126.
10. Korshunov L.G. *Iznashivanie metallov pri trenii* [Wear in metals caused by friction]. Moscow: Metallurgy, 1991, vol. 1, v. 2, pp. 289–424.

Received 03/10/16

Образец для цитирования

Ефимов А.В., Чернов В.П. Термовременная обработка отливок из стали марки 150ХНМ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 79–85. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

For citation

Efimov A.V., Chernov V.P. Transient heat treatment of 150KhNM steel castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 79–85. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипин Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3564-0310>.

Бегинюк Виталий Александрович – ведущий специалист технологической группы доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)24-10-38. E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Булдашев Иван Владимирович – аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. Тел.: 8-312-65-47-13. E-mail: buldashev.ivan@mail.ru

Ворошилов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: +7 (391) 206-37-31. E-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

Ворошилова Марина Владимировна – ассистент кафедры «Техносферная безопасность горного и металлургического производства», Институт цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: +7 (391) 206-36-18. E-mail: aniram1988@yandex.ru

Ганин Дмитрий Рудольфович – инженер Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: dmrgan@mail.ru

Дружков Виталий Гаврилович – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519)298430. E-mail: shirshov1989@mail.ru

Ефимов Андрей Витальевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Unspok@mail.ru

Мирзаев Джалал Аминулович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры материаловедения и физико-химии материалов, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. Тел.: 8-312-65-47-13. E-mail: mirzaevda@susu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4696-8258>.

Мирзоев Александр Аминулаевич – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. Тел.: 8-312-65-47-13. E-mail: mirzoevaa@susu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1527-371X>.

Окишев Константин Юрьевич – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры материаловедения и физико-химии материалов, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. Тел.: 8-312-65-47-13. E-mail: k.okishev@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6331-3050>.

Панычев Анатолий Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: a.pan1939@mail.ru

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5443-423X>.

Пустовойтов Денис Олегович – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-25. E-mail: pustovoytov_den@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0496-0976>.

Рожков Артем Андреевич – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3007-1099>.

Румянцев Михаил Игоревич – канд. техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел. +7(3519)-29-85-70. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru; mir@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0608-0446>.

Селиванов Валентин Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30. E-mail: mcm@magtu.ru

Сибгатуллин Салават Камирович – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30. E-mail: 10skt@mail.ru

Смирнов Алексей Алексеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igdur.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8949-1525>.

Соколов Игорь Владимирович – д-р техн. наук, зав. лабораторией подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. Тел.: 8(343)350-71-28. E-mail: geotech@igdur.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7841-5319>.

Стеблянюк Валерий Леонтьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Федосеев Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц. кафедры математического моделирования систем и процессов ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. E-mail: fsa@gelicon.biz

Филиппова Елена Владимировна – канд. техн. наук, доц., Забайкальский государственный университет, Чита, Россия. E-mail: filena78@mail.ru

Харченко Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30. E-mail: as.mgtu@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0454-6399>.

Хрунина Наталья Петровна – ст. науч. сотр., Институт горного дела Дальневосточного отде-

ления РАН (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Тел.: 8-(4212)32-79-27. E-mail: npetx@mail.ru

Чебан Антон Юрьевич – ст. науч. сотр., доц., Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Тел.: 8-(4212)32-79-27. E-mail: chebanay@mail.ru

Чернов Виктор Петрович – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30.

Шаповалов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: alshapo@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0888-814X>.

Шахназаров Карэн Юрьевич – канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: karen812@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7501-6590>.

Швеева Татьяна Владимировна – инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: asttv@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4726-6215>.

Шевченко Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц., ст. преп. кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: ShevchenkoE.A@yandex.ru

Шестаков Иван Яковлевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Общая металлургия», Институт цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: +7 (391) 206-37-78. E-mail: yakovlevish@mail.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и не редактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подписанные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_m/I_{n0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину. Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).