

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№ 1 (33) март 2011 г.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет:

Председатель редсовета:

В.М. Колокольцев – ректор ГОУ ВПО «МГТУ», проф., д-р техн. наук.

Члены редсовета:

А.В. Дуб – ген. директор ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», д-р техн. наук;
Д.Р. Каплунов – член-кор. РАН, проф. ИПКОН РАН, д-р техн. наук;
В.Ф. Рашиков – Президент ООО "Управляющая компания ММК", проф., д-р техн. наук;
В.М. Счастливец – зав. лабораторией ИФМ УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук;
А.Б. Сычков – зам. директора по технической политике Восточно-Европейского металлургического дивизиона ОАО «МЕЧЕЛ» (Румыния), д-р техн. наук;
Ken-ichiro Mori – Professor Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan;
Maciej Pietrzyk – Professor Akademia Gorniczo-Hutnicza, Krakow, Poland.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Г.С. Гун – проф., д-р техн. наук.

Заместитель:

М.В. Чукин – проф., д-р техн. наук
(отв. редактор).

Члены редколлегии:

Л.И. Антропова – проф., д-р фил. наук;
В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук;
К.Н. Вдовин – проф., д-р техн. наук;
С.Е. Гавришев – проф., д-р техн. наук;
В.Н. Калмыков – проф., д-р техн. наук;
С.Н. Павлов – канд. пед. наук;
М.Б. Пермяков – доц., канд. техн. наук;
А.М. Песин – проф., д-р техн. наук;
В.М. Салганик – проф., д-р техн. наук;
А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук;
К.Ф. Усманова – проф., д-р экон. наук;
Л.Ф. Усманова – проф., д-р юрид. наук.

Ответственные редакторы по научным направлениям экспертных советов ВАК РФ:

М.А. Полякова – доц., канд. техн. наук;
М.В. Шубина – доц., канд. техн. наук.

© ГОУ ВПО «МГТУ», 2011

На журнал можно подписаться в отделениях связи либо приобрести непосредственно в редакции. Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС11-1157 от 18 апреля 2007 г.

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 29-85-17
Факс (3519) 23-57-60
E-mail: vestnik@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати Издательским центром МГТУ им. Г.И.Носова.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.

Подписано к печати 17.03.2011.

Заказ 200. Тираж 500 экз. Цена свободная.



VESTNIK

**Magnitogorsk State Technical
University named after G. I. Nosov**

№ 1 (33) March 2011

The journal is included in the Abstract Journal and the database of All-Russian Institution of Scientific and Technical information, and also in the List of the leading reviewed scientific journals and publications. On recommendation of advisory committee in the development of mineral resource deposits and metallurgy, the scientific results of candidates for Ph.D. theses are to be published in the above-mentioned journals. Internet versions of the journal can be found on the Scientific Electronic Library site in the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial committee

Chairman of editorial committee:

V. M. Kolokol'tsev – rector of State Educational Institution of Higher Professional Education “Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov”, D. Sc

Members of the editorial committee:

A. V. Dub – general director of JSC Research and Production Association of Central Scientific Research Institution of Technical Mechanic Engineering, D.Sc.

D. R. Kaplunov – corresponding member of Russian Academy of Science, D.Sc.

V. Ph. Rashnikov – President of LTd “Magnitogorsk Steel and Iron Works managing company”, Prof., D. Sc.

V. M. Schastlivtsev – chief of laboratory in Russian Academy of Science, academician of Russian Academy of Science, D. Sc.

A. B. Sychkov – deputy director in technical politics of Eastern European metallurgical division JSC “MECHEL” (Romania), D. Sc.

Ken-ichiro Mori – Professor Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan.

Maciej Pietrzyk – Professor Akademia Gorniczo-Hutnicza, Krakow, Poland.

Editorial staff

Editor-in-chief:

G. S. Gun – Prof., D. Sc.

Deputy chief editor:

M. V. Chukin – Prof., D.Sc.

Members of the editorial staff:

L.I. Antropova – Prof., D.Sc.

V. A. Bigeev – Prof., D.Sc.

K. N. Vdovin – Prof., D.Sc.

S. E. Gavrishev – Prof., D.Sc.

V. N. Kalmykov – Prof., D.Sc.

S.N. Pavlov – Ph.D.

M.B. Permyakov – Assoc. Prof., Ph.D.

A.M. Pesin – Prof., D.Sc.

V. M. Salganik – Prof., D.Sc.

A.S. Sarvarov – Prof., D.Sc.

K.F. Usmanova – Prof., Doctor of Economics

L.F. Usmanova – Prof., Doctor of Law.

Executive editors in scientific fields of advisory committee of Higher Certifying Commission in the Russian Federation:

M. A. Polyakova – Assoc. Prof., Ph.D.

M. V. Shubina – Assoc. Prof., Ph.D.

© State Educational Institution of Higher Professional Education
“Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov”, 2011

One can subscribe for the journal in the general publication catalogue of scientific-technical information, the subscription index of the journal 73849, or get the journal right in the editorial office.

Registration certificate ПИ № ФС11-1157 April 18, 2007 г.

Editorship address:

455000, city Magnitogorsk, Lenin Str. 38

Phone number: (3519)29-85-17

Fax: (3519)23-57-60

Email: vestnik@magtu.ru

Published by publishing center of MSTU named after G. I. Nosov.

Signed for press 03.17.2011.

Order 200. Circulation – 500 items. Free price.



СОДЕРЖАНИЕ

Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	5
<i>Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М.</i> Методология создания ресурсовоспроизводящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья	5
<i>Мельников И.Т., Кутлубаев И.М., Суров А.И., Мельников И.И., Васильев К.П., Плотников Д.П., Шевцов Н.С.</i> Разработка методики определения рациональных параметров намывных хвостохранилищ и отвалов вскрыши	9
Металлургия черных, цветных и редких металлов	14
<i>Сивагатуллин С.К., Майорова Т.В.</i> Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте	14
<i>Андреев В.В.</i> Физико-химические основы формирования включений графита в высокопрочных чугунах	16
Литейное производство.....	23
<i>Колокольцев В.М., Шевченко А.В.</i> Повышение свойств отливок из чугунов специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов	23
<i>Савинов А.С., Тубольцева А.С., Сеницкий Е.В.</i> Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей.....	29
<i>Казakov А.С., Столяров А.М.</i> Настройка модели расчета режима вторичного охлаждения слябовой непрерывнолитой заготовки.....	32
<i>Загиров Н.Н., Аникина В.И., Усынина Г.П., Юриков А.С., Иванов Е.В.</i> Технологическая схема получения лигатурного прутка из стружки силумина, исключая ее переплав	34
Материаловедение и термическая обработка металлов	39
<i>Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю., Шабуров А.Д.</i> Взаимодействие водорода с примесями замещения в альфа-железе	39
Наноматериалы и нанотехнологии	43
<i>Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г.</i> Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой.....	43
<i>Жеребцов Ю.В., Самойлова А.Ю., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У.</i> Определение сверхпластических свойств по результатам тестовых формовок прямоугольных мембран при постоянном давлении	46
Стандартизация, сертификация и управление качеством	52
<i>Наливайко А.В., Стеблов А.Б., Тулунов О.Н., Кинзин Д.И.</i> Разработка комплексного показателя качества арматурной стали и обоснование рационального применения слиттинг-процесса в условиях отечественного мини-завода	52
<i>Моллер А.Б., Лимарев А.С., Логинова И.В.</i> Квалиметрическая оценка компетентности персонала металлургического предприятия.....	54
Энергетика металлургии, энергосбережение и теплоэнергетика	59
<i>Мугалимов Р.Г.</i> Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе	59
<i>Буланова О.В., Малафеев А.В., Ахметханов А.М.</i> Исследование статической устойчивости генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» при параллельной работе с энергосистемой	63
Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.....	66
<i>Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В.</i> Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн	66
<i>Харченко О.А., Матвеева Г.Н., Михайловский В.Н.</i> Оптимизация систем водоснабжения промышленных предприятий	70
Экономика, управление и рынок продукции.....	75
<i>Бессонова Ю.А., Слукина С.А.</i> Подходы к оценке эффективности создания и функционирования интегрированных структур.....	75
<i>Поликарпова М.Г.</i> Параметрическое моделирование интеграционной активности секторов экономики России.....	78
Рефераты	86
Reports	90
Сведения об авторах	94
The information about the authors	97

CONTENT

Processing and Utilization Technologies of Formations and Wastes	5
<i>Medyanik N.L., Kalugina N.L. Varlamova I.A., Strokan A.M.</i> Methodology of Developing Resource Reproducing Technologies of Technogenic Hydro-mineral Raw Materials Reprocessing.....	5
<i>Melnikov I.T., Kutlubaev I.M., Surov A.I., Melnikov I.I., Vasilyev K.P., Plotnikov D.P., Shevtsov N.S.</i> Development of determination methods of rational parameters for tail-storing and dump rocks	9
Metallurgy of Ferrous, Non-ferrous and Rare Metals	14
<i>Sibagatullin S.K., Majorova T.V.</i> The increase of gas flow performance in a blast furnace as a result of the increase of total pressure drop through the furnace height.....	14
<i>Andreev V.V.</i> Physical and chemical basics of graphite inclusions formation in high-strength cast iron	16
Foundry Engineering	23
<i>Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V.</i> Properties improvement of castings of special purpose white cast-irons by means of refining and melts modifying	23
<i>Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Sinitsky E.V.</i> Research of deformation ability of sandy-argillaceous mixtures	29
<i>Kazakov A.S., Stolyarov A.M.</i> Adjustment of the calculation model of secondary cooling mode for a continuous cast slab	32
<i>Zagirov N.N., Anikina V.I., Usynina G.P., Yurikov A.S., Ivanov E.V.</i> Manufacturing scheme of alloyed rod production of silumin chip without its remelting	34
Material Science and Thermal Metal Treatment	39
<i>Mirzayev D.A., Okishev K. Yu., Shaburov A.D.</i> Interaction of Hydrogen with Substitutional Impurities in Alpha Iron	39
Nanomaterials and Nanotechnology	43
<i>Korchunov A.G., Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G.</i> Engineering principles of continuous manufacturing process of steel wire with ultrafine-grained structure.....	43
<i>Zherebtsov Yu.V., Samoilova A.Yu., Zagirov T.M., Enikeev F.U.</i> Determination of superplastic properties from the results of constant pressure forming of rectangular membranes.....	46
Standardization, Certification and Quality Management	52
<i>Nalivaiko A.V., Steblov A.B., Tulupov O.N., Kinzi D.I.</i> Development of complex quality criterion for reinforcing bar steel and justification of rational application of slitting pass at domestic mini-mill.....	52
<i>Moller A.B., Limarev A.S., Loginova I.V.</i> Qualimetry estimation of personnel competence of a metallurgical enterprise.....	54
Power Supply of Metallurgy, Energy Saving and Heat Power	59
<i>Mugalimov R.G.</i> The concept of energy efficiency of induction motors and electric drives based on them.....	59
<i>Bulanova O.V., Malafeev A.V., Ahmethanov A.M.</i> The study of generators static stability of JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» power stations operating in parallel with power supply system.....	63
Construction Materials and Structural Engineering in Metallurgy	66
<i>Krishan A.L., Troshkina E.A., Kuzmin A.V.</i> Improvements of calculation of concrete filled steel tubes durability.....	66
<i>Harchenko O.A., Matveeva G.N., Mihajlovsky V.N.</i> Optimisation of water supply systems of industrial enterprises.....	70
Economics, Management and Production Market.....	75
<i>Bessonova J.A., Slukina S.A.</i> Different Approaches to Estimation of Efficiency of Integrated Structures Forming and Operation	75
<i>Polikarpova M.G.</i> Parametric modeling of the integration activities of economic sectors of the Russian Federation	78
Рефераты	86
Reports	90
Сведения об авторах	94
The information about the authors	97

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 622.717-9:658.511

Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М.

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РЕСУРСОВОСПРОИЗВОДЯЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

При добыче и переработке руд медно-колчеданных месторождений Южного Урала образуются значительные, достигающие $4 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$, объёмы минерализованных подотвальных, рудничных, карьерных, шахтных и сточных вод, характеризующихся аномально высоким содержанием ценных компонентов, приоритетными из которых являются цинк (от 220–653 до 9734 мг/дм³), медь (II) (от 75–644 до 1884 мг/дм³), марганец (от 25–187 до 960 мг/дм³) и железо (II, III) (от 308–760 до 18560 мг/дм³). Эти воды, безусловно, оказывают сильное экотоксичное воздействие на подземные и поверхностные водные системы районов недропользования [1].

В формировании состава такого вида техногенного гидроминерального сырья, как подотвальные, рудничные, карьерные и шахтные воды главная роль принадлежит процессам окисления и гидролиза минералов, поэтому основными компонентами этих вод являются сульфаты и хлориды тяжелых металлов (меди, цинка, марганца, железа и др.). Вынос рудничными водами значительных количеств ценных химических элементов продолжается и после завершения эксплуатации месторождения в течение десятков и даже сотен лет.

В работах отечественных и зарубежных исследователей доказано, что техногенное гидроминеральное сырьё относится к конкурентоспособным перспективным минеральным ресурсам, переработка которых с использованием инновационных технологий позволит получить значительный технико-экономический и экологический эффекты, что соответствует новому уровню требований, предъявляемых к современному горно-обогатительному производству. Однако проблема извлечения и селективного разделения металлов, присутствующих в техногенных водах, до конца не решена и весьма актуальна. Методология создания ресурсовоспроизводящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья не разработана.

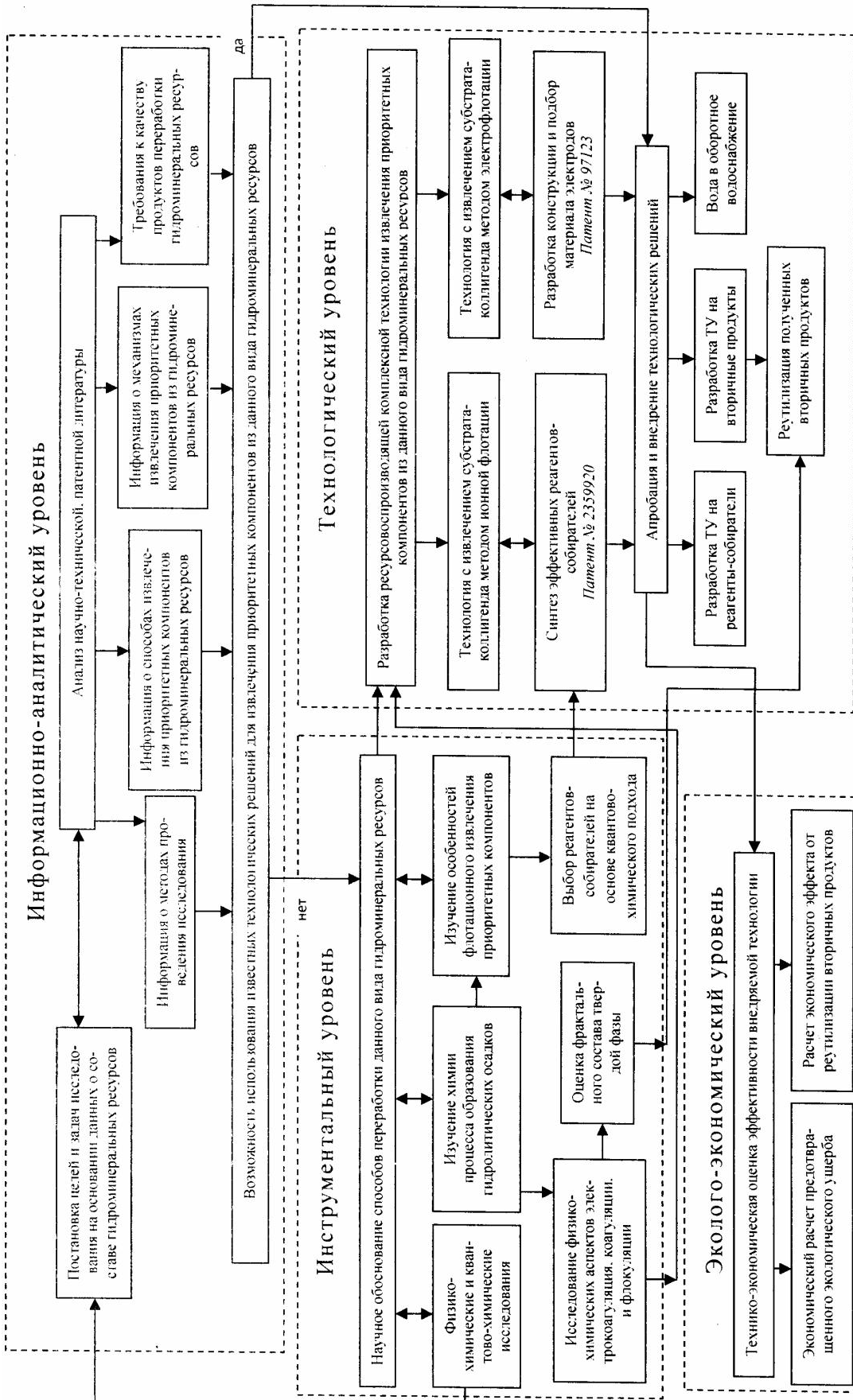
На основании проведенного анализа современного состояния проблемы извлечения и селективного разделения металлов из техногенного гидроминерального сырья можно сделать вывод о том, что одним из перспективных методов глубокой переработки металлосодержащих вод является флотация. Метод характеризуется высокой производительностью, эффективностью, экономичностью и простотой техноло-

гических операций. Флотация может применяться как в качестве основной операции при переработке техногенных вод, так и в сочетании с другими методами – цементацией, гальвано коагуляцией, экстракцией и химическим осаждением [2].

Очевидным является тот факт, что создание ресурсовоспроизводящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья невозможно без предварительно проведенных фундаментальных исследований квантово-химических, физико-химических и технологических свойств как самих извлекаемых ценных компонентов (тяжелых металлов), так и извлекающих агентов (осадителей, реагентов-собирающих, пенообразователей, окислителей и т.п.) без изучения механизма процессов извлечения (осаждения, коагуляции, флокуляции, окисления, флотации и электрофлотации), без управления эффективностью процесса извлечения с помощью направленного выбора реагентов-собирающих, т.е. без разработки методологии создания ресурсовоспроизводящих технологий.

Разработанная нами методология создания ресурсовоспроизводящих технологий переработки гидроминерального сырья, образующегося в процессе деятельности горно-обогатительных комбинатов, состоит из четырёх взаимосвязанных уровней: *информационно-аналитического, инструментального, технологического и эколого-экономического*. Она отражает многоступенчатую соподчиненность и взаимосвязь научных обобщений различных этапов, объектов и методов исследований.

Важной особенностью методологии является использование принципа «структура–свойство/активность–свойство» при создании ресурсовоспроизводящих технологий переработки гидроминерального сырья. Принцип «структура–свойство/активность–свойство» относительно флотационных систем можно сформулировать следующим образом: молекулярные структуры соединений реагентов должны содержать активные реакционные центры и проявлять определённые свойства по отношению к извлекаемым ценным компонентам, которые, в свою очередь, имеют структуру и обладают свойствами, усиливающими избирательное воздействие применяемых реагентов во флотационных системах.



Блок-схема методологии создания ресурсосовпроизводящих комплексных технологий переработки гидроминерального сырья

Информационно-аналитический уровень предлагаемой методологии включает в себя получение фундаментальных представлений о важнейших направлениях ресурсо-экологической политики в области управления гидротехногенным сырьем. Он состоит из шести информативных блоков (см. **рисунок**). Анализ состава гидроминеральных ресурсов позволяет выявить приоритетные компоненты и сформулировать цели и задачи исследования по их селективному извлечению. Дальнейший анализ научно-технической и патентной литературы приводит к получению информации о методах проведения исследования, о способах и механизмах извлечения приоритетных компонентов из данного вида гидроминерального сырья, о требованиях к качеству продуктов его переработки. На основании комплекса полученной информации проводится корректировка целей и задач выполняемого исследования и выявляется возможность использования известных технологических решений для извлечения приоритетных компонентов из данного вида гидроминерального сырья.

Если возможность использования известных технологических решений для селективного извлечения приоритетных компонентов установлена **да**, то дальнейшие исследования перемещаются на *технологический уровень* в блок **Апробация и внедрение технологических решений**. Если возможность использования известных технологических решений для селективного извлечения приоритетных компонентов не установлена **нет**, то дальнейшее исследование целесообразно проводить на следующем уровне методологии – *инструментально*.

Исследования на *инструментальном уровне* методологии основаны на принципе «структура–свойство/активность–свойство» и включают комплекс современных методов количественного анализа, гарантирующих надежность и достоверность полученных результатов, а также методов квантово-химического и фрактального моделирования, позволяющих научно обосновать способы переработки данного вида гидроминеральных ресурсов и образующихся вторичных продуктов.

На этом же уровне методологии формируется научное обоснование комплекса способов переработки данного вида гидроминерального сырья, являющихся основой для создания ресурсопроизводящей комплексной технологии и извлечения приоритетных компонентов из данного вида гидроминерального сырья. Этот уровень включает в себя шесть ведущих блоков:

1. Блок физико-химических и квантово-химических исследований извлекаемых компонентов и продуктов переработки гидроминерального сырья, направленных на получение информации о функциональных свойствах:

- субстратов-коллигенов (о формах их нахождения в перерабатываемом техногенном гидроминеральном сырье, их специфических химических и технологических свойствах);
- сублатов флотационных систем (об их структурно-химическом составе и возможности их дальнейшей переработки в качестве кондиционных товарных продуктов);

- кондиционных товарных продуктов (об их компонентном и гранулометрическом составе, о реологических свойствах, определяющих направления их дальнейшего использования).

Результаты этих исследований являются основой как для выбора комплекса методов переработки данного вида гидроминеральных ресурсов и способов реутилизации полученных вторичных продуктов, так и для корректировки целей и задач исследования.

2. Блок изучения химии процесса образования гидротехногенных осадков с целью выяснения условий селективного выделения приоритетных компонентов из данного вида гидроминеральных ресурсов методами кислотно-основного или окислительно-восстановительного химического осаждения (в зависимости от природы извлекаемого компонента).

Результаты исследований, полученные в данном блоке, являются также базой для дальнейшего последовательного рассмотрения физико-химических аспектов коагуляции, электрофлотации и флокуляции образующейся твердой дисперсной фазы и проведения оценки ее фрактального состава. Кроме того, прослеживается явная соподчиненность и взаимосвязь блока 2 с блоком 5 «Изучение особенностей флотационного извлечения приоритетных компонентов».

3. Блок исследования физико-химических аспектов электрокоагуляции, коагуляции и флокуляции, таких как кинетика процессов, порядок введения реагентов, их массовые соотношения, взаимное влияние компонентов матрицы технологических растворов, оценка коагулирующего и флокулирующего эффектов при различных значениях pH в процессе нейтрализации, а также влияние плотности тока, подаваемого на электроды в случае электрокоагуляции, ориентирован на создание условий получения осадков, пригодных для дальнейшей реутилизации.

Анализ результатов исследований, проведенных в блоках 2, 3 *инструментального* уровня, используется при разработке ресурсопроизводящей комплексной технологии переработки гидротехногенного сырья.

4. Блок оценки фрактального состава твердой фазы – продукта химического осаждения – на основании фрактальных моделей, полученных с помощью разработанной программы «Shlam», позволяет на технологическом уровне выбрать направление реутилизации полученных вторичных продуктов.

5. Блок изучения особенностей флотационного извлечения приоритетных компонентов из данного вида гидроминерального сырья – либо с использованием реагентов-окислителей и последующей электрофлотацией, либо с подобранными реагентами-собирателями при ионной флотации.

6. Блок выбора перспективных реагентов-собирателей для извлечения приоритетных компонентов методом ионной флотации на основе квантово-химического подхода является одним из важнейших, так как способствует эффективному управлению флотационным процессом с помощью направленного выбора реагентов-собирателей с заранее заданными свойствами, через реализацию принципа «структура–свойство/активность–свойство». Состав и свойства

подобранного реагента-собирающего должны соответствовать определенному набору молекулярных дескрипторов, что обеспечивает его высокую эффективность и селективность в процессе ионной флотации. Кроме того, реагент-собирающий должен обладать определенными функциональными свойствами (эргономическими, эксплуатационными, коммерческими).

Результаты исследований, выполненных в данном блоке, используются на технологическом уровне при синтезе или подборе эффективных реагентов-собирающих, используемых в созданной комплексной ресурсопроизводящей технологии.

Основная функция *технологического уровня* – разработка того или иного вида комплексной ресурсопроизводящей технологии извлечения приоритетных компонентов из данного гидроминерального сырья на основании результатов, полученных на информационно-аналитическом и инструментальном уровнях.

Если на инструментальном уровне установлено, что условия для эффективного извлечения ценных компонентов достигаются в процессе нейтрализации техногенных кислых вод, то перспективна разработка ресурсопроизводящей комплексной технологии с извлечением субстрата-коллиганда методом ионной флотации с использованием реагентов-собирающих, структура которых должна обладать высокими значениями основных дескрипторов индекса реакционной способности – абсолютной жесткости, химического потенциала, глобальной и локальной электрофильности активных центров комплексообразования, высокой энергией стабилизации полей лигандов и др. [3]. При этом оставшиеся в твердой фазе компоненты (вторичные продукты переработки) реализуются в конечном итоге в закладочные строительные смеси.

Если на инструментальном уровне установлено, что условия для эффективного извлечения ценных компонентов достигаются в процессе окислительно-восстановительного осаждения, то перспективна разработка ресурсопроизводящей комплексной технологии с извлечением субстрата-коллиганда методом электрофлотации.

Основными компонентами структуры *технологического уровня* являются два вида комплексных технологий переработки техногенных гидроминеральных ресурсов – на основе ионной флотации и на основе электрофлотации.

Разработка комплексной технологии на основе ионной флотации включает два взаимосвязанных блока для проведения селективной ионной флотации: Блок синтеза эффективных реагентов-собирающих [4] и связанный с ним Блок разработки ТУ на реагенты-собирающие, к которому переходят после положительных результатов апробации и внедрения технологических решений.

Эффективная реализация электрохимических методов в промышленных условиях невозможна без организации энергосберегающих мероприятий, в том числе совершенствования конструктивных элементов и подбора оптимального материала электродов аппарата с целью интенсификации процесса. Вот почему на технологическом уровне при создании комплексной технологии на основе электрофлотации использован Блок разработки

конструкции и подбора материала электродов [5].

Центральным блоком технологического уровня является Блок апробации и внедрения разработанных технологических решений.

Реализация разработанных технологических решений приведет в дальнейшем к необходимости разработки ТУ на вторичные продукты ионной флотации и электрофлотации с целью их реутилизации, к разработке способов регенерации флотационных реагентов и возврата очищенной воды в оборотное водоснабжение или сброса ее на рельеф. Поэтому *технологический* уровень разработанной методологии включает такие блоки, как:

- Блок разработки ТУ на вторичные продукты;
- Блок реутилизации полученных вторичных продуктов;
- Блок возврата воды в оборотное водоснабжение или сброса ее на рельеф.

Для подтверждения экономической и экологической обоснованности разработанных технологических решений на *жолого-экономическом уровне* проводятся:

Технико-экономическая оценка эффективности разработанной ресурсопроизводящей комплексной технологии извлечения приоритетных компонентов из данного вида гидроминеральных ресурсов.

Экономический расчет предотвращенного экологического ущерба.

Расчет экономического эффекта от реутилизации вторичных продуктов.

Предложенная авторами многоуровневая методология прошла успешную апробацию в условиях горно-обогатительных предприятий медного комплекса Уральского региона.

Разработанный авторами методологический подход позволяет создавать новые научно обоснованные экологически безопасные комплексные ресурсосберегающие технологии переработки гидроминерального сырья, оптимизировать и интенсифицировать технологические процессы на горно-обогатительных предприятиях, повышая их экономическую эффективность и конкурентоспособность.

Список литературы

1. Медяник Н.Л., Гиревая Х.Я. Извлечение ионов меди из сточных вод с помощью осадителей-восстановителей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С. 113–114.
2. Выбор высокоэффективных реагентов для флотационного извлечения ионов меди (II) и цинка из техногенных гидроминеральных ресурсов / Медяник Н.Л., Варламова И.А., Капутина Н.Л., Гиревая Х.Я. // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. 2010. № 3(43). С. 91–96.
3. Медяник Н.Л. Количественная оценка активности собирателей для флотационного извлечения катионов цветных металлов из техногенных рудничных вод // Обогащение полезных ископаемых: сб. науч. трудов по материалам симпозиума «Неделя горняка – 2009» / под общ. ред. В.М. Авдохина. М.: Горная книга, 2009. № 0814. С. 210–215.
4. Пат. 2359920 РФ. Способ очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Медяник Н.Л., Шадрунова И.В., Гиревая Х.Я., Строкань А.М. (РФ).
5. Пат. на полезную модель 97123 РФ. Аппарат для электрохимической очистки водных растворов / Медяник Н.Л., Мишурина О.А. (РФ).

Bibliography

1. Medyanik N.L., Girewaya H.Y. Copper ions recovery out of waste water using precipitating – reducing agent // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2007. № 1. P. 113–114.
2. Selection of high-performance agents for flotation recovery of copper (II) and zinc ions out of industrial hydro mineral resources / Medyanik N.L., Varlamova I.A., Kalugina H.L., Girewaya H.Y. // Bulletin of Irkutsk state technical university. 2010. № 3 (43). P. 91–96.
3. Medyanik N.L. Quantitative assessment of precipitators activity for

flotation recovery of non-ferrous metals cations out of mine waste waters // Mineral dressing: Collection of scientific papers presented at the symposium «Miner Week – 2009» / Under the editorship of V.M. Avdohin. M.: Mining Book. 2009. № 0814. P. 210–215.

4. Patent 2359920 of the Russian Federation. The Way of Waste Water Refining of Ions of Heavy Metals / Medyanik N.L., Shadrinova I.V., Girewaya H.Y., Strokan A.M.
5. The patent for useful model 97123 of the Russian Federation. Device for electrochemical clearing of water solutions / Medyanik N.L., Mishurina O.A.

УДК 622.271.75: 622:882

Мельников И.Т., Кутлубаев И.М., Суров А.И., Мельников И.И., Васильев К.П., Плотников Д.П., Шевцов Н.С.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАМЫВНЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ И ОТВАЛОВ ВСКРЫШИ

К концу прошлого века на каждого жителя планеты ежегодно приходилось 45 т разнообразного сырья, из которого не более 2% превращается в полезный продукт, а остальное возвращается окружающей природе в виде отвалов вмещающих пород, шлаков металлургического производства, золохранилищ, шламо- и хвостохранилищ, отходов химической промышленности. Формируются так называемые горнотехнические техногенные сооружения, для размещения которых ежегодно безвозвратно отторгаются миллионы гектаров земель [1].

Динамика работы 15 железорудных ГОКов России, Украины и Казахстана с годовой производительностью по сырой руде более 10 млн. т в период с 1970 по 2009 годы приведена на рис. 1. Период с 1990 по 2000 годы характеризуется переходом от плановой экономики к рыночной, переделом собственности и падением объёмов

добычи железной руды. Планируемые во второй декаде III тысячелетия ввод в эксплуатацию Приоскольского месторождения, увеличение производственных мощностей Качкандарского, Бакальского, Лебединского и освоение месторождений Чинейской железорудной провинции Забайкалья (Этырко и Магнитное) позволили прогнозировать годовой объём добычи сырой руды к 2020 году на предприятиях СНГ до 450–500 млн т, товарной руды 150–170 млн т, выход хвостов обогащения до 300–330 млн т. Начавшийся подъём экономики был прерван мировым финансовым кризисом, который разразился в конце 2008 года и приостановил реализацию многих проектов. В 2009 году произошло снижение объёмов добычи железной руды – основы металлургического сектора экономики, уменьшение инвестиций в создание наукоградов и проведение достойной социальной политики (см. рис. 1).

К 2020 году можно прогнозировать увеличение объёмов добычи сырой руды до 400 млн т в год, выход хвостов до 250 млн т и товарной руды до 140–150 млн т. Динамика развития железорудной горнодобывающей промышленности, несмотря на влияние макроэкономических факторов, позволяет предполагать, что ежегодная интенсивность прироста добычи сырой руды, выхода хвостов и получения концентрата будет составлять соответственно более 3, 2 и 1 млн т.

В настоящее же время среднее содержание железа в добываемом сырье на большинстве горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) колеблется в пределах 16–45%, а содержание железа в товарной руде возрастает и на

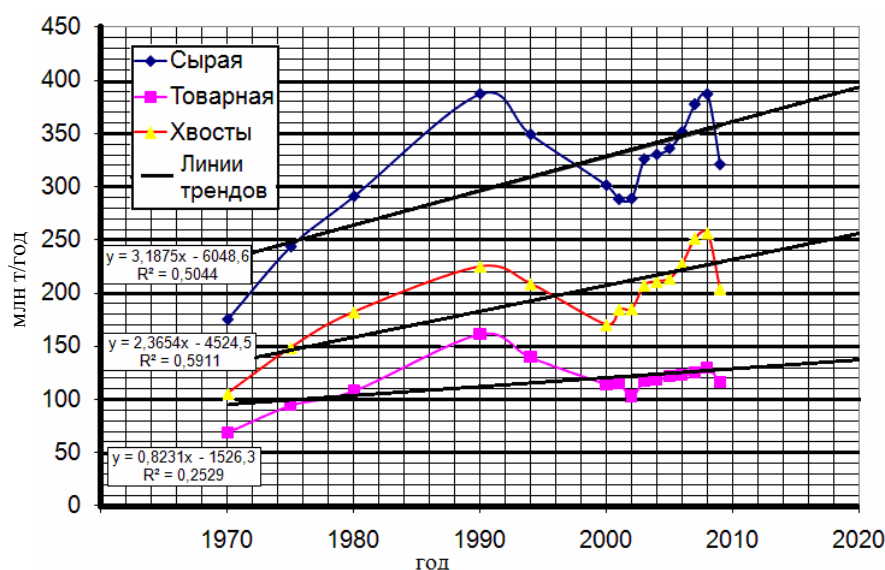


Рис. 1. Динамика добычи сырой железной руды, выхода товарной руды и хвостов на ГОКах России, Украины и Казахстана

отдельных предприятиях достигает 66,5–67,0% [2]. Динамика изменения средневзвешенных значений содержания железа в сырой и товарной руде на ГОКах России, Казахстана и Украины приведена на рис. 2, на котором видно, что на рубеже веков средневзвешенные значения содержания железа в сырой руде снизилось до 26–27%. Исходя из имеющей сырьевой базы, с определённой долей вероятности можно прогнозировать средневзвешенное содержание железа в сырой и товарной руде к 2020 году соответственно 26 и 65,1%

Выполненный анализ развития железорудной горнодобывающей промышленности стран СНГ показывает увеличение объёмов добычи, рост содержания железа в товарной руде по требованиям металлургического передела и его снижения в сырой руде в связи с переходом на разработку более бедных месторождений. Это однозначно предполагает увеличение выхода объёмов хвостов и обострение проблем, связанных с гидротранспортом, укладкой и хранением отходов обогащения.

По данным Росгортехнадзора только в России около 300 хвостохранилищ и накопителей промстоков [3], половина из которых находится в аварийном состоянии или достигли своих проектных отметок. За последние 15–20 лет на территории России не построено ни одного нового хвостохранилища, потому что требуются значительные капитальные, интеллектуальные и организационные затраты, отторжение огромных площадей земель различного назначения, мониторинг загрязнения воздушного и

водного бассейнов. Новая генерация собственников в погоне за прибылью не способна оценить серьёзности угроз такой политики, риска потерять бизнес при нарастающем интересе государства к требованиям экологичности и безопасности эксплуатации техногенных гидротехнических сооружений. В связи с этим в настоящее время перед многими горно-обогатительными предприятиями стоит проблема увеличения вместимости эксплуатируемых хвостохранилищ, строительство новых, переход на новые технологические схемы гидротранспорта высокоплотных пульп, новые технологии укладки и утилизации хвостов [4, 5].

Вместимость хвостохранилищ и внешних отвалов вскрыши определяется многообразием геотехнических факторов: физико-механическими свойствами пород отвала и основания, формой и площадью земельного отвода, рельефом местности, воздействием сейсмических и гидродинамических сил. В связи с вышеизложенным, разработка методики определения рациональных параметров намывных хвостохранилищ и отвалов вскрыши, обеспечивающих максимальную вместимость подотвальных площадей при учёте многообразных факторов, является актуальной задачей.

Возможные варианты конфигурации техногенных горно-технических сооружений определяются рядом параметров: физико-механическими свойствами пород основания и тела отвала, площадью и формой земельного отвода под внешние отвалы, рельефом местности и воздействием внешних сил. По сути выбор оптимальных параметров является задачей многопараметрической оптимизации. В качестве критерия оптимальности следует принимать максимальную вместимость отвалов вскрыши при заданной площади и форме земельного отвода или минимальную площадь для размещения определенного объёма вскрышных пород или хвостов. Методика определения рациональных параметров техногенных хранилищ заключается в использовании интерактивного режима расчетов и реализуется в следующей последовательности.

В общем случае объём отвала определяется по зависимости вида

$$V_0 = H_0 S_0 - \Delta V_{отк},$$

или

$$V_0 = H_0 S_0 - 0,1667 H_0^2 \operatorname{ctg}(\alpha) \times \times (3P_0 - K_\phi H_0 \operatorname{ctg}(\alpha)), \quad (1)$$

где $\Delta V_{отк}$ – потери объема в приоткосной части, м³; S_0 – площадь основания, м²; H_0 – высота отвала, м; α – угол откоса отвала, град; P_0 – периметр основания подотвальной площади, м; K_ϕ – коэффициент формы подотвальной площади. В выражении (1) коэффициент K_ϕ определяет формы земельного отвода. Для наиболее распространённых вариантов аналитическое выражение K_ϕ представлены в таблице. В общем случае K_ϕ определяется по формуле

$$K_\phi = (P_0 - P_B)(H_0 \operatorname{ctg}(\alpha))^{-1}, \quad (2)$$

где P_B – периметр верхней площадки отвала, м.

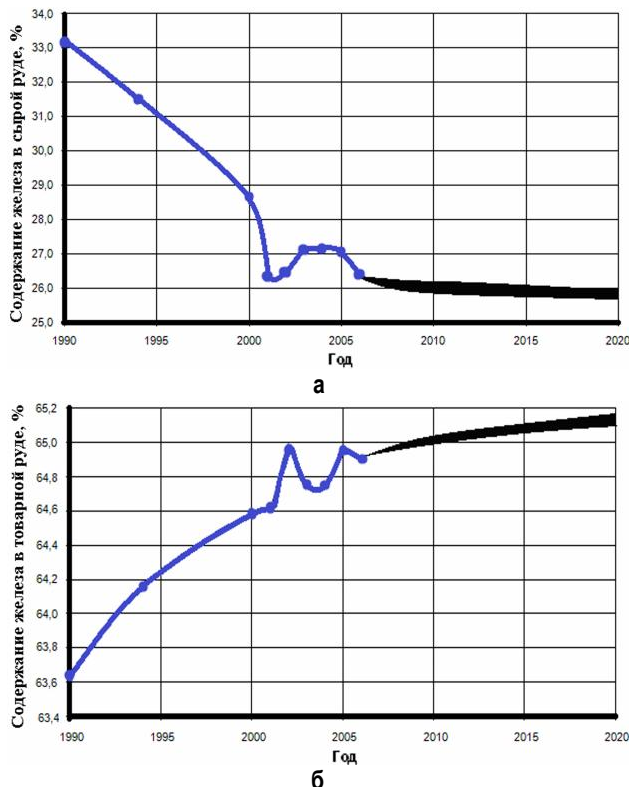


Рис. 2. Динамика изменения средневзвешенных значений содержания железа на горно-обогатительных комбинатах России, Казахстана и Украины: а – в товарной руде (концентрате); б – в сырой руде; ■ – область прогнозных значений

Для земельного отвода многоугольной формы

$$K_\phi = 2N \operatorname{tg}(\pi N^{-1}), \quad (3)$$

где N – количество сторон многоугольника основания. Для фигур неправильной формы коэффициент приближенно считают как для эллиптической, принимая за полуоси половину наибольшего и наименьшего измерения.

При проектировании и определении технологических параметров хранилищ техногенных отходов можно построить неограниченное количество конфигураций, различающихся по высоте и в плане. Обязательным при этом является обеспечение нормативного коэффициента запаса устойчивости (рис. 3, а).

Высота отвала H_0 в выражении (1) является функцией физико-механических свойств основания и тела отвала и, кроме того, зависит от результирующего угла откоса α . В работе [6] предложена методика построения зависимости высоты отвала H_0 от результирующего угла откоса α (рис. 3, б) при безусловном обеспечении нормативного коэффициента запаса устойчивости $[K_y]$. Однако эта зависимость имеет дискретный характер, что затрудняет аналитическое исследование функции (1).

Для расчёта оптимальных параметров внешних отвалов вскрыши и хвостохранилищ следует иметь эту зависимость в формализованном виде. Для этого полученный график $H_0 = f(\operatorname{ctg} \alpha)$ следует аппроксимировать функцией вида

$$H_0 = m \operatorname{ctg}^n \alpha. \quad (4)$$

Для определения коэффициента m и n используют две точки, лежащие на графике и имеющие координаты H_1, α_1 и H_2, α_2 . Выбор точек основывается на их принадлежности к предполагаемому интервалу высоты и угла откоса отвала или хвостохранилища. В этом случае коэффициенты n и m определяются по формулам:

$$n = (\ln H_2 - \ln H_1) [\ln \operatorname{ctg}(\alpha_2) - \ln \operatorname{ctg}(\alpha_1)]^{-1}; \quad (5)$$

$$m = H_1 \operatorname{tg}^n \alpha_1 = H_2 \operatorname{tg}^n \alpha_2. \quad (6)$$

После соответствующих подстановок в уравнение (1) можно определить угол $\alpha = \alpha_{opt}$, обеспечивающий достижение максимального объема V_0

$$\alpha_{opt} = \operatorname{arccctg} \left\{ 1,5P_0(2n+1) - \left[2,25P_0^2(2n+1)^2 - 6nS_0K_\phi(3n+2) \right]^{1/2} \left[mK_\phi(3n+2) \right]^{-1} \right\}^{1/(n+1)}. \quad (7)$$

Широко распространенной задачей при проектировании отвалов и хвостохранилищ является задача по определению минимальной площади земельного отвода

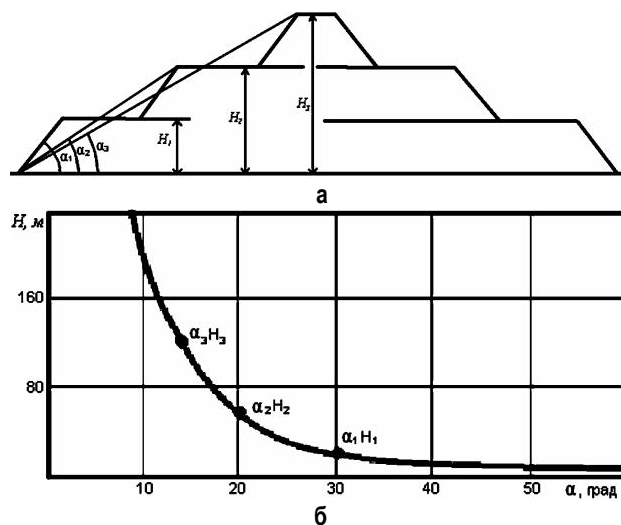


Рис. 3. График зависимости устойчивых параметров отвала на прочном основании и возможные конструкции многоярусных отвалов

Значения коэффициентов формы подотвальной площади K_ϕ и основания отвала K_0

Форма подотвальной площади	Методика определения коэффициентов
Круглая	$K_\phi = 2\pi; K_0 = 2\pi^{1/2}$
Эллиптическая, a, b – полуоси; $K = b/a$	$K_\phi = 2\pi \left\{ 0,5 + \left[0,5 - (a-b)(a+b)^{-2} \right]^{1/2} \right\}; K_0 = \pi^{1/2} (K+1) K^{1/2}$
Квадратная	$K_\phi = 8; K_0 = 4$
Прямоугольная, a, b – стороны; $K = b/a$	$K_\phi = 8; K_0 = 2(K+1) K^{-1/2}$
Трапециевидная, a, b – основания; h – высота	$K_\phi = 8; K_0 = \left(a+b+2h \cos \left\{ \operatorname{arctg} \left[0,5h^{-1}(b-a) \right] \right\} \right) \left(h \mp (b-a)/2 \right)^{-1/2}$
Треугольная, a, b, c – стороны; P – полупериметр треугольника	$K_\phi = 10,39; K_0 = (a+b+c) \left[(P-a)(P-b)(P-c)P \right]^{-1/2}$
Неправильный многоугольник, N – количество сторон основания	$K_\phi = 2N \operatorname{tg}(\pi N^{-1}); K_0$ – определяется путем инструментальных замеров площади и периметра земельного отвода в плане

Примечание. Наибольшее значение K_ϕ имеет треугольник – 10,39; наименьшее – круг $2\pi = 6,28$.

определенной формы, необходимой для размещения заданного объема вскрыши или некондиционных руд.

Введем коэффициент основания подотвальная площади K_0 .

$$K_0 = P_0 \cdot S_0^{-1/2}. \quad (8)$$

Решая уравнение (1) относительно S_0 , используя введенный коэффициент основания, получим:

$$S_0 = \left\{ 0,25 K_0 m \operatorname{ctg}^{(n+1)}(\alpha) + \left[V_0 m^{-1} \operatorname{ctg}^{-n}(\alpha) - m^2 \operatorname{ctg}^{(2n+2)}(\alpha) \left(\frac{K_\phi}{6} - \frac{K_0^2}{16} \right) \right]^{1/2} \right\}^2. \quad (9)$$

Продифференцировав уравнение (7) по $d(\operatorname{ctg}(\alpha))$, найдем значение угла откоса $\alpha = \alpha_{\text{опт1}}$, при котором достигается минимум площади земельного отвода под основание отвала для размещения требуемого объема техногенных пород V_0 :

$$\alpha_{\text{опт1}} = \operatorname{arccctg} \left\{ \left\{ 3V_0 K_0^2 \left[M \frac{n}{n+1} m \frac{1}{n+1} \times \left(3 - 3M K_\phi + M^2 K_\phi^2 \right) \right]^{-1} \right\}^{1/2} \frac{M}{m} \right\}^{1/n+1}. \quad (10)$$

Полученные зависимости позволяют установить взаимосвязь между максимальной вместимостью и минимальной площадью земельного отвода:

$$V_{\max} = (K_0 M)^{n+1} m^{n+1} 10,333 \times \quad (11)$$

$$\times \left(3 - 3M K_\phi + M^2 K_\phi^2 \right) S_0^{3n+2};$$

$$S_{\min} = \left\{ 3V_0 \left[(K_0 M)^{n+1} m^{n+1} \times \left(3 - 3M K_\phi + M^2 K_\phi^2 \right) \right]^{-1} \right\}^{2n+2}. \quad (12)$$

Для технико-экономических расчетов рекультивации отвалов необходим расчет площади откосов $S_{\text{отк}}$ и горизонтальных площадок $S_{\text{Г}}$:

$$S_{\text{отк}} = \left(S^{1/2} K_0 - 0,5 K_\phi H_0 \operatorname{ctg}(\alpha) \right) \times H_0 \left(\operatorname{ctg}^2(\alpha) \right)^{1/2}; \quad (13)$$

$$S_{\text{Г}} = H_0 \left(S^{1/2} K_0 - K_\phi H_0 \operatorname{ctg}(\alpha) \right) \times \left(\operatorname{ctg}(\alpha) - \operatorname{ctg}(\alpha_e) \right) K_0^{-2}, \quad (14)$$

где α_e – угол естественного откоса уступа отвала или угол, приданный ему в результате горнотехнической рекультивации.

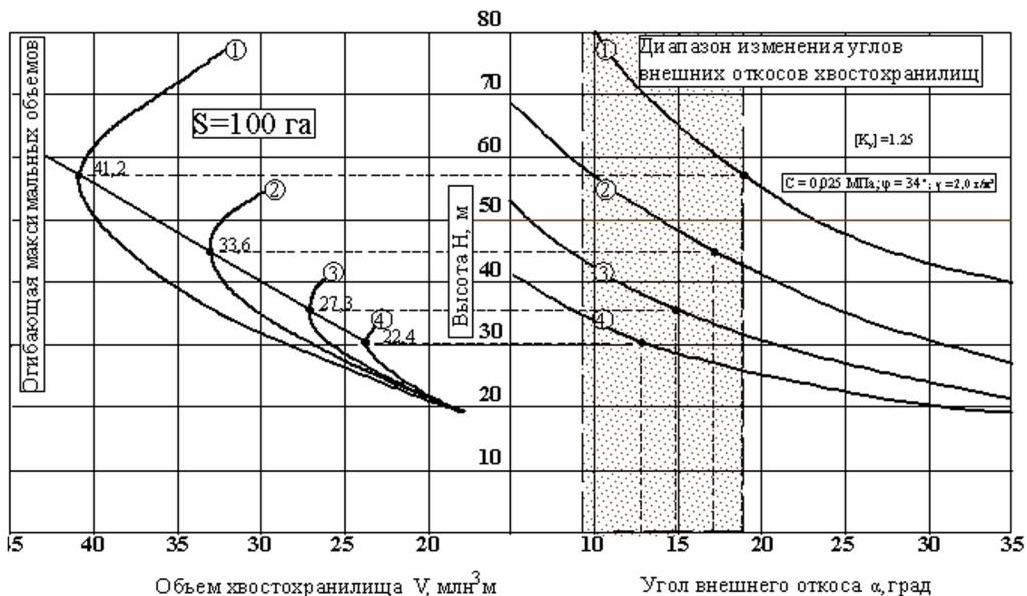


Рис. 4. Вместимость хвостохранилища при различном положении депрессионной кривой:

- 1 – тело ограждающей дамбы не обводнено; 2 – прогнозируемое положение депрессионной кривой для фактического неоднородного строения ограждающей дамбы с учётом экранирующего действия переходной зоны и донных отложений прудковой зоны и работы дренажной системы; 3 и 4 – соответственно расчётное положение депрессионной кривой при работающем и не работающем горизонтальном трубчатом дренаже для однородной ограждающей дамбы без учёта экранирующего действия переходной зоны и донных отложений прудковой зоны

Полученные аналитические зависимости позволяют оценить взаимовлияние параметров, определяющих конфигурацию внешних отвалов вскрыши или хвостохранилищ.

Было установлено, что:

- с увеличением площади земельного отвода оптимальный угол откоса уменьшается, а высота отвала возрастает;
- отклонение формы земельного отвода от круга обуславливает увеличение угла откоса и снижение высоты отвала;
- вместимость подотвальных площадей также зависит от формы земельного отвода. Так, на круглом отводе земли площадью 400 га при указанных свойствах пород отвала и основания вместимость составит 318,2 млн м³, а при треугольной форме подотвального участка такой же площади вместимость – 245,8 млн м³, т.е. на 30% меньше;
- расчеты по предлагаемой методике показали, что для складирования 100 млн м³ пород с указанными свойствами на прочном основании (см. рис. 2) требуются участки с площадью: при круглой форме отвода – 165 га, квадратной – 185 га, прямоугольной (b/a=2) – 200 га, треугольной – 220 га.

Зависимости (4), (7), (9), (10) позволяют оценивать влияние степени обводнения откоса. Для хвостохранилища площадью $S=100$ га при квадратной форме земельного отвода были рассчитаны V_0 , $\alpha_{\text{опт}}$ и $H_{\text{опт}}$ (рис. 4) при различной степени обводнения и эффективности работы дренажных систем.

Для необводненных внешних отвалов вскрыши на этой площади можно разместить до 41,2 млн м³. При полном обводнении откоса вместимость снижается до 22,4 млн м³. Однако учёт реального неоднородного строения ограждающей дамбы – области фильтрации и экранирующего действия донных отложений прудковой и переходной зоны – области питания фильтрационного потока, выбор эффективной дренажной системы позволяет увеличить вместимость хвостохранилищ еще на 25–30%. Прогноз основных технологических параметров – интенсивность и длина фронта намыва в рациональных контурах намывного хвостохранилища $\alpha_{\text{опт}}$ и $H_{\text{опт}}$ определяется по разработанной методике [8], что обеспечивает безопасность эксплуатации и гидротехнических сооружений.

Заключение

Предложенная методика позволяет обоснованно рассчитывать параметры внешних отвалов вскрыши и хвостохранилищ, обеспечивающие безопасное увеличение их ёмкости. При этом учитываются физико-механические свойства складываемого материала,

пород основания, формы и площади земельного отвода, воздействия фильтрационного потока и эффективности работы дренажных систем.

Список литературы

1. Ресурсосбережение и экология в металлургии / Юсфин Ю.С., Карабасов Ю.С., Карпов Ю.А. и др. // Научные школы МИСиС – 75 лет. М.: МИСиС, 1997. С. 272–283.
2. Сухорученков А.И. Железородное сырье: прогноз на завтра // Металлы Евразии. 2005. № 1. С. 32–34.
3. Основы проектирования, строительства и эксплуатации хвостохранилищ большой вместимости // Л.К. Антоненко, В.Г. Зотеев, А.И. Коваленко, А.М. Иваненко, Т.К. Костерова // Горный журнал. 1990. № 11. С. 43–45.
4. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г. Проблемы безопасной эксплуатации хвостохранилищ и пути их решения // Горный журнал. 1998. № 1. С. 65–67.
5. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г., Морозов М.Г. Наземные хвостохранилища каскадного типа как реальные источники техногенных катастроф. Причины и следствия Качканарской аварии // Горный журнал. М., 2000. № 10. С. 49–52.
6. Мельников Т.И., Мельников И.Т. Аналитический метод оценки устойчивости откосов на слабом основании // Горный журнал. Изв. вузов. Свердловск, 1984. № 6. С. 35–38.
7. Попов С.И., Мельников И.Т., Летанин В.М. Системный подход при проектировании отвалов, гидротвалов и хвостохранилищ // Горный журнал. Изв. вузов. Свердловск, 1991. № 10. С. 27–31.
8. Мельников И.Т. Математическое описание технологии возведения намывных хвостохранилищ равнинного и нагорного типов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С. 3–9.

Bibliography

1. Usfin U.S., Karabasov U.S., Karpov U.A., et al. Resource-saving and ecology in metallurgy. Scientific schools of MISiS – 75 years old. M.: MISiS, 1997. P. 272–283.
2. Suhoruchenkov A.I. Iron ore material: forecast for tomorrow // Metals of Eurasia. 2005. № 1. P. 32–34.
3. Basics of the designing, construction and operation of big capacity tailings storages / L.K. Antonenko, V.G. Zoteev, A.I. Kovalenko, A.M. Ivanenko, T.K. Kosterova // Mining magazine. 1990. № 11. P. 43–45.
4. Antonenko L.K., Zoteev V.G. Problems of safe operation of tailings storage and their solutions // Mining magazine. 1998. № 1. P. 65–67.
5. Antonenko L.K., Zoteev V.G., Morozov M.G. Overland tailings storage of cascade type as potential sources of technological disasters. Causes and effects of Kachkanarsk accident // Mining magazine. M., 2000. № 10. P. 49–52.
6. Melnikov T.I., Melnikov I.T. Analytical method of slope stability estimation on a weak base // Mining magazine. Proceedings of high school. Sverdlovsk. 1984. № 6. P. 35–38.
7. Popov S.I., Melnikov I.T., Letanin V.M. System approach to dump, sludge ponds and tailings storage design // Mining magazine. Proceedings of high school. Sverdlovsk. 1991. № 10. P. 27–31.
8. Melnikov I.T. Mathematical formulation of construction technology for alluvial tailings storage of plain and highland types // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. Magnitogorsk, 2007. № 1. P. 3–9.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.262.3

Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В.

УВЕЛИЧЕНИЕ РАБОТЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ПОВЫШЕНИЕМ ОБЩЕГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ

Близость к предельно низкой величине вертикального давления шихты в определяющей по газодинамике зоне и существование резерва в остальной части доменной печи делает возможным совершенствование выплавки чугуна повышением общего перепада давления газов. Это реализуемо, во-первых, перераспределением силового взаимодействия потока шихты с газами по высоте и сечению печи, во-вторых, стабилизацией его в определяющей зоне.

Перераспределение предусматривает улучшение результатов доменной плавки повышением напряжённости силового взаимодействия потоков шихты и газов в тех зонах, где это допустимо, без снижения вертикального давления в определяющей зоне. На печи это выглядит как ход доменной плавки с повышенным общим перепадом давления газов по высоте при ровном ходе шихты.

Общий перепад давления возрастает с повышением скорости газового потока, т.е. интенсивности по дутью, до предельно допустимого уровня, равномерности распределения железорудного сырья и кокса, крупных и мелких материалов по сечению и окружности печи [1–5 и др.]. Повышение равномерности распределения можно использовать преимущественно для снижения удельного расхода кокса, а повышение интенсивности по дутью при сохранении ровного

схода шихты – в направлении увеличения производительности. Зависимость между равномерностью распределения материалов и предельно допустимой интенсивностью схематично представлена на рис. 1.

Допустимый общий перепад давления оказывается наиболее высоким ($\Delta P_{ВП}$) при предельно допустимой и достижимой повышенной равномерности распределения материалов по окружности и сечению (кривая 1). В этом случае газопроницаемость шихты получается низкой, а это, для исключения неровного схода шихты, заставляет вести доменную плавку с пониженной интенсивностью по дутью ($J_{ВП}$) и соответственно по коксу. При этом высокий перепад обеспечивает необходимую высокую порозность слоя шихты [2] (разрыхленное состояние её). Низкая интенсивность ведёт соответственно к пониженной производительности.

Допустимый общий перепад давления (ΔP) в этом случае оказывается наибольшим в связи с тем, что насыпная плотность шихты высока по всем элементарным участкам сечения и окружности печи, с которой перепад давления связан линейной зависимостью:

$$\Delta P = v \cdot \gamma_{ш} \cdot H, \quad (1)$$

где v – степень уравнивания шихты подъёмной силой газового потока; $\gamma_{ш}$ – насыпная плотность шихты; H – рабочая высота печи.

Повышенная равномерность распределения железорудного сырья и кокса, крупных и мелких материалов обеспечивает высокую степень использования химической, тепловой и потенциальной энергии газового потока и соответственно низкий удельный расход кокса. Такой режим хода доменного процесса целесообразно организовывать при необходимости ограничения производительности печи (например, в связи с отсутствием потребителей чугуна).

Степень использования потенциальной энергии газового потока характеризуется показателем η_n (%):

$$\eta_n = 100 \cdot \Delta P / P_0, \quad (2)$$

где P_0 – давление дутья.

При некотором оптимальном распределении, подбираемом логико-статистическим способом [3] (кривая 2), печь принимает максимальное количество дутья ($J_{ОПТ}$) при ровном ходе шихты. Такой режим обеспечивает сочетание максимальной производительности с низким удельным расходом кокса. По

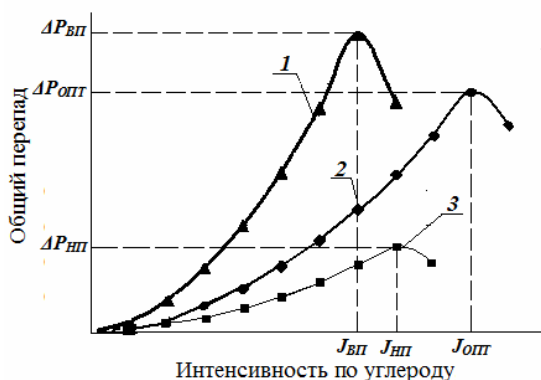


Рис.1. Влияние равномерности распределения железорудного сырья и кокса на интенсивность плавки и общий перепад давления газов в доменной печи:

- 1 – равномерное распределение для ограничения производительности и снижения удельного расхода кокса;
- 2 – оптимальное распределение для работы с максимальной производительностью;
- 3 – неравномерное распределение

исследованиям на доменных печах увеличение общего перепада давления на 10 кПа сопровождается уменьшением удельного расхода кокса в среднем на 8 кг/т чугуна и повышением производительности на 2,1%. Такое улучшение результатов плавки обеспечивается повышением использования тепловой, химической и потенциальной энергии печных газов.

При излишнем неравномерном распределении (кривая 3) газопроницаемость шихты получается высокой, а допустимый общий перепад давления газов ($\Delta P_{НП}$) и допустимая интенсивность ($J_{НП}$), обеспечивающая в таких условиях устойчивое состояние шихты, оказываются низкими. Допустимый общий перепад давления газов в этом случае низок согласно выражению (1) в связи с минимальной насыпной плотностью шихты в зонах сосредоточения кокса.

Ведение доменной печи с повышенным общим перепадом давления газов обеспечивает увеличение количества совершаемой работы газового потока A_c , которая определяется по формуле

$$A_c = \frac{R}{22,4} \left(ПГ \cdot T_{n.z.} \cdot \ln \frac{P_{n.z.}}{P_0} + V_{фz} T_{фz} \ln \frac{P_0}{P_{кz}} + CO_d T_{co} \ln \frac{P_n}{P_{кz}} \right),$$

где $ПГ$ – расход природного газа, м³/т чугуна; $V_{фz}$ – выход фурменного газа, м³/т чугуна; CO_d – количество монооксида углерода, образовавшегося при прямом восстановлении, м³/т чугуна; $T_{n.z.}$ – температура природного газа, К; $T_{фz}$ – температура фурменного газа, К; T_{co} – температура протекания реакций прямого восстановления, К; $P_{n.z.}$ – давление природного газа; P_0 – давление дутья; P_n – давление в зоне протекания реакций прямого восстановления, кПа; $P_{кz}$ – давление колошникового газа; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Распределение работы образования газа по высоте и сечению доменной печи, рассчитанное по результатам вертикального и горизонтального зондирования её [4], представлено на рис. 2 и 3.

Работа газового потока при движении его в верхней части печи изменяется экстремально. Экстремум обусловлен в основном быстрым увеличением к низу температур в верхней части верхней ступени интенсивного теплообмена [5]. Это увеличение по влиянию на скорость движения газа не компенсировано расширением печи к низу. Дополнительно действует разрушение материалов при восстановлении железа, находящегося в виде Fe_2O_3 , до Fe_3O_4 . В середине шахты работа газового потока на единицу высоты печи уменьшается в основном за

счёт замедления роста температур к низу печи в зоне замедленного теплообмена. Частично действует спекание мелких фракций до начала размягчения.

На нижних горизонтах печи работа газового потока на единицу высоты печи значительно увеличивается вследствие образования зоны когезии, роста градиента температур в нижней ступени теплообмена, уменьшения сечения печи в заплечиках. Указанное неравномерное распределение работы газового потока по высоте уменьшает её суммарную величину от горизонта фурм до уровня засыпи вследствие того, что в зонах максимума работы (верх шахты и заплечики) излишнее протекание её приводит к неровному сходу шихты. Для увеличения этой суммарной величины необходимо полнее использовать среднюю часть печи.

Неравномерное распределение работы газового потока по сечению печи (см. рис. 3) также приводит к уменьшению её суммарной величины от горизонта фурм до уровня засыпи. Это обусловлено недостаточным использованием зон, в которых создаётся пониженная рудная нагрузка для улучшения газопроницаемости шихты. Поэтому для повышения количества работы газового потока с улучшением результатов доменной плавки целесообразно создавать повышенную равномерность распределения железорудного сырья и кокса, крупных и мелких материалов по сечению, допустимую по ровности схода шихты.

Заключение

Организация хода доменного процесса с повышенным общим перепадом давления газов по высоте обеспечивает увеличение степени использования тепловой, химической и потенциальной энергии газов.

Для реализации хода доменного процесса, обеспечивающего повышенный общий перепад давления газов, целесообразно, наряду с другими мероприятиями, исключать зоны с пониженной рудной нагрузкой, создавая для этого необходимые условия.

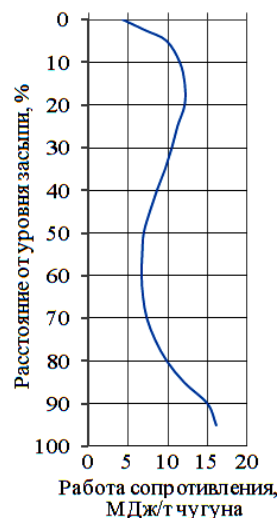


Рис. 2. Общий характер распределения работы газового потока по высоте доменной печи

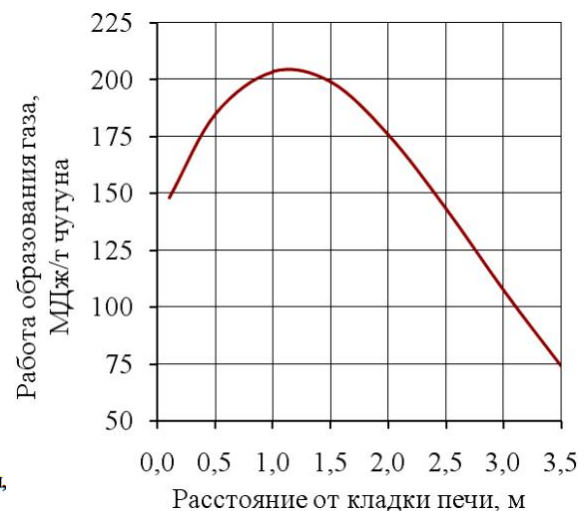


Рис. 3. Общий характер распределения работы образования газа по радиусу доменной печи в нижней части

Ведение доменной печи с повышенным общим перепадом давления газов увеличивает количество совершаемой газовым потоком работы.

Библиографический список

1. Стефанович М.А., Сибатагуллин С.К. Рациональная организация хода основных процессов в противоточной зоне доменной печи // Производство чугуна. Свердловск: УПИ, 1983. С. 80–86.
2. Сысов Н.П. Влияние скорости опускания столба шихты в доменной печи на его порозность // Производство чугуна. Магнитогорск: МГМА, 1994. С. 4–6.
3. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 545 с.
4. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 257 с.
5. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко.

Екатеринбург: УГТУ, 1995. 243 с.

Bibliography

1. Stefanovich M. A., Sibagatullin S.K. Rational organization of basic processes in the counter-flow zone of a blast furnace // Pig-iron Manufacture. Sverdlovsk: UPI, 1983. P. 80–86.
2. Sysoyev N.P. Influence of speed of stock column descent in a blast furnace on its fractional void volume // Pig-iron Manufacture. Magnitogorsk: Magnitogorsk mining and metallurgical academy, 1994. P. 4–6.
3. Basics of the theory and technology of blast furnace smelting / A.N. Dmitriev, N.S. Shumakov, L.I. Leontev, O.P. Onorin. Yekaterinburg: The Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. 545 p.
4. Babarykin N.N. Theory and technology of the blast furnace process. Magnitogorsk: the state educational institution of higher professional education "MGU", 2009. 257 p.
5. Heat exchange and the increase of blast furnace smelting efficiency / N.A. Spirin, J.N. Ovchinnikov, V.S. Shvydkiy, J.G. Jaroshenko. Yekaterinburg: USTU, 1995. 243 p.

УДК 621.74:669.13

Андреев В.В.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНАХ

Несмотря на более чем 60-летний период применения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и большое количество проведенных исследований, до настоящего времени еще не разработана общепринятая теория, объясняющая с достаточной достоверностью механизм образования сферолитов графита в чугуне. Это относится и к другим «промежуточным» (между пластинчатой и шаровидной) формам графита. Их появление в чугуне обусловлено невыполнением в расплаве в полной мере необходимых условий, обеспечивающих образование нормального шаровидного графита.

На основании результатов многолетних исследований, посвященных получению основных параметров жидкого состояния чугуна с шаровидным графитом, кинетики его кристаллизации и строения различных форм графита в нем Б.С. Мильманом была высказана гипотеза об условиях образования шаровидного графита в чугуне и роли элемента-модификатора в этом процессе [1, 2]. Затем основные положения этой концепции были обоснованы и подтверждены результатами исследования условий образования шаровидного графита без каких-либо сфероидизирующих графит элементов в синтетическом чугуне, выплавленном в глубоком вакууме из особо чистых исходных материалов и содержащем минимальное количество серы и кислорода [3, 4]. Согласно этой концепции образование шаровидного графита в чугуне происходит в условиях совместного воздействия двух основных факторов: высокого поверхностного натяжения расплава и значительного его переохлаждения. Роль же элемента-модификатора (при обработке технических чугунов) заключается в том, что он, благодаря взаимодействию и связыванию в стойкие химические соединения поверхностно-активных примесей чугуна (кислорода

и серы), создает и поддерживает в расплаве вышеуказанные условия в процессе кристаллизации чугуна. При этом сам элемент-сфероидизатор не принимает непосредственного участия в формировании сферолитов путем избирательной адсорбции на гранях растущих кристаллов графита или каким-либо иным способом, а лишь препятствует таковой со стороны кислорода и серы. Результатом такого воздействия является кристаллизация графита в шаровидной форме.

В последующих исследованиях специалистов ЦНИИТМАШ, посвященных вопросам разработки новых сфероидизирующих присадок [5, 6] и новой технологии получения чугуна с шаровидным графитом непосредственно в процессе выплавки в электропечах промышленной частоты [7], эти положения были использованы и нашли свое экспериментальное подтверждение.

В настоящее время уже, практически, всеми исследователями в качестве одного из основных условий, определяющих возможность образования шаровидного графита в чугуне, признается необходимость его глубокого рафинирования от кислорода и серы, что, в конечном счете, приводит к повышению общего уровня поверхностного натяжения расплава и, как правило, повышению межфазного натяжения на границе расплава-графит. Таким образом, соблюдается первое необходимое условие для получения шаровидного графита. Что же касается второго необходимого условия (или фактора) – наличия определенного переохлаждения, под которым в данном случае понимается снижение температуры эвтектической кристаллизации чугуна с шаровидным графитом по отношению к исходному чугуну, то большинством исследователей он также признается в качестве главного, наиболее существенного фактора.

С использованием новых методик удалось экспериментально определить в чугунах с пластинчатой и шаровидной формой графита величины межфазных натяжений на границе раздела расплав-базисные и расплав-призматические плоскости кристаллов графита и показать связь этих параметров с формообразованием кристаллизующихся включений графита [8, 9].

Было установлено, что в чуугне кристаллизуется полностью шаровидный графит, если при общем высоком уровне межфазного натяжения на границе расплав-графит ($\sigma_{Т-ж}$) эта величина на границе жидкого чугуна с призматическими плоскостями ($\sigma_{Т-(hko)-ж}$) превышает межфазное натяжение на границе с базисными плоскостями графита ($\sigma_{Т-(ool)-ж}$), т.е. соблюдается условие:

$$\sigma_{Т-(hko)-ж} \geq \sigma_{Т-(ool)-ж}$$

У чугуна с пластинчатым графитом наблюдается обратная зависимость, а абсолютные величины этих показателей существенно ниже. Сопоставление кривых кристаллизации чугунов с изменением межфазного натяжения на границе расплав-графит всегда сопровождается снижением температуры эвтектической кристаллизации, что вполне согласуется с современными теоретическими представлениями о процессах зародышеобразования.

Таким образом, о состоянии расплава, обуславливающего формирование той или иной формы кристаллизующегося графита, теперь можно судить по величине одного только межфазного натяжения, а учитывая более интенсивный характер изменения межфазного натяжения на границе расплав-призматические плоскости графита, именно по величине ($\sigma_{Т-(hko)-ж}$). При его высоком значении (>1200 МДж/м²) графит кристаллизуется в шаровидной форме [8].

Исходя из вышеизложенной концепции, для выявления различий в процессах кристаллизации чугунов с различной формой графита и выяснения причин его неполной сфероидизации были изучены все указанные параметры применительно к чугунам, обработанным РЗМ-содержащими лигатурами. Кроме того, методом закалки образцов исследовали картину зарождения и роста вермикулярного графита в процессе кристаллизации чугуна, а также его внешнюю форму

и внутреннее строение.

Комплексному исследованию по определению всех указанных параметров подвергали чугуны с различной формой графита. Изменение формы графита достигали путем обработки исходного чугуна соответствующим количеством РЗМ-содержащей лигатуры или металлического иттрия. В качестве проб для контроля структуры и снятия кривых кристаллизации чугунов использовали клиновидные заготовки с толщиной стенки 25 мм.

Обработка исходного чугуна Si-РЗМ-лигатурой, как и обработка магнием, церием или мишметаллом, приводит к изменению температуры эвтектической кристаллизации модифицированного чугуна по отношению к исходному (рис. 1).

Однако при использовании лигатуры это изменение является результатом одновременного воздействия РЗМ и кремния. Кроме того, обработка лигатурой без модифицирования (инокулирования) приводит к значительному отбелу чугуна (появлению ледебурита в структуре) и соответственно резко снижению температуры его эвтектической кристаллизации (см. рис. 1, сравни кривые 1 и 3). Модифицирование ферросилицием такого чугуна вновь повышает температуру его эвтектической кристаллизации (кривая 4) за счет изменения степени эвтектичности расплава при растворении дополнительного количества кремния, а также вследствие проявления инокулирующего действия присадки.

Чтобы выявить влияние именно РЗМ из лигатуры на изменение температуры эвтектической кристаллизации модифицированного чугуна и установить связь между этим изменением и формой кристаллизующегося графита в реальных отливках, получаемых по разработанному технологическому процессу, т.е. после сфероидизирующей и графитизирующей обработки расплава, необходимо сравнить кривые кристаллизации чугуна, обработанного лигатурой, и исходного чугуна с пластинчатым графитом, имеющих одинаковый химический состав (отличающийся лишь содержанием РЗМ) и подвергнутых вторичному инокулированию ферросилицием (см. рис. 1, кривые 2 и 4).

Поэтому была принята следующая методика проведения этого эксперимента. Выплавляли исходный чугун заданного состава и одну его часть обрабатывали в ковше определенным количеством лигатуры, а в другую добавляли соответствующее количество ферросилиция, компенсирующее увеличение содержания кремния в чуугне за счет присадки лигатуры. Затем полученными чугунами после их вторичного модифицирования ферросилицием (0,8% от массы жидкого чугуна) заливали пробы, кривые кристаллизации которых записывались автоматически.

Поверхностное и межфазное натяжение этих чугунов определяли методом рентгеновской съемки лежащей жидкой капли в атмосфере высокочистого аргона на установке «параболоид» конструкции ЦНИИТМАШ. При определении межфазного натяжения на грани-

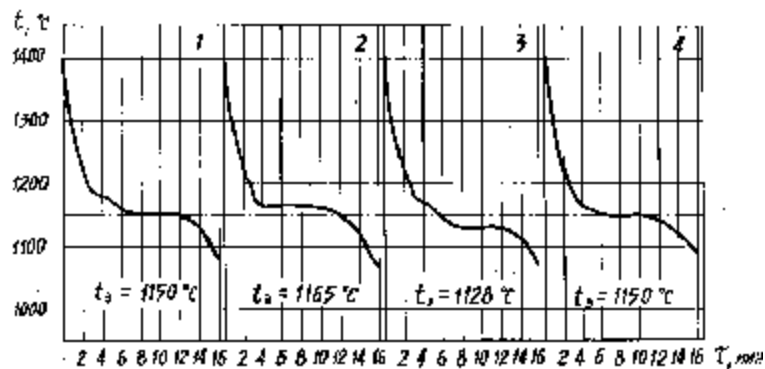


Рис. 1. Кривые кристаллизации чугунов:

- 1 – исходный, 2 – исходный модифицированный ФС 75, 3 – обработанный лигатурой (0,6%), 4 – обработанный лигатурой и модифицированный ФС 75

Связь поверхностных свойств жидкого чугуна со снижением температуры его эвтектической кристаллизации и формой кристаллизующегося в нем графита

Номер поз.	Химический состав, %							Форма графита	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{ж-г}$	$\sigma_{т(001)-ж}$	$\sigma_{т(hko)-ж}$
	C	Si	Mn	P	S	O ₂						
1	3,53	2,89	0,31	0,028	0,019	0,0035	–	ПГ	-	1034	197	72
2	3,58	2,79	0,30	0,001	0,004	0,0032	–	ПГ	-	1380	711	539
3	3,60	2,50	0,40	0,025	0,006	0,0017	0,10PЗМ	ВГ	9	1400	1010	958
4	3,73	2,60	0,35	0,030	0,005	0,0016	0,12PЗМ	ВГ+15%ШГ	12	1440	1058	1020
5	3,73	2,65	0,70	0,065	0,005	0,0014	0,06Y	ВГ+30%ШГ	15	1470	1072	1044
6	3,72	2,70	0,65	0,058	0,005	0,0010	0,10Y	ВГ+50%ШГ	19	1520	1108	1090
7	3,62	2,65	0,73	0,065	0,004	0,0008	0,16Y	90%ШГ	24	1600	1246	1349
8	3,52	2,89	0,33	0,001	0,004	0,0007	0,09Mg	100%ШГ	27	1622	1242	1390

Примечания: 1. ПГ, ВГ и ШГ – соответственно пластинчатый, вермикулярный и шаровидный графит.

2. Δt – снижение температуры эвтектической кристаллизации модифицированного чугуна в сравнении с исходным.

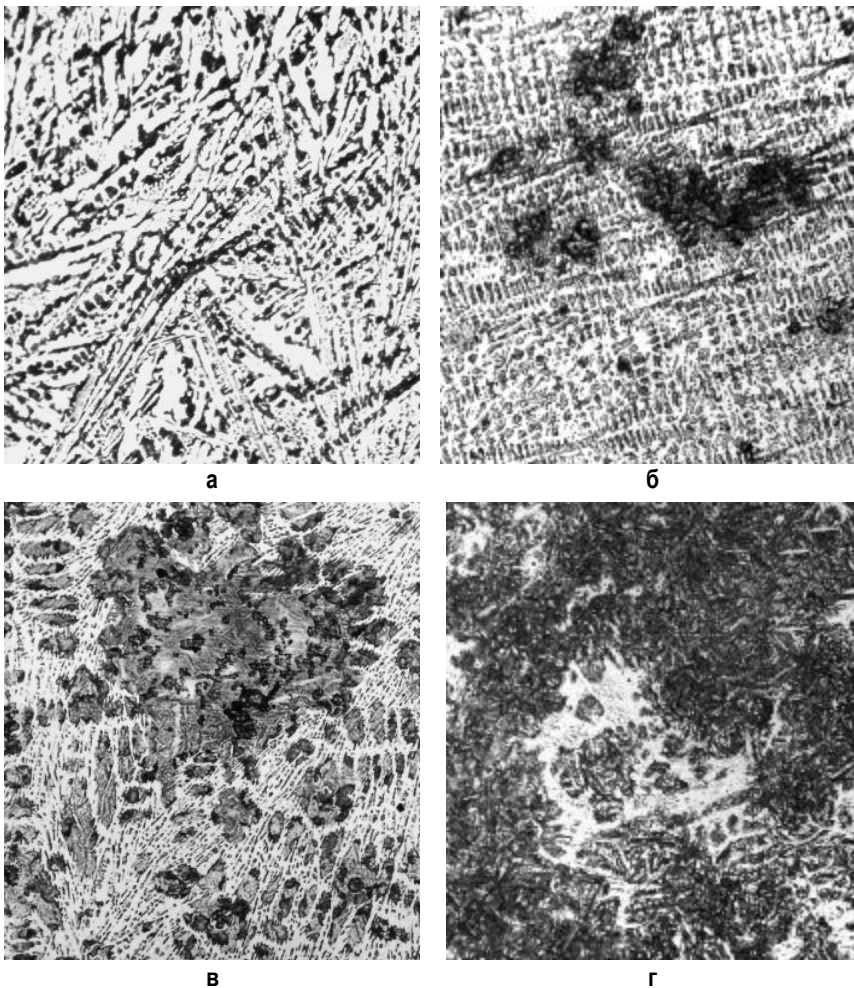


Рис. 2. Структура закаленных образцов ЧВГ (травлено, $\times 200$)

це расплав-базисные и расплав-призматические плоскости использовали в качестве подложки соответствующие псевдомонокристаллы графита, имеющие весьма высокую степень ориентировки плоскостей. Величину поверхностного натяжения рассчитывали по геометрическим параметрам капли жидкого чугуна. Межфазное

натяжение рассчитывали по формуле, выведенной из известного уравнения Т. Юнга:

$$\sigma_{т-ж} = \sigma_{т-ж} + \sigma_{ж-г} \cos(180^\circ - \Theta^\circ),$$

где $\sigma_{т-ж}$, $\sigma_{т-г}$, $\sigma_{ж-г}$ – соответственно поверхностные натяжения на границе фаз твердое–жидкость (графит–жидкий чугун), твердое–газ (графит–газ), жидкость–газ (жидкий чугун–газ); Θ° – краевой угол смачивания подложки жидким чугуном.

Поскольку поверхностное натяжение твердого графита на границе с газом при постоянной температуре расплава практически не изменяется, то с изменением физико-химических свойств расплава величина $\sigma_{ж-г} \cos(180^\circ - \Theta^\circ)$ будет характеризовать изменение межфазного натяжения на границе жидкий чугун–графит.

В таблице приведены результаты этих исследований для чугунов с различной формой графита, обработанных РЗМ. Для сравнения представлены также данные для чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом (поз. 1, 2 и 8), полученные в работе [8]. Эти данные наглядно иллюстрируют связь содержания кислорода и серы в чугуне с поверхностными свойствами жидкого расплава, изменением температуры его эвтектической кристаллизации и формой кристаллизующегося в нем графита.

Содержание кислорода и серы оказывает основное влияние на величину поверхностного и межфазного натяжения жидкого чугуна. Действительно, самый низкий уровень поверхностного и межфазного натяжения имеет обычный электропечной чугун с пластинчатым графитом, содержащий значительное количество кислорода и серы (см. таблицу, поз. 1).

При этом величина межфазного натяжения на границе расплав-призматические плоскости графита $\sigma_{т(hko)-ж}$ значительно

меньше, чем на границе расплав-базисные плоскости графита $\sigma_{т(001)-ж}$. Такая же закономерность имеет место и в чугуне с пластинчатым графитом, выплавленном на чистых исходных материалах и содержащем всего только 0,004% серы при том же количестве кислорода, хотя абсолют-

ные значения межфазных натяжений существенно возрастают (см. **таблицу**, поз 2).

В чугунах, подвергнутых сфероидизирующей обработке РЗМ, содержание газов резко снижается, в том числе кислорода в 2–3 раза и водорода в 2–4 раза. Содержание серы в них, как правило, составляет 0,003–0,006%.

Иногда при обработке исходных чугунов с повышенным содержанием серы ($>0,03\%$) ее остаточное содержание в модифицированном чугуне может быть и несколько выше. В чугуне с вермикулярным графитом оно может достигать значений 0,010–0,012% и сопровождаться соответствующим увеличением остаточного содержания РЗМ. Этот эффект, безусловно, является следствием меньшей степени рафинирования чугуна от продуктов десульфации, так как при прочих равных условиях (одинаковой длительности выдержки и температуры жидкого чугуна) с повышением исходного содержания серы образуется и большее количество сульфидных включений, которые не успевают полностью удалиться из металла в шлак. Существенное уменьшение содержания кислорода и серы в обработанных РЗМ чугунах обуславливает резкое повышение поверхностного и межфазного натяжений их жидких расплавов и соответствующее изменение формы кристаллизующегося графита.

Так, например, величина поверхностного натяжения ($\sigma_{ж-г}$) чугунов с вермикулярным графитом имеет значения 1380...1470 МДж/м² и с последующим увеличением степени сфероидизации графита (увеличение количества шаровидных включений) достигает значений 1550...1600 МДж/м², характерных для чугунов с полностью шаровидной формой графита.

Абсолютные значения межфазных натяжений на границе раздела расплав-графит базисные и расплав-графит призматические грани кристаллов для этих чугунов также закономерно возрастают.

Особенность этого изменения заключается в том, что у чугуна с вермикулярным графитом, как и у чугуна с пластинчатым графитом, межфазное натяжение на границе расплав-призматические грани графита при общем более высоком уровне остаются всегда меньше, чем межфазное натяжение на границе расплав-базисные грани графита, хотя эта разница существенно уменьшается (см. **таблицу**, поз. 3, 4, 5). При этом у чугунов с вермикулярной и смешанной вермикулярной и шаровидной формой графита абсолютные величины значений этих межфазных натяжений остаются всегда меньше, чем это необходимо для реализации процессов сферолитной кристаллизации, т.е. не достигает значений 1200 МДж/м² [8]. У чугуна же с шаровидным графитом межфазные натяжения на границе расплав-графит имеют более высокие значения, превышающие указанную величину (см. **таблицу**, поз. 7, 8), а соотношение их величин меняется в пользу межфазного натяжения на границе расплав-призматические грани графита, т.е. $\sigma_{Т(лкo)-ж}$ становится больше $\sigma_{Т(ool)-ж}$ и, таким образом, в этом случае основное условие сферолитной кристаллизации графита выполняется полностью.

Термографический анализ процесса затвердевания чугунов, обработанных РЗМ-лигатурами и ферро-

силицием по вышеуказанной методике, показал, что температура их эвтектической кристаллизации снижается по отношению к исходному чугуну и разница между ними (Δt°) тем больше, чем больше присадка лигатуры или РЗМ и соответственно выше степень сфероидизации графита. Для чугунов с вермикулярным графитом эта разница составляет 8–15°С и с увеличением степени сфероидизации графита возрастает до значений 20–30°С, характерных для чугунов с практически полностью шаровидной формой графита. Полученные данные хорошо согласуются с изменением межфазного натяжения этих чугунов (см. **таблицу**), так как уровень последнего в основном и определяет величину «перехолаждения».

Таким образом, физико-химическое состояние расплава чугуна, обуславливающее кристаллизацию графита в вермикулярной форме, характеризуется:

- низким содержанием поверхностно-активных примесей (кислорода и серы);
- повышенным поверхностным натяжением;
- относительно небольшим снижением температуры эвтектической кристаллизации;
- общим, достаточно высоким уровнем межфазного натяжения при условии, что межфазное натяжение на границе «жидкий чугун–призматические грани графита» все же остается всегда несколько меньшим, чем межфазное натяжение на границе «жидкий чугун–базисные грани графита».

Для исследования особенностей кристаллизации чугунов с различной формой графита использовали структурно-закалочный метод, позволяющий судить о последовательности кристаллизации отдельных фаз сплава и проследить процесс формообразования структурных составляющих по мере их роста.

В качестве исходного материала для исследования этих процессов использовали электропечной итриевый чугун следующего состава: 3,62% С; 2,95% Si; 0,73% Mn; 0,065% P; 0,004% S и 0,16% Y. Стружку чугуна в кварцевых ампулах $\varnothing 3$ мм и толщиной стенки 0,5 мм помещали в силитовую печь, нагревали до 1400°С, выдерживали при этой температуре 2 мин и затем охлаждали с печью со скоростью 20–25°С в минуту. В процессе охлаждения на различных этапах кристаллизации в интервале температур 1160–1100°С ампулы с образцами чугуна закачивали в воде. Металлографический анализ структуры закаленных образцов позволил выявить общую картину формирования включений графита в чугуне (**рис. 2**).

В образцах чугуна, закаленных с температуры 1160°С, фиксируется, в основном, жидкая фаза в виде тонкого ледебурита (**рис. 2, а**). Однако уже при этой температуре выявляется химическая неоднородность расплава, которая обуславливает выделение в процессе закалки некоторого количества первичных дендритов аустенита и цементита.

Начиная с температуры 1150°С и ниже в структуре закаленных образцов можно наблюдать наличие твердой фазы – графита и аустенита, количество которой непрерывно увеличивается в процессе дальнейшего охлаждения чугуна (**рис. 2, б–г**). Появившиеся шаровидные вклю-

чения графита уже на ранних этапах эвтектической кристаллизации обволакиваются аустенитом (рис. 3, а).

Образовавшиеся же в процессе совместного роста с аустенитом розетки вермикулярного графита, сходно с

эвтектическими колониями пластинчатого графита (рис. 3, б), своими концами (кромками) на этом этапе кристаллизации еще связаны с расплавом (рис. 3, в, г).

Позже такие розетки тоже полностью окружаются аустенитом, и дальнейший рост вермикулярного графита, как и шаровидного, продолжается в условиях диффузии атомов (ионов) углерода из расплава через аустенитную оболочку.

Выявленные особенности кристаллизации, по-видимому, и определяют специфичность формы и строения вермикулярного графита в чугунах.

Металлографические исследования шлифов чугуна, полученных методом последовательных сошлифовок и ионного травления, позволили выявить некоторые особенности формы и строения включений вермикулярного графита.

Включения вермикулярного графита на срезе шлифа представляют собой агрегаты, состоящие из набора кристаллов, в которых кристаллографическая ориентировка плоскостей роста различна (рис. 4).

Одни из кристаллитов являются как бы фрагментами сферолитного графита со слоисто-концентрически расположенными плоскостями роста или приближающимися к концентрическому расположению (рис. 5, а), другие, сходно с включениями пластинчатого графита, являются слоистыми пластинами (рис. 5, б) с преобладанием роста вдоль плоскостей базиса.

Что же касается пространственного облика вермикулярного графита, то методом последовательных сошлифовок удалось установить, что в пределах одной колонии

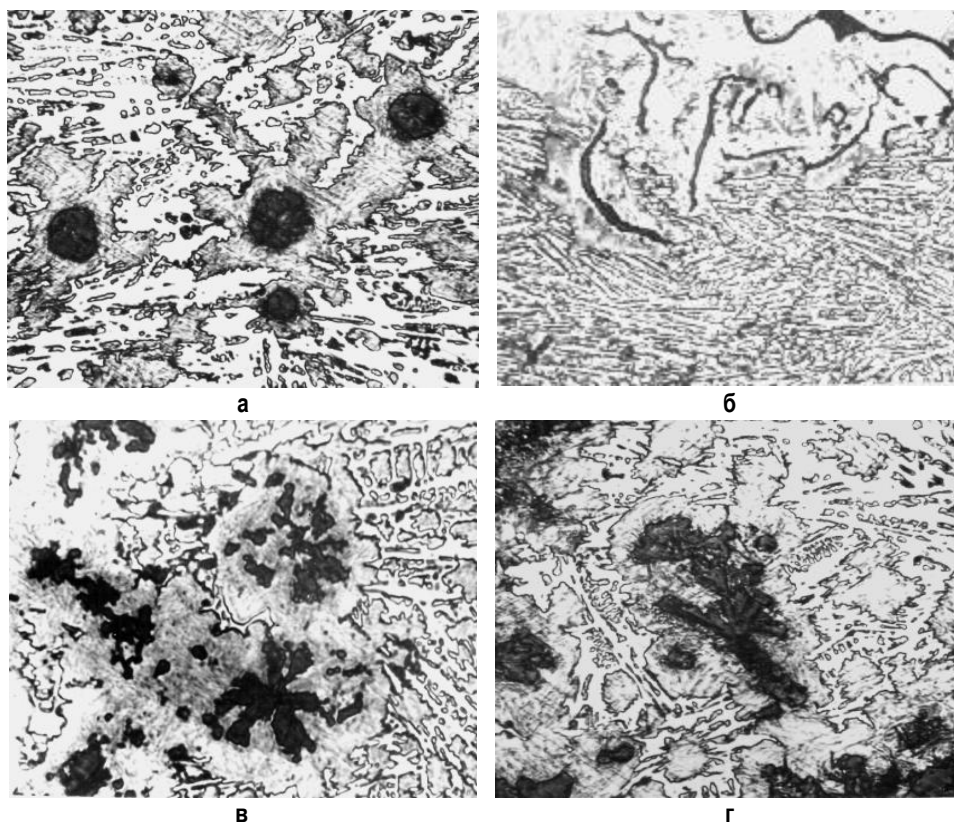


Рис. 3. Связь включений графита с расплавом (травлено, $\times 500$): а – шаровидный; б – пластинчатый; в, г – вермикулярный графит

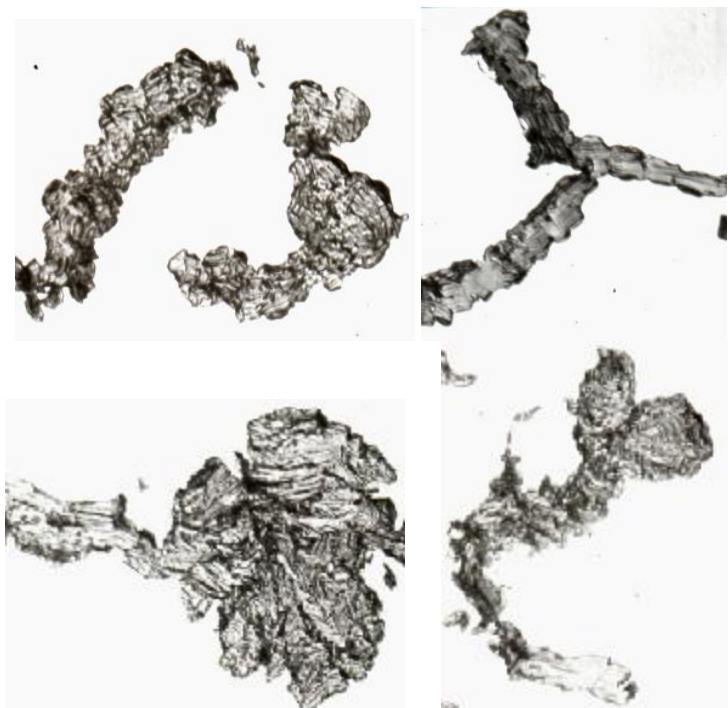
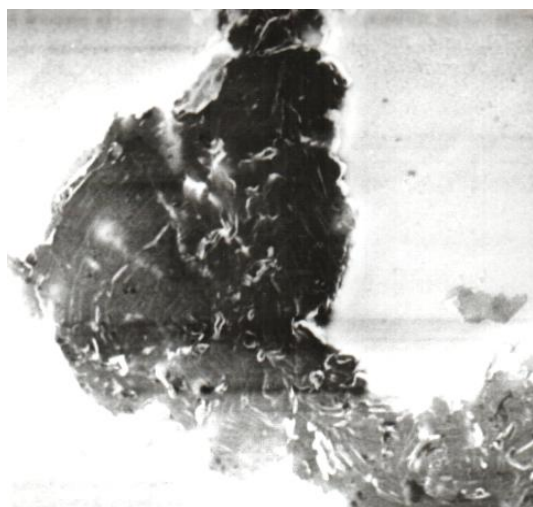


Рис. 4. Включения вермикулярного графита после ионного травления ($\times 800$)



а ×1500



б ×5000

Рис. 5. Фрагменты вермикулярного графита после ионного травления в изображении растрового электронного микроскопа (РЭМ)

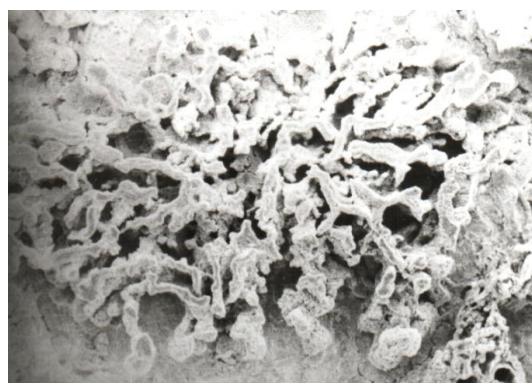
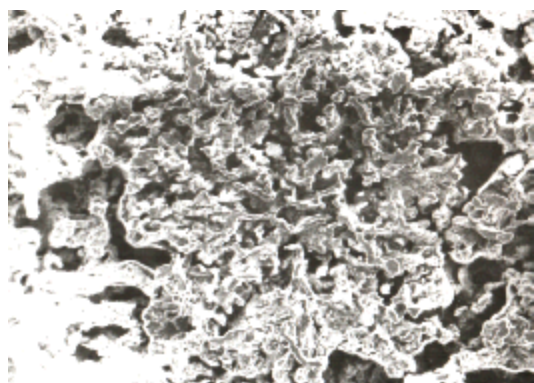
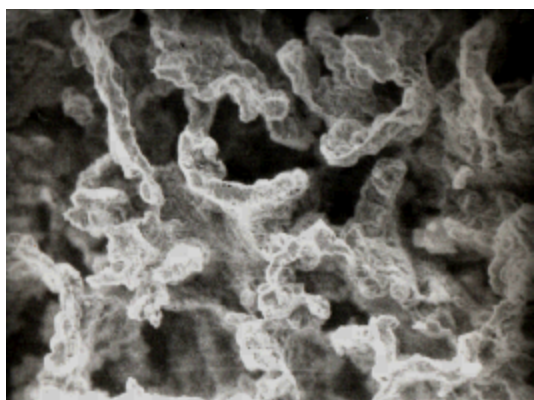
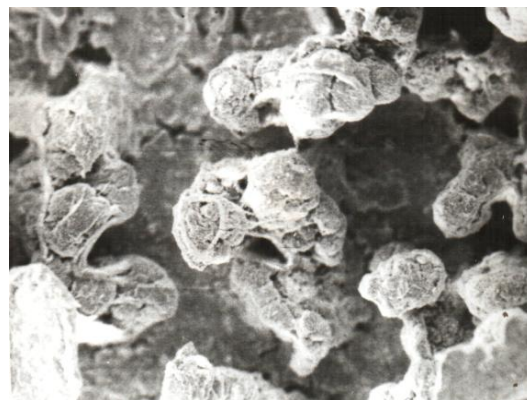


Рис. 6. Пространственная форма вермикулярного графита



а



б

Рис. 7. Пространственная форма вермикулярного графита (фрагменты, ×400):
а – связь между ветвями; б – полушаровидные образования на концах ветвей

видимые на плоскости шлифа изолированные включения вермикулярного графита в пространстве связаны между собой и, таким образом, образуют весьма сложный разветвленный графитный агрегат. Исследования на растровом электронном микроскопе графита вермикулярной формы, освобожденного от окружающей металлической основы в процессе глубокого электролитического растравливания полированной поверхности шлифов, подтвердили это положение.

В объеме розетка вермикулярного графита представляет собой сложную пространственную структуру, выросшую, по-видимому, из одного центра и напоминающую по форме коралловое образование (рис. 6). Этот разветвленный графитный агрегат состоит из утолщенных, взаимопересекающихся, изогнутых, переменного сечения пластин (рис. 7, а), оканчивающихся полусферовидными образованиями (рис. 7, б).

Возникновение таких полусферовидных образований можно объяснить тем, что вермикулярный графит на определенном этапе теряет непосредственную связь с расплавом и дальнейший его рост идет за счет диффузии углерода через оболочку аустенита, что благоприятствует проявлению черт сферолитной кристаллизации.

Список литературы

1. Мильман Б.С. Образование шаровидного графита и развитие технологии высокопрочного чугуна // Литейное производство. 1958. № 6.
2. Мильман Б.С. Исследования процесса образования шаровидного графита в чугуне // Кристаллизация металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
3. Мильман Б.С., Осада Н.Г., Ильичева Л.В. Образование шаровидного графита в синтетическом вакуумированном чугуне // Литейное производство. 1968. № 6. С. 24.
4. Мильман Б.С., Осада Н.Г., Ильичева Л.В. Основные факторы образования шаровидного графита в чугуне // Основы образования литейных сплавов. М.: Наука, 1970.
5. Мильман Б.С., Ключнев Н.И., Захаров А.П. Влияние силикокальция и РЗМ на структуру чугуна // Литейное производство. 1972. № 8. С. 23.
6. Мильман Б.С., Ключнев Н.И., Попова Н.Ю. Исследование процесса обработки жидкого чугуна церием // Труды ЦНИТМАШ. М., 1964.
7. Мильман Б.С., Блошко Н.К., Горшенков А.Н. Влияние электромагнитного перемешивания расплава на форму графита в чугун // Свойства расплавленных металлов. М.: Наука, 1974.
8. Мильман Б.С., Александров Н.Н. и др. Межфазное натяжение и форма графита кристаллизующегося в жидком чугуне // Литейное производство. 1976. № 5.
9. Herfurth K. Theories aus Freiberg über die Ursachen für die verschiedenen Graphitkristallformen im Gusseisen. «Giesserei Rdsch.». 2004.51. № 3–4. S. 61–63.

Bibliography

1. Milman B.S. Formation of spherical graphite and development of high-strength cast iron technology // Foundry engineering. 1958. № 6.
2. Milman B.S. Study of the formation process of spherical graphite in cast iron // Metals solidification. M.: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1960.
3. Milman B.S., Osada N.G., Ilyicheva L.V. Formation of spherical graphite in synthetic vacuum-treated cast iron // Foundry engineering. 1968. № 6. P. 24.
4. Milman B.S., Osada N.G., Ilyicheva L.V. Main factors of spherical graphite formation in cast iron // Basics of cast alloys formation. M.: Science, 1970.
5. Milman B.S., Klochnev N.I., Zaharov A.P. Influence of silicocalcium and rare-earth metals on cast iron structure // Foundry engineering. 1972. № 8. P. 23.
6. Milman B.S., Klochnev N.I., Popova N.Yu. Study of the process of liquid cast iron treatment with cerium // Articles of TSNIITMASH. M., 1964.
7. Milman B.S., Blozhko N.K., Gorshenkov A.N. Influence of melt electromagnetic stirring on the graphite shape in cast iron. // Properties of molten metals. M.: Science, 1974.
8. Milman B.S., Alexandrov N.N. et al. Interfacial tension and the shape of graphite solidifying in liquid cast iron // Foundry engineering. 1976. № 5.
9. Herfurth K. Theories aus Freiberg über die Ursachen für die verschiedenen Graphitkristallformen im Gusseisen. «Giesserei Rdsch.». 2004.51. № 3–4. S. 61–63.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК [621.745.55:669.046.516]:669

Колокольцев В.М., Шевченко А.В.

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕМ РАФИНИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ИХ РАСПЛАВОВ*

Срок службы отливок из комплексно-легированных белых чугунов (КЛБЧ) зависит от свойств самого металла, которые во многом определяются структурой. В свою очередь, управлять литой структурой и свойствами чугунов можно путем изменения химического состава, скорости охлаждения, модифицирования, рафинирования, термовременной и термической обработки.

Эффективными методами улучшения механических и специальных свойств литейных сплавов являются рафинирование и модифицирование. Рафинирование позволяет получать сплавы надлежащего качества, что достигается снижением до минимальных пределов содержания вредных примесей и газов. Модифицирование способствует измельчению структурных составляющих. Рафинирование и модифицирование, активно воздействуя на степень чистоты сплава, размер зерна, состав и морфологию избыточных фаз, влияют на весь спектр свойств.

Примесное модифицирование потенциально является наиболее экономичным и высокоэффективным методом воздействия на формирование литой структуры отливок и придания металлу повышенных технологических и эксплуатационных свойств. Примесное модифицирование подходит для всех видов литья.

В настоящее время термовременное модифицирование КЛБЧ почти не используют ввиду его слабой изученности и недостаточной разработки. Поэтому остается не раскрытым вопрос влияния выдержки расплава при различных температурах и времени, а также влияния полученных при этом структур на свойства КЛБЧ.

С целью повышения свойств отливок из КЛБЧ изучали процессы их рафинирования и модифицирования кальций-стронциевым карбонатом (Ca,Sr)CO₃, ферробором ФБ23, силикокальцием СК-20, бор-титан-алюминистой лигатурой БФТ-1, а также термовременной обработкой.

Исследования проводили на комплексно-легированных белых чугунах – ИЧ220Х18Г4НТ, ИЧ270Х24НГБР, ИЧХ28Н2. Выплавку опытных чугунов осуществляли в индукционной тигельной печи с основной футеровкой. По окончании выплавки проводили раскисление расплава, после чего осуществлялась обработка рафинирующе-модифицирующими

материалами – (Ca,Sr)CO₃, FeB, Si-Ca, БФТ-1. Химический состав образцов определяли спектральным методом на приборе фирмы «Тайгер» в лаборатории ЗАО «Механоремонтный комплекс», ОАО «ММК».

Сравнительные испытания на износостойкость сплавов при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы проводили на лабораторной установке по методике, регламентированной ГОСТ 23.208-79. Относительную износостойкость определяли по отношению потери массы эталонного образца к потере массы исследуемого образца.

Оценку ударно-абразивной износостойкости металлов и сплавов проводили согласно ГОСТ 23.207-79 «Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание».

Твердость образцов (по Роквеллу) определяли на твердомере фирмы Ernst типа АТ130D по ГОСТ 9013-59 вдавливанием алмазного конуса, имеющего угол при вершине 120°, с нагрузкой 1457 Н.

Исследование влияния рафинирующе-модифицирующих материалов на кристаллизацию КЛБЧ проводили с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) ЛА-50 USB.

Жидкотекучесть чугунов определяли при помощи пробы со спиральным каналом по ГОСТ 16438-84. Линейную усадку определяли как разность размеров формы (модели отливки) и отливки после ее полного охлаждения.

Металлографические исследования микроструктуры сплавов проводили на оптических микроскопах при увеличении от 100 до 1000 крат. Количественный металлографический анализ проводили при помощи анализатора изображений Тiχοmet.

Микротвердость структурных составляющих измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 Н.

Исследование влияния (Ca,Sr)CO₃ на структуру и свойства проводили на чугунах ИЧХ28Н2, ИЧ270Х24НГБР, ИЧ220Х18Г4НТ. Количество добавки в опытных плавках составило 1, 3, 5, 6, 7 и 9 кг/т. Средний химический состав кальций-стронциевого карбоната следующий:

- массовая доля карбоната кальция – 90%;
- массовая доля карбоната стронция – 5%;
- остальное MgO, Al₂O₃, SiO₂, фториды натрия и калия.

Обработка чугунов карбонатом приводит к увеличению всех показателей свойств (рис. 1). Максималь-

* Работа выполнена в рамках государственного контракта № ГК-873П реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

ные показатели свойств наблюдаются при добавлении карбоната до 5 кг/т – для чугунов ИЧ220Х18Г4НТ и ИЧ270Х24НТБР, а для чугуна ИЧХ28Н2 – до 6 кг/т.

Обработка чугунов карбонатом способствует снижению загрязненности сплавов неметаллическими включениями, особенно сульфидными, уменьшению их размера, глобуляризации и переводу их в глубину зерна, а также измельчению и усреднению структуры. Полученные результаты показывают, что наибольшее влияние кальций-стронциевый карбонат оказывает на КЛБЧ аустенитного и аустенитно-ферритного классов (ИЧ220Х18Г4НТ, ИЧ270Х24НТБР) и менее значительное – мартенситно-аустенитного (ИЧХ28Н2) класса.

Исследовано влияния бора на свойства чугунов ИЧХ28Н2, ИЧ220Х18Г4НТ. В исследуемых чугунах содержание бора составляло: 0,005; 0,01; 0,02; 0,03%.

Обработка чугунов бором повышает весь комплекс свойств. Максимальные показатели свойств наблюдаются при добавлении бора для ИЧ220Х18Г4НТ – 0,02%, а для ИЧХ28Н2 – 0,01% (рис. 2). Это можно объяснить тем, что при таком количестве бора он действует как добавка, рафинирующая и модифицирующая чугун.

Бор при введении его в расплав адсорбируется на поверхности растущих кристаллитов, затрудняя их рост. Тем самым, снижая тепловыделение при кристаллизации, вызывает увеличение переохлаждения. Это способствует увеличению дисперсности структурных составляющих исследуемых сплавов.

Исследовано влияния кальция на свойства чугуна ИЧ220Х18Г4НТ. Количество СК20 определялось, исходя из остаточного содержания кальция: 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025%.

Максимальные показатели свойств наблюдаются при добавлении силикокальция в количестве 6,6 кг/т (Ки 1,85 ед., HRC 46,5 ед., Δm 0,029 г/м²ч, L 0,24%). Такое благоприятное действие основывается на его способности оказывать влияние на тип и распределение неметаллических включений, микроструктуру чугуна, а также на высоком сродстве кальция к кислороду и сере.

Остаточное содержание серы после обработки сплава силикокальцием в количестве 6,6 кг/т составило 0,01%, по сравнению с исходным 0,026%. Оксиды и сульфиды кальция имеют низкую плотность, легко всплывают и переходят в шлак. При этом происходит заметное повышение твердости и износостойкости образцов до количества добавки, соответствующей оптимальной.

Исследовано влияния лигатуры БФТ-1 на свойства чугуна

ИЧХ28Н2. Химический состав лигатуры БФТ-1, %: 43,5 Ti; 3,0 В; 20,0 Al; 13,5 Si; 1,2 С; Fe – ост.

Количество БФТ-1 в опытных плавках составило 1, 3, 5, 7 и 9 кг/т. При обработке расплавов БФТ-1 до 5 кг/т, залитых как в сырую, так и в сухую ПГФ, происходит непрерывный рост всех свойств, что соответствует остаточному содержанию бора – 0,012%, титана – 0,12%. Наилучшие результаты наблюдаются при заливке расплава в сырую ПГФ (Ки 1,88 ед., HRC 50,5 ед., Δm 0,016 г/м²ч, L 0,19%). При расходе БФТ-1 свыше 5 кг/т происходит снижение свойств. При заливке расплавов в кокиль, обработанных БФТ-1 в количестве до 7 кг/т, коэффициент износостойкости Ки, уменьшается.

С целью повышения механических свойств была проведена термическая обработка модифицированных образцов, которая заключалась в нагреве до температур аустенизации (900°С), выдержки при этой температуре в течение 1 часа и спокойном остывании на воздухе.

Термическая обработка привела к значительному повышению твердости исследуемого чугуна (с 50 до 60,5 HRC), что положительно отражается на износостойкости. Коэффициент износостойкости модифицированного чугуна, обработанного 5 кг/т БФТ-1, залитого сухую и сырую ПГФ, увеличился на 10%.

Как указывалось выше, наибольшего повышения эксплуатационной стойкости отливок можно добиться путем комплексного модифицирования расплава активными элементами, причем желательно, чтобы они имели различный механизм воздействия на расплав, т.е. были инокуляторами, ингибиторами и инверсорами.

Таким условиям удовлетворяют показавшие наи-

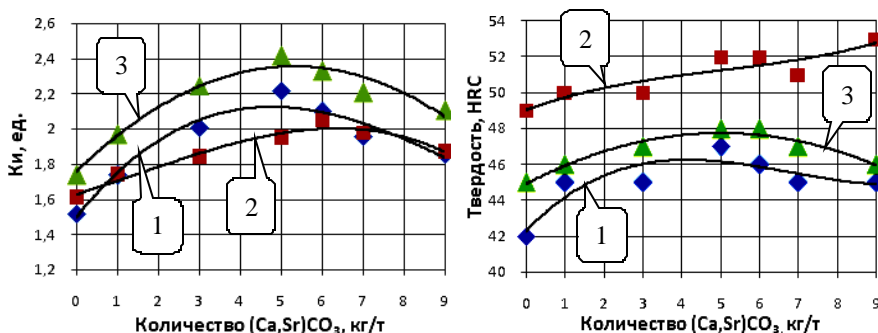


Рис. 1. Влияние (Ca,Sr)CO₃ на свойства чугунов, залитых в сырую ПГФ: 1 – ИЧ220Х18Г4НТ; 2 – ИЧХ28Н2; 3 – ИЧ270Х24НТБР

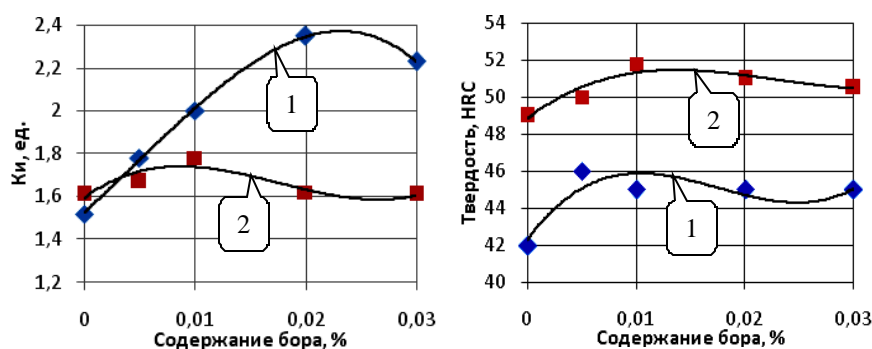


Рис. 2. Влияние бора на свойства чугунов, залитых в сырую ПГФ: 1 – ИЧ220Х18Г4НТ; 2 – ИЧХ28Н2

лучшие результаты по обработке жидких расплавов КЛБЧ лигатура БФТ-1, а также из материалов, содержащих щелочно-земельные элементы – кальций-стронциевый карбонат.

Исследование влияния комплексного модифицирования проводили на чугуне ИЧХ28Н2. Чугун выплавляли в индукционной тигельной печи с основной футеровкой. Влияние скорости охлаждения при кристаллизации на структуру и свойства чугуна изучали на образцах, залитых в сухие, сырые песчано-глинистые формы и кокиль.

Для этого был спланирован и проведен рототабельный эксперимент, где в качестве ядра плана – полный факторный эксперимент типа 2^2 , при следующем изменении факторов, кг/т: X_1 ((Ca,Sr)CO₃, 3; 5); X_2 (БФТ-1, 2; 4), а также постановка дополнительных опытов в «звездных» точках и в центре плана этого ядра.

В результате обработки рототабельного эксперимента получены адекватные математические зависимости свойств экспериментальных сплавов от количеств введенных модификаторов. В частности, для сухой ПГФ они имеют вид:

$$K_{И\text{сух}} = 1,901 + 0,065X_1 + 0,084X_2 + 0,0106X_2^2 - 0,0265X_1X_2 \text{ ед.}; \quad (1)$$

$$\Delta m_{\text{сух}} = 0,0184 + 0,01X_1 + 0,006X_2 - 0,0023 * X_1^2 \text{ г/м}^2\text{ч}; \quad (2)$$

$$L_{\text{сух}} = 0,216 + 0,008X_1 + 0,01X_2 - 0,007X_2^2 \%. \quad (3)$$

Используя полученные математические зависимости и нейросетевую программу «Модель», были определены весовые коэффициенты и ряды влияния модификаторов на свойства чугуна.

По силе влияния на износостойкость, твердость, окалиностойкость и ростоустойчивость добавки можно расположить в следующие ряды, в порядке уменьшения (табл. 1).

Наибольшее влияние на твердость, износостойкость и ростоустойчивость чугуна оказывает БФТ-1. Это можно объяснить наличием карбидов и диборидов титана в сплаве, имеющих высокие показатели микротвердости, что способствует увеличению износостойкости и твердости, а также жаропрочные свойства, способствующие стабилизации структуры, что влечет повышение ростоустойчивости.

Наибольшее влияние на окалиностойкость оказывает кальций-стронциевый карбонат, что объясняется повышением сопротивляемости окислению матрицы чугунов, благодаря высокой рафинирующей способности карбоната и, что более важно, образованию на поверхности отливок оксидной пленки хромата стронция (SrCrO₄), имеющей высокую плотность и прочное сцепление с металлической основой.

Прослеживается четкая тенденция изменения показателей свойств и некоторых характеристик микроструктуры в зависимости от скорости охлаждения.

С увеличением скорости охлаждения происходит измельчение карбидов и эвтектики. Это приводит к увеличению твердости и снижению износостойкости. Максимальной износостойкостью обладают чугуны, залитые в сухую ПГФ, где обеспечиваются оптимальные значения микротвердости основы и карбидов, их соотношение и количество. Меньшей износостойкостью обладают чугуны, залитые в кокиль, в них образуется большое количество мелких карбидов, которые не имеют прочного сцепления с основой и при изнашивании выкрашиваются, что приводит к снижению износостойкости.

Падение окалиностойкости с увеличением скорости охлаждения связано с увеличением количества эвтектики, что приводит к обеднению твердого раствора хромом. Кроме того, увеличивается межзеренная поверхность, которая обогащается легкоплавкими составляющими и более загрязнена.

Прослеживается различное влияние модификаторов при обработке расплавов в зависимости от типа литейной формы. С увеличением скорости охлаждения влияние карбоната на твердость, износостойкость и ростоустойчивость уменьшается, а лигатуры БФТ-1 увеличивается. Влияние карбоната на окалиностойкость увеличивается, а БФТ-1 уменьшается.

Используя данные ряды и сопоставляя влияние модифицирующих материалов на структурные составляющие в зависимости от скорости охлаждения, можно определять их рациональное содержание для обеспечения требуемых свойств отливок.

Проведены исследования по влиянию термовременной обработки жидкого расплава. Исследования проводили на чугуне ИЧХ28Н2. Выдержку расплава осуществляли при его перегреве над температурой ликвидус на 100, 150, 200, 250 и 350°С. Учитывая массу садки печи, продолжительность выдержки расплава при заданной температуре составила 3 мин. После расплавления чугун нагревали до заданной температуры, проводили выдержку, после чего расплав охлаждали и заливали в сухую, сырую ПГФ и кокиль.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшей абразивной и удара-абразивной износостойкостью обладает сплав, выдержанный при температуре 1420°С (рис. 3). Максимальная абразивная износостойкость получена при заливке расплава в сухую ПГФ, при этом с увеличением теплоаккумулирующей способности формы $K_{И}$ снижается. На-

Таблица 1

Влияние добавок на свойства чугунов

Свойство чугуна	Добавка		
	ПГФ сухая	ПГФ сырая	Кокиль
Износостойкость	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃
Твердость	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃
Окалиностойкость	(Ca,Sr)CO ₃ → БФТ-1	(Ca,Sr)CO ₃ → БФТ-1	(Ca,Sr)CO ₃ → БФТ-1
Ростоустойчивость	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	БФТ-1 → (Ca,Sr)CO ₃	

больший $K_{и,уд.абр}$ получен при заливке расплава в сырую ПГФ. Твердость образцов незначительно снизи-

лась. Жаростойкость также понизилась, и с повышением температуры выдержки расплава до температуры 1620°C показатели окалин-ности и ростоустойчивости образцов повышаются.

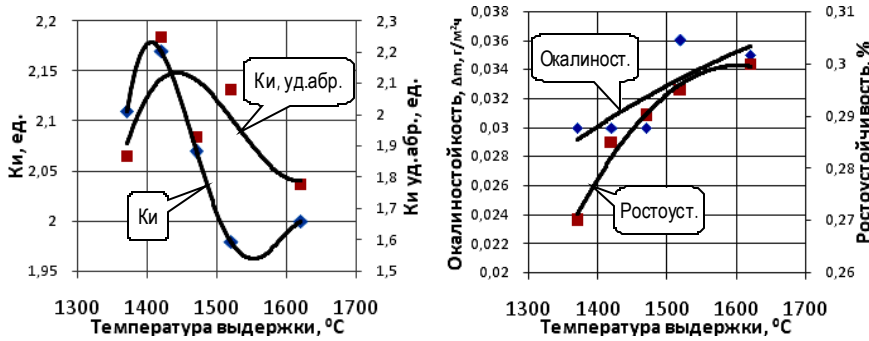


Рис. 3. Влияние ТВО на свойства чугуна ИЧХ28Н2, залитого в сухую ПГФ

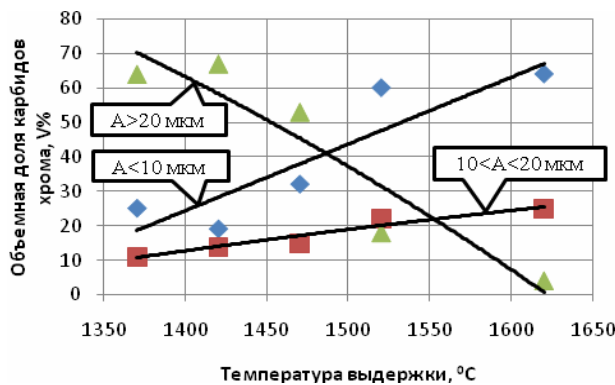


Рис. 4. Влияние ТВО на объемную долю карбидов хрома чугуна ИЧХ28Н2, залитого в сырую ПГФ

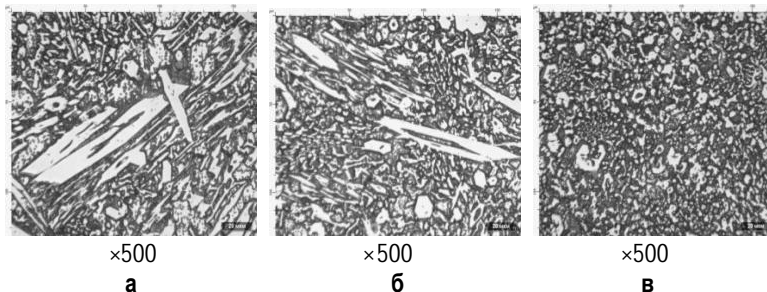


Рис. 5. Микроструктура чугуна ИЧХ28Н2 после термовременной обработки при температуре выдержки: а – 1370°C; б – 1470°C; в – 1620°C

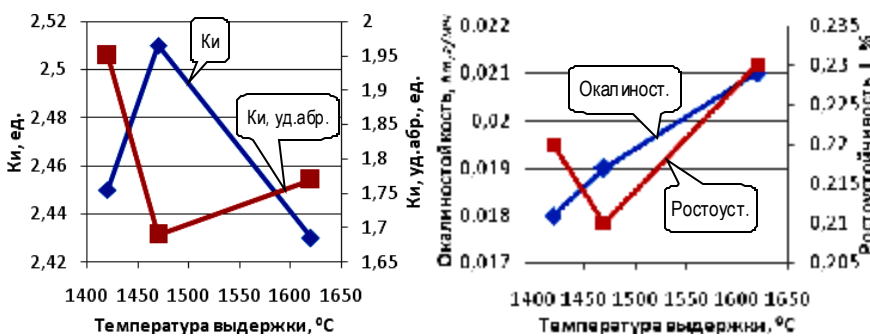


Рис. 6. Совместное влияние ТВО и $(Ca,Sr)CO_3$, БФТ-1 на свойства ИЧХ28Н2, залитого в сухую ПГФ

Количественный анализ карбидов хрома показал, что при повышении температуры выдержки для всех типов форм происходит увеличение объемной доли карбидов хрома с площадью менее 10 μm^2 и в интервале $10 < A < 20 \mu m^2$, с одновременным уменьшением доли карбидов $> 20 \mu m^2$, т.е. происходит растворение крупных карбидов и образование более мелких. На рис. 4 представлено влияние ТВО на объемную долю карбидов хрома чугуна ИЧХ28Н2 в зависимости от их средней площади, залитого в сырую ПГФ.

Установлено взаимное влияние теплоаккумулирующей способности формы и температуры выдержки на структуру и свойства чугуна. С повышением теплоаккумулирующей способности формы повышается степень влияния температуры выдержки. Так, наибольшее влияние температура выдержки оказывает на расплавы, залитые в кокиль, где происходит значительное увеличение доли карбидов площадью менее 10 μm^2 и уменьшение доли крупных карбидов площадью более 20 μm^2 .

С повышением температуры выдержки происходит изменение формы карбидов (рис. 5). Карбиды становятся более округлыми и равномерно распределены по объему. Это отражается и на микротвердости структурных составляющих.

Под влиянием ТВО происходит уменьшение микротвердости основы и эвтектики и заметное повышение микротвердости (с 1587 до 2040 HV) отдельных карбидов хрома. Такая тенденция наблюдается до температуры выдержки 1520°C. Это связано с изменением химического состава карбидов вследствие обеднения основы хромом и насыщения им карбидов. Дальнейшее повышение температуры (1620°C) приводит к росту микротвердости основы и эвтектики и снижению микротвердости карбидов хрома.

Согласно законам термодинамики получение мелкозернистой структуры и других эффектов модифицирования зависит от изменения свободной энергии ΔG . Любые воздействия на жидкий металл, вызывающие изменение его внутренней энергии, будут приводить к изменению характера кристаллизации. Поэтому является перспективным повышение свойств отливок за счет совместного воздействия на жидкий расплав белого чугуна термовременной обработки и примесного модифицирования.

На основе ранее проведенных исследований были выбраны режимы ТВО и количество рафинирующе-модифицирующих материалов $(Ca, Sr)CO_3$ и БФТ-1, указанные ниже.

После расплавления проводили нагрев расплава до нужной температуры (1420, 1470 и 1620°C) с последующей выдержкой в течение 3 мин, после чего расплав охлаждали до температуры заливки, вводили карбонат, а затем лигатуру в количествах 3 и 4 кг/т соответственно. После ввода карбоната и БФТ-1 расплав выдерживали до полного растворения добавок, а затем заливали опытные образцы. Результаты экспериментов представлены на рис. 6.

Термовременная обработка и модифицирование расплава $(Ca, Sr)CO_3$ и БФТ-1 обеспечили повышение всех показателей свойств. Наибольший показатель абразивной износостойкости соответствует температуре выдержки чугуна при 1470°C, а ударно-абразивной – при 1420°C.

Максимальная абразивная износостойкость получена при заливке расплава в сухую ПГФ, при этом с увеличением теплоаккумулирующей способности формы $K_{уд.обр}$ снижается. Наибольший $K_{уд.обр}$ получен при заливке расплава в сырую ПГФ.

Следует отметить, что показатели ударно-абразивной износостойкости снизились по сравнению с показателями, полученными при воздействии на чугун только ТВО. Твердость образцов изменилась в сторону повышения. Жаростойкость также повысилась, и наибольшим показателям окалинстойкости и ростоустойчивости образцов соответствуют температуры выдержки расплавов 1420 и 1470°C.

С повышением температуры выдержки происходит увеличение объемной доли карбидов за счет увеличения их числа. При этом размеры карбидов и расстояние между ними уменьшаются. Они более равномерно распределены по объему (рис. 7). Данные изменения отразились на микротвердости структурных составляющих. Под влиянием ТВО и модифицирования происходит повышение микротвердости эвтектики (с 550 до 650 НВ) и отдельных карбидов хрома (с 1106 до 1556 НВ) до температуры выдержки 1470°C, после чего происходит снижение.

Наибольшая микротвердость карбидов хрома получена при заливке чугуна в сухую ПГФ. С повышением теплоаккумулирующей способности формы значения микротвердости снижаются.

На основе проведенных исследований разработан наиболее рациональный режим: температура выдержки – 1470°C; время выдержки – 3 мин; количество

карбоната – 3 кг/т, лигатуры БФТ-1 – 4 кг/т.

Проведенные ранее исследования показали, что при вводе в жидкий расплав активных элементов происходит изменение параметров кристаллизации, что, несомненно, отразится на литейных свойствах.

С этой целью были изучены литейные свойства чугуна ИЧХ28Н2 после его модифицирования разработанным комплексом $((Ca, Sr)CO_3, БФТ-1)$ и ТВО. Для этого измеряли линейную и литейную усадку, трещиностойчивость и жидкотекучесть чугунов до и после применения разработанной технологии модифицирования, с оптимальным режимом ТВО и количествами карбоната и БФТ-1.

Кинетика свободной линейной усадки чугуна до и после модифицирования расплава $(Ca, Sr)CO_3$ и БФТ-1 совместно с ТВО представлена на рис. 8, затрудненной линейной усадки – на рис. 9.

Оценивая влияние разработанной технологии модифицирования на кинетику процессов свободной и затрудненной усадок, можно отметить, что происходит замедление этих процессов и, как следствие, снижение усадки. Наиболее ярко выраженное влияние модифицирование оказывает на кинетику процесса затрудненной усадки, особенно в начальный момент затвердевания отливки. Следствием этого замедления является снижение нарастания напряжений, что положительно влияет на трещиностойчивость.

Модифицирование расплава $(Ca, Sr)CO_3, БФТ-1$ и ТВО также оказывает влияние и на другое важное ли-

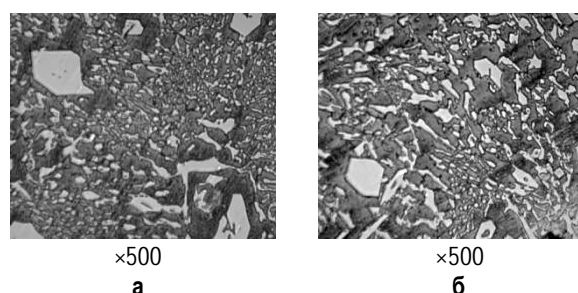


Рис. 7. Микроструктура чугуна ИЧХ28Н2 после совместного воздействия ТВО (температура выдержки: а – $T=1420^\circ C$; б – $T=1470^\circ C$) и модифицирования разработанным комплексом (сырая ПГФ)

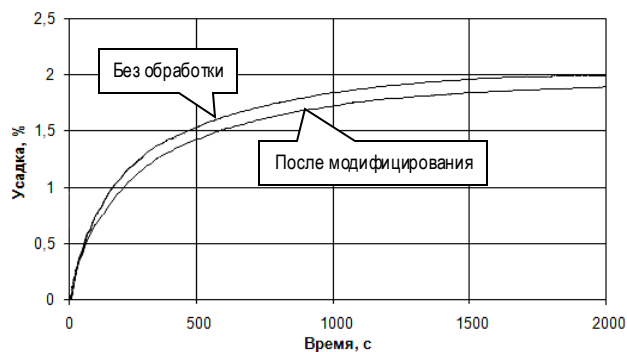


Рис. 8. Влияние разработанной технологии модифицирования на кинетику процесса свободной усадки чугуна ИЧХ28Н2

тейное свойство – жидкотекучесть. На рис. 10 показана жидкотекучесть чугуна ИЧХ28Н2 до и после обработки его расплава ТВО и рафинирующе-модифицирующими материалами при температуре заливки 1370°С.

Применение разработанного метода обработки расплава чугуна оказывает положительное влияние на жидкотекучесть. Уменьшение поверхностного натяжения, вязкости металла и уменьшение величины кристаллов, связанное с модифицирующим действием добавок и ТВО расплава, приводит к изменению закономерности кристаллизации при движении в полости канала. Сочетание такого фактора с рафинирующим действием карбоната обеспечило прирост жидкотекучести.

Для изучения влияния рафинирующе-модифицирующих материалов, а также разработанной технологии модифицирования на весь комплекс литейных свойств исследуемых чугунов применяли комплексную технологическую пробу Нехендзи-Купцова, данные по исследованиям на которой представлены в табл. 2.

При обработке чугунов данными рафинирующе-модифицирующими материалами и ТВО приводит к повышению трещиностойчивости.

Проведенные исследования показали, что для всех исследуемых чугунов, влияние карбоната на усадку, жидкотекучесть и трещинопоражаемость более значительно, чем силикокальция, бора и БФТ-1, что объясняется высокой рафинирующей способностью карбоната. Однако совместное влияние ТВО, (CaSr)CO₃ и БФТ-1 на исследуемые литейные свойства показывает наилучшие результаты. Следует отметить, что после обработки чугунов бором и лигатурой БФТ-1 происходит снижение жидкотекучести, что связано с увеличением переохлаждения расплава при кристаллизации, а также наличием в БФТ-1 диборидов и образующихся нитридов и карбидов титана, имеющих угловатую форму, что влечет повышение вязкости расплава.

Обобщение полученных результатов исследований позволило сделать следующие выводы:

1. Зависимость жароизносостойкости чугунов от количества вводимых кальций-стронциевого карбоната, силикокальция, бора и лигатуры БФТ-1 носит ярко выраженный экстремальный характер с максимумом при строго определенном количестве вводимой добавки. Количество вводимого карбоната, при котором жароизносостойкость чугунов максимальна: для ИЧ220Х18Г4НТ и ИЧ270Х24НТБР составляет 5 кг/т, для ИЧХ28Н2 – 6 кг/т. Количество вводимого бора для ИЧ220Х18Г4НТ – 0,02%, для ИЧХ28Н2 – 0,01%. Максимальные показатели свойств чугуна ИЧ220Х18Г4НТ при добавлении силикокальция СК20 соответствуют количеству добавки 6,6 кг/т. Количество БФТ-1, при котором свойства ИЧХ28Н2 наибольшие, составляет 5 кг/т.

2. Обработка расплава чугуна ИЧХ28Н2 одновременно (Ca,Sr)CO₃ и БФТ-1 в количествах 3 и 4 кг/т соответственно привела к существенному улучшению жаростойкости и износостойкости, чем при раздельном их использовании.

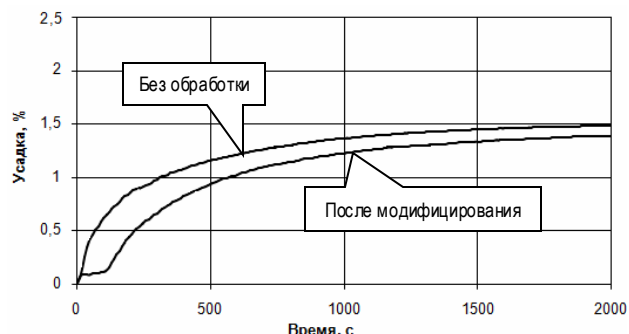


Рис. 9. Влияние разработанной технологии модифицирования на кинетику процесса затрудненной усадки чугуна ИЧХ28Н2

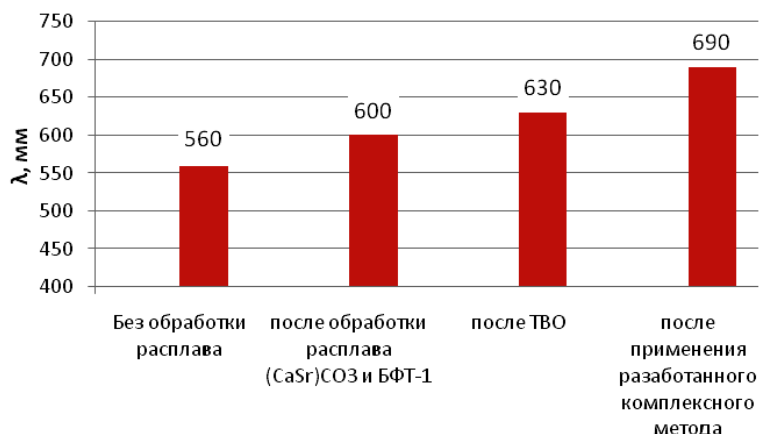


Рис. 10. Жидкотекучесть чугуна ИЧХ28Н2 после различных видов обработки его расплава

Таблица 2

Литейные свойства чугунов

Сплав	Литейные свойства						
	Усадка ε, %	Жидкотекучесть l, мм	Трещинопоражаемость, мм				
			Δl _{1mp}	Δl _{2mp}	Δl _{3mp}	Δl _{4mp}	ΣΔl _{mp}
ИЧХ28Н2	1,7	325	–	1,6	–	–	1,6
с карбонатом	1,52	340	–	0,9	–	–	0,9
с БФТ-1	1,6	305	–	1,2	–	–	1,2
ИЧХ28Н2 после применения разработанного метода	1,5	360	–	0,7	–	–	0,7
ИЧ220Х18Г4НТ	2,1	220	–	1,55	–	–	1,55
с карбонатом	1,86	235	–	0,85	–	–	0,85
с бором	1,91	210	–	1,2	–	–	1,2
с силикокальцием	1,87	220	–	0,9	–	–	0,9
ИЧ270Х24НТБР	1,8	155	–	1,7	–	–	1,7
с карбонатом	1,66	166	–	0,85	–	–	0,85
с силикокальцием	1,69	162	–	0,9	–	–	0,9

3. Получены математические зависимости взаимосвязей количеств модификаторов ((Ca,Sr)CO₃, БФТ-1), механических и специальных свойств чугуна ИЧХ28Н2, залитого в сырую, сухую песчано-глинистые формы и кокиль. На их основе определены весовые коэффициенты влияния данных модификаторов на свойства исследуемого чугуна.

Наибольшее влияние на твердость, износостойкость и ростоустойчивость сплавов оказывает БФТ-1, а на окалиностойкость – кальций-стронциевый карбонат. При этом установлено различное влияние этих материалов на свойства в зависимости от скорости охлаждения. С увеличением скорости охлаждения влияние карбоната на твердость, износостойкость и ростоустойчивость уменьшается, а лигатуры БФТ-1 увеличивается. Влияние карбоната на окалиностойкость увеличивается, БФТ-1 уменьшается.

4. Термомеханическая обработка способствует измельчению карбидов, что приводит к повышению абразивной и ударно-абразивной износостойкости чугунов при незначительном понижении жаростойкости. Одновременному повышению всех специальных свойств ТВО не способствует. Наибольшей абразивной и ударно-абразивной износостойкостью обладает сплав, выдержанный при температуре 1420°С в течение 3 мин.

Установлено взаимное влияние теплоаккумулирующей способности формы и температуры выдержки на структуру и свойства чугуна. С повышением теплоаккумулирующей способности формы повышается степень влияния температуры выдержки. Так, наибольшее влияние температура выдержки оказывает на расплавы, залитые в кокиль, где происходит значительное увеличение доли карбидов площадью менее 10 мкм² и уменьшение доли крупных карбидов площадью более 20 мкм².

5. Совместное влияние ТВО и (Ca,Sr)CO₃ с БФТ-1 на расплав ИЧХ28Н2 обеспечило повышение всех показателей свойств. Наибольший показатель абразивной износостойкости соответствует температуре выдержки чугуна при 1470°С, а ударно-абразивной – при температуре 1420°С. Причем показатели ударно-абразивной износостойкости снизились по сравнению с показателями, полученными при воздействии на чугун только ТВО. Жаростойкость также повысилась, и наибольшим показателям окалиностойкости и ростоустойчивости образцов соответствуют температуры

выдержки расплава 1420–1470°С.

6. Одним из важнейших факторов, определяющих сопротивление данных чугунов изнашиванию, является их структурное состояние, которое зависит от взаимного расположения, количественного соотношения и характера связи отдельных составляющих структуры. Что, в свою очередь, зависит от вида модификатора, его количества и скорости охлаждения сплава (типа формы).

Была установлена тенденция изменения твердости, износостойкости и характеристик микроструктуры в зависимости от скорости охлаждения. Таким образом, выбирая тип литейной формы, можно регулировать структуру и свойства КЛБЧ. Это позволяет получать отливки с требуемыми свойствами, учитывая специфику и условия их эксплуатации, что является важным моментом для практики.

7. Применение ТВО и разработанного комплекса ((Ca,Sr)CO₃ и БФТ-1) как отдельно, так и совместно улучшает комплекс литейных свойств чугуна ИЧХ28Н2: увеличивает жидкотекучесть, снижает линейную (свободную и затрудненную) усадку и замедляет интенсивность развития усадки в начальный момент; повышает трещиностойкость чугуна: что делает этот сплав более технологичным для получения сложных фасонных отливок.

Список литературы

1. Воронков Б.В., Колокольцев В.М., Петрученко Е.М. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны: монография / под ред. проф. В.М. Колокольцева. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
2. Брялин М.Ф., Колокольцев В.М., Гольцов А.С. Повышение эксплуатационных свойств отливок из жароизносостойких хромо-марганцевых чугунов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4(20). С. 22–25.

Bibliography

1. Voronkov B.V., Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.M. Complex-doped white wear resistant cast-irons: a monograph / under the editorship of Professor V.M. Kolokoltsev. Chelyabinsk: Printing salon «Publishing house REKPOL», 2005. 178 p.
2. Kolokoltsev V. M., Brijalin M. F., Goltsov A.S. increase of operational properties castings from жароизносостойких хромо-марганцевых чугунов // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2007. № 4(20).

УДК 621.744.3:539.4:001.891

Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ

Одним из путей повышения экономической эффективности работы литейного предприятия является снижение себестоимости изделия за счет уменьшения брака. При этом следует отметить, что зачастую весовая доля отбраковки отливок ведется ввиду образования ужимин, горячих и холодных трещин, в процессе за-

твердевания и охлаждения изделия, поэтому моделирование процесса трещинообразования в динамике формообразования отливки является актуальной задачей.

Расчет напряженного состояния литой детали не возможен без изучения условий ее формирования тепловых, структурных преобразований, а также деформа-

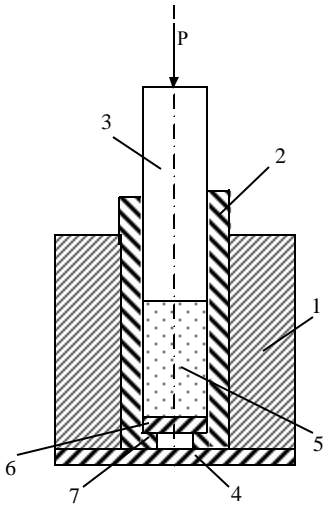


Рис. 1. Установка для определения податливости формовочной смеси:

- 1 – корпус; 2 – обойма; 3 – шток
- 4 – опора; 5 – образец;
- 6 – шайба; 7 – ограничитель

ционной способности формы в различных температурных условиях. В данной работе рассматривается влияние на податливость сырой песчано-глинистой формы начальной влажности, процентного содержания связующего, усилия нагружения, температуры смеси. Исследование проводили на установке, принцип которой аналогичен устройствам, описанным в работах [1, 2], где смесь сжималась в обойме пуансоном диаметром, меньшим диаметром обоймы. При этом изучался процесс внедрения пуансона в формовочную смесь, что и определяло характер проводимых испытаний.

Для наибольшего совпадения с реальным процессом пуансон нагревался, моделируя тепловое воздействие стенки отливки. В отличие от вышеуказанных источников, расширение базы данных по податливости формовочной смеси в данной работе осуществлялось при центральном сжатии материала, имеющего постоянные физико-механические свойства (начальная влажность, компонентный состав, температура смеси). Осевую деформацию образца обеспечивали применением установки, внутренний диаметр обоймы которой совпадает с внутренним диаметром пуансона (рис. 1). Данная конструкция является частным случаем устройства, применяемого в работах [1, 2]. Конструктивно используемое устройство представляет собой стальную обойму 2 с сваренным ограничителем 7 и исключаяющей просыпание формовочной смеси шайбой 6, установленное на опоре 4, штоком 3 уплотняется образец 5 заданного компонентного состава. Для обеспечения устойчивости обоймы в сборе устанавливается в корпус 1. Нагружение осуществлялось штоком 3 на испытательной машине УММ-5.

При помощи данного устройства был проведен полный факторный эксперимент по изучению деформационной способности смеси. Варьирование факторов осуществлялось в следующих пределах: связующее 0, 5, 10% (бентонитовые и каолиновые глины);

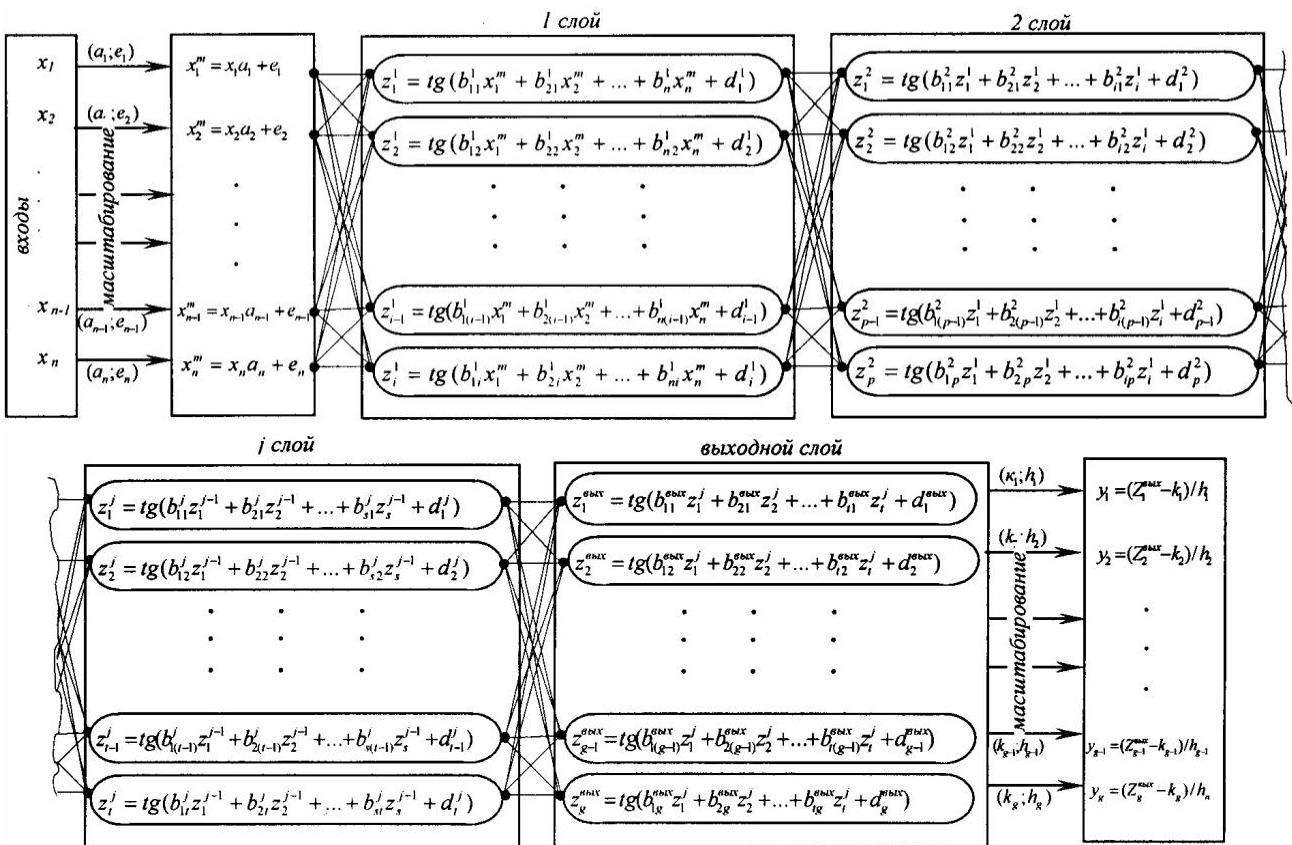


Рис. 2. Структура нейросети:

- x_n, x_n^m – входной и масштабированный параметры соответственно; Z_i^j – i -й нейрон j -го слоя, $i = 0, 1, 2, \dots, j = 0, 1, 2, \dots$;
- a_n, e_n – коэффициенты масштабирования, $n = 0, 1, 2, \dots$; b_{ki}^j – связь (синапс) между i -м нейроном j -го слоя и k -м входом, $k = 0, 1, 2, \dots$;
- d_i^j – опорный коэффициент i -го нейрона j -го слоя; y_b – выходной параметр

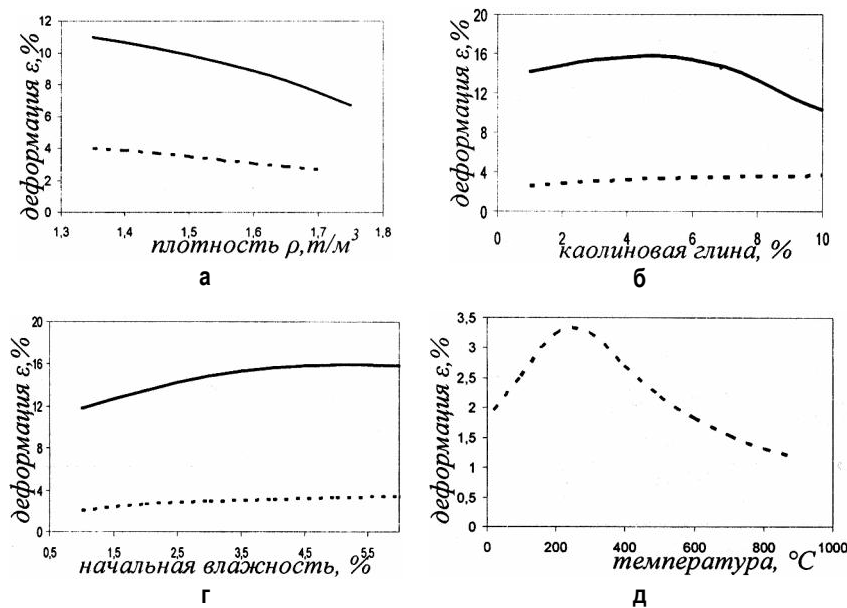


Рис. 3. Расчетные данные влияния на уплотнение формочной смеси: а – плотности; б – содержания каолиновой глины; в – содержания бентонитовой глины; г – начальной влажности; — сырая смесь; - - - - - сухая смесь

влажность смеси 0, 2, 6, 10%, используемый наполнитель – кварцевый песок марки 1К202 ГОСТ 2138-91. Образцы вышеописанных компонентных составов сушили при температуре 150°С, охладились и повторно нагревались до температуры 20, 300, 600, 900°С. В ходе эксперимента испытуемый элемент в сухом и сыром состоянии подвергался статическому нагружению 0–1 кН/см². Усилие нагружения и деформация образца фиксировались на разработанном лабораторном стенде [3]. Полученные в ходе эксперимента абсолютные значения деформации пересчитывались в относительные единицы по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100\%,$$

где Δl – абсолютное изменение размера образца; l – первоначальный размер.

Полученная база данных была использована для построения нейросетевых моделей, структура которых представлена на рис. 2.

Относительное отклонение экспериментальных и тестовых значений составило $\varepsilon = 11,3\%$ для сырой смеси и $\varepsilon = 10,9\%$ для сухой смеси. Корреляционное отношение экспериментальных и тестовых (расчетных) значений было $\eta^{сыр} = 0,96$, $\eta^{сух} = 0,98$, что говорит о высокой сходимости опытных и спрогнозированных данных. Полученные результаты расчета отображены графически на рис. 3.

При построении зависимостей рассматривалось влияние на деформационную способность одного фактора. Остальные факторы принимались константой при среднем значении содержания. Как видно из представленных зависимостей, деформационная способность сухой смеси много ниже сырой, что подтверждается источниками [4, 5], следовательно, рост сухого слоя формы оказывает исключительное влияние на напряженное состояние отливки в процессе ее охлаждения.

В связи с этим весьма интересно нахождение экстремальных минимальных значений деформационной

способности сухой ПГС в координатах «влажность – связующее». Данные экспериментальные значения были получены с помощью разработанного нейросетевого математического аппарата и графически отображены на рис. 4. На графике в точках даны экстремальные значения деформации при нагружении 0,5 МПа.

Следует отметить, что расчет напряженного состояния литой детали в динамике является достаточно сложной задачей ввиду существенного изменения механических свойств формы при нарастании сухого слоя смеси [6], движения зоны конденсации, теплового воздействия отливки.

Применение существующих дискретных методов расчета позволяет с достаточной точностью находить возникающие в процессе кристаллизации и охлаждения отливки напряжения, однако для их успешного применения необходима возможность моделирования изменения граничных условий расчета. Полученные модели направлены на решение данной задачи при моделировании процесса в условиях, соответствующих экспериментальным.

В результате проведенной работы расширена база данных по деформационной способности сырой и сухой

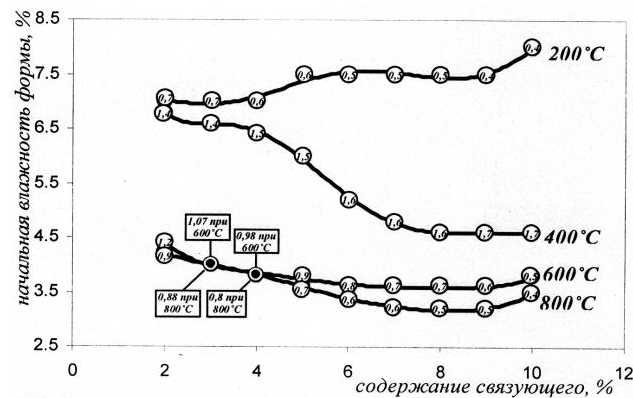


Рис. 4. Экстремальные значения деформации сухой ПГС при различных температурах

песчано-глинистых смесей. Получены модели, применение которых обеспечивает прогнозирование граничных условий формирования напряженного состояния литой детали в широком интервале варьирования влияющих факторов: содержание связующего, физико-механических свойств формы, усилии нагружения.

Список литературы

1. Баладин Г.Ю., Степанов Ю.А. О силовом взаимодействии заг вердевающей отливки и формы // Литейное производство. 1962. С. 37–40.
2. Аксенов П.Н., Трухов А.П., Лесной В.Н. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливостъ // Литейное производство. 1970. № 3. С. 20–22.
3. Информационно-измерительный комплекс для определения параметров процессов при изготовлении литой детали / А.С. Савинов, С.М. Андреев, А.С. Тубольцева // Современные технологии в машиностроении: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конференции. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2009. С. 39–41.
4. Жуковский С.С. Прочность литой формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
5. Илларионов И.Е., Васин Ю.П. Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1995. 288 с.

6. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет движения фронта влажности в сырой песчано-глинистой форме // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. 2010. № 2. С. 30–33.

Bibliography

1. Balandin G.Ju., Stepanov J.A. Some aspects of the force interaction between the solidifying casting and the mold // Foundry engineering. 1962. P. 37–40.
2. Aksenov P.N., Truhov A.P., Lesnoy V.N. Testing instrument for hot pliability of greensand forming mixtures // Foundry engineering. 1970. № 3. P. 20–22.
3. An information-measuring complex for definition of process parameters during cast detail manufacture / A.S. Savinov, S.M. Andreev, A.S. Tuboltseva // Modern technologies in mechanical engineering: Articles of the XII International theoretical and practical conference. Penza: Privolzhsy Dom Znaniy, 2009. P. 39–41.
4. Zhukovsky S.S. Durability of a casting mold. M.: Mechanical engineering, 1989. 288 p.
5. Illarionov I.E., Vasin Ju.P. Forming materials and mixtures. Cheboksary: Publishing house Chuvash university, 1995. 288 p.
6. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Calculation of movement of the front of humidity in wet sandy-argillaceous mold // Vestnik of MSTU named after G.I.Nosov. 2010. № 2. P. 30–33.

УДК 621.746.5.047

Казakov А.С., Столяров А.М.

НАСТРОЙКА МОДЕЛИ РАСЧЕТА РЕЖИМА ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Инженерные расчеты режима вторичного охлаждения слябовой непрерывнолитой заготовки на машинах, оборудованных поддерживающими роликами с наружным охлаждением, производятся на модели, разработанной в среде электронных таблиц «Excel» с использованием методики [1]. В расчетах для МНЛЗ, на которых применяются ролики с внутренним охлаждением водой, необходимо учитывать дополнительные потери тепла непрерывнолитой заготовкой, величина которых была оценена в работе [2]. Поэтому базовая методика расчета была усовершенствована введением дополнительной расходной статьи потерь тепла с водой, циркулирующей внутри роликов. Кроме того, в формулу для расчета потерь тепла излучением был введен коэффициент, учитывающий условия каждой зоны охлаждения МНЛЗ для передачи тепла данным способом. Значения этого коэффициента, а также степени черноты поверхности заготовки, коэффициента конвективной теплоотдачи с поверхности заготовки, охлаждающего эффекта воды могут отличаться в разных зонах охлаждения машины. Информация о возможных значениях рассматриваемых параметров, как правило, черпается из литературных источников. Однако при этом часто не удается учесть конструктивные особенности МНЛЗ, для которой производится расчет режима вторичного охлаждения, и условия, при которых осуществляется процесс разлива стали разных марок. Поэтому необходима настройка разработанной модели расчета режима вторичного охлаждения непрерывнолитой заготовки с учетом кон-

кретных условий разлива стали на данной МНЛЗ.

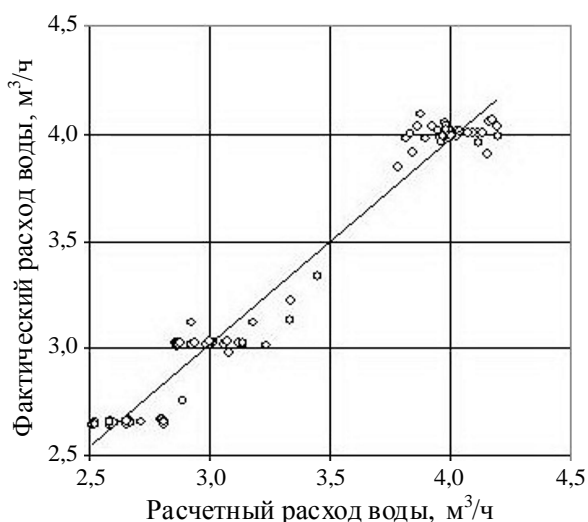
Настройка модели произведена для разлива трубной стали марки 17Г1С-У на начальном участке зоны вторичного охлаждения криволинейной машины с вертикальным участком с получением непрерывнолитой заготовки сечением 250×1730 мм. Начальный участок состоит из четырех роликовых секций, объединенных в три зоны охлаждения: вторую, третью и четвертую с протяженностью соответственно 760, 1560 и 1794 мм. Выбор этого участка обусловлен тем, что только на нем имеется информация о параметрах внутреннего охлаждения роликов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. При настройке модели используются опытные данные, полученные при разливе металла 99 плавков: по 33 плавки с каждой из трех скоростей вытягивания заготовки из кристаллизатора – 0,6; 0,7 и 0,8 м/мин.

На начальном этапе настройки модели в электронных таблицах «Excel» производится расчет расходов воды во второй, третьей и четвертой зонах охлаждения для каждой из 99 проконтролированных плавков. При этом температура поверхности сляба по оси широкой грани определяется в точках, соответствующих серединам второй, третьей и четвертой зон охлаждения и находящимся на расстоянии 0,675, 1,835 и 3,512 м от нижнего среза кристаллизатора.

На следующем этапе настройки модели осуществляется подбор значений корректируемых параметров для каждой из трех рассматриваемых зон охлаждения таким образом, чтобы добиться минимального расхо-

дения величин расчетных расходов воды от их фактических значений на опытных плавках. Для этого используется сервисная функция «Поиск решения» в электронных таблицах «Excel». В целевую ячейку электронных таблиц заносится сумма квадратов отклонений всех 297 расчетных значений расходов воды от их опытных значений. При настройке модели производится изменение содержимого 12 ячеек, в которых находятся значения четырех параметров: коэффициента, учитывающего условия каждой зоны для передачи тепла излучением; степени черноты поверхности заготовки; коэффициента конвективной теплоотдачи с поверхности заготовки; охлаждающего эффекта воды для каждой из трех зон охлаждения: второй, третьей и четвертой. В результате осуществления процедуры сервисной функции «Поиск решения» были получены следующие значения настроенных параметров (табл. 1).

Величина коэффициента, учитывающего условия для передачи тепла излучением, во второй зоне охлаждения оказалась примерно в 2,2 раза ниже, чем в двух других последующих зонах – третьей и четвертой. Это может объясняться использованием во второй зоне охлаждения защитных экранов. Степень черноты поверхности заготовки изменялась в интервале от 0,7 до 0,62. Со снижением скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора и с увеличением расстояния от начала зоны вторичного охлаждения МНЛЗ степень черноты поверхности заготовки уменьшается вследствие падения температуры поверхности слэба. Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности заготовки имел одинаковые значения во всех зонах. Во второй зоне охлаждения наблюдалось снижение охлаждающего эффекта воды по сравнению с двумя последующими зонами, что, очевидно, объясняется влиянием на условия охлаждения поверхности слэба водовоздушной смесью сильного парового отсоса в этой зоне.



Сравнение расчетных и фактических значений расхода воды во второй, третьей и четвертой зонах охлаждения МНЛЗ при вытягивании слэбов шириной 1730 мм стали марки 17Г1С-У со скоростью 0,6 м/мин

Для оценки качества проведенной настройки модели расчета режима вторичного охлаждения проведено сравнение расчетных и опытных значений расходов воды, используемых при вытягивании слэба из кристаллизатора с различной скоростью. На рисунке представлен характерный результат проведенного сравнения для одной из скоростей вытягивания заготовки.

Уравнения зависимости фактического расхода воды ($G_{в\ факт}$, м³/ч) на вторичное охлаждение заготовки во второй, третьей и четвертой зонах от их рассчитанных по модели значений ($G_{в\ расч}$, м³/ч) имеют следующий вид:

Скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин

$$0,6 G_{в\ факт} = 0,947 G_{в\ расч} + 0,174, r = 0,983; \quad (1)$$

$$0,7 G_{в\ факт} = 0,959 G_{в\ расч} + 0,125, r = 0,987; \quad (2)$$

$$0,8 G_{в\ факт} = 0,997 G_{в\ расч} - 0,009, r = 0,972. \quad (3)$$

Таблица 1

Значения настроенных параметров

Параметр	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Зона охлаждения МНЛЗ		
		вторая	третья	четвертая
Коэффициент, учитывающий условия зоны для передачи тепла излучением	0,6			
	0,7	0,46	1,0	1,0
	0,8			
Степень черноты поверхности заготовки	0,6	0,68	0,64	0,62
	0,7	0,69	0,65	0,63
	0,8	0,70	0,66	0,64
Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности заготовки, Вт/(м²·град)	0,6	26	26	26
	0,7	26	26	26
	0,8	26	26	26
Охлаждающий эффект воды, Вт·ч/м³	0,6	44300	56300	56300
	0,7	44300	56300	56300
	0,8	44300	56300	56300

Таблица 2

Результаты сравнения двух выборок значений фактического (числитель) и расчетного (знаменатель) расходов воды на вторичное охлаждение непрерывнолитой заготовки

Наименование параметра	Скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин		
	0,6	0,7	0,8
Среднее значение, м³/ч	3,23 / 3,22	3,31 / 3,29	3,37 / 3,39
Дисперсия, (м³/ч)²	0,344/0,328	0,454/0,422	0,527/0,501
Критерий F	1,050	1,077	1,054
Критическое значение критерия $F_{0,05}$	1,396		
Критерий t	0,008	0,190	0,254
Критическое значение критерия $t_{0,05}$	1,972		

Критическое значение коэффициента парной корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,001$ и количестве опытов, равном 99, составляет 0,336. Существенное превышение каждого из трех значений коэффициента парной корреляции его критической величины свидетельствует о наличии тесной связи между фактическими и расчетными расходами воды с вероятностью 99,9%. Это подтверждается данными сравнения двух выборок значений фактического и расчетного расходов воды с использованием критериев F и t (табл. 2).

Расчетные значения критерия t значительно ниже его критического уровня. Это означает, что обе выборки, состоящие из фактических и расчетных значений расходов воды, принадлежат к одной генеральной совокупности. Следовательно, настройка модели расчета режима вторичного охлаждения произведена с приемлемой точностью.

УДК 621.771:621.777

Загиров Н.Н., Аникина В.И., Усынина Г.П., Юриков А.С., Иванов Е.В.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ЛИГАТУРНОГО ПРУТКА ИЗ СТРУЖКИ СИЛУМИНА, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ЕЕ ПЕРЕПЛАВ

Одной из задач, стоящих перед производственными предприятиями, занятыми в сфере изготовления различного рода металлопродукции, является рациональное использование образующихся при механической обработке отходов в виде стружки и опилок. Чем мельче стружка, тем технически сложнее и экономически затратнее перерабатывать ее через плавильный передел. Это связано с тем, что при загрузке мелкой стружки в плавильную ванну в свободнотасыпанном виде часть ее просто сгорает, часть переходит в шлак, в результате чего выход годного будет относительно невысоким. Принципиально не решает проблемы и предварительное брикетирование стружки. Объемы образующейся стружки каждый год остаются на стабильно высоком уровне, поэтому поиск и реализация альтернативных вариантов вовлечения ее в производственный оборот являются по-прежнему актуальной задачей.



Рис. 1. Общий вид исходной стружки

Список литературы

1. Селиванов В.Н., Столяров А.М. Определение технологических параметров разлива стали на слябовой МНЛЗ. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 22 с.
2. Казakov А.С., Столяров А.М. Влияние внутреннего охлаждения роликов ЗВО МНЛЗ на теплоотвод от слябовой непрерывнолитой заготовки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 3. С. 18–21.

Bibliography

1. Selivanov V.N., Stolyarov A.M. Calculation of process parameters of steel casting at slab CCM. Magnitogorsk: SEI of HPE "MSTU", 2010. 22 p.
2. Kazakov A.S., Stolyarov A.M. Influence of internal cooling of rollers CCM on the heat removal of continuous cast slabs. // Vestnik of MSTU named after G.I.Nosov. 2010. № 3. P. 18–21.

Рациональнее всего перерабатывать стружку, во-первых, в местах ее образования, а во-вторых, с изготовлением продукции, которая в дальнейшем использовалась бы на том же самом предприятии, где она и была получена.

В данной работе объектом внимания была выбрана стружка силумина АК12, образующаяся на одном из переделов при производстве литых дисков колес. Исходный вид используемой стружки представлен на рис. 1.

Известно [1], что перед разливкой сплав АК12 подвергают модифицированию. Тем самым обеспечивается получение тонкодифференцированной алюминиево-кремниевой эвтектики, которая предопределяет высокий уровень прочностных и пластических характеристик силуминов [2].

Руководствуясь представлением о кластерном строении жидкого кристаллизующегося металла, было высказано предположение, что измельчения α -твердого раствора можно добиться за счет введения в расплав прутков-модификаторов из того же сплава, что и модифицируемый материал [3]. В этой связи переработка стружки в прутки, которые можно будет использовать в дальнейшем как модифицирующий материал, являлась логическим воплощением выдвинутой гипотезы.

Для ее проверки на первом этапе необходимо было оценить принципиальную возможность получения прутков из стружки литейного сплава АК12, минуя ее передел, а также практически опробовать технологическую схему реализации такого рода подхода, основанную на использовании некоторых приемов, характерных для процессов порошковой металлургии [4]. В общем виде эта схема приведена на рис. 2, где

указаны также и основные параметры осуществления той или иной операции.

Основной в формировании необходимых структуры и свойств получаемых по предлагаемой схеме изделий является операция «экструзия». Температурно-скоростной режим осуществления данной операции соответствовал параметрам, рекомендуемым для прессования прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов, т.е. когда температура нагрева заготовки $\Theta = 450\text{--}480^\circ\text{C}$, скорость прессования $v_{\text{пр}} = 50\text{--}100\text{ мм/с}$ [5]. Для обеспечения изотермических условий деформирования в экспериментах брикеты с нанесенной на все контактные поверхности смазкой нагревали вместе с инструментальной оснасткой.

После экструзии у полученных прутков отделяли передний слабodeформированный конец длиной порядка 100 мм. Оставшуюся часть прутка, после отбора проб для изучения микроструктуры в продольном и поперечном сечениях, делили на несколько фрагментов, один из которых шел на изготовление образцов для проведения механических испытаний на растяжение, а другие использовались для последующей холодной обработки волочением.

На рис. 3 и 4 приведены характерные структуры полученных с разными значениями коэффициента вытяжки прутков диаметрами 6 и 8 мм соответственно.

Структура прутков в продольном сечении строчечная, т.е. светлые, вытянутые в направлении истечения из матрицы, участки алюминиевой фазы перемежаются с более темными областями, насыщенными кремнием. При этом концентрация, размер частиц кремния и порядок их распределения на фоне алюминиевой фазы носят несколько неоднородный характер. В прутке диаметром 6 мм строчечность проявляется чуть резче, чем в прутке диаметром 8 мм, что можно объяснить большей степенью деформации при получении прутка диаметром 6 мм.

Чтобы оценить, какое влияние на структуру и свойства пресс-изделий после горячей экструзии оказывает термообработка, часть образцов отобранных от полученных экструзией прутков отжигали при $\Theta = 400^\circ\text{C}$ в течение 1 ч. После этого проводили сопоставление структур до и после проведения отжига, сравнивая соответствующие данные металлографических исследований, которые также представлены на рис. 3 и 4.

Анализ показывает, что особых изменений в структуре после отжига не наблюдается. Проведение отжига только в некоторой степени уменьшает строчечность структуры и способствует тому, что кремний распределяется более равномерно в прутках диаметром 6 мм. Размер частиц кремния в α -твердом растворе алюминия в отожженных и неотожженных прутках практически не отличается, за исключением отдельных участков, где имеет место некоторая коагуляция частиц кремния (рис. 4, а). Исходя из всего вышеизложен-

ного, можно сделать вывод, что проводить отжиг после горячей экструзии в нашем случае не имеет смысла, так как к принципиальным изменениям в структуре он не приводит.

Другую часть полученных горячей экструзией прутков подвергали холодной обработке волочением с единичным обжатием 15–20% до того момента, пока не наступала повышенная обрывность проволоки в ходе волочения. При составлении маршрута волочения учитывалось, что кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия в элементарном виде. Имея переменную растворимость, кремний в то же время не влияет

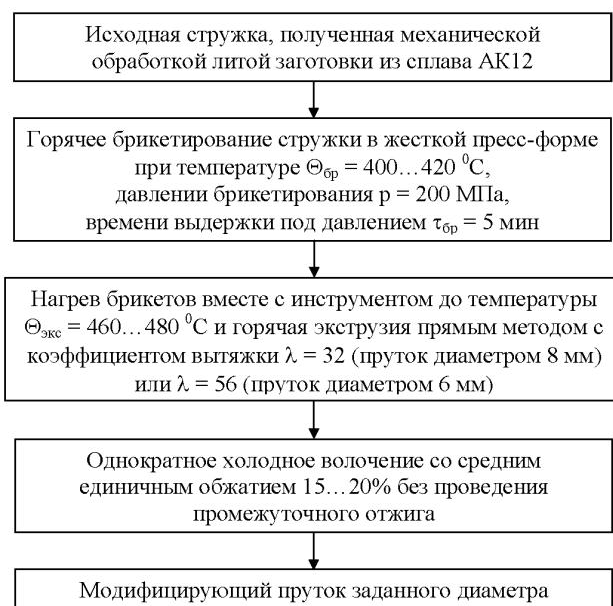


Рис. 2. Общая технологическая схема получения модифицирующего прутка из стружки сплава АК12

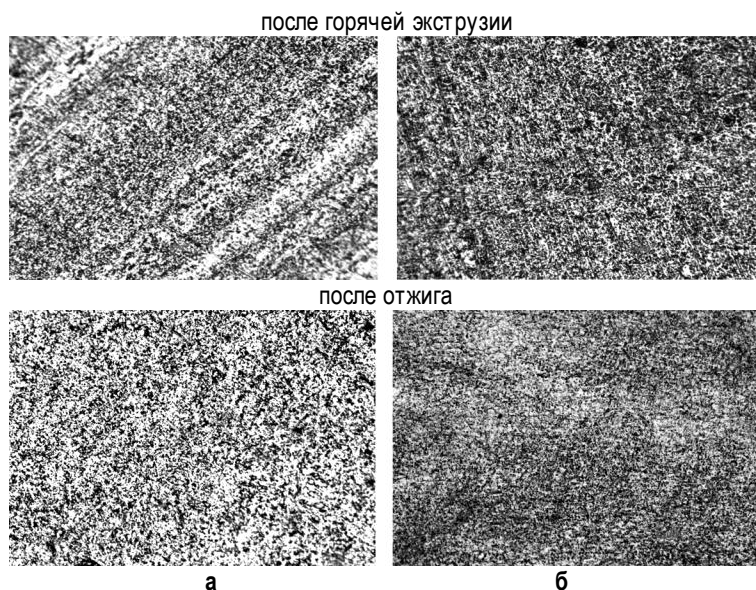


Рис. 3. Характерные микроструктуры прутка диаметром 6 мм в продольном (а) и поперечном (б) сечениях, $\times 320$

на способность алюминия к упрочнению пластической деформацией, что связано с неблагоприятным характером распада твердого раствора кремния в алюминии. Присутствуя в алюминии, кремний только несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства.

Характер изменения механических свойств прутков диаметрами 6 и 8 мм при последующем волочении принципиальных отличий не имеет – с увеличением степени деформации прочностные характеристики материала повышаются, а пластические, наоборот, понижаются. Эти особенности поведения материала проволоки при холодном волочении позволили предположить, что существует в своем роде «единая» кривая упрочнения материала при холодной обработке. Для построения ее все экспериментальные значения временного сопротивления разрыву σ_b в проволоке различного диаметра были нанесены в соответствии со своими значениями относительного обжатия ϵ на единое поле графической зависимости $\sigma_b = f(\epsilon)$ (рис. 5) и аппроксимированы уравнением

$$\sigma_b = 169 - 0,0041\epsilon^2 + 1,8681\epsilon.$$

Из рис. 5 следует, что в интервале относительных обжатий до 80% прочность проволоки на конечных размерах может достигать значений $\sigma_b = 280$ –300 МПа, при этом пластичность заметно снижается до значений $\delta = 2$ –4%.

С точки зрения получения прутков или проволоки для последующего модифицирования уровень их механических характеристик принципиального значения не имеет. Важнее обеспечить требуемое структурное состояние материала, достигаемое как раз холодной обработкой. При этом диаметр используемых прутка или

проволоки не должен быть сравнительно маленьким, поскольку в противном случае могут возникнуть технические сложности по введению их в расплав с целью достижения модифицирующего эффекта. В этой связи было решено проследить характер изменения структуры для оценки модифицирующей способности материала использовать проволоку диаметром порядка 4 мм.

Изучение структуры производилось на проволоке диаметрами 6,6 и 5,0 мм, каждая из которых была протянута из соответствующих прессованных прутков определенного диаметра с суммарным относительным обжатием 30%. Анализ приведенных на рис. 6 микроструктур показывает, что по мере уменьшения диаметра прутка происходит, хоть и не совсем равномерное по длине, но достаточно заметное, измельчение кремния. Границы между отдельными стружками практически не проявляются, то есть фактически имеем дело с однородным сплошным материалом, представляющим собой равномерно распределенную кремнистую фазу по телу α -твердого раствора алюминия. Строчечность структуры в продольном направлении выражена уже в меньшей степени, чем у прутков после горячей экструзии.

Оценка модифицирующей способности экспериментально полученной проволоки производилась в полупромышленных условиях при осуществлении реального технологического процесса литья под низким давлением заготовок алюминиевых автомобильных дисков колес на предприятии «КиК» (г. Красноярск).

Целью данного этапа исследования было изучение возможности модифицирования расплава АК12 проволокой, полученной из стружковых отходов этого же сплава.

Для приготовления сплава использовались следующие шихтовые материалы:

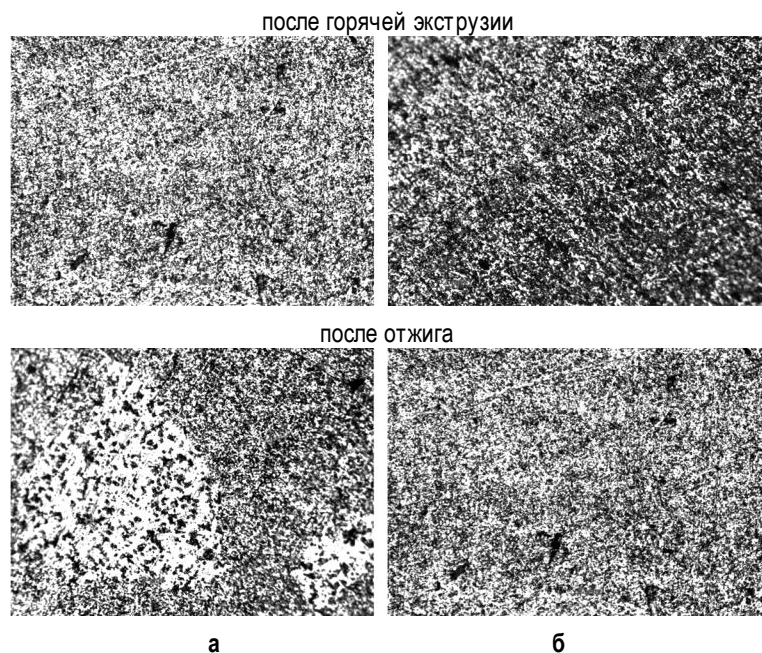


Рис. 4. Характерные микроструктуры прутка диаметром 8 мм в продольном (а) и поперечном (б) сечениях, $\times 320$

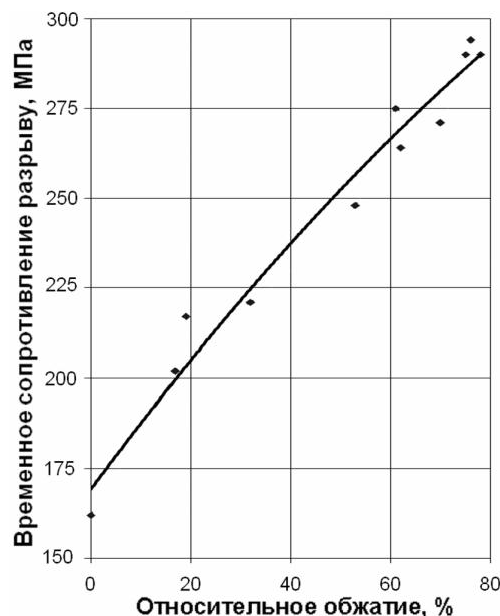


Рис. 5. Изменение временного сопротивления разрыву прутков и проволоки из стружки сплава АК12 после горячей экструзии ($\epsilon = 0\%$) и холодного волочения

Таблица 1

Химический состав опытных колес

Характеристика отливки	Химический состав, вес %											
	Si	Fe	Ca	Mg	Ni	Zn	Ti	B	Pb	Sn	Sr	Al
До введения лигатуры	11,40	0,173	0,0010	0,055	0,001	0,014	0,113	0,001	0,0021	0,0017	0,0032	88,23
Модифицированная проволокой \varnothing 4,2 мм	11,36	0,170	0,0010	0,054	0,001	0,014	0,115	0,001	0,0020	0,0018	0,0032	88,27

- алюминий первичный, марки не ниже А7 (ГОСТ 11069);
- кремний кристаллический, марки не ниже КР00 (ГОСТ 2169);
- магний Mg90;
- лигатура Ti80F;
- отходы собственного производства (бракованные колеса, переплав АК12, стружка).

В ходе работы в качестве основного оборудования использовали:

- печь индукционную тигельную ИАТ–2.5;
- ковш разливочный (1 т);
- роторную установку дегазации;
- печь литейной установки.

Жидкий алюминий, привезенный с расположенного рядом предприятия «КрАЗ» и прошедший входной контроль, заливали в индукционную печь. Добавляли в расплав кремний и титан, после чего проводили рафинирование расплава флюсом. Затем отбирали пробу на экспресс-анализ, а получив требуемый результат, добавляли магний. После этого снимали шлак, подогревали расплав и сливали его в разливочный ковш в количестве 540 кг. Далее выполняли рафинирование расплава аргоном на роторной установ-

ке. После окончания обработки расплава и достижения им температуры 710–720°C, сливали готовый металл в печь литейной машины, после чего снимали шлак и отбирали соответствующие пробы.

После выхода пресс-формы на требуемый температурный режим отливали 5 колес (без модифицирования расплава) со следующими параметрами процесса: $T_{me} = 715 \pm 15^\circ C$, $t_{цикла} = 170 \pm 10$ с, $P = 200$ –650 мбар. Потом вводили прутковую лигатуру в количестве 3% и производили еще 5 отливок.

Из полученных отливок вырезали образцы для определения химического состава и испытания механических свойств, а также проведения анализа микроструктуры.

Ниже приведены химический состав (табл. 1) и механические свойства (табл. 2) отлитых колес. Кроме того, в табл. 2 указаны значения механических характеристик, соответствующие требованиям ГОСТ 50511, а также диапазон данных характеристик, получаемый при литье колес по технологии, применяемой в настоящее время в ООО «КиК» (сплав, модифицированный лигатурами AlTiB и AlSr).

Анализ полученных результатов показывает, что колеса, отлитые без модификатора, имеют достаточно низкий уровень механических свойств, не соответст-

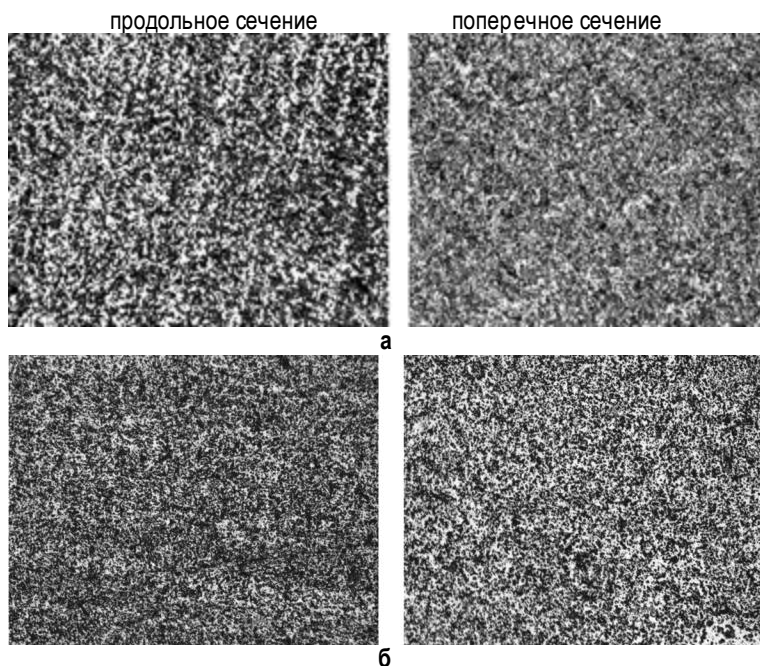


Рис. 6. Характерные микроструктуры ($\times 320$) проволоки диаметрами 5 мм (а) и 6,6 мм (б), тянутой из прессованных прутков диаметрами соответственно 6 и 8 мм

Таблица 2

Механические свойства опытных колес

Характеристика отливки	Номер отливки	Механические свойства	
		Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
До введения лигатуры	1	167,9	4,6
	2	154,7	4,4
	3	165,8	3,0
	4	166,1	4,9
	5	160,0	4,1
Модифицированная проволокой \varnothing 4,2 мм	1	184,9	11,0
	2	198,8	10,2
	3	189,7	9,8
	4	191,2	8,7
	5	195,1	10,8
Модифицированная AlTiB и AlSr		181–200,1	8,8–12
Требования ГОСТ 50511		Не менее 160 МПа	Не менее 5%

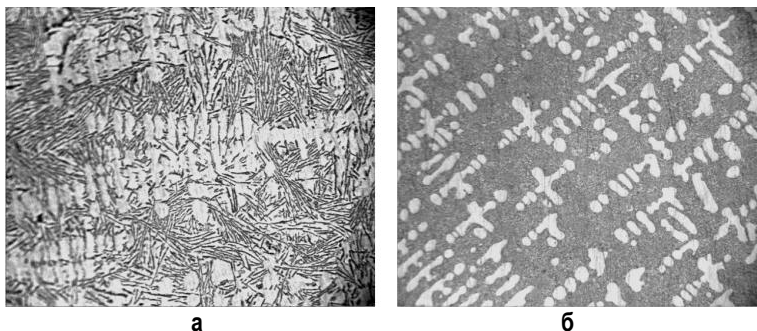


Рис. 7. Микроструктуры колес из сплава АК12 до (а) и после (б) введения проволочной лигатуры \varnothing 4,2 мм из стружковых отходов, $\times 200$

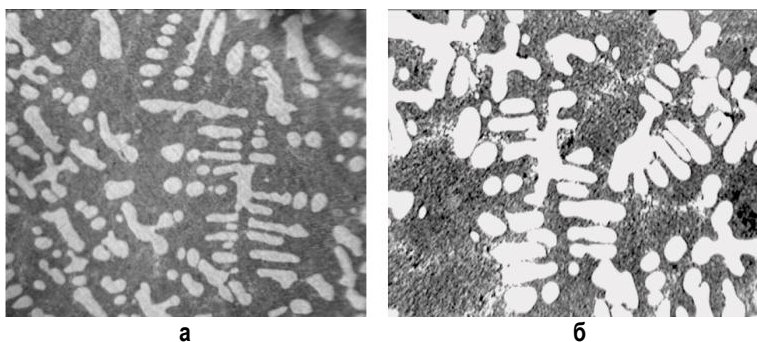


Рис. 8. Микроструктуры колес из сплава АК12, модифицированных лигатурами AlSi (а) и AlSi + AlTiB (б), $\times 200$

вующий требованиям ГОСТ 50511.

Модифицирование расплава лигатурой в виде проволоки \varnothing 4,2 мм, произведенной из стружковых отходов, в количестве 3% обеспечило прирост прочностных свойств до значений, удовлетворяющих указанным требованиям.

При исследовании микроструктуры было установлено, что в отливках, изготовленных без введения прутковой лигатуры, имеет место непромодифицированная эвтектика (рис. 7, а), а после добавления прутков наблюдаются тонкодисперсные включения кремния в эвтектике без присутствия на границах зерен – колоний грубых частиц кремния и игольчатых железосодержащих фаз (рис. 7, б).

На рис. 8 представлены микроструктуры колес из сплава АК12, модифицированных лигатурами AlSi и AlTiB + AlSi. Сравнивая их со структурой, получаемой с применением экспериментальной проволоки (см. рис. 7, б), можно сделать вывод, что они имеют достаточно схожий характер при введении одной лигатуры AlSi. При совместном введении AlSi + AlTiB в колесах наблюдается перемодифицированная структура.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что использование приемов, харак-

терных для процессов порошковой металлургии и традиционной обработки давлением, позволяет, исключив переплав, получать прутки и проволоку непосредственно из стружки сплава АК12, относящегося, как известно, преимущественно к группе литейных сплавов. Введением проволоки, произведенной из стружковых отходов, в расплав АК12 удается добиться в отливках формирования структуры и достижения механических свойств, близких по данным показателям к отливкам, модифицированным по действующей технологической схеме с использованием лигатур AlTiB и AlSi. Исходя из этого, можно прийти к заключению, что потенциально полученную по предлагаемой технологической схеме проволоку можно применять в качестве модификатора в условиях реального промышленного производства.

Список литературы

1. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
2. Биронт В.С., Аникина В.И., Ковалева А.А. Дилатометрический анализ структурных превращений в алюминиево-кремниевых сплавах при термодинамической обработке // Journal Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2009. № 2. С. 384–393.
3. Пат. 2257419 РФ, МПК В22 С1/03. Способ получения модифицирующих материалов для алюминия и его сплавов / Клишко А.П., Биронт В.С., Загиров Н.Н. и др. Опубл. 27.07.05. Бюл. № 21.
4. Биронт В.С., Аникина В.И., Загиров Н.Н. Материаловедение. Формирование структуры нового класса стружковых материалов: учеб. пособие / ГУЦМиЗ. Красноярск, 2005. 80 с.
5. Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х. Технология прессования металлов. М.: Металлургия, 1995. 336 с.

Bibliography

1. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. Aluminum alloys with silicon. M.: Metallurgy, 1977. 272 p.
2. Biron V.S., Anikina V.I., Kovaleva A.A. Dilatometric analysis of the structural transformation in aluminum-silicon alloys in thermal processing // Journal Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2009. № 2. P. 384–393.
3. Patent 2257419 RF, MPK B 22 C 1/03. Method of making modifying materials for aluminum and its alloys / Klimko A.P., Biron V.S., Zagirov N.N. at alias. Published on 27.07.05. Bulletin № 21.
4. Biron V.S., Anikina V.I., Zagirov N.N. Materials science. Structure formation of a new class of chip materials: textbook / GUTSMIZ. Krasnoyarsk, 2005. 80 p.
5. Shcherba V.N., Raitbarg L.H. Technology of metal pressing. M.: Metallurgy, 1995. 336 p.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 544.344.3-16: 546.72: 546.11

Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю., Шабуров А.Д.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА С ПРИМЕСЯМИ ЗАМЕЩЕНИЯ В АЛЬФА-ЖЕЛЕЗЕ*

В работах [1, 2] в рамках статистической теории ближнего порядка М.А.Штремеля [3] было получено уравнение для растворимости водорода в тройных сплавах, которое учитывает существование ближнего порядка во взаимном расположении атомов замещения и внедрения. Атомы водорода в решётке α -железа располагаются в тетраэдрических порах [4]. Каждый атом основной решетки окружен $z_{12} = 24$ тетраэдрическими порами, в которых могут располагаться атомы водорода. Каждая тетрапора и соответственно расположенный в ней атом водорода окружены $z_{21} = 4$ атомами основной решетки. Поэтому каждая тетрапора принадлежит атому основной решетки на $1/z_{21}$ часть. Отсюда число пор, приходящихся на один атом основной решетки, оказывается равным $v = z_{12}/z_{21} = 6$ пор на атом. Концентрации элементов в таком растворе удобно выражать через доли атомов элемента Y в подрешётке узлов замещения и атомов водорода в подрешётке тетрапор, которые связаны с обычными атомными долями x соотношениями $\theta_Y = \frac{x_Y}{1-x_H}$ и $\theta_H = \frac{x_H}{v(1-x_H)}$.

В качестве характеристики ближнего порядка в [1, 2] был использован параметр $p = p_{H-Y}$, который представляет вероятность события, что в данном ближайшем к атому водорода узле основной решетки в сплаве Fe-Y-H находится атом элемента Y, образующего с железом раствор замещения. В условиях термодинамического равновесия параметр p выражается формулой [3]

$$p_3^0(T, \theta_H, \theta_Y) = \left[-\left(1 + (1 - \theta_H - \theta_Y)h\right) + \sqrt{\left[1 + (1 - \theta_H - \theta_Y)h\right]^2 + 4\theta_H\theta_Y h} \right] / 2\theta_H h, \quad (1)$$

где $h = \exp(\varepsilon/kT) - 1$; $\varepsilon = \varepsilon_{Y-H} - \varepsilon_{Fe-H}$ есть основной энергетический параметр взаимодействия атомов Y и H, представляющий разность энергий связи пар ближайших соседей Y-H и Fe-H, а T – абсолютная температура. Если $\varepsilon < 0$, то между атомами водорода и эле-

мента Y в твёрдом растворе будет наблюдаться притяжение, и наоборот, при $\varepsilon > 0$ они будут отталкиваться друг от друга. Поскольку содержание водорода в промышленных сплавах обычно мало, то вместо сложной формулы (1) можно использовать приближённую:

$$p_3^0 = \frac{\theta_Y}{1 + (1 - \theta_Y)h}. \quad (2)$$

На основе выражения (2) в [1] было получено уравнение для растворимости (выраженной в практических единицах – см³ газа H₂ при нормальных условиях на 100 г металла) в форме

$$\ln C_H = \ln C_H^0 + z_{21} \ln \left[1 - \theta_Y + \theta_Y \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \right] + \ln f_H^{1/2}, \quad (3)$$

которая аналогична уравнению Вагнера, использованному им для описания растворимости водорода в тройных сплавах на основе палладия [5]. В формуле (3) величина f_H – фугитивность (летучесть) водорода,

Таблица 1

Параметры уравнения (3) для растворимости водорода в бинарных сплавах железа с различными элементами Y

Y	$\ln C_H^0$	ε , Дж/моль	Интервал концентраций Y (ат. %)	Источники экспериментальных данных
Pd	2,85–2395/T	-19500	0–0,26	[11]
Ti	3,6–3269,8/T	-19000	0–0,56	[10]
V	3,6–3269,8/T	-16000	0–1,0	[10]
Mn	по (4)	-1500–12T	0–5	[10, 12]
Si	по (4)	-10000	0–3,6	[12, 13]
W	3,84–3269,8/T	-6000–4T	0–2,8	[14, 15]
Ni	по (4)	-5000–1,5T	0–12	[10, 12, 16, 17]
Mo	3,5–2894/T	-11000+7T	0–6,1	[18, 19]
Ge	3,4–2894/T	-4000	0–2,9	[20]
Cr	по (4)	500–3T	0–32	[12, 16, 21, 22]
Al	4,0–3269,8/T	-7500+5T	0–5	[23]

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и поддержана грантом РФФИ 10-03-00295-а.

Таблица 2

Значения параметра взаимодействия ϵ и растворимости водорода C_H , рассчитанные по (3) и данным табл. 1

Y	ϵ , Дж/моль, при		C_H , см ³ /100 г при $T = 370$ К	
	$T = 1000$ К	$T = 370$ К	$\theta_Y = 0,001$	$\theta_Y = 0,01$
Fe	0	0	$6,90 \cdot 10^{-3}$	$6,90 \cdot 10^{-3}$
Pd	-19500	-19500	0,160	52,3
Ti	-19000	-19000	$25,5 \cdot 10^{-3}$	6,03
V	-16000	-16000	$10,3 \cdot 10^{-3}$	0,329
Mn	-13500	-5940	$7,07 \cdot 10^{-3}$	$8,68 \cdot 10^{-3}$
Si	-10000	-10000	$7,61 \cdot 10^{-3}$	$16,7 \cdot 10^{-3}$
W	-10000	-7480	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$10,0 \cdot 10^{-3}$
Ni	-6500	-5555	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$8,42 \cdot 10^{-3}$
Mo	-4000	-8410	$14,1 \cdot 10^{-3}$	$22,7 \cdot 10^{-3}$
Ge	-4000	-4000	$12,1 \cdot 10^{-3}$	$13,4 \cdot 10^{-3}$
Cr	-3500	-610	$6,91 \cdot 10^{-3}$	$6,96 \cdot 10^{-3}$
Al	-2500	-5650	$8,10 \cdot 10^{-3}$	$9,74 \cdot 10^{-3}$

а $\ln C_H^0 = \frac{(1/2)\mu_{H_2}^0 - \mu_H^0}{RT} + 5,3016$ представляет собой растворимость водорода в α -железе при давлении 1 атм, которая по данным Геллера и Сунь [6] равна

$$\ln C_H^0 = 3,8614 - \frac{3269,8}{T} \quad (4)$$

Особенность уравнения (3) заключается в том, что при $\theta_Y = 0$ оно переходит в выражение для растворимости водорода в чистом железе. Если же $\theta_Y = 1$, то второе слагаемое в нём становится равным $z_{21}(\epsilon_{Y-H} - \epsilon_{Fe-H})$. Поскольку мы не рассматривали изменение колебательной энергии и энтропии при внедрении атома водорода, то под $z_{21}(\epsilon_{Y-H} - \epsilon_{Fe-H})$ надо понимать разность химических потенциалов водорода, находящегося в бесконечно разбавленном растворе соответственно в элементе Y и железе. Следовательно, параметр $z_{21}\epsilon$, как это

обычно бывает для химического потенциала, должен иметь температурную зависимость $\epsilon = \alpha + \beta T$. В дальнейшем энергия ϵ будет выражаться в Дж/моль.

В работах [1, 2] было продемонстрировано, что формула (3) позволяет хорошо описать экспериментальные данные В.И. Архарова [7] для растворимости водорода в дополнительно легированной 0,26 ат. % Pd конструкционной стали, если принять $\epsilon = -22500$ Дж/моль. При этом, в отличие от чистого железа, при стремлении температуры к нулю растворимость водорода не убывает монотонно, а пройдя через минимум при ~ 450 К, начинает увеличиваться; это обусловлено тем, что атомы водорода всё в большей степени захватываются атомами палладия, и тепловое движение уже не в силах преодолеть такое взаимопритяжение. Этот вывод важен для проблемы образования в стали водородных трещин – флокенов, поскольку у сплавов с палладием резко возрастает концентрация растворенного водорода при температуре ~ 370 К, для которой максимально давление выделяющегося в микропорах молекулярного водорода [8]. Это даёт основание предполагать, что уровень давления для сплава с палладием будет существенно меньшим. Именно это обстоятельство, вероятно, объясняет резкое уменьшение склонности к флокенообразованию у стали, содержащей палладий [9]. Поэтому представлялось важным сделать попытку использовать уравнение (3) для расчёта растворимости водорода в других тройных сплавах железо–элемент замещения–водород.

С этой целью нами были использо-

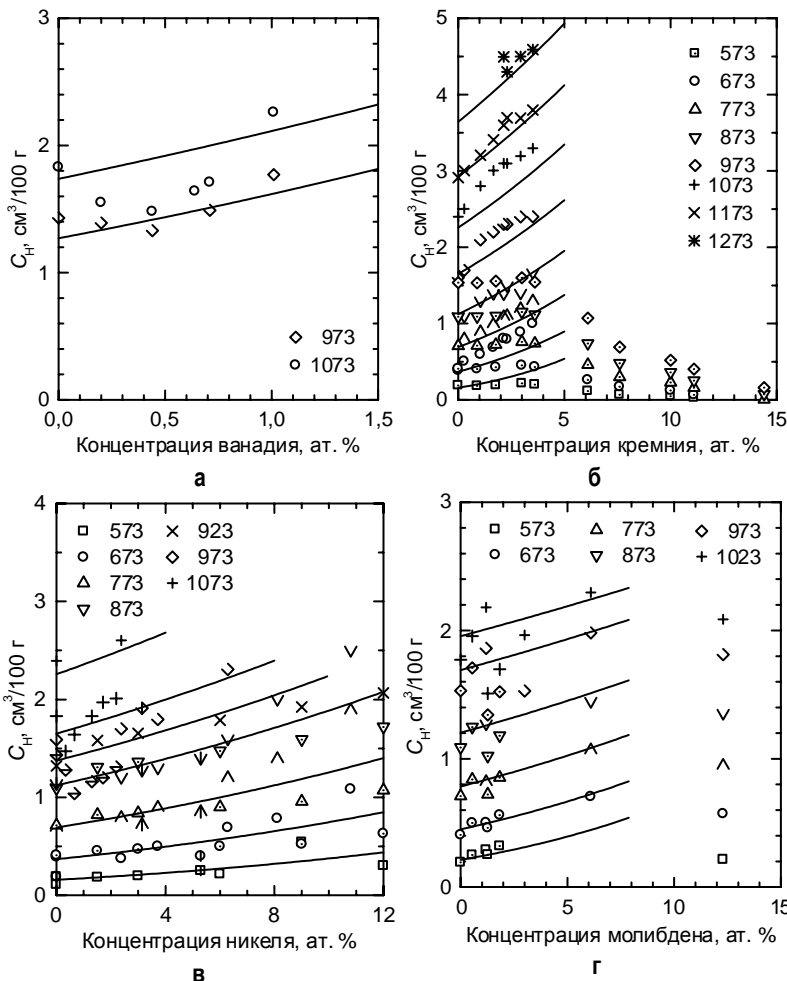


Рис. 1. Концентрационные зависимости растворимости водорода в бинарных сплавах железа с V, Si, Ni и Mo (а-г).

Точки – экспериментальные данные для температур в кельвинах, указанных на графиках; источники см. в табл. 1. Линии рассчитаны по уравнению (3) и данным табл. 1

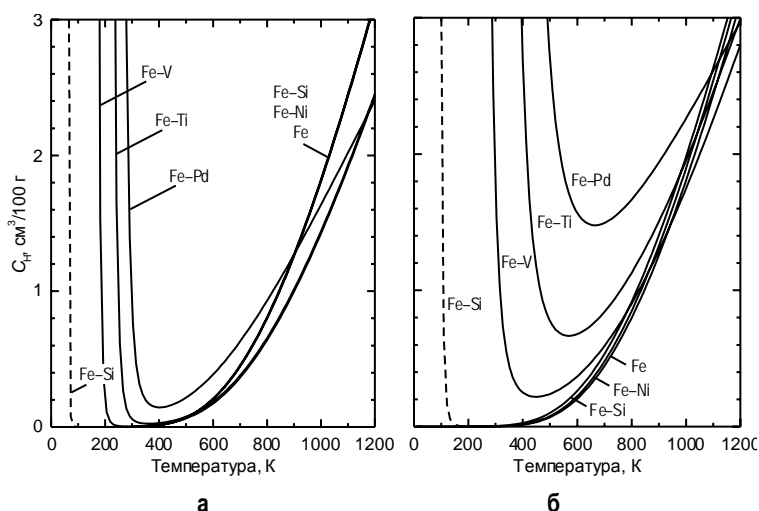


Рис. 2. Температурная зависимость растворимости водорода в некоторых сплавах железа, рассчитанная по уравнению (3) и данным табл. 1 при $\theta_{\gamma} = 0,001$ (а) и $0,01$ (б)

ваны данные работ [10–21], в которых изучена растворимость водорода в сплавах железа с одиннадцатью различными элементами замещения. Как показали расчёты, экспериментальные данные хорошо описываются уравнением (3) при соответствующем подборе значений параметра взаимодействия ϵ , к которому иногда приходилось, как сказано выше, придавать температурную зависимость. В некоторых случаях в соответствии с экспериментальными данными приходится немного изменять и величину первого слагаемого $\ln C_{\text{H}}^0$; вероятно, это связано с колебаниями давления, разной чистотой сплавов и другими особенностями методики эксперимента у разных авторов. Значения ϵ и $\ln C_{\text{H}}^0$ для всех систем сплавов приведены в табл. 1 и 2, а примеры сравнения расчётных концентрационных зависимостей растворимости с экспериментальными – на рис. 1, 2. Экспериментальные данные о растворимости водорода в использованных исследованиях относятся в основном к области температур 573–1273 К (а часто и более узкой). Область концентраций, использованных для анализа, обычно не превышала нескольких процентов (см. табл. 1), так как при больших концентрациях зависимость часто становится немонотонной. Впрочем, для ванадия, обладающего неограниченной растворимостью в α -железе, уравнение (3), как показано в [1] на основании экспериментальных данных [24], справедливо во всей области концентраций (0–100% V). При этом энергию взаимодействия необходимо принимать равной $\epsilon = -15460 + 3,32 \cdot T$ Дж/моль [-14232 Дж/моль при 370 К], что очень близко к значению $\epsilon = -16000$, следующему из данных [10]. Отметим также, что в работах [1, 2] на основании экспериментальных данных [7] о растворимости водорода в легированной палладием стали 34ХН3М было получено значение $\epsilon = -22500$ Дж/моль; анализ данных работы [11], в которой исследовалась растворимость водорода в бинарном сплаве Fe–Pd, привёл к очень близкому значению $\epsilon = -19500$ Дж/моль.

Как следует из табл. 2, где приведены рассчитанные для $T = 1000$ и 370 К значения ϵ и C_{H} , абсолютная величина параметра взаимодействия ϵ уменьшается в ряду Pd, Ti, V, Mn, Si, W, Ni, Mo, Ge, Cr, Al. При этом для всех элементов он отрицателен, то есть между атомами легирующего элемента и водорода в растворе существует притяжение, наиболее сильное в случае Pd, Ti и V. Для этих трёх элементов на расчётной кривой $C_{\text{H}}(T)$ наблюдается минимум, расположенный выше комнатной температуры. Как следует из формул (3) и (4), условием наличия минимума является $\epsilon < -6796$ Дж/моль. Ниже минимума растворимость водорода в таких сплавах быстро увеличивается при снижении температуры, что приводит к резкому увеличению растворимости в температурном интервале образования флокенов (см. табл. 2). Это показывает, что «эффект Архарова» (подавление образования флокенов при легировании стали палладием) должен проявляться также при легировании ванадием, титаном и другими элементами, сильно взаимодействующими с водородом в α -твёрдом растворе – разумеется, при условии, что эти элементы не окажутся связанными в карбиды или другие фазы.

Список литературы

1. Термодинамические аспекты влияния малых добавок палладия на растворимость водорода и флокенообразование в сталях / Д.А. Мирзаев, А.А. Мирзоев, И.В. Кашуков, К.Ю. Окишев // ФММ. 2009. Т. 108. № 5. С. 525–533.
2. Термодинамические основы образования флокенов и способы их предупреждения / Д.А. Мирзаев, А.А. Мирзоев, И.В. Кашуков, К.Ю. Окишев // Материаловедение и термическая обработка металлов / под ред. А.Н. Емельяшина, Е.В. Петровича. Магнитогорск: МГТУ, 2009. С. 187–208.
3. Штремель М.А., Крупин Ю.А., Зарецкий Е.Б. Ближний порядок в тройных твёрдых растворах замещения-внедрения // ФММ. 1978. Т. 46. Вып. 5. С. 984–993.
4. Diffusion of interstitial hydrogen into and through bcc Fe from first principles / D.E. Jiang, E.A. Carter // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. 064102.
5. Водород в палладии и сплавах палладия / Э. Вике, Х. Бродовский в сопр. с Х. Цохнером // Водород в металлах: пер. с англ. Т. 2 / под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля. М.: Мир, 1981. 432 с.
6. Geller W., Sun Tak-Ho. Einfluß von Legierungszusätzen auf die Wasserstoffdiffusion im Eisen und Beitrag zum System Eisen-Wasserstoff // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1950. Jg. 21. N. 11/12. P. 423–430.
7. Влияние малых добавок палладия на водородопроницаемость среднелегированной стали / В.И. Архаров, Т.Т. Мороз, И.А. Новохацкий, М.Е. Еремина, С.И. Хохлова // ФХММ. 1971. Т. 7. № 6. С. 51–54.
8. Мирзаев Д.А., Мирзоев А.А. Термодинамический аспект выделения растворённого водорода в микропорах металла // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 7. С. 117–123. (Сер. Математика, физика, химия. Вып. 7).
9. О возможности снижения склонности стали к флокенообразованию посредством малых добавок палладия / В.И. Архаров, А.А. Крапина, Л.И. Кватер, П.В. Склюев // Изв. АН СССР. Металлы. 1967. № 1. С. 105–111.

10. The effect of alloying elements on the hydrogen solubility of ferritic iron at atmospheric hydrogen pressure and elevated temperatures / B.-T. Lee, J.-Y. Lee, S.-H. Hwang // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1982. Jg. 53. Nr. 2. S. 71–76.
11. Еремина М.И., Новохацкий И.А., Мороз Т.Т. Определение содержания, растворимости и коэффициентов диффузии водорода в металлах методом несущего газа // Методы определения газов в металлах и сплавах: материалы семинара. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1971. С. 58–64.
12. Schwarz W., Zitter H. Löslichkeit und Diffusion von Wasserstoff in Eisenlegierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1965. Jg. 36. H. 5. S. 343–349.
13. Салий В.И., Рябов Р.А., Гельд П.В. Коэффициенты диффузии и растворимости водорода в твердых растворах кремния в железе // ФММ. 1973. Т. 35. № 1. С. 119–124.
14. Baukloh W., Gehlen K. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Eisen-Wolfram-Legierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1938. Jg. 12. H. 1. S. 39–40.
15. Житенев В.И., Рябов Р.А., Афанасьева Л.А. Диффузия и растворимость водорода в сплавах железа с вольфрамом // Изв. вузов. Физика. 1976. Вып. 1. С. 140–142.
16. Luckemeyer-Hasse L., Schenck H. Löslichkeit von Wasserstoff in einigen Metallen und Legierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1932. Jg. 6. H. 5. S. 209–214.
17. Швецов Н.И., Левченко В.П., Рябов Р.А. Растворимость водорода в железоникелевых сплавах // Физические свойства металлов и сплавов: труды УПИ им. С.М. Кирова. Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1974. № 231. С. 140–141.
18. Sieverts A., Brüning K. Das Aufnahmevermögen der Eisen-Molybdän-Legierungen für Wasserstoff und Stickstoff // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1934. Jg. 7. H. 11. S. 641–645.
19. Житенев В.И., Рябов Р.А., Гельд П.В. Коэффициент диффузии и растворимости водорода в твердых растворах молибдена в железе // ФММ. 1976. Т. 41. Вып. 3. С. 650–652.
20. Зависимость коэффициентов диффузии и проникновения водорода в твердых растворах германия в железе от состава раствора и температуры / Р.А. Рябов, В.И. Салий, П.В. Гельд, М.Л. Теслер // ФХММ. 1976. Т. 12. № 4. С. 111–113.
21. Coldwell D.M., McLellan R.B. Thermodynamic properties of Fe-Cr-H ternary solid solutions // Acta Metallurgica. 1975. V. 23. No. 1. P. 57–61.
22. Арчаков Ю.И., Ванина Т.Н. Влияние хрома на растворимость водорода в железе при высоких температурах и давлениях // Журнал прикладной химии. 1977. Т. 50. № 6. С. 1209–1212.
23. Siegelin W., Lieser K.H., Witte H. Löslichkeit von Wasserstoff in Legierungen. III // Zeitschrift für Elektrochemie. 1957. Bd. 61. Nr. 3. S. 359–366.
24. Kirschfeld L., Sieverts A. Das Verhalten von Vanadin und Vanadin-Eisenlegierungen gegen Wasserstoff // Zeitschrift für Elektrochemie. 1930. Bd. 36. Nr. 3. S. 123–129.
5. Hydrogen in palladium and palladium alloys / E. Wicke, H. Brodowsky in co-operation with H. Züchner // Hydrogen in Metals II / under the editorship of G. Alefeld, J. Völkl. M. Mir, 1981. 432 p.
6. Geller W., Sun Tak-Ho. Einfluß von Legierungszusätzen auf die Wasserstoffdiffusion im Eisen und Beitrag zum System Eisen-Wasserstoff // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1950. Jg. 21. H. 11/12. S. 423–430.
7. Effect of small palladium additions on hydrogen permeation in a intermediate-alloy steel / V.I. Arkharov, T.T. Moroz, I.A. Novokhatsky, M.E. Eremina, S.I. Khokhlova // Physical and Chemical Mechanics of Materials. 1971. V. 7. No. 6. P. 51–54.
8. Mirzaev D.A., Mirzoev A.A. Thermodynamic aspect of dissolved hydrogen emission in microvoids of a metal // South Ural State University Bulletin. 2006. No. 7. («Mathematics, Physics, Chemistry» Series, issue 7). P. 117–123.
9. On possibility of decreasing the flake susceptibility of a steel by small palladium additions / V.I. Arkharov, A.A. Kralina, L.I. Kvater, P.V. Sklyuev // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals. 1967. No. 1. P. 105–111.
10. The effect of alloying elements on the hydrogen solubility of ferritic iron at atmospheric hydrogen pressure and elevated temperatures / B.-T. Lee, J.-Y. Lee, S.-H. Hwang // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1982. Jg. 53. Nr. 2. P. 71–76.
11. Eremina M.I., Novokhatsky I.A., Moroz T.T. Determination of content, solubility and diffusivity of hydrogen in metals by means of carrying gas method // Methods of gas determination in metals and alloys: Papers of the seminar. Moscow: F.E. Dzierzynski house of science and technology, 1971. pp. 58–64.
12. Schwarz W., Zitter H. Löslichkeit und Diffusion von Wasserstoff in Eisenlegierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1965. Jg. 36. H. 5. P. 343–349.
13. Saliy V.I., Ryabov R.A., Geld P.V. Diffusivities and solubilities of hydrogen in solid solutions of silicon in iron // Physics of Metals and Metallography. 1973. V. 35. No. 1. P. 119–124.
14. Baukloh W., Gehlen K. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Eisen-Wolfram-Legierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1938. Jg. 12. H. 1. P. 39–40.
15. Zhitenev V.I., Ryabov R.A., Afanasyeva L.A. Diffusion and solubility of hydrogen in iron-tungsten alloys // Izvestiya VUZ. Physics. 1976. No. 1. P. 140–142.
16. Luckemeyer-Hasse L., Schenck H. Löslichkeit von Wasserstoff in einigen Metallen und Legierungen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1932. Jg. 6. H. 5. P. 209–214.
17. Shvetsov N.I., Levchenko V.P., Ryabov R.A. Hydrogen solubility in iron-nickel alloys // Physical properties of metals and alloys: scientific articles of S.M. Kirov Ural Polytechnical Institute. Sverdlovsk: S.M. Kirov Ural Polytechnical Institute, 1974. No. 231. P. 140–141.
18. Sieverts A., Brüning K. Das Aufnahmevermögen der Eisen-Molybdän-Legierungen für Wasserstoff und Stickstoff // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1934. Jg. 7. H. 11. P. 641–645.
19. Zhitenev V.I., Ryabov R.A., Geld P.V. Diffusivity and solubility of hydrogen in solid solutions of molybdenum in iron // Physics of Metals and Metallography. 1976. V. 41. No. 3. P. 650–652.
20. Dependence of diffusivity and permeability of hydrogen in solid solutions of germanium in iron on composition and temperature / R.A. Ryabov, V.I. Saliy, P.V. Geld, M.L. Tesler // Physical and Chemical Mechanics of Materials. 1976. V. 12. No. 4. P. 111–113.
21. Coldwell D.M., McLellan R.B. Thermodynamic properties of Fe-Cr-H ternary solid solutions // Acta Metallurgica. 1975. V. 23. No. 1. P. 57–61.
22. Archakov Yu.I., Vanina T.N. Effect of chromium on hydrogen solubility in iron at high temperatures and pressures // Journal of Applied Chemistry. 1977. V. 50. No. 6. P. 1209–1212.
23. Siegelin W., Lieser K.H., Witte H. Löslichkeit von Wasserstoff in Legierungen. III // Zeitschrift für Elektrochemie. 1957. Bd. 61. Nr. 3. P. 359–366.
24. Kirschfeld L., Sieverts A. Das Verhalten von Vanadin und Vanadin-Eisenlegierungen gegen Wasserstoff // Zeitschrift für Elektrochemie. 1930. Bd. 36. Nr. 3. P. 123–129.

Bibliography

1. Thermodynamic Aspects of the Effect of Small Palladium Additions on Solubility of Hydrogen and Flakes Formation in Steels / D.A. Mirzaev, A.A. Mirzoev, I.V. Kashukov, K.Yu. Okishev // Physics of Metals and Metallography. 2009. V. 108. No. 5. P. 496–503.
2. Thermodynamic basics of flake formation and methods of its prevention / D.A. Mirzaev, A.A. Mirzoev, I.V. Kashukov, K.Yu. Okishev // Materials Science and Heat Treatment of Metals / under the editorship of A.N. Emelyushin, E.V. Petrochenko. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University, 2009. P. 187–208.
3. Shtremel M.A., Krupin Yu.A., Zaretsky E.B. Short-range order in substitutional-interstitial ternary solid solutions // Physics of Metals and Metallography. 1978. V. 46. No. 5. pp. 984–993.
4. Jiang D.E., Carter E.A. Diffusion of interstitial hydrogen into and through bcc Fe from first principles // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. 064102.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.778

Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г.

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ*

Важнейшим видом продукции метизной отрасли является стальная проволока, используемая при производстве канатов ответственного назначения, в элементах железобетонных конструкций, деталей машин, сталемедных изделиях для электрификации железных дорог.

Как показывает анализ современной нормативно-технической документации, в настоящее время предъявляются все более жесткие требования к уровню регламентируемых свойств указанных металлических изделий. Традиционные технологии повышения уровня механических свойств стальной проволоки не имеют существенного резерва по таким технико-экономическим показателям, как рентабельность, энергоемкость, ограниченная возможность оперативного изменения как всего технологического процесса, так и отдельных его параметров. Поэтому разработка технологических мероприятий и технических средств, обеспечивающих комплексное повышение механических свойств стальной проволоки с использованием инновационных способов деформационной обработки, является важной научно-технической проблемой, решение которой позволит усилить конкурентные позиции отечественной науки и бизнеса.

Одним из путей повышения конкурентоспособности и эксплуатационной надежности металлоизделий является использование новых наукоемких технологий, позволяющих получать ультрамелкозернистые (УМЗ) и наноструктуры в металлах и сплавах. Одним из наиболее перспективных подходов к получению таких структур является применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Однако широкомасштабное применение существующих способов формирования УМЗ структур деформационным воздействием в условиях массового производства ограничено, главным образом, дискретностью существующих процессов и размером получаемых заготовок. Кроме того, непрерывные способы, позволяющие получать УМЗ структуру в длинномерных металлических изделиях, практически не разработаны, либо они низко технологичны [1]. С этой точки зрения существует необходимость разработки инновационных не-

прерывных схем интенсивной пластической деформации, адаптированных к действующим технологическим схемам обработки длинномерных изделий и открывающих перспективу производства проволоки с УМЗ структурой в условиях массового производства.

В развитие данного направления коллективом ученых ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» разработана схема равноканальной угловой свободной протяжки (РКУПротяжки) проволоки и инструмент для ее реализации (рис. 1) [2, 3].

Суть предлагаемого способа заключается в многократном протягивании стальной заготовки через сборную волоку специального профиля, что вызывает одноосное растяжение и изгиб проволоки одновременно в двух очагах деформации. Заготовка полностью заполняет рабочий канал инструмента. Схему процесса можно представить следующим образом (см. рис. 1): зона свободного входа проволоки в инструмент (область I); зона упруго-пластического контакта и изгиба проволоки в области пересечения каналов инструмента (область II); межочаговая область (область III); зона упруго-пластического контакта и изгиба проволоки в области выхода из инструмента (область IV); зона свободного выхода проволоки из инструмента (область V). При этом площадь попереч-

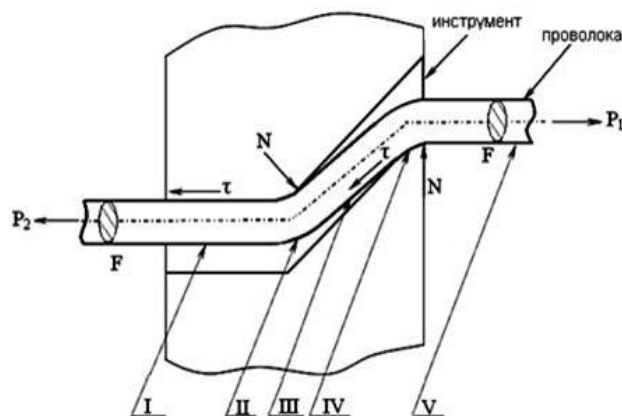


Рис. 1. Принципиальная схема процесса РКУПротяжки:

F – площадь поперечного сечения обрабатываемой заготовки;

P_1 – усилие протяжки; P_2 – усилие противонапряжения;

N – сила нормального давления; t – сила трения

* Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт П1983).

ного сечения заготовки остается неизменной. Обработка заготовки способом РКУПротяжки обеспечивает существенную немонотонность и одновременно высокое значение накопленной степени деформации сдвига в металле, что приводит к эволюции дислокационной структуры, активизации новых систем скольжения, разориентации микрообъемов в пределах одного зерна и перестройке сформированных фрагментов в ультрамелкие зерна с неравновесными высокоугловыми границами.

Проведенные исследования экспериментально подтвердили возможность использования РКУПротяжки для формирования УМЗ структуры в длинномерных изделиях, что позволяет применять данный процесс в условиях поточного производства проволоки ответственного назначения на действующем оборудовании волочильных цехов метизной отрасли [4, 5]. Это явилось основой для разработки принципов проектирования непрерывных технологий с использованием данного метода для производства стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой.

1. Принцип критериальной оценки возможности получения ультрамелкозернистой структуры в процессе РКУПротяжки.

Исходя из предназначения и физической сущности РКУПротяжки, предполагающей одновременный знакопеременный изгиб и одноосное растяжение при неизменности геометрических размеров заготовки, разработан комплекс критериев оценки возможности получения ультрамелкозернистой структуры, которые можно разделить на две группы.

1.1. Критерии, обеспечивающие достижение необходимой степени и однородности НДС материала обрабатываемой проволоки.

1.1.1. Выполнение условия пластичности Губера-Мизеса:

$$\sigma_u = \sigma_T, \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести проволоки, МПа; σ_u – интенсивность напряжений, МПа.

Интенсивность напряжений определяется по известной формуле

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}. \quad (2)$$

В соответствии с данным критерием режимы РКУПротяжки в каждом проходе должны обеспечивать пластическое течение, обусловленное достижением интенсивности напряжений, возникающих при прохождении проволоки через инструмент, предела текучести обрабатываемого материала.

1.1.2. Обеспечение максимальной равномерности распределения интенсивности напряжений по сечению проволоки:

$$\Delta = (\sigma_u^{нов} - \sigma_u^{центр}) \rightarrow MIN \text{ при } \sigma_u^{нов} \rightarrow MAX, \quad (3)$$

где Δ – градиент интенсивности напряжений, МПа; $\sigma_u^{нов}$, $\sigma_u^{центр}$ – интенсивность напряжений на поверхности и в центре проволоки соответственно, МПа.

Выполнение критерия обеспечивает однородность формируемой УМЗ структуры и свойств по сечению заготовки.

1.1.3. Стремление уровня значений интенсивности деформаций сдвига по сечению проволоки к максимальной величине:

$$\Gamma \rightarrow MAX, \quad (4)$$

где $\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}$ – интенсивность деформаций сдвига;

ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} – компоненты тензора деформаций.

Выполнение критерия обеспечивает высокий уровень деформаций сдвига, обуславливающих формирование УМЗ структуры проволоки в процессе РКУПротяжки.

1.2. Критерий, обеспечивающий технологическую стабильность РКУПротяжки. Физический смысл критерия заключается в недопустимости превышения значений интенсивности напряжений, возникающих в переднем конце проволоки под действием усилия протяжки, величины временного сопротивления материала. Нарушение условия приведет к обрыву переднего конца проволоки. В качестве такого критерия можно использовать коэффициент запаса прочности материала проволоки K_3 :

$$K_3 \leq \frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где σ_ϵ – временное сопротивление заготовки, МПа.

2. Принцип определения конструктивных особенностей инструмента деформационной обработки способом РКУПротяжки.

Основными конструктивными параметрами инструмента, влияющими на эффективность обработки проволоки, являются (рис. 2):

- диаметр горизонтального (входного) канала инструмента D_1 ;
- диаметр наклонного (выходного) канала инструмента D_2 ;
- угол наклона оси выходного канала инструмента к горизонтальной плоскости α , град (или угол пересечения каналов инструмента $\Phi = (180^\circ - \alpha)$);
- толщина пластин, образующих горизонтальный ($L_{вх}$) и наклонный ($L_{вых}$) каналы;
- радиусы скруглений кромок каналов r .

Другие параметры инструмента подбираются в зависимости от конструктивных особенностей оборудования, в составе которого используется инструмент.

При определении соотношения исходного диаметра проволоки D_1 и диаметра горизонтального канала инструмента D_1 необходимо учитывать, что увеличение степени заполнения каналов инструмента положительно влияет на интенсивность упрочнения стали в процессе обработки. Максимально возможный диаметр обрабатываемой проволоки определяется технологической стабильностью процесса РКУПротяжки.

3. Принцип определения количества циклов РКУПротяжки, обеспечивающих достижение требуемого уровня прочностных и пластических свойств проволоки.

При определении количества циклов РКУПротяжки заготовки необходимо учитывать следующие основные особенности:

- для повышения эффективности процесса РКУПротяжки рекомендуется многократная обработка с поворотом заготовки вокруг своей продольной оси на угол 90° при каждом последующем проходе. Это возможно при изменении в каждом последующем проходе направления изгиба заготовки путем поворота наклонного канала инструмента;
- при РКУПротяжке процесс фрагментации структурных составляющих носит кумулятивный характер, т. е. степень дисперсности зерна от прохода к проходу непрерывно возрастает. Достаточное количество проходов для получения ультрамелкозернистой структуры выбирают в зависимости от требуемого уровня механических свойств проволоки, экономической целесообразности проведения обработки и возможностей технологического оборудования, в составе которого используется инструмент для осуществления РКУПротяжки.

Одним из вариантов осуществления непрерывной деформационной обработки проволоки является совмещение в различных сочетаниях процессов многократной РКУПротяжки с традиционным волочением. При этом состав и режимы традиционных операций производства проволоки не требуют существенных корректировок.

Практическая реализация РКУПротяжки достигается установкой на многократном волочильном стане

необходимого количества комплектов технологического инструмента разработанной конструкции. При таком подходе технология производства проволоки, включающая обработку способом РКУПротяжки и волочение на необходимый диаметр, обладает высокой степенью технологической развязки, внутренней гибкостью с большим количеством траекторий обработки, мобильностью при смене сортамента, возможностью изготовления партий готовой продукции любой тоннажности.

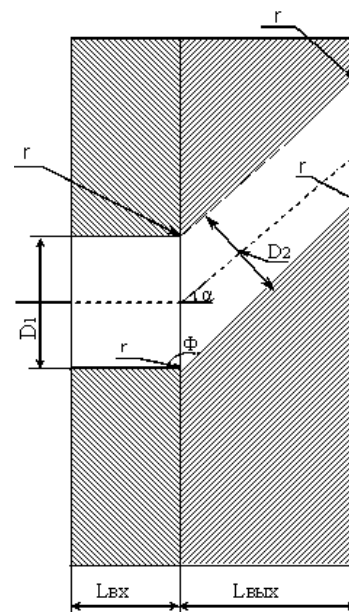


Рис. 2. Принципиальная схема инструмента деформационной обработки проволоки способом РКУПротяжки

Таким образом, РКУПротяжка является перспективным способом деформационной обработки для получения ультрамелкозернистой структуры проволоки. Внедрение разрабатываемого способа в промышленности приведет к созданию новых наукоемких технологий производства высокопрочной стальной проволоки ответственного назначения, исключающих необходимость применения дорогостоящих сырья и дополнительных операций термической обработки.

Дальнейшие теоретико-экспериментальные исследования процесса РКУПротяжки будут направлены на повышение однородности структуры и свойств обрабатываемой проволоки, практическую интеграцию результатов научных разработок в действующие производственные процессы.

Список литературы

1. Проблемы получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Д.Г. Емалева, С.Е. Носков // Метиз. 2010. № 8(63). С. 19–21.
2. Формирование субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки методом РКУПротяжки / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Д.Г. Емалева и др. // Труды седьмого конгресса прокатчиков. Т. 1. М.: Черметинформация, 2007. С. 364–368.
3. Непрерывный деформационный способ формирования ультрамелкозернистой структуры стальной проволоки / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Полякова М.А. и др. // Сталь. 2010. № 6. С. 96–98.
4. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Д.Г. Емалева и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 84–86.
5. Чукин М.В., Емалева Д.Г. Влияние термической обработки на эволюцию структуры и свойств стальной проволоки в процессе РКУПротяжки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 70–71.

Bibliography

1. Problems of steel wire producing with ultrafine grain structure / Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G., Noskov S.E. // Hardware. 2010. No. 8(63). P. 19–21.
2. Forming of submicrocrystall structure in the surface layer of steel wire by EPA-broaching method / Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G. et al. // Proceedings of the seventh rollers congress. V. 1. M.: Chermetinformation, 2007. P. 364–368.
3. Continuous deformation method of steel wire forming with ultrafine-grain structure / Chukin M.V., Korchunov A.G., Polyakova M.A. et al. // Steel. 2010. № 6. P. 96–98.
4. The study of submicrocrystall structure in steel wire surface layer forming with the purpose of improving mechanical properties of wire / Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G. et al. // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2007. № 3. P. 84–86.
5. Chukin M.V., Emaleeva D.G. Influence of heat treatment on structure development and properties of steel wire during EPA-broaching // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2008. № 2. P. 70–71.

УДК 620.17: 539.52: 539:374

Жеребцов Ю.В., Самойлова А.Ю., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТОВЫХ ФОРМОВОК ПРЯМОУГОЛЬНЫХ МЕМБРАН ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Явление структурной сверхпластичности (СП) наблюдается в микрокристаллических материалах со средним размером зерен менее 10 мкм в очень узком диапазоне температур и скоростей деформаций [1,2]. Особенностью структурной СП является универсальный характер этого явления: установлено, что широкий круг поликристаллических материалов может быть переведен в состояние структурной СП путем соответствующей подготовки структуры материала, основной целью которой является измельчение зерен до среднего размера 10 мкм и менее [2]. Обработка металлов давлением в состоянии СП позволяет не только добиться получения изделий с минимальным припуском на дальнейшую механическую обработку, но еще и обеспечить в получаемых деталях необходимый уровень функциональных и эксплуатационных свойств [1–3]. Использование СП при обработке металлов давлением во многих случаях обеспечивает снижение деформирующих усилий, повышение коэффициента использования металла, уменьшение числа технологических переходов и улучшение качества деформируемых полуфабрикатов, что обуславливает значительный интерес к изучению этого явления. В этой связи актуальной задачей становится разработка математических моделей технологических процессов обработки давлением микрокристаллических материалов, основанных на постановке и решении краевых задач механики СП.

В последние годы, в связи с бурным развитием информационных технологий, средств вычислительной техники и программного обеспечения, кардинально расширились возможности использования методов компьютерного моделирования. В результате в большинстве организаций и предприятий уже имеются современные программные средства от известных разработчиков, такие как ANSYS, ABAQUS, MARC, DEFORM и др. Таким образом, построение компьютерных моделей технологических процессов сводится сегодня, по сути, к обычным пользовательским процедурам и не представляет серьезной проблемы для квалифицированного инженера-программиста.

Ключевым звеном в постановке краевой задачи являются определяющие соотношения – законы связи между напряжениями и деформациями, которые замыкают систему уравнений, составляющих начальную краевую задачу механики. По этой причине недостаточно просто взять готовый программный продукт, например MARC, и на этом основании считать проблему построения адекватных моделей технологических процессов практически решенной. И дело не только в том, что необходимо выбрать конкретный вариант постановки краевой задачи механики СП, что само по себе имеет довольно большое, но не определяющее значение. Гораздо более важно осуществить рациональный выбор модели материала и методов ее идентификации. Результатом идентификации выбранной модели материала является набор материальных констант, характеризующих сверхпластические свойства обрабатываемого материала, который вводится в среду имеющегося в распоряжении программного продукта при проведении практических расчетов наряду с граничными условиями, ответственными за приложенные к обрабатываемому телу нагрузки и перемещения.

Основной особенностью реологического поведения сверхпластичного материала считается его повышенная чувствительность к скорости деформации ξ , которую характеризуют величиной параметра скоростной чувствительности m , входящего в стандартную степенную модель СП:

$$\sigma = K \xi^m, \quad (1)$$

где σ – напряжение течения; K – параметр материала, зависящий от среднего размера зерен и других структурных характеристик [1, 2]. Границы СП течения определяют обычно из условия $m > 0,3$. К сожалению, в литературе пока не предложена единая стандартизованная методика определения значений K и m по результатам одноосных испытаний [4]. Соответственно пока не изданы справочники, в которых приводились бы значения этих параметров даже для самых распро-

страненных материалов, например промышленных сплавов на основе железа, титана, магния, никеля и др., не говоря уже о перспективных материалах, таких как керамики, интерметаллиды, композитные материалы и металлические стекла.

Интерес к изучению уникального явления структурной СП значительно усилился в последние годы в связи с развитием методов получения объемных ультрамелкозернистых материалов, имеющих субмикрористаллическую (со средним размером зерен d менее 1 мкм) и нанокристаллическую ($d < 0,1$ мкм) структуру [5]. Исследования показывают, что ультрамелкозернистые материалы проявляют уникальные свойства и уже начинают находить практическое применение в опытно-промышленных технологиях получения некоторых изделий для медицины и микроустройств. Для материалов, имеющих ультрамелкозернистую микроструктуру, особое значение приобретает необходимость учета возможного влияния роста зерен на их реологическое поведение [6]. Как следствие, возникает проблема выбора и идентификации определяющих соотношений, учитывающих возможное влияние роста зерен на реологическое поведение ультрамелкозернистых материалов в процессах обработки давлением. Включение такого рода определяющих соотношений в постановку краевых задач механики СП позволит строить эффективные компьютерные модели технологических процессов обработки металлов давлением в состоянии СП [7–9], которые могут быть решены с использованием современного сертифицированного программного обеспечения, такого как пакеты MARC, ANSYS, ABAQUS, DEFORM и т.п.

В тех случаях, когда в расчетах необходимо принять во внимание возможное влияние роста зерен, на практике довольно часто используют следующее обобщение реологического закона (1):

$$\sigma = K' \xi^{m'} \varepsilon^n, \quad (2)$$

где ε – степень деформации; n – так называемый показатель деформационного упрочнения материала, ответственный за учет влияния роста зерен на реологическое поведение микрористаллических материалов, деформируемых в режиме СП. Авторами работ [7–9] предложен подход к построению компьютерных моделей технологических процессов сверхпластического формообразования ультрамелкозернистых материалов, включающий в себя учет влияния роста зерен в рамках соотношения (2), которое входит в стандартную библиотеку программного комплекса ANSYS. В этих работах приведены примеры конкретных численных расчетов в среде программного комплекса ANSYS, однако недостаточное внимание уделено описанию использованных при этом методик идентификации модели материала (2). Данная публикация призвана восполнить этот пробел.

Целью настоящей работы является разработка и практическая реализация методики определения постоянных материала K' , m' и n , входящих в уравнение (2), по результатам тестовых формовок длинных узких прямоугольных мембран при постоянном давлении.

Общая схема подхода к идентификации определяющих соотношений СП по результатам технологиче-

ских экспериментов предложена в работах [4, 10]. Данный подход реализован авторами работы [11], в которой предложена методика идентификации определяющего соотношения (1) по результатам тестовых формовок прямоугольных мембран при постоянном давлении. Методика основана на использовании упрощенной инженерной модели процесса сверхпластической формовки листового проката в прямоугольную матрицу, предложенную авторами работ [12, 13], которая построена в рамках основных предположений безмоментной теории оболочек. Применимость этой упрощенной модели обоснована путем прямого сопоставления результатов аналитических расчетов с экспериментальными данными [12, 13] и соответствующими численными решениями краевой задачи механики СП [14].

Пусть s_0, s – исходная и текущая толщина листа соответственно; W, D – полуширина и глубина матрицы соответственно; R – текущий радиус оболочки, ψ – угол, проведенный из центра кривизны к границе оболочки. Далее предполагается, что длина матрицы много больше ее ширины, и $D \leq W$. Тогда из несжимаемости $R\psi = s_0 W$, откуда, учитывая, что $R = W/\sin\psi$, следует, что $s = s_0 \sin\psi/\psi$. Принимая во внимание, что каждое волокно листа, имевшее в начальный момент времени длину W , растянуто в текущий момент времени в $R\psi/W = \psi/\sin\psi$ раз, легко видеть, что соответствующая физическая компонента тензора скоростей деформаций $\xi_z = (1/R\psi) d(R\psi)/dt = d\psi/dt (1/\psi - \text{ctg}\psi)$. Поскольку деформация вдоль оси мембраны отсутствует, $\xi_x = 0$, поэтому из несжимаемости третья физическая компонента тензора скоростей деформаций $\xi_n = -\xi_z$. Тогда интенсивность скоростей деформаций ξ_e и накопленная деформация ε_e равны:

$$\xi_e = \sqrt{\frac{2}{3} \xi_{ij} \xi_{ij}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot \left(\frac{1}{\psi} - \text{ctg}\psi \right);$$

$$\varepsilon_e = \int_0^t \xi_e dt = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\psi}{\sin\psi}. \quad (3)$$

Для анализа напряженного состояния в деформируемом листе используем основные положения безмоментной теории оболочек, в соответствии с которыми отличными от нуля являются только две компоненты тензора напряжений Коши: тангенциальная σ_t и продольная σ_z . Два уравнения равновесия могут быть записаны в виде

$$\frac{\sigma_z}{\rho_z} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{s}; \quad \sigma_z = \frac{p\rho_t}{s} \cdot \left(1 - \frac{\rho_t}{2\rho_z} \right), \quad (4)$$

где ρ_z, ρ_t – главные радиусы кривизны оболочки; p – давление газа. Учитывая, что в данном случае $\rho_t = R = W/\sin\psi$, $\rho_z = \infty$, из выражений (4) следует

$$\sigma_t = \frac{pR}{s} = \frac{pW}{s \cdot \sin\psi}; \quad \sigma_z = \frac{pR}{2s} = \frac{pW}{2s \cdot \sin\psi}. \quad (5)$$

Тогда интенсивность напряжений σ_e равна по определению [1]

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{pR}{s} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{pW}{s_0} \cdot \frac{\psi}{\sin^2 \psi}, \quad (6)$$

где S_{ij} – компоненты девиатора напряжений.

Подставляя выражения (3) и (6) в определяющее соотношение (2), находим

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{pW}{s_0} \cdot \frac{\psi}{\sin^2 \psi} = \\ &= K' \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot \left(\frac{1}{\psi} - \text{ctg} \psi \right) \right]^{m'} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\psi}{\sin \psi} \right)^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь значение ψ изменяется в пределах $0 \leq \psi \leq \psi_{\max} = 2 \arctg(D/W)$, где D – глубина матрицы.

Выражение (7) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение относительно неизвестной функции $\psi(t)$, которое может быть проинтегрировано численными методами для заданного закона подачи давления $p=p(t)$. Авторами работы [7] проанализированы режимы деформирования прямоугольной мембраны при постоянном давлении и постоянной скорости деформации.

Для режима деформирования при постоянном давлении газа решение (7) может быть представлено в квадратурах:

$$\begin{aligned} t \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{pW}{K' s_0} \right)^{1/m'} &= I_{m',n}(\psi) = \\ &= \int_0^\psi \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{x} - \text{ctg} x \right) \left(\frac{\sin^2 x}{x} \right)^{1/m'} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{x}{\sin x} \right)^{n/m'} dx, \end{aligned} \quad (9)$$

где для краткости записи введено обозначение $I_{m',n}(\psi)$. Рассмотрим методы определения постоянных материала K' , m' и n , основанные на использовании выражения (9).

Идентификация по минимальному набору входных данных

Пусть t_1, t_2 – продолжительность формовки листа до одинаковой глубины $D_1=D_2$ при давлении газа p_1, p_2 соответственно. Тогда из (9) следует, что величина параметра m' может быть рассчитана по формуле

$$m' = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(t_2/t_1)}. \quad (10)$$

Заметим, что выражение (10) совпадает с аналогичными выражениями для случаев формовки в прямоугольную и цилиндрическую матрицы, полученные авторами работ [11–13] и [15,16] соответственно.

Пусть t_3 – продолжительность формовки листа до глубины $D_3 \neq D_1$ при давлении газа $p_3=p_1$. Тогда из (9) следует, что должно выполняться условие

$$\frac{t_3}{t_1} = \frac{I_{m',n}(\psi_3)}{I_{m',n}(\psi_1)}, \quad (11)$$

где $\psi_1=2\arctg(D_1/W)$, $\psi_3=2\arctg(D_3/W)$. Уравнение (11) может быть решено относительно неизвестного n численными методами. Наконец, значение постоянной K' может быть вычислено по формуле

$$K'_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{p_i W}{s_0} \cdot \left[\frac{t_i}{I_{m',n}(\psi_i)} \right]^{m'}, \quad i=1, 2, 3. \quad (12)$$

Очевидно, что в пределах точности вычислений должно выполняться условие $K'_1 \cong K'_2 \cong K'_3$.

Таким образом, минимальный набор данных, необходимый для идентификации определяющего соотношения (2), включает в себя следующие три измерения:

Продолжительность формовки t_1 при давлении газа p_1 до глубины D_1 .

Продолжительность формовки t_2 при давлении газа p_2 до глубины $D_2=D_1$.

Продолжительность формовки t_3 при давлении газа $p_3=p_1$ до глубины $D_3 \neq D_1$.

Идентификация по расширенному набору входных данных

Если в распоряжении имеется более обширный набор входных данных, возникает проблема выбора метода их обработки. Как отмечают авторы работы [16], методика выбора опорной точки, использованная авторами работ [11, 17], приводит к тому, что задача оптимизации решается для более узкого класса функций, и найденное в итоге решение не обязательно будет совпадать с оптимальным. По этой причине авторы работы [16] предложили процедуру оптимизации, которую они условно назвали «метод организации внешнего цикла». В работе [16] этот метод применен для определения значений постоянных K и m по результатам тестовых формовок полусфер при постоянном давлении. Авторы работы [18] распространили указанную процедуру на случай идентификации модели материала (2) по результатам тестовых формовок полусфер при постоянном давлении. Ниже излагается процедура организации внешнего цикла для случая формовки листового проката в матрицы прямоугольной формы.

Общая идея подхода основана на минимизации отклонений расчетных значений продолжительности формовки от результатов измерений. Пусть имеется следующий набор входных данных: $\{p_k, t_k, D_k\}$, $k=1, 2, \dots, N$. Здесь t_k – продолжительность формовки оболочки в матрицу глубиной D_k при постоянном давлении газа p_k . Назовем этот набор *полным* набором входных данных. При его обработке можно поступить по аналогии с тем, как это обычно делается при расшифровке данных одноосных экспериментов на растяжение, а именно сделать своего рода «срез» при некотором конкретном значении деформации ϵ . В данном случае выделим из полного набора следующую выборку данных, соответствующих одной и той же глубине матрицы D_j : $\{p_i, t_i\}$, $i=1, 2, \dots, N_j$. Назовем эту выборку *расширенным* набором входных данных, соответствующим глубине матрицы D_j : $\{p_i, t_i\}$, $i=1, 2, \dots, N_j$.

Авторами работы [18] предложена двухэтапная процедура идентификации определяющего соотношения (2) по результатам тестовых формовок полусфер при

постоянном давлении. При обработке результатов изменений продолжительности формовки в прямоугольную матрицу можно поступить аналогичным образом. Процедура идентификации разбивается на два этапа. На первом этапе, исходя из вида определяющих соотношений (1) и (2), принимается, что $m=m'$ и $K=K'\varepsilon^n$. Другими словами, на первом этапе идентификации модели (2) можно «забыть» на время о том, что мы имеем дело с моделью вида $\sigma=K'\xi^{m'}\varepsilon^n$ и рассмотреть задачу идентификации более простой модели вида $\sigma=K\xi^m$ по заданному набору значений продолжительности формовки листа в прямоугольную матрицу глубины $D=D_j$ по расширенному набору входных данных $\{p_i, t_i\}$, $i=1, 2, \dots, N_j$. Эта задача уже решена авторами работы [11]. Однако в работе [11] использована процедура введения опорной точки, что, как уже отмечено выше, сужает класс функций, на которых ищется оптимальное решение. Поэтому в данном случае рекомендуется ввести в рассмотрение следующую целевую функцию:

$$\Lambda(K, m) = \sum_{i=1}^{N_j} \left\{ t_i^m - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{K s_0}{p_i W} \cdot [I_m(\psi)]^m \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $I_m(\psi)$ определяется выражением (9) при $n=0$ для $\psi=2\arctg(D_j/W)$. Для минимизации целевой функции (13) применим процедуру внешнего цикла, предложенную в работе [16].

Предположим, что величина параметра m известна. Тогда целевая функция $\Lambda(K, m)$ становится функцией одной переменной K , обозначим ее через $L(K)$. Из необходимого условия экстремума функции $dL/dK=0$ легко получить следующее выражение для постоянной K :

$$K(m) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} t_i^m / p_i}{\sum_{i=1}^{N_j} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s_0}{p_i W} \right) \cdot [I_m(\psi)]^m}, \quad (14)$$

где введено обозначение $K(m)$ с целью подчеркнуть то обстоятельство, что минимум функции $L(K)$ определен при известном значении m ; обозначим его через $L_{\min}(m)$. Если теперь организовать цикл по m в интервале $[0, 1]$ с некоторым шагом, скажем, 0,001, то можно вычислить соответствующие значения $K(m)$, $L_{\min}(m)$. Если теперь построить функцию $L_{\min}(m)$, то можно убедиться в том, что она имеет локальный минимум на отрезке $[0, 1]$. После этого можно ввести в программу любую известную из литературы процедуру безусловной скалярной оптимизации применительно к функции $L_{\min}(m)$, например метод половинного деления, золотого сечения, Фибоначчи, квадратичной интерполяции и т.д. и т.п. В результате получим программное средство, реализующее процедуру минимизации целевой функции $\Lambda(K, m)$.

На выходе из процедуры внешнего цикла будут получены значения постоянных m и K . При этом следует иметь в виду, что значение постоянной m будет получено точное, однако в результате осуществления указанной выше процедуры будет получено некото-

рое усредненное значение K , которое не следует использовать в дальнейших расчетах. В то же время для материала с нулевым деформационным упрочнением (при $n=0$) значение K будет определено корректно.

После того как значение $m=m'$ найдено, необходимо определить величину параметра n . Для этого уже недостаточно расширенного набора входных данных $\{p_i, t_i\}$, $i=1, 2, \dots, N_j$. Необходимо использовать хотя бы одну дополнительную точку при другом значении деформации, т.е. продолжительность формовки до другой глубины матрицы, отличной от D_j . Пусть $\psi_0=2\arctg(D_0/W)$ – значение параметра ψ , соответствующее формовке листа до глубины $D_0 \neq D_j$. Тогда из выражения (9) следует, что для всех точек расширенного набора должно выполняться условие

$$\frac{t_0}{t_i} = \frac{I_{m',n}(\psi_0)}{I_{m',n}(\psi_i)}, \quad i=1, 2, \dots, N_j, \quad (15)$$

где t_0 – продолжительность формовки листа в матрицу глубиной $D_0 \neq D_j$. Как вариант, можно использовать условие

$$\sum_{i=1}^{N_j} \left[\frac{t_0}{t_i} - \frac{I_{m',n}(\psi_0)}{I_{m',n}(\psi_i)} \right]^2 \rightarrow \min. \quad (15')$$

Значение постоянной n находится путем численного решения (15).

После того как значения постоянных m' и n определены, остается найти значение постоянной K' . С этой целью можно рассмотреть следующую целевую функцию:

$$\Psi(K') = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \left\{ t_i^{m'} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{K' s_0}{p_i W} \cdot [I_{m',n}(\psi_i)]^{m'} \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

где значения m' и n уже известны. Необходимое условие минимума функции $\Psi(K')$ имеет вид: $d\Psi/dK'=0$. Из этого условия следует, что

$$K' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{W}{s_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_j} t_i^{m'} \cdot [I_{m',n}(\psi_i)]^{m'} / p_i}{\sum_{i=1}^{N_j} [I_{m',n}(\psi_i)]^{2m'} / p_i^2}, \quad (17)$$

где для расширенного набора $\psi_i=2\arctg(D_j/W)$, $I_{m'}(\psi)$ из (9).

Тестирование методики

Прежде чем новую методику идентификации применить к анализу экспериментальных данных, необходимо ее протестировать. С этой целью выбирают значения материальных констант из области разумных и генерируют отклик виртуального материала, по которому затем решают обратную задачу определения материальных констант.

Сначала проведем тестирование методики идентификации по минимальному набору данных. Предположим, что значения материальных констант для некоторого материала известны; например, выберем в качестве этих значений те, которые сообщены в работе [19] для промышленного титанового сплава Ti-6Al-4V: $K'=3737,259 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$, $m'=0,757$ и $n=0,234$. Используем этот набор констант для того, чтобы сгенерировать отклик Ti-6Al-4V по формуле (9). В расчетах примем для определенности, что $W=15 \text{ мм}$, $s_0=1 \text{ мм}$, $D_2=D_1=15 \text{ мм}$ и $D_3=10 \text{ мм}$. Используя указанные выше значения, сгенерируем минимальный набор псевдоэкспериментальных данных, для чего проведем численные расчеты по формуле (9):

A. $t_1=2830 \text{ с}$ при давлении газа $p_1=0,2 \text{ МПа}$ до глубины $D_1=15 \text{ мм}$.

B. $t_2=844 \text{ с}$ при давлении газа $p_2=0,5 \text{ МПа}$ до глубины $D_2=D_1=15 \text{ мм}$.

C. $t_3=1180 \text{ с}$ при давлении газа $p_3=p_1$ до глубины $D_3=10 \text{ мм}$.

Теперь «забудем» о том, что значения материальных констант нам известны и определим их в соответствии с описанной выше методикой. По формуле (10) находим, что $m'=\ln(p_1/p_2)/\ln(t_2/t_1)=0,7573$. После этого из условия (11) находим значение $n=0,2342$ (уравнение (11) было решено методом золотого сечения). Наконец, по формулам (12) находим значение третьей постоянной, K' . По всем трем формулам получаем значение $K'=3749 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$. Теперь можно «вспомнить» о том, что ответ нам известен ($K'=3737,259 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$, $m'=0,757$ и $n=0,234$) и сравнить его с результатом идентификации ($K'=3749 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$, $m'=0,7573$ и $n=0,2342$). В результате приходим к выводу о том, что предложенная методика работоспособна.

Для тестирования методики идентификации модели материала (2) по расширенному набору данных воспользуемся результатами работы [20], в которой приведены следующие данные для промышленного алюминиевого сплава AA 5083: $s_0=1,22 \text{ мм}$, средний размер зерен $d=6,6 \text{ мкм}$, $K'=159,50 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$, $m'=0,39$ и $n=0,088$. Вычислим продолжительность формовки листа из сплава AA 5083 толщиной $s_0=1,22 \text{ мм}$ в матрицу полуширины $W=15 \text{ мм}$. Расчеты по формуле (9) показывают, что при давлении газа, равном 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 МПа, продолжительность формовки оказалась равной соответственно 8403, 1421, 502,4, 240,3, 135,6 с. Одна дополнительная точка, необходимая для определения параметра деформационного упрочнения: продолжительность формовки алюминиевого листа в матрицу полушириной $W=15 \text{ мм}$ до глубины $D=10 \text{ мм}$ при давлении $p=0,4 \text{ МПа}$ равна 211,9 с.

Снова «забудем», что материальные константы алюминиевого сплава AA5083 нам известны и найдем их по сгенерированному расширенному набору. Проводя процедуру внешнего цикла, основанную на минимизации целевой функции (13), находим, что $m=0,390$ и $K=141,83 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$. Заметим, что значение m определено верно, а значение K действительно является некоторым усредненным параметром, который

Продолжительность тестовых формовок листов с исходной толщиной 1 мм в матрицу размерами 120×30 мм из сплава ВТ6 при температуре 900°С [11]

Давление газа, МПа	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Время формовки, с (D=10 мм)	935	524	313	215	171
Время формовки, с (D=15 мм)	2550	1290	940	594	400

не следует использовать в дальнейших расчетах. При известном $m=0,390$ из выражения (15) находим, что $n=0,0881$. Наконец, по формуле (17) вычисляем значение постоянной $K'=159,54 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$. Таким образом, в результате идентификации получен набор констант $K'=159,54 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$, $m'=0,390$, $n=0,0881$, который достаточно близок к тому, который был использован при генерации отклика виртуального материала: $K'=159,50 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-m}$, $m'=0,39$, $n=0,088$.

После того как работоспособность предложенных методик проверена на тестовых объектах, используем их для идентификации модели материала (2) по экспериментальным данным, приведенным в **таблице**.

Для идентификации по минимальному набору данных выберем следующие значения:

A. $t_1=2550 \text{ с}$ при давлении газа $p_1=1,0 \text{ МПа}$ до глубины $D_1=15 \text{ мм}$.

B. $t_2=1290 \text{ с}$ при давлении газа $p_2=1,2 \text{ МПа}$ до глубины $D_2=D_1=15 \text{ мм}$.

C. $t_3=524 \text{ с}$ при давлении газа $p_3=p_2$ до глубины $D_3=10 \text{ мм}$.

В результате получим: $m'=0,422$; $n=0,130$; $K'=510,6 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$. Эти значения были введены в среду ANSYS при проведении численных расчетов авторами работ [7–9].

Для идентификации по расширенному набору данных выберем значения, соответствующие глубине матрицы $D=15 \text{ мм}$. По этим значениям находим $m'=0,460$. Если использовать в качестве дополнительной точки значение $t_0=524 \text{ с}$ при давлении газа $p_0=0,8 \text{ МПа}$, то в результате идентификации находим, что $n=0,1456$, $K'=724 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$. Эти значения были использованы в численных расчетах авторами работы [7]. Если вместо выражения (15) использовать его обобщение в форме (15'), то в результате идентификации находим следующий набор констант: $m'=0,460$; $n=0,207$ и $K'=783 \text{ МПа}\cdot\text{с}^m$.

Таким образом, предложенные в настоящей работе методики идентификации модели материала $\sigma=K'\xi^m\epsilon^n$ могут быть использованы для определения значений постоянных материала K' , m' , n по результатам тестовых формовок листового материала в прямоугольные матрицы при постоянном давлении. Минимальный набор данных включает в себя два измерения при разных давлениях до одной и той же глубины и одно дополнительное измерение продолжительности формовки в матрицу другой глубины. Если имеется более расширенный набор входных данных, предлагаемая методика позволяет получить однозначный результат по всему набору.

Список литературы

- Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
- Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
- Мастеров В.А., Берковский В.С. Теория пластической деформации и обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1989. 400 с.
- Padmanabhan K.A., Vasin R.A., Enekeev F.U. Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 2001. 363 p.
- Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. М.: Наука, 2007.
- Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Перспективы применения наноструктурных титановых сплавов в машиностроении // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 1. С. 69–72.
- Аюпов И.Ф., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У. Влияние роста зерен на режимы деформирования протяженной прямоугольной мембраны в состоянии сверхпластичности // Металлообработка. 2010. № 4. С. 22–27.
- Компьютерное моделирование процессов сверхпластической формовки ультратонких листовых материалов / Жеребцов Ю.В., Загиров Т.М., Аюпов И.Ф., Еникеев Ф.У. // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. 2010. № 2(47). С. 3–7.
- Никитин М.С., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У. Расчет режимов нагружения сварных листовых заготовок в режиме сверхпластичности с учетом влияния роста зерен на реологическое поведение перспективных конструкционных материалов // Технология машиностроения. 2010. № 8. С. 5–10.
- Об идентификации определяющих соотношений по результатам технологических экспериментов / Васин Р.А., Еникеев Ф.У., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 2. С. 111–123.
- Сафиуллин Р.В., Еникеев Ф.У., Мухаметрахимов М.М. Методика определения величины параметра скоростной чувствительности и тонколистных сверхпластичных материалов по результатам тестовых формовок при постоянном давлении // Заводская лаборатория. 1999. № 12. С. 41–46.
- Vasin R.A., Enekeev F.U. and Safiullin R.V. Mathematical Modeling of Superplastic Forming of a Long Rectangular Box Section // Mater. Sci. Forum, 304–306 (1999), 765–770.
- Сафиуллин Р.В., Еникеев Ф.У. Расчет режимов сверхпластической формовки протяженной прямоугольной мембраны // Кузнечно-штампочное производство. 2001. № 3. С. 35–40.
- Mathematical modeling of the superplastic forming of a long rectangular sheet / Vasin R.A., Enekeev F.U., Tokuda M., Safiullin R.V. // Int. J. Non-linear Mechanics. 2003. Vol. 35. P. 799–807.
- Enekeev F.U. and Kruglov A.A. An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm // International Journal of Mechanical Sciences. 1995. Vol. 37. No. 5. P. 473–483.
- Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Идентификация реологических параметров сверхпластичности по результатам тестовых формовок листовых материалов при постоянном давлении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. № 9. С. 48–56.
- Еникеев Ф.У. К определению величины порогового напряжения для сверхпластичных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. № 7. С. 39–42.
- Методика экспериментального определения реологических свойств микрокристаллических материалов по результатам технологических экспериментов / Загиров Т.М., Каримов М.С., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 65–74.
- Giuliano G. Constitutive equation for superplastic Ti–6Al–4V alloy // Materials and Design. 2008; 29:1330–33.
- Luckey Jr. S.G., Friedman P.A., Weinmann K.J. Correlation of

finite element analysis to superplastic forming experiments // Journal of Materials Processing Technology. 194 (2007), 30–37.

Bibliography

- Smirnov O.M. Superplastic metal working techniques. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 184 p.
- Kaibyshev O.A. Superplasticity of commercial alloys. Moscow, Metallurgy, 1984. 264 p.
- Masterov V.A., Berkovski V.S. Theory of plastic deformation and metal working. Moscow: Metallurgy, 1989. 400 p.
- Padmanabhan K.A., Vasin R.A., Enekeev F.U., Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 2001. 363 p.
- Valiev R.Z., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials: manufacturing, structure and properties. Moscow: Nauka, 2007.
- Kruglov A.A., Lutfullin R.Ya. Practical applications of nanostructured titanium alloys in mechanical engineering // Problems in Mechanical Engineering and Reliability of Machines. 2009. No. 1. P. 69–72.
- Ayupov I.F., Zagirov T.M., Enekeev F.U. Influence of grain growth on the superplastic regimes of loading of a long rectangular membrane // Metalworking. 2010. No. 4. P. 22–27.
- Computer simulation of superplastic forming processes of ultrafinegrain sheets / Zherebtsov Yu.V., Zagirov T.M., Ayupov I.F., Enekeev F.U. // Metal working. Technology. Equipment. Instruments. 2010. No. 2(47). P. 3–7.
- Nikitin M.S., Zagirov T.M., Enekeev F.U. Computation of the regimes of loading for superplastic forming of welded envelopes taking into account the influence of grain growth of the rheological behavior of advanced structural materials // Technology of Mechanical Engineering. 2010. No. 8. P. 5–10.
- Determination of material constants from technological experiments / Vasin R.A., Enekeev F.U., Kruglov A.A., Safiullin R.V. // Proceeding of Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids. 2003. No. 2. pp. 111–123.
- Safiullin R.V., Enekeev F.U., Muhametrahimov M.M. Method of determining the strain rate sensitivity of superplastic sheet materials from the results of constant pressure trials // Plant Laboratory. 1999. No. 12. P. 41–46.
- Vasin R.A., Enekeev F.U. and Safiullin R.V. Mathematical Modeling of Superplastic Forming of a Long Rectangular Box Section // Mater. Sci. Forum, 304–306 (1999), 765–770.
- Safiullin R.V., Enekeev F.U. Computation of the loading regimes for superplastic forming of a rectangular sheet // Press-forging. 2001. No. 3. P. 35–40.
- Mathematical modeling of the superplastic forming of a long rectangular sheet / Vasin R.A., Enekeev F.U., Tokuda M., Safiullin R.V. // Int. J. Non-linear Mechanics. 2003. Vol. 35. P. 799–807.
- Enekeev F.U. and Kruglov A.A. An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm // International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 37. No. 5. P. 473–483 (1995).
- Zagirov T.M., Kruglov A.A., Enekeev F.U. Determination of rheological superplastic properties from the results of constant pressure forming // Plant Laboratory. Diagnostics of Materials. 2010. No. 9. P. 48–56.
- Enekeev F.U. Determination of the threshold stress in superplastic materials // Plant Laboratory. Diagnostics of Materials. 2002. No. 7. P. 39–42.
- Method of determining the rheological properties of microcrystalline materials from technological experiments / Zagirov T.M., Karimov M.S., Kruglov A.A., Enekeev F.U. // Problems of Mechanical Engineering and Automation. 2010. No. 2. P. 65–74.
- Giuliano G. Constitutive equation for superplastic Ti–6Al–4V alloy // Materials and Design. 2008; 29:1330–33.
- Luckey Jr. S.G., Friedman P.A., Weinmann K.J. Correlation of finite element analysis to superplastic forming experiments // Journal of Materials Processing Technology. 194 (2007), 30–37.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 669.14.018.291.3

Наливайко А.В., Стеблов А.Б., Тулупов О.Н., Кинзин Д.И.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА АРМАТУРНОЙ СТАЛИ И ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СЛИТТИНГ-ПРОЦЕССА В УСЛОВИЯХ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МИНИ-ЗАВОДА

Металлургический мини-завод ГУП «ЛПЗ» в г. Ярцево Смоленской области был построен по решению Правительства г. Москвы для удовлетворения потребностей в строительной арматуре столицы и ЦФО. Сегодня в Московский регион импортируется до 170 тыс. т арматуры в месяц. Поставщиками арматурной стали для строек Москвы в основном являются ОАО «Северсталь», ОАО «ЗСМК», ОАО «ММК», Белорусский и Молдавский металлургические заводы. Удаленность поставщиков увеличивает рыночную стоимость арматуры. Используя основные принципы проектирования типового мини-завода, основанного на утилизации собираемого в регионе металлического лома, завод уже в 2009 году отгрузил потребителям более 197 тыс. т арматуры класса А500С диаметром 12–25 мм по СТО АСЧМ 7-93. Вся номенклатура продукции сертифицирована в системе «Мосстрой-сертификация».

Сталеплавильный комплекс завода способен выплавить и разлить до 220 тыс. т заготовки в год. Сталь выплавляется в электродуговой печи ДСП-30 с эркерным выпуском (мощность трансформатора 25МВА). Масса выпускаемого металла 30–32 т. Длительность плавки 60 мин. Сырьем служит подготовленный лом черных металлов, поставляемый с территории Смоленской обл. После выплавки сталь корректируется по химическому составу и температуре в агрегате ковш-печь АПК-30. Мощность трансформатора 8 МВА. Длительность обработки стали 45 мин. Непрерывнолитая заготовка (НЛЗ) из стали СтЗсп по ГОСТ 380 разливается на двухручьевого МНЛЗ радиального типа. Базовый радиус машины 7000 мм. Рабочая скорость разливки стали СтЗсп на заготовку сечением 125×125 мм – 2,7 м/мин. Качество заготовки обеспечивается в соответствии с требованиями ТУ 0885-01-70067945–2007.

Производство арматуры на заводе осуществляется методом горячей прокатки на 18-клетьевом стане 280 из квадратной заготовки сечением 125×125 мм длиной от 4000 до 12000 мм. Заготовка собственного производства разливается на 2-ручьевого МНЛЗ радиального типа в соответствии с требованиями ТУ 0885-01-70067945-2007 из низкоуглеродистой стали, по химическому составу аналогичной марке СтЗсп по ГОСТ 380. После выхода из чистой клетки арматура проходит последующее упрочнение на класс прочности А500С на установке 12-секционной установке

термоупрочнения. Длина установки 25 м, расход воды до 150 м³/ч при давлении 1,6 МПа.

В целях совершенствования технологии производства, повышения уровня механических и потребительских свойств арматуры была выполнена работа по количественной оценке влияния параметров сквозной технологии на качество проката*.

Для условий ГУП «ЛПЗ» разработан комплексный критерий оценки качества арматурной стали, который в процессе развития технологии на заводе адаптируется, уточняется и совершенствуется.

Комплексная оценка $P_o = \gamma(\bar{X})$, где \bar{X} – вектор параметров технологического процесса, рассчитывается как совокупность (P_{ij}) на любом уровне иерархии (j) по известному в квалиметрии выражению

$$P_o = \prod P_{ij}, \quad (1)$$

$0 \leq i \leq m$, m – число уровней; $1 \leq j \leq n$, n – число показателей качества.

Под P_{ij} понимается вероятность попадания i -го показателя на j -м уровне в заданный нормативным документом (ГОСТ или ТУ) интервал регламентированных значений, например q_{ij} – показатель предела текучести на j -м уровне (механические свойства). Заданный интервал $K^{(H)}$ и $K^{(B)}$ – нижняя и верхняя граница показателя качества.

В случае нормального распределения дифференциальная оценка качества проката равна вероятности попадания в интервал $K^{(H)}$ и $K^{(B)}$, определяемая по формуле

$$P_{ij} = \text{вер} (K^{(H)} \leq Q \leq K^{(B)}) = F(K^{(H)}) - F(K^{(B)}), \quad (2)$$

Учитывая, что дифференциальная оценка единичного показателя качества готового проката принята в форме вероятности попадания в заданное поле допуска, комплексная оценка рассчитывается как произведение вероятности событий при их независимости. Теоретически возможна ситуация, когда низкая дифференциальная оценка перекрывается при расчете комплексного показателя другим единичным показателем вероятности соответствия, которого базовому показателю близка к 1.

* Стеблов А.Б., Наливайко А.В., Тулупов О.Н. Анализ уровня технологии производства арматуры класса А500С на ГУП ЛПЗ г. Ярцево // Металлург. 2010. № 8. С. 68–73.

В этом случае комплексная оценка будет необъективно высокой. Чтобы предупредить такую ситуацию, вводится «коэффициент Вето» (W), который при определённых условиях обращает комплексный показатель в ноль. Коэффициент Вето применяется как множитель и имеет два значения 0 и 1.

Для определения величины коэффициента Вето принято обозначение (R) – количество металла со значением данного показателя за пределами требований стандарта. [R] – предельно допустимое значение R.

В случае двухстороннего нормирования границ

$$W = 1, \text{ если } R_{i,j,n} \leq [R]_{i,j,n} \text{ и } R_{i,j,v} \leq [R]_{i,j,v};$$

$$W = 0, \text{ если } R_{i,j,n} > [R]_{i,j,n} \text{ и } R_{i,j,v} > [R]_{i,j,v}. \quad (3)$$

Тогда

$$P_o = \prod \prod (P_{ij} W_{ij}). \quad (4)$$

Каждый единичный показатель качества – это скалярная свёртка векторного критерия показателя качества \bar{q} , полученного на основе вероятностно-статистического метода. При этом каждый единичный показатель, как и качество проката в целом, формируется под воздействием множества технологических факторов. Зачастую различные факторы влияют на конкретный показатель диаметрально противоположно. Поэтому нахождение критериев управления комплексным критерием качества – это поиск компромиссных решений. Влияние параметров технологии на величину показателя качества носит стохастический характер.

Качество продукции в целом P_o определяется совокупностью показателей q_i на j -м уровне. Требования к качеству арматурного проката класса А500С из стали Ст Зсп по ГОСТ 380 определены нормативным документом СТО СЧМ 7-93. Иерархическая совокупность показателей качества для арматурной стали приведена в **таблице**, где:

- $i=0$ q_0 – качество продукции в целом;
- $i=1$ $q_{1.1}$ – качество металла;
- $q_{1.2}$ – качество поверхности;
- $q_{1.3}$ – качество геометрических размеров;
- $i=2$ $q_{2.1}$ – качество марки стали;
- $q_{2.2}$ – механические свойства готового проката;
- $q_{2.3}$ – испытания на свариваемость (служебные свойства);
- $q_{2.4}$ – испытания на коррозионную стойкость (служебные свойства);
- $q_{2.5}$ – качество поверхности, образующей профиль;
- $q_{2.6}$ – отклонение от заданной мерной длины,

- $\pm \Delta$ мм;
- $q_{2.7}$ – отклонение от номинального диаметра, $\pm \Delta$ мм;
- $i=3$ $q_{3.1}$ – $q_{3.9}$ – содержание химических элементов, %, соответственно (C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo, Cu);
- $q_{3.10}$ – $q_{3.19}$ – отклонение химического состава от заданных пределов по ГОСТ 380, соответственно (C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo, Cu);
- $q_{3.20}$ – $q_{3.23}$ – результаты испытаний на растяжение, соответственно (σ_t , σ_b , δ_5 , δ_p);
- $q_{3.24}$ – результаты испытаний на ударную вязкость;
- $q_{3.25}$ – результаты испытаний на холодный изгиб;
- $q_{2.26}$ – $q_{2.32}$ – качество поверхности по показателям (раскатанные загрязнения, трещина, плена, закат, риска, отпечаток, вкатанная окалина);
- $q_{3.33}$ – отклонение заданных размеров геометрии поперечного сечения (высота ребра, $\pm \Delta$ мм);
- $i=4$ $q_{4.1}$ – отклонение от номинала по массе погонного метра, \pm кг.

Иерархическая совокупность показателей качества продукции составлена с учётом всех требований, предъявляемых к арматурному прокату класса А500С из стали Ст Зсп.

Химический состав стали $q_{3.1}$ – $q_{3.9}$ не относится к показателям качества, а является квалификационным, следовательно, эти показатели при расчёте комплексного показателя не используются. Качество поверхности, образующей профиль $q_{2.5}$, на показатели качества $q_{3.26}$ – $q_{3.32}$ третьего уровня раскладывать нецелесообразно, так как стандарт оговаривает только глубину дефекта, а не его природу. Разложение на третьем уровне необходимо, если оценка окажется ниже допускаемой. Таким образом, выражение (4) для комплексной оценки качества в целом приобретает вид:

$$P_o = \prod \prod (P_{ij} W_{ij}); i, j = 3.1-3.9, 3.26-3.32 \quad (5)$$

при $P_{ij} = F(K_{ij}^{(B)}) - F(K_{ij}^{(H)})$ и

$$W = 1, \text{ если } R_{i,j,n} \leq [R]_{i,j,n} \text{ и } R_{i,j,v} \leq [R]_{i,j,v};$$

$$W = 0, \text{ если } R_{i,j,n} > [R]_{i,j,n} \text{ и } R_{i,j,v} > [R]_{i,j,v}. \quad (6)$$

Допускаемые значения комплексного критерия (комплексная оценка) могут быть получены при подстановке в (2) $W = 1$ и значений $[p]_{ij}$.

Комплексный критерий P_o позволяет оптимизировать параметры технологии производства проката. Для определения конкретного вида функции вполне очевидным является использование выражения (4), согласно которому вычисление дифференциальной оценки и вероятности выхода за границы поля допуска предшествуют определению величины P_o , поэтому сначала определяются зависимости

$$P_{ij} = \gamma_{ij}(\bar{X}), P_{ij} = \varphi_{ij}(\bar{X}), W_{ij} = \omega_{ij}(\bar{X}). \quad (7)$$

Поскольку P_{ij} есть вероятность попадания в интервал $[K_{ij}^{(H)}, K_{ij}^{(B)}]$, то её величина зависит от параметров $p = f(\bar{Q}, S, K^{(H)}, K^{(B)})$.

$K^{(H)}$ и $K^{(B)}$ в конкретных условиях есть величины постоянные, \bar{Q} и S изменяются в зависимости от параметров технологии. Статистический анализ совокупности дифференциальных показателей качества и параметров технологии

Иерархическая совокупность показателей качества

$i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
		$q_{2.1}$	$q_{3.1}$ – $q_{3.9}$ $q_{3.10}$ – $q_{3.19}$	
	$q_{1.1}$	$q_{2.2}$	$q_{3.20}$ – $q_{3.23}$ $q_{3.24}$ $q_{3.25}$	
q_0		$q_{2.3}$ $q_{2.4}$		
	$q_{1.2}$	$q_{2.5}$	$q_{3.26}$ – $q_{3.32}$	
	$q_{1.3}$	$q_{2.6}$		
		$q_{2.7}$	$q_{3.33}$	$q_{4.1}$

Клеть	Заготовка 125x125					Клеть
Зог.						
1 Н						10 Н
2 V						11 Н
3 Н						12 Н
4 V						13 Н
5 Н						14 Н
6 V						15 Н
7 Н						16 Н
8 Н						17 Н
9 Н						18 Н
			N12	N14	N10	

Разработанная схема калибровки с использованием слиттинг-процесса

$$\bar{Q} = a_0 + \sum_{z=1}^M a_z x_z \quad \text{и} \quad S = b_0 + \sum_{z=1}^M b_z x_z, \quad (8)$$

где a и b – коэффициенты регрессии, x_z – параметры технологии.

По составленным уравнениям регрессии (8) получаем связь P_{ij} , R_{ij} и W_{ij} с параметрами технологии x_z . Найденные таким образом зависимости позволяют получить искомую функцию $P_o = \gamma(\bar{X})$, т.е. основное уравнение связи комплексного критерия качества с

параметрами технологического процесса:

- дифференциальные оценки качества определяются таким образом, что разные по своей природе и измеренные разными физическими величинами свойства можно сравнивать между собой, т.е. приводятся к одной шкале;
- комплексная оценка вычисляется по дифференциальным с использованием определённых зависимостей с учетом весомости (важности) свойств. Комплекс полученных уравнений (8) является основой математической модели для определения параметров технологии, обеспечивающих выполнение заданного комплексного критерия качества продукции (5).

Учитывая планируемое увеличение объема производства стали за счет проектируемого второго сталеплавильного комплекса ГУП «ЛПЗ» с целью повышения производительности и расширения сортамента стана было решено рассмотреть технологию слиттинга (прокатки с разделением).

Известно, что показатель $q_{2.4}$ – испытания на коррозионную стойкость по данным НИИЖБ на арматуре, прокатанной в одну нитку значительно выше, чем при прокатке методом продольного разделения (слиттинг). За базовый показатель, равный 1, был взят экспериментальный показатель по коррозионной стойкости арматуры, прокатанной без использования технологии слиттинга. Расчётные значения подтверждают данные НИИЖБ. Так, при разделении раската на 3 продольных полосы коррозионная стойкость может ухудшиться в среднем на 30–40% в сравнении с прокаткой заготовки в одну «нитку». При разделении раската на 2 полосы расчётный показатель «коррозионная стойкость» может ухудшиться в 8–15 раз.

Анализ разработанного комплексного показателя качества показал, что при использовании слиттинг-процесса наилучшее качество обеспечивается при разделении раската на 3 части. Исходя из этого была разработана соответствующая калибровка валков для прокатки арматуры № 10, 12 и 14 слиттинг-процессом (см. рисунок). Данная калибровка позволяет освоить производство профиля № 10 и повысить производительность стана на 60 и 40% при прокатке арматуры № 12 и 14 соответственно.

УДК 658.562

Моллер А.Б., Лимарев А.С., Логинова И.В.

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ*

Развитие современных металлургических комплексов предполагает внедрение эффективных СМК и корпоративных информационных систем. Данная задача актуальна как для действующих металлургических компаний, где она решается поэтапно на основе опыта и

сложившихся производственно-технологических схем, так и для вновь образующихся предприятий [1, 2]. Чтобы обеспечить запланированную эффективность системы менеджмента качества уровень квалификации персонала должен соответствовать высоким требованиям механизации и автоматизации производства. Согласно требованиям стандартов серии ИСО 9000 персонал является главным ресурсом в системе менеджмента каче-

* Работа выполнена в рамках НИР по Государственному контракту № 02.740.11.0422 от 30.09.2009 г.

ства, поскольку факторы, создающие условия для обеспечения и улучшения качества, в первую очередь не технические, а социальные. Поэтому высшему руководству организаций, ориентированных на долговременное функционирование, необходимо заботиться о воспроизводстве интеллектуального потенциала человеческих ресурсов своей компании.

Характеристика качества профессиональной подготовки персонала может быть представлена с использованием количественных показателей. Сбор такого рода информации, особенно в части получения качественных характеристик, затруднен и требует специальных длительных исследований. Чаще на практике используется упрощенный подход, когда качественная характеристика трудового потенциала ограничивается данными, отражающими образовательный и квалификационный уровни, наличие специальной профессиональной подготовки и ее продолжительность, половозрастной состав. Одним из вариантов системы показателей трудового потенциала коллектива является использование комплексного показателя оценки компетентности персонала.

На основании анализа существующего комплексного показателя компетентности для работников высших учебных заведений [3] и результатов экспертного опроса был сформирован новый критерий (критерий компетентности) для оценки уровня квалификации технологического персонала металлургических предприятий [4]. Данный показатель позволяет комплексно подойти к оценке компетентности персонала промышленного предприятия с учетом особенностей отдельных работников. Согласно предложенной и усовершенствованной методике все коэффициенты, кроме коэффициента образования, перемножаются между собой, демонстрируя при этом совокупный эффект соответствующих показателей.

Коэффициент образования рассчитывается как средний балл по документу об образовании. Он вынесен отдельно от остальных коэффициентов, так как образование – это база компетентности, которую человек получает по окончании учебного заведения.

$$K_k = K_{об} + K_{оп} K_{п} K_{м} K_{т} K_{л}, \quad (1)$$

где $K_{об}$, $K_{оп}$, $K_{п}$, $K_{м}$, $K_{т}$, $K_{л}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно образование, опыт работы, подготовленность, мастерство, творчество и лидерские навыки.

Значение $K_{об}$ для отдельного работника условно постоянно ввиду того, что его можно повысить только посредством получения еще одного образования по тому же направлению, но уровнем выше. В случаях наличия одного образования у работника $K_{об}$ рассчитывается на основании документа об образовании и остается неизменным для конкретного работника, в то время как остальные коэффициенты показателя компетентности могут изменяться в процессе трудовой деятельности человека.

Таким образом, при оценке персонала учитывается несколько факторов, в результате недостаток одного показателя становится возможным компенсировать

улучшением другого. Методика также подразумевает разделение работников на категории: рабочие, инженерно-технические работники (ИТР) и руководители.

Согласно общепринятой практике оценка различных параметров производится по пятибалльной шкале. Применим данный подход к выбранному показателю качества в отношении составляющих его коэффициентов. Тогда если сотрудник отвечает требованиям к занимаемой должности, то коэффициенты показателя компетентности будут больше либо равны 3 баллам (базовое значение), что традиционно характеризуется как «удовлетворительно». Соответственно в идеальном случае значения коэффициентов должны стремиться к 5 баллам.

Опыт работы имеет большое значение для компетентности работника, так как позволяет получить определенные навыки и накопить существенный объем знаний. Данный показатель будем учитывать с помощью коэффициента $K_{оп}$. Значение показателя определяется, исходя из стажа работы по специальности (табл. 1).

Согласно мировой практике рабочими профессиями принятые сотрудники овладевают примерно за один год. Они могут не знать отдельных тонкостей работы и не успеть столкнуться с нестандартными производственными задачами, однако основные навыки получают. Соответственно базовому значению коэффициента опыта для рабочих соответствует стаж работы один год. В должностных инструкциях руководящих специалистов многих промышленных предприятий оговаривается стаж работы по специальности на инженерно-технической должности кандидата на должность руководителя. Он составляет 5 лет. Выберем такой стаж работы за базовый для ИТР и руководителей. Максимальная оценка коэффициента будет соответствовать среднему сроку работы сотрудника на предприятии – 20 лет. В случае если стаж работы больше 20 лет, то каждый последующий год стажа увеличивает значение $K_{оп}$ на 0,01.

Подготовка. Обучение персонала производится с целью систематического развития работников и повышения их компетентности в соответствии с научно-техническим прогрессом, расширения кругозора и повышения удовлетворенности трудом, обеспечения продвижения по службе и обеспечения потребности предприятия в кадрах за счет внутреннего рынка труда.

Согласно требованиям стандартов ИСО 9000 организация должна постоянно повышать компетентность персонала для сохранения возможности выпуска качественной продукции. Степень подготовки оценивается показателем $K_{п}$. Значение показателя определяется в зависимости от длительности пройденного курса подготовки (табл. 2). При прохождении работником нескольких курсов подготовки определя-

Таблица 1
Значения коэффициента $K_{оп}$

Стаж работы	Значение коэффициента		
	Рабочие	ИТР	Руководители
1	3	1	1
3	3,5	2	2
5	4	3	3
10	4,5	4	4
15	4,75	4,5	4,5
20	5	5	5

Таблица 2

Значения коэффициента K_n для одного курса подготовки

Вид подготовки	Значение коэффициента
Менее 100 ч	2
100–500 ч	3
500–1000 ч	4
Свыше 1000 ч	5

ется общая длительность курсов и соответствующее значение коэффициента подготовки. Причем в расчет принимаются подтверждающие обучение документы за последние 5 лет.

Уровень мастерства важен при определении возможности персонала развивать новые способности к конкретной работе.

Он подразумевает наличие

навыков, приобретаемых во время работы, способность оперативного решения стандартных производственных задач. Для оценки уровня мастерства используется показатель K_m , который определяется согласно систематической аттестации на соответствие занимаемой должности. Аттестация персонала подразумевает проверку знаний должностных инструкций, требований по технике безопасности, инструкций по охране труда, организации системы менеджмента. По результатам аттестации работнику выставляется оценка в процентах или баллах. В зависимости от используемой шкалы осуществляется перевод выставленных оценок в значение коэффициента мастерства по пятибалльной шкале.

Способность к творчеству. Творческий потенциал персонала – это ресурс организации, способный приносить прибыль. Организация должна определять способы сбора и анализа творческих идей и обмена знаниями между сотрудниками. Например, возможно проведение научно-технических конференций и опубликование сборников статей. Также на предприятии должна существовать опытная лаборатория для проведения научных исследований работниками. Если руководство пренебрегает знаниями работников, это может породить у последних ощущение невостребованности. В итоге люди начинают явно или скрыто игнорировать в работе интересы компании, стремятся заняться собственными делами, причем часто за счет предприятия. Некоторые вообще могут покинуть его, унеся с собой перспективные для фирмы знания [5].

Для оценки творческой активности сотрудников применяется показатель K_t . При участии сотрудника в научно-исследовательской деятельности значение коэффициента увеличивается в зависимости от творческих успехов $K_t = 1 + K_{t1} + K_{t2} + K_{t3} + \dots + K_{tn}$.

В табл. 3 представлены значения коэффициентов для различных видов творческой деятельности.

При оценке коэффициента творческой активности в расчет принимаются данные за последние 5 лет.

Лидерские навыки человека связаны в первую очередь с его психологическими особенностями, а именно: темпераментом, самооценкой, поведением в конфликте, самоконтролем. Опыт ведущих организаций мира, в том числе и ОАО «ММК», показывает значимость психологических тестов при назначении кандидата на определенную должность. В связи с этим коэффициент лидерских навыков K_l будем оценивать по результатам психологического теста, который работники проходят при приеме на работу, а

также повторно при необходимости. Однако лидерские качества важны для руководящих должностей. Поэтому для данной группы работников результаты психологического теста необходимо через пропорцию пересчитывать в соответствии с пятибалльной шкалой. Оценка лидерских качеств персонала, не связанного с организаторской деятельностью, пересчитывается на шкалу 0–2 и к полученной оценке прибавляется 3. В таком случае общий показатель компетентности работников, занимающих рабочие должности, при отсутствии лидерских навыков не уменьшает свое базовое значение. Коэффициент лидерства рассчитывается следующим образом:

$$K_l = T + 3^*, \quad (2)$$

где T – оценка психологического теста ($T_{\text{псих}}=5$ для работников, связанных с организаторской деятельностью, и $T_{\text{псих}}=2$ – для остальных); * – для персонала, не связанного с организаторской деятельностью.

В условиях производства для выполнения разного рода задач требуется различный набор компетенций. Так, к примеру, для рабочего персонала более важны показатели мастерства и опыта, для специалистов технологических служб существенное значение имеет творческая составляющая, а для руководителей одним из главных параметров, наряду с другими, являются лидерские навыки. В предложенном коэффициенте компетентности (1) значимость всех показателей одинакова. Это снижает утилитарность оценки компетентности персонала с использованием выбранной методики.

Поскольку для различных групп персонала требуется разный набор компетенций, на следующем этапе исследований были введены показатели весомости коэффициентов. Это дает возможность расширить

Таблица 3

Значение коэффициента при различных видах творческой деятельности

Вид творческой деятельности	Значение коэффициента	
	Рабочие	ИТР и руководители
Публикация статьи в сборнике трудов	1,0	0,5
Публикация статьи в центральном журнале	1,5	1,0
Участие в региональной конференции	1,6	1,2
Участие в международной конференции	1,7	1,8
Участие в международном конкурсе («Металл-Экспо» и т.д.): бронзовая медаль		1,5
серебряная медаль		2,0
золотая медаль		2,5
Подача заявки на изобретение		1,5
Получение патента		2,0
Внедрение изобретения		2,5
Внедрение рацпредложений		2,0

границы использования критерия компетентности в рамках металлургического предприятия и повышает эффективность оценки квалификации сотрудников. В квалиметрии принято, что то или иное свойство, находящееся на любом уровне рассмотрения, необходимо и достаточно определяется двумя числовыми параметрами – весомостью и оценкой. Весомость служит мерой важности отдельных свойств и отражает тот факт, что при увеличении оценок различных свойств на одну и ту же величину комплексное свойство может измениться неодинаково для обоих показателей. Относительная оценка служит мерой качества отдельного свойства, рассматриваемого вне связи со всем комплексом свойств объекта. Уровень образования является базой, которая дополняется остальными компетенциями, приобретаемыми в процессе профессиональной деятельности, поэтому весомость данного показателя равна суммарной весомости остальных. Для учета значимости остальных показателей в формулу (1) добавлены коэффициенты весомости w_i . Таким образом, коэффициент компетентности приобретает следующий вид:

$$K_k = K_{об} + K_{оп}^{w_1} K_{п}^{w_2} K_{м}^{w_3} K_{т}^{w_4} K_{л}^{w_5}. \quad (3)$$

С точки зрения практического использования разработанной методики существенное значение имеет простота использования и адаптивность к конкретным производственным задачам. При оценке квалификации персонала важно, чтобы кадровые службы любого металлургического предприятия могли самостоятельно назначать значения коэффициентов весомости исходя из своих потребностей. Поэтому для определения значений коэффициентов весомости показателей компетентности был выбран метод предельных и номинальных значений:

$$w_i = \frac{1/(Q_i^h - Q_i^{pp})}{\sum_{i=1}^n [1/(Q_i^h - Q_i^{pp})]}, \quad (4)$$

где Q_i^h – номинальное значение показателя Q_i ; Q_i^{pp} – предельное значение показателя Q_i .

В качестве предельного значения принимается максимально возможное значение показателя компетентности. В предлагаемой методике это значение равняется 5. Номинальное значение выбирается кад-

ровыми службами предприятия в соответствии с квалификационными требованиями к конкретной должности. Следует отметить, что при использовании этого метода комплексное свойство коэффициента компетентности не изменяется, поскольку весомость всех показателей удовлетворяет равенству

$$\sum_{i=1}^5 w_i = 1. \quad (5)$$

В качестве примера была проведена оценка компетентности персонала ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» с использованием квалиметрических методов. Квалиметрическая оценка компетентности персонала произведена на основе дифференциального метода для определения относительных показателей компетентности персонала. Применительно к персоналу он показывает, как фактический уровень компетентности соотносится с базовым, который в данном случае рассматривается как требуемый:

$$q_i = \frac{P_i}{P_i^6}. \quad (6)$$

Здесь P_i – это текущее значение комплексного показателя компетентности. Уровень компетентности (P_i^6) определим из условия, что все коэффициенты показателя компетентности соответствуют базовому значению, то есть равны 3:

$$P_i^6 = 3 + 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 246.$$

Квалиметрическая оценка компетентности персонала по формуле (6) подразумевает степень достижения работником минимального уровня компетентности. В данном случае применительно к персоналу она показывает, как фактический уровень компетентности соотносится с базовым (в данном случае допустимым) уровнем компетентности персонала (табл. 4).

Квалиметрическая оценка компетентности персонала по формуле (6) подразумевает степень достижения работником минимально достаточного уровня компетентности. То есть в случае достаточной компетентности $q_i \geq 1$. Чтобы определить, насколько высока оценка того или иного работника, сравним ее с максимальным значением относительного показателя (см. табл. 4). q_i^{\max} находим, исходя из случая, при котором текущее значение комплексного показателя компетентности максимально, то есть все его коэффициенты в формуле равны 5.

Согласно представленной методике произвели оценку компетентности персонала завода металлургической отрасли, проводившего дополнительное образование работников на базе МГТУ им. Г.И. Носова по программе «Новые решения в оборудовании и технологии сортопрокатного производства». Выборочные результаты оценки для работников одного из цехов (рабочих и руководителей) приведены в табл. 5. Значения коэффициентов в столбцах 2–7 определены со-

Таблица 4

Показатели квалиметрической оценки компетентности персонала

Относительный показатель компетентности персонала	Базовое значение показателя компетентности	Наилучшее значение показателя компетентности	Максимальное значение относительного показателя компетентности персонала
$q_i = \frac{P_i}{P_i^6}$	$P_i^6 = 246$	$P_i^{\max} = 3130$	$q_i^{\max} = \frac{P_i^{\max}}{P_i^6} = 12,72$

Таблица 5

Квалиметрическая оценка компетентности персонала

Категория работника	K_o	$K_{оп}$	$K_{п}$	$K_{м}$	$K_{т}$	$K_{т}$	K_k	q_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рабочий	3,50	4,40	2,00	3,90	1,00	3,43	121,22	0,49
Рабочий	4,20	4,70	3,00	3,10	2,50	3,12	345,14	1,40
Рабочий	4,20	3,75	2,00	3,40	1,00	3,87	102,89	0,42
Рабочий	4,20	4,30	3,00	4,60	2,00	3,64	436,20	1,77
Рабочий	3,85	4,72	4,00	4,20	2,60	4,20	869,76	3,54
Рабочий	3,85	4,00	3,00	3,70	2,00	3,51	315,54	1,28
Рабочий	4,20	3,00	1,00	4,50	1,00	4,14	60,09	0,24
Рабочий	4,20	3,50	2,00	3,70	1,00	4,56	122,30	0,50
Рабочий	4,20	3,50	2,00	4,60	2,00	3,83	250,85	1,02
Рабочий	3,50	4,72	5,00	3,40	4,60	4,06	1502,06	6,11
Рабочий	3,50	2,50	1,00	3,90	1,00	3,94	41,92	0,17
Руководитель	4,85	4,75	4,00	4,20	3,50	3,65	1024,30	4,16
Руководитель	4,85	4,40	4,00	4,35	4,80	4,10	1511,55	6,14
Руководитель	4,85	4,75	4,00	4,60	4,70	2,97	1224,87	4,98
Руководитель	4,85	4,50	4,00	4,60	3,40	4,34	1226,65	4,99
Среднее значение	4,19	4,10	2,93	4,05	2,47	3,82	610,35	2,48

Примечание. $q_i^{max} = 12,72$.

гласно описанной выше методике, показатель компетентности (столбец 8) рассчитан по формуле (1), q_i и q_i^{max} (столбец 9, примечание) – согласно формуле (3) (см. табл. 4).

Общий анализ табл. 5 позволяет сделать следующие выводы:

- 10 из 15 работников цеха имеют уровень компетентности, соответствующий базовому, в том числе 6 рабочих и 4 руководителя, при этом 5 человек не достигают достаточного уровня, что требует принятия решения о целесообразности их обучения и определения затрат времени и средств на это обучение;
- наибольшее значение относительного показателя 6,14, что соответствует 48,3% от максимального возможного значения показателя.

Наименьшие значения имеют коэффициенты творческих способностей K_t и подготовки $K_{п}$. Для повышения общего уровня образования и развития творческих способностей сотрудников следует выделять средства на организацию курсов подготовки и повышения квалификации, причем во время обучения следует освобождать сотрудников от работы для более эффективного процесса обучения.

Оценка компетентности персонала описанным

методом позволяет определить достаточность квалификации вновь принимаемых работников, сотрудников, назначаемых на определенные должности, а также организовать систему непрерывного повышения компетентности, включающей планомерное формирование бюджета с целью постоянного обеспечения необходимого уровня качества профессиональной подготовки персонала. Таким образом, при оценке персонала учитывается несколько факторов, в результате недостаток одного показателя становится возможным компенсировать улучшением другого. Данной методике присущи следующие свойства:

- адаптивность – позволяет устанавливать значение показателей в зависимости от необходимых требований компетентности;
- простота – возможность учета комплекса факторов без трудоемких операций с помощью единого числового значения на основании документов, что позволяет объективно сравнивать сотрудников;
- соответствие требованиям международных стандартов международных ИСО серии 9000 к системам менеджмента качества.

Список литературы

1. Швец В. Е. Человеческий фактор в системах менеджмента качества // Деловое совершенство. 2006. № 6. С. 6–9.
2. Концепция построения современных моделей прокатки на сортовых станах / А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.С. Лимарев, Д.В. Назаров // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С. 64–67.
3. Пронин А.М., Штриков Б.Л. Компетентность персонала в образовательной деятельности // Методы менеджмента качества. 2006. № 9. С. 31–34.
4. Тулупов О.Н., Лимарев А.С., Моллер А.Б. Повышение конкурентоспособности производства посредством эффективного управления качеством подготовки кадров // Сталь. 2009. № 3. С. 84–85.
5. Соловьев Е. Управляешь знаниями – управляешь миром // Методы менеджмента качества. 2006. № 4.

Bibliography

1. Shvets V.E. Human factor in quality management systems // Business perfection. 2006. No 6. P. 6–9.
2. The concept of developing modern rolling models on section mills / A.B. Moller, O.N. Tulupov, A.S. Limarev, D.V. Nazarov // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2007. No 1. P. 64–67.
3. Pronin A.M., Shtrikov B.L. Personnel competence in educational activity // Quality management methods. 2006. No 9. P. 31–34.
4. Tulupov O.N., Limarev A.S., Moller A.B. Increase of production competitiveness through effective quality control of personnel training // Steel. 2009. No 3. P. 84–85.
5. Solovyev E. Manage the knowledge – manage the world // Quality management methods. 2006. No 4. Solovyev E. Manage the knowledge – manage the world // Quality management methods. 2006. No 4.

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313

Мугалимов Р.Г.

КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Повышение энергоэффективности промышленных предприятий является одной из приоритетных задач российской экономики. В различных отраслях промышленности РФ для вращения рабочих машин, агрегатов и промышленных установок используется не менее 150 млн штук традиционных асинхронных двигателей (ТАД) мощностью от 0,25 до 315 кВт на номинальное напряжение до 1000 В, частотой 50 Гц. Эти электродвигатели потребляют до 80% вырабатываемой в стране электрической энергии. На рис. 1 представлены диаграммы распределения ТАД: по механизмам в промышленности; по мощности и потребляемой электроэнергии.

Следует отметить, что 75–80% электроприводов на основе применения ТАД являются нерегулируемыми. Из анализа диаграммы (рис. 1, б), следует, что электроприводы на основе ТАД мощностью до 100 кВт потребляют около 92% всей электроэнергии.

Несмотря на высокую надежность и небольшие эксплуатационные затраты, ТАД обладают невысокой энергоэффективностью. В частности, они потребляют из электросети от 25 до 40% реактивного тока и реактивной энергии индуктивного характера. Реактивная энергия в механическую энергию не преобразуется. Реактивный ток в системах электроснабжения создает дополнительное падение напряжения и увеличивает потери активной электрической энергии. Номинальный

электрический КПД η_n ТАД, в зависимости от номинальной мощности P_{2n} и частоты вращения, составляет 70–92%, коэффициент мощности $\cos\varphi_n$ не превышает 0,8–0,92, энергетический КПД, равный произведению $\eta_{эн} = \eta_n \cdot \cos\varphi_n$, в лучшем случае, находится в диапазоне 56–82%. На рис. 2 представлены зависимости этих показателей в функции от номинальной мощности.

Анализ энергетических показателей ТАД (см. рис. 2), свидетельствует о том, что в среднем от 18 до 60% потребляемой асинхронными электроприводами электрической энергии в полезную работу не превращается, причем, чем меньше мощность и частота вращения двигателя, тем меньше энергетический КПД.

При эксплуатации ТАД по различным причинам они выходят из строя и поступают на капитальный ремонт. Опыт эксплуатации показывает, что до 70% ТАД поступает на ремонт по причине выхода из строя обмотки статора. Ремонт обмотки статора осуществляют специализированные электроремонтные предприятия, цехи, участки, как правило, по обмоточным данным завода-изготовителя. Некоторые ТАД за свой срок службы проходят до 4–7 ремонтов. От ремонта к ремонту по различным причинам рабочие, механические и энергосберегающие характеристики ТАД ухудшаются, то есть они становятся энергорасточительными. В этих случаях приходится двигатель или эксплуатировать с меньшей нагрузкой, или компенсировать убытки, вызванные потерями энергии, или сдавать в лом и покупать новый. Это экономически не выгодно.

Известная концепция повышения энергоэффективности электрооборудования переменного тока, в том числе и ТАД, основанная на явлении резонанса токов в электрической цепи, заключается в компенсации реактивного тока индуктивного характера реактивным током емкостного характера. На практике реализация этой концепции осуществляется путем подключения параллельно к рабо-

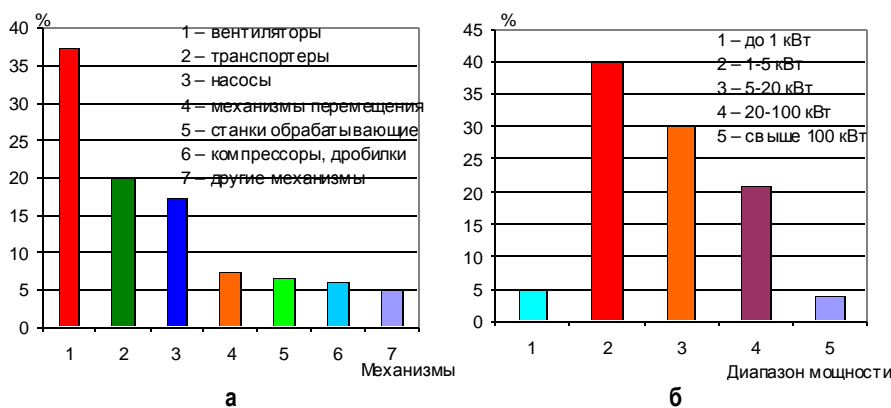


Рис. 1. Диаграммы распределения ТАД

по механизмам в промышленности и (а) и по мощности и потребляемой электроэнергии (б)

тающему ТАД или трехфазной конденсаторной батареи, или статического компенсатора реактивной мощности, или создание электропривода по системе ПЧ-АД, ТРН-АД. Особенностью этих технических решений является то, что компенсация реактивного тока происходит в кабеле, питающем электродвигатель, и системе электроснабжения. При этом энергетические показатели ТАД практически не изменяются. Кроме того, в системах ПЧ-АД, ТРН-АД энергетические показатели собственно двигателя снижаются дополнительно на 3–7% из-за высших гармонических составляющих токов [1]. Экономический эффект от систем ПЧ-АД, ТРН-АД достигается, преимущественно, за счет уменьшения потребления электрической энергии путем регулирования механической мощности двигателя изменением частоты вращения вала в соответствии с технологической нагрузкой рабочей машины.

В данной работе предлагается новая концепция повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов, основанная на известной концепции, однако отличающаяся от нее тем, что вместо явления электрического резонанса токов, характерного для электрических цепей, используется явление феррорезонанса токов в конкретных электромагнитных системах, содержащих электротехническую сталь. Техническая реализация новой концепции, применительно к асинхронным двигателям, заключается в том, что компенсирующий конденсатор подключается к одной из трехфазных обмоток асинхронного двигателя, связанной через электромагнитное поле с другими его трехфазными обмотками. Такое техническое решение позволяет использовать электротехническую сталь электрической машины для значительного увеличения эффекта компенсации реактивного тока индуктивного характера небольшим реактивным током емкостного характера. В предлагаемой концепции компенсация реактивного тока происходит в электромагнитной системе и это, кроме уменьшения потребляемого тока, ведет к улучшению других показателей энергоэффективности двигателя. При оптимальном подборе параметров электромагнитной системы и компенсирующего конденсатора достигается коэффициент мощности, равный единице, и повышение КПД двигателя.

Техническое решение, позволяющее реализовать новую концепцию, изложено в патенте [2]. Конструктивно новый энергоэффективный асинхронный двигатель (ЭАД) отличается от ТАД наличием на статоре двух трехфазных обмоток, одна из которых включается в трехфазную электросеть, а другая – на трехфазный конденсатор определенной емкости. В отличие от ТАД, оптимально спроектированный ЭАД в установившихся режимах работы не потребляет из электросети реактивные ток и

мощность. Он работает с $\cos\varphi=1,0$. Энергетический КПД ЭАД составляет не менее 80–93%, что на 13–20% выше энергетического КПД ТАД [2, 3].

Изложенная концепция и техническое решение могут быть реализованы путем создания новых ЭАД в условиях электромашиностроительных предприятий или путем модернизации ТАД в электроремонтных предприятиях при капитальном ремонте их обмоток статора без изменения магнитной системы. Это позволит, кроме получения после ремонта энергосберегающего асинхронного двигателя, сохранить материальные ресурсы – дорогостоящую электротехническую сталь, конструктивные элементы машины, которые, как правило, имеют многократные запасы по своим характеристикам, а также сберечь вложенные в них и в создание электрической машины трудозатраты.

Первый путь предусматривает проектирование и создание нового асинхронного двигателя. Этот путь изложен в публикации [4]. В данной работе предлагается путь модернизации ТАД в электроремонтных предприятиях. Для реализации этого пути разработаны методика электромагнитного пересчета параметров ТАД на параметры ЭАД и технология реконструкции, предусматривающая использование уже созданной ферромагнитной системы двигателя.

Сущность разработанной методики электромагнитного пересчета параметров ТАД на параметры ЭАД поясняется блок-схемой на рис. 3.

В блоке 1 вводятся номинальные данные реконструируемого ТАД и создаваемого ЭАД; $F_{1ТАД}$, мм² – площадь паза, занимаемая медью обмотки статора; $F_{1ЭАД}$, $F_{3ЭАД}$, мм² – площади паза, занимаемые медью рабочей и компенсационной обмоток; $F_{и.1,3}$, мм² – площадь паза, занимаемая изоляцией между рабочей и компенсационной обмотками; $k_{31}=W_3/W_1$ – коэффициент трансформации между обмотками статора; $k_{ТЭ}=W_{1ТАД}/W_{1ЭАД}$ – отношение чисел витков обмотки статора ТАД и рабочей обмотки ЭАД. В блоках 2, 3 рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения ТАД, обмоточные данные ЭАД. В блоке 4 проверяется условие $F_{1ЭАД}+F_{3ЭАД} \leq F_{1ТАД}$. Если условие не

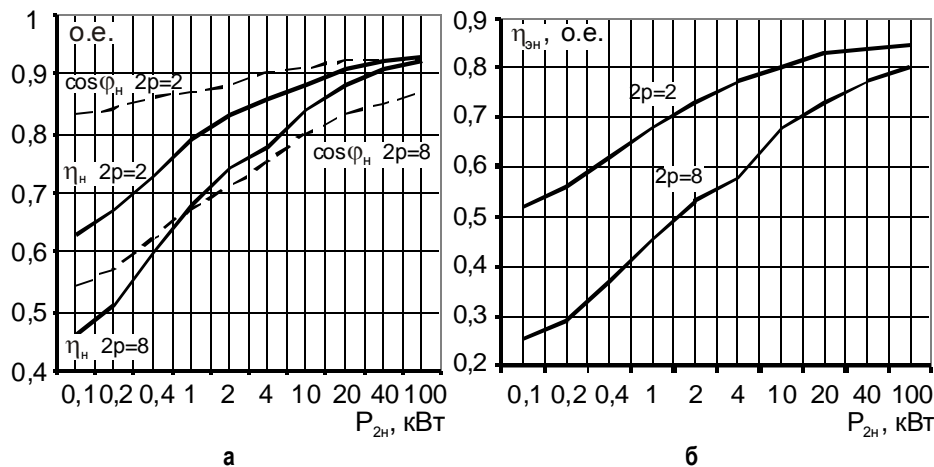


Рис. 2. Энергетические показатели ТАД в зависимости от номинальной мощности: а – номинальные КПД и коэффициент мощности; б – номинальный энергетический КПД

удовлетворяется – необходимо изменить входные параметры: k_{31} и диаметры обмоточных проводов. В блоке 5 проверяется условие $J_{1,3} \leq J_{доп}$, $J_{1,3}$ – плотность тока в рабочей и компенсационной обмотках, $J_{доп}$ – допустимая плотность тока. Если условие не выполняется – изменяются параметры рабочей обмотки (РО) и компенсационной обмотки (КО). В блоке 6 проверяется условие $A_{1,3} \leq A_{доп}$, $A_{1,3}$ – линейная токовая нагрузка статора ЭАД, $A_{доп}$ – допустимая линейная токовая нагрузка статора. Линейная токовая нагрузка статора ЭАД рассчитывается по формуле [5]

$$A_{1,3} = \frac{10N_{п1}Z_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} \sqrt{(I_{1на} + I'_{3а})^2 + (I_{1нр} + I'_{3р})^2},$$

где $I_{1на}$, $I_{1нр}$ – активная и реактивная составляющие

тока рабочей обмотки при номинальной нагрузке двигателя; $I'_{3а}$, $I'_{3р}$ – активная и реактивная составляющие тока компенсационной обмотки, приведенного к рабочей обмотке статора; Z_1 – число пазов статора; $N_{п1}$ – число проводников в пазах статора; D_1 – внутренний диаметр статора, мм; a_1 – число параллельных ветвей обмоток статора.

Если условие $A_{1,3} \leq A_{доп}$ не выполняется – изменяются параметры РО и КО. В блоке 7 рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения ЭАД по формулам [6]:

$$\begin{aligned} Z_{1ЭАД} &= R_{1ЭАД} + jX_{1ЭАД}; \\ R_{1ЭАД} &= \frac{R_{1ТАД} (F_{1ТАД} - F_{и1,3})}{k_{ТЭ}^2 (F_{1ТАД} - F_{3ЭАД})}; \\ X_{1ЭАД} &= \frac{X_{1ТАД} (h_{1ТАД} - h_{3ЭАД})}{k_{ТЭ}^2 h_{1ТАД}}; \\ Z'_{3ЭАД} &= R'_{3ЭАД} + j(X'_{3ЭАД} - X'_{С3}); \\ R'_{3ЭАД} &= \frac{R_{1ТАД} (F_{1ТАД} - F_{и1,3})}{k_{31}^2 F_{3ЭАД}}; \\ X'_{3ЭАД} &= \frac{X_{1ТАД} (h_{1ТАД} - h_{1ЭАД})}{k_{31}^2 h_{1ТАД}}, \end{aligned}$$

где $Z_{1ЭАД}$, $Z'_{3ЭАД}$ – комплексные сопротивления рабочей и компенсационной обмоток ЭАД; $h_{1ТАД}$ – высота паза статора ТАД; $h_{3ТАД}$ – высота паза, занимаемая компенсационной обмоткой ЭАД; $h_{1ЭАД}$ – высота паза, занимаемая рабочей обмоткой ЭАД.

В блоке 8 рассчитываются параметры ветви намагничивания ЭАД $Z_{мЭАД}$ по формуле [6]:

$$\begin{aligned} Z_{мЭАД} &= 2(Z_{нЭАД} - Z_{1ЭАД})Z_{тТАД}Z_{нТАД} \times \\ &\times 1 / \left[2(Z_{нТАД} - Z_{1ТАД})Z_{нЭАД}k_{ТЭ} - \right. \\ &\left. - k_{ТЭ}Z_{тТАД}Z_{нЭАД} + Z_{тТАД}Z_{нТАД} \right], \end{aligned}$$

где $Z_{нТАД}$, $Z_{нЭАД}$ – комплексные номинальные сопротивления ТАД и ЭАД; $Z_{1ТАД}$, $Z_{тТАД}$ – комплексные сопротивления обмотки статора и ветви намагничивания ТАД.

В блоке 9 осуществляется расчет емкостного сопротивления и емкости компенсирующего конденсатора для получения двигателя с желаемым $\cos\phi_{ж}$ по формулам:

$$\begin{aligned} X'_{С3} &= -\frac{B}{4A} + \frac{\pm_1 W \pm_2 \sqrt{-\left(3\alpha + 2y \pm_1 \frac{2\beta}{W}\right)}}{2}; \\ C'_3 &= \frac{1}{2\pi f X'_{С3}}, \end{aligned}$$

коэффициенты α и β определяют по [7].

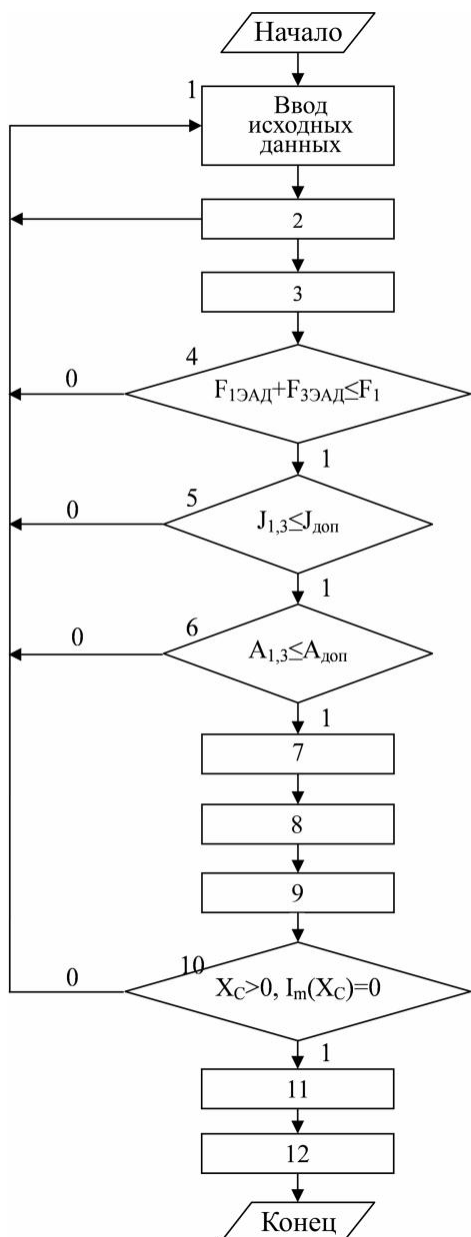


Рис. 3. Блок-схема пересчета ТАД в ЭАД

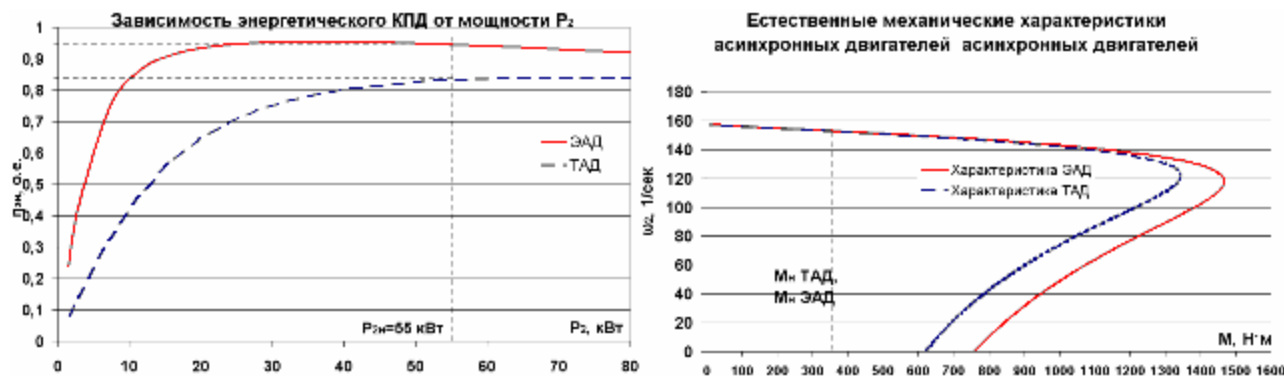


Рис. 4. Рабочие (энергетические) и механические характеристики ТАД и ЭАД типа 4А225М4У3 для шламового насосного агрегата

В блоке 10 проверяется условие $X_c > 0$, $I_{п}(X_c) = 0$. Если корни уравнения $X'_{с3}$ комплексные или не имеют физического смысла – увеличивают желаемый угол сдвига между питающим напряжением и током на величину $\Delta\varphi_{ж}$. В блоках 11, 12 осуществляется расчет рабочих и механических характеристик ЭАД и ТАД, результаты расчетов выводятся в виде таблиц или графиков. На основе анализа рабочих и механических характеристик ТАД и ЭАД принимается решение о целесообразности модернизации исходного двигателя.

С помощью разработанной методики электромагнитного расчета спроектированы, созданы методом реконструкции ТАД в ЭАД и внедрены в электроприводы рабочих машин: общепромышленные асинхронные двигатели АИР71-В2, ДАТ-126 для электромашиностроительного завода ОАО «Электромашина» [8]; асинхронные двигатели типа 4А112М2 и АИР180 S2 для насосных агрегатов МП треста «Теплофикация» (г. Магнитогорск); асинхронные двигатели АИР180-8 для нефтяных станков-качалок ОАО «Татнефть» [9]; асинхронные двигатели 4А225М4У3, $P_{2н}=55$ кВт; $U_{1н}=220$ В; $\eta_n=0,935$; $\cos\varphi_n=1,0$; $I_n=89,1$ А, для шламового насосного агрегата ЗАО «Горно-обоганительное производство» группы компаний ОАО «ММК»

(г. Магнитогорск). На рис. 4 приведены рабочие (энергетические) и механические характеристики ТАД и ЭАД типа 4А225М4У3.

Из анализа характеристик (см. рис. 4), очевидны преимущества ЭАД, в частности, номинальный энергетический КПД увеличивается на 10–12%, при коэффициентах загрузки двигателя в диапазоне 0,25–0,55 – на 40–25%, критический и пусковой моменты возрастают на 18%. Увеличение $M_{кр}$ ЭАД объясняется уменьшением $X_{1ЭАД}$, а M_n – некоторым увеличением $R_{1ЭАД}$.

Опыт промышленного применения ЭАД в нефтедобывающей, горной, металлургической промышленности, а также на предприятиях ЖКХ показывает целесообразность применения изложенной в данной работе концепции создания энергоэффективных асинхронных двигателей путем индивидуальной компенсации их реактивной мощности. В таблице приведены главные экономические показатели электроприводов, созданных путем модернизации ТАД в ЭАД.

Выводы

1. Концепция, основанная на индивидуальной компенсации реактивных индуктивных токов электромагнитных устройств путем использования явле-

Основные экономические показатели электроприводов

Механизм, мощность P _н	Количество ЭАД, шт.	Установленная мощность, кВт	Экономический эффект в год	
			кВт ч	руб.
Электропривод нефтяной качалки P _н =18,5 кВт; ОАО «ТАТНЕФТЬ»	42	777	505050	909090
Электропривод насоса теплового пункта P _н =22 кВт; МУП «Теплофикация», г. Омск	18	396	237600	403920
Электропривод вентилятора градирни P _н =37 кВт; МУП «Теплофикация», г. Омск	4	148	88800	150960
Электропривод насоса теплогенератора P _н =55 кВт; ООО «Экоэнергия», г. Москва	2	110	71500	128700 (ожидаемый)
Электропривод волоочильного стана P _н =55 кВт; ОАО «ММК–Метиз», г. Магнитогорск	3	165	66000	99000
Электроприводы насосов систем холодного и горячего водоснабжения P _н =7,5 кВт; P _н =22 кВт; МУП «Трест Теплофикация»; «Водоканал»	30; 50	1325	795000	1240000 (ожидаемый)
Электропривод шламового насоса P _н =55 кВт; ЗАО «Горно-обоганительное производство» группы компаний ОАО «ММК», г. Магнитогорск	2	110	79000	136000 (ожидаемый)

ния феррорезонанса токов позволяет существенно повысить энергоэффективность электротехнических комплексов и систем.

2. Индивидуальная компенсация реактивной мощности в асинхронных двигателях уменьшает потребляемый ток на 10–15%, повышает cosφ до единицы, энергетический КПД – на 13–20%.

Список литературы

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006.
2. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 H02 k 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Савицкий А.Л., Мугалимов Р.Г., Савицкая Л.Д. // Открытия. Изобретения. 1998. № 15.
3. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Губайдуллин А.Р. Экспериментальные исследования электроприводов вольтового стана на основе энергосберегающих асинхронных двигателей // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 43–47.
4. Мугалимова А.Р., Мугалимов Р.Г., Космагов В.И. Метод и алгоритм проектирования компенсированного энергосберегающего асинхронного двигателя // Сборник материалов V Международной (XVI Всероссийской) научной конференции, 18–21 сентября 2007 г. СПб., 2007. С. 281–284.
5. Мугалимова А.Р. Обоснование и расчет линейной токовой и тепловой нагрузок энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Материалы 65 науч.-техн. конференции: сб. докл. Т. 2. Магнитогорск: МГТУ, 2007.
6. Мугалимова А.Р., Космагов В.И., Мугалимов Р.Г. К определению параметров схемы замещения компенсированного асинхронного двигателя при его создании путем реконструкции из традиционного двигателя // Электротехнические системы и комплексы: междуз. сб. науч. трудов. Вып. № 15 / под ред. Радионова А.А. Магнитогорск: МГТУ, 2009. С. 67–76.
7. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. К определению оптимальной емкости компенсирующего конденсатора для энергосберегающего асинхронного электропривода // Материалы 66-й научно-технической конференции: сб. докл. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. Т. 2. С. 50–53.
8. Мугалимов Р.Г., Савицкий А.Л., Савицкая Л.Д. Характеристики двигательного и генераторного режимов индивидуально компенсированной асинхронной машины // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы // Вестник УГТУ–УПИ. Ч. 1.

9. Екатеринбург, 2003. С. 159–162.
9. Мугалимова А.Р. Энергосберегающий электропривод нефтяного стана-качалки на основе асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Энергосбережение и энергоэффективность: сб. науч. тр. студентов. Магнитогорск: МГТУ, 2005. С. 97–101.

Bibliography

1. Leznov B.S. Energy saving and controlled electric drive in pumping plants and blower installations. M.: Energoatomizdat. 2006.
2. Patent 2112307 RU, MKI H02 k 17/28. Asynchronous compensated electrical machine / Savitsky A.L., Mugalimov R.G., Savitskaya L.D. // Discoveries. Inventions. 1998. № 15.
3. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Gubaidullin A.R. Experimental studies of electric drives of a drawing mill, based on energy-efficient induction motors // Proceedings of universities. Electromechanics. 2009. № 1. P. 43–47.
4. Mugalimova A.R., Mugalimov R.G., Kosmatov V.I. The method and design algorithm of the compensated energy-saving induction motor // Proceedings of V International (XVI All-Russian) Scientific Conference, 18–21 September 2007. St. Petersburg, 2007. P. 281–284.
5. Mugalimova A.R. Substantiation and calculation of line current and thermal loads of energy-efficient induction motor with self-compensation of reactive power // Proceedings of the 65th scientific and technical conference. V. 2. Magnitogorsk: MSTU, 2007.
6. Mugalimova A.R., Kosmatov V.I., Mugalimov R.G. Some aspects of determining the parameters of equivalent circuit of a compensated induction motor when it is designed by reconstructing a traditional motor // Electrical systems and complexes. Collected scientific papers. Issue No. 15 / Under the editorship of A.A. Radionov. Magnitogorsk: MSTU, 2009. P. 67–76.
7. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Determination of optimum capacity of a compensating capacitor for an energy-saving induction motor // Reports of the 66th Scientific Conference: collected reports. Magnitogorsk: SEI of HPE «MSTU», 2008. V. 2. P. 50–53.
8. Mugalimov R.G., Savitskiy A.L., Savitskaya L.D. Characteristics of traction and generator modes of an individually compensated asynchronous machine // Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled electromechanical systems // Bulletin of the Ural State Technical University – UPI. Part 1. Yekaterinburg, 2003. P. 159–162.
9. Mugalimova A.R. Energy-saving electric drive of an oil pumping installation on the basis of the induction motor with individual compensation of reactive power // Energy saving and energy efficiency: Collected scientific papers of university students. Magnitogorsk: MSTU, 2005. P. 97–101.

УДК 621.311.1:658.26

Буланова О.В., Малафеев А.В., Ахметханов А.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОАО «ММК» ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Необходимым условием существования систем электроснабжения промышленных предприятий является достаточный запас статической устойчивости генераторов. Современное программное обеспечение в основном ориентировано на крупные энергосистемы. В связи с этим на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «МГТУ» было разработано оригинальное программное обеспечение «Расчет установившихся и переходных режимов и

режимов замыкания на землю систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями», позволяющее оценивать статическую устойчивость систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные электростанции. Возможность прогнозирования запаса статической устойчивости позволяет разработать мероприятия по ее повышению, что необходимо для надежной работы потребителей.

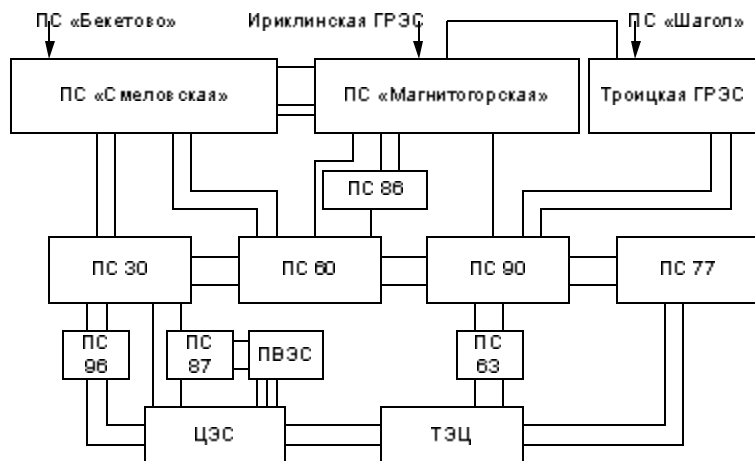


Рис. 1. Упрощенная схема Магнитогорского энергоузла на уровнях напряжений 110–500 кВ



Рис. 2. Зависимость электромагнитной мощности генератора Г4А (ЦЭС) от его внутреннего угла

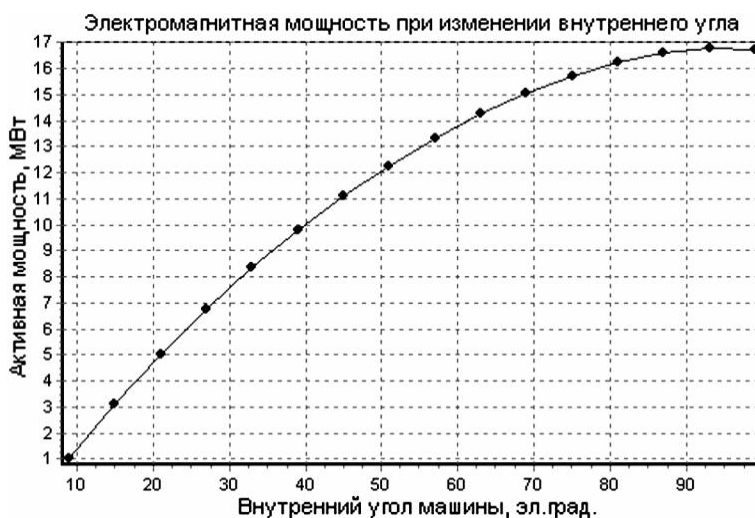


Рис. 3. Зависимость электромагнитной мощности генератора Г4А (ЦЭС) от его внутреннего угла

В основу программного обеспечения для расчета установившихся режимов положен модифицированный метод последовательно эквивалентирования [1]. Непосредственно исследование статической устойчивости синхронных генераторов осуществляется путем определения действительного предела передаваемой мощности [2]. В свою очередь, максимальное значение электромагнитной мощности, выдаваемой генератором, определяется путем применения метода последовательного утяжеления. При параллельной работе электростанций с энергосистемой в качестве утяжеляемого параметра целесообразно принять угол ротора δ .

В ходе исследования производится расчет исходного установившегося режима и определяется начальный угол ротора и ЭДС генератора. Далее угол ротора исследуемого генератора начинает изменяться с заданным шагом и для каждой величины угла производится расчет установившегося режима. Из каждого расчета определяются электромагнитные активные мощности генератора, по которым строится кривая зависимости передаваемых мощностей от величины угла ротора. При этом производится корректировка выдаваемой генератором реактивной мощности при превышении током статора номинального значения. Максимальное значение кривой соответствует действительному пределу передаваемой мощности. Основным достоинством принятого алгоритма является возможность определения пределов передаваемой мощности в системах электроснабжения сложной конфигурации с учетом действия автоматических регуляторов тока возбуждения.

Основным критерием при исследовании статической устойчивости является коэффициент запаса, который определяется

$$k_3 = \frac{P_{max} - P_T}{P_T} \cdot 100\%,$$

где P_{max} – действительный предел выдаваемой мощности в сеть; P_T – фактическая мощность генератора, равная мощности турбины.

В нормальных режимах работы коэффициент запаса должен быть не менее 20%, а в послеаварийных режимах не ниже 10%. В таких условиях статическая устойчивость синхронных машин обеспечивается.

Исследование статической устойчивости проводилось для Магнитогорского энергоузла при параллельной работе с энергосистемой. Упрощенная схема Магнитогорского энергоузла на уровнях напряжений 110–500 кВ приведена на рис. 1.

Как известно, в силу роста мощностей нагрузок и генераторов, а также увеличения пропускной способности линий кольцо на-

пряжением 110 кВ магнитогорского энергоузла было разомкнуто. Это было связано с недопустимым уровнем токов короткого замыкания и необходимостью его ограничения. Однако размыкание кольца приводит к снижению эквивалентной пропускной способности узла и, как следствие, к снижению коэффициента запаса статической устойчивости машин переменного тока. Целью данной работы является оценка влияния размыкания кольца на коэффициент запаса статической устойчивости генераторов собственных электростанций ОАО «ММК». В работе была исследована статическая устойчивость трех вероятных режимов работы кольца 110 кВ Магнитогорского энергоузла при его параллельной работе с энергосистемой:

- кольцо 110 кВ разомкнуто с одной стороны;
- кольцо 110 кВ разомкнуто с двух сторон (существующий режим);
- кольцо 110 кВ замкнуто.

При разомкнутом кольце 110 кВ с одной стороны на подстанции № 90 наиболее устойчивыми оказались генераторы, работающие на центральной электростанции (ЦЭС ОАО «ММК»), имеющие коэффициенты запаса больше 100%, хотя минимально допустимым является 20% в нормальном режиме работы. Наиболее устойчивыми оказались генераторы № 4А и 4Б номинальной мощностью 6 МВт.

Это объясняется относительно небольшим коэффициентом мощности, то есть значительной выдчей реактивной мощности в нормальном режиме работы по сравнению с активной, и значительным током возбуждения. Эти факторы способствуют повышению действительного предела выдаваемой мощности. Малая электрическая удаленность генераторов центральной электростанции по отношению к энергосистеме также способствует повышению коэффициента запаса статической устойчивости. Кроме того, генераторы 4А и 4Б ЦЭС имеют минимальный угол ротора δ .

Наиболее неустойчивые генераторы расположены на подстанции 25 паровоздуходувной электростанции (ПВЭС-2). Наименее устойчиво себя показали генераторы ТГ1 и ТГ2. Это можно объяснить их достаточно большой электрической удаленностью по отношению к энергосистеме (связь осуществляется через несколько трансформаторов и реакторов, что увеличивает удаленность), а также высоким коэффициентом загрузки по активной мощности. Как известно, при этом уменьшается выдча реактивной мощности из-за необходимости ограничения полного тока статора. Уменьшение реактивной мощности, как известно, достигается уменьшением ЭДС генератора и тока возбуждения. Это уменьшает пропускную способность электропередачи и действительный предел выдаваемой мощности генератора.

Пример зависимости электромагнитной мощности генератора от внутреннего угла δ приведен на рис. 2. Как видно из рисунка, за счет действия автоматического регулирования возбуждения максимум выдаваемой мощности приходится на угол, больший 90 град.

В режиме полного кольца 110 кВ коэффициенты устойчивости остались практически неизменными, по сравнению с режимом полукольца. Это связано со значительной пропускной способностью последнего.

Эл/ст или п/ст	ТЭЦ	ЦЭС	п/ст 7	п/ст 25	п/ст 83	п/ст 29Л
Уменьшение K_z , %	17–31	2–5	4–6	5–7	9	8–9

В режиме кольца 110 кВ, разомкнутого с двух сторон, размыкание производилось на подстанции 90 и на шинах ЦЭС напряжением 110 кВ. При данной схеме произошло уменьшение коэффициента запаса статической устойчивости у всех генераторов в силу уменьшения пропускной способности линий электропередачи. Особенно сильно это произошло на генераторах ТЭЦ. Уменьшение коэффициентов запаса показано в **таблице**.

Примеры зависимости электромагнитной мощности генератора от внутреннего угла приведены на рис. 3.

Таким образом, при режиме кольца и кольца, разорванного с одной стороны, устойчивость генераторов практически оставалась неизменной. Это объясняется тем, что пропускная способность изменилась незначительно.

При полном разрыве кольца устойчивость генераторов на всех станциях и подстанциях уменьшилась, об этом говорит уменьшение коэффициента запаса.

Особенно сильно это отразилось на устойчивости генераторов, расположенных на ТЭЦ ОАО «ММК». Там коэффициент запаса уменьшился в пределах 17–31%. Это можно объяснить тем, что при разрыве связи ЦЭС–ТЭЦ электрическая удаленность ТЭЦ от энергосистемы увеличилась, разрыв кольца сильно уменьшает пропускную способность ЛЭП и, как следствие, уменьшается устойчивость генераторов.

Однако в целом коэффициенты запаса генераторов по статической устойчивости при любом режиме работы кольца превышают 20%, что свидетельствует о допустимости работы генераторов при разомкнутом кольце 110 кВ.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет исследовать статическую устойчивость синхронных генераторов промышленных электростанций в системах электроснабжения конфигурации любой сложности. Это позволяет выявлять неустойчивые режимы и разрабатывать мероприятия по повышению статической устойчивости.

Список литературы

1. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / Игуменцев В.А., Заславцев Б.И., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. // Промышленная энергетика. 2008. № 6. С. 16–22.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.

Bibliography

1. Modified method of successive equivalenting for calculation of modes of complex power-supply systems / V.A. Igumenschev, B.I. Zaslavets, A.V. Malafeev, O.V. Bulanova, Y.N. Rotanova // Industrial power engineering. 2008. No 6. P. 16–22.
2. Zhdanov, P.S. Problems of energy systems stability / under the editorship of L.A. Zhukov. M.: Energy, 1979. 456 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 691:539.3/4

Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ПРОЧНОСТИ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Трубобетонные колонны (ТБК) все шире применяются в мировой практике строительства, особенно при возведении высотных зданий. В нашей стране их практическое использование сдерживает два основных фактора. Первый связан с отсутствием нормативных документов по их расчету и проектированию. Второй обусловлен наличием существенного конструктивного недостатка сжатых трубобетонных элементов. Он состоит в сложности обеспечения совместной работы бетонного ядра и внешней стальной оболочки при эксплуатационных нагрузках. В результате оболочка начинает включаться в работу в качестве стальной обоймы только после начала процесса микротрещинообразования в бетоне. Это отрицательно влияет на эффективность работы ТБК. Кроме того, в местах передачи нагрузок на колонну от перекрытий может оказаться недостаточным сцепление между бетонным ядром и стальной оболочкой.

Авторами статьи предложена усовершенствованная конструкция трубобетонной колонны и новый способ ее изготовления [1, 2]. Основной особенностью данной конструкции является применение в процессе ее изготовления длительного прессования

бетонной смеси давлением 1,5–3 МПа. Бетон, твердеющий под таким давлением, имеет на 40–60% более высокую прочность, а также существенно меньшие величины деформаций усадки и ползучести. В процессе прессования из бетонной смеси отжимается «свободная» (не вступившая во взаимодействие с частицами цемента) вода. Прессующее давление через бетонную смесь передается на внутреннюю поверхность стальной трубы-оболочки. Благодаря этому создается предварительное растяжение стальной оболочки и последующее обжатие бетонного ядра. Таким образом, за счет длительного прессования можно изготавливать предварительно обжатые ТБК. Эффект предварительного обжатия также может быть достигнут и при использовании бетонной смеси на расширяющемся цементе с достаточной величиной самонапряжения (1,5–2 МПа и более). В предварительно обжатых ТБК существенно увеличивается сцепление стальной трубы с бетоном, а также обеспечивается совместная работа бетонного ядра и стальной оболочки при любых уровнях их нагружения.

Примеры конструктивных решений ТБК с предварительно обжатым ядром представлены на рис. 1.

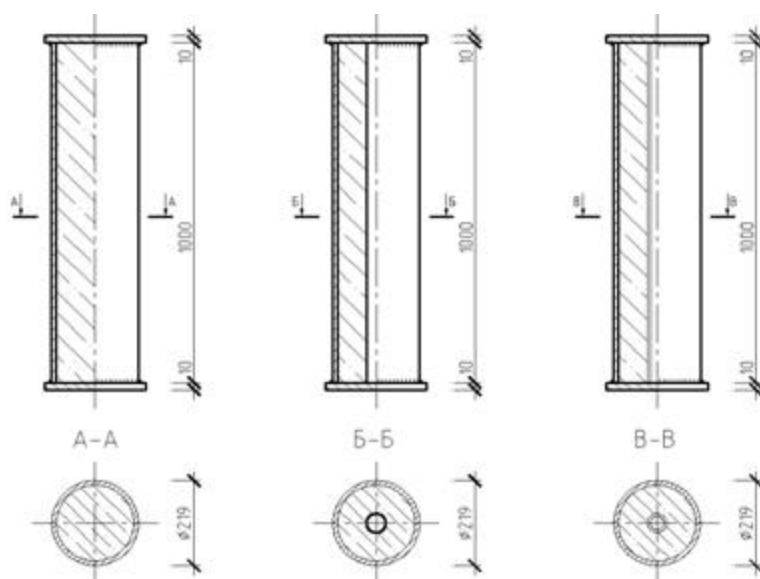


Рис. 1. Варианты исполнения лабораторных образцов ТБК

В данной статье рассматривается методика расчета прочности и оценки напряженно-деформированного состояния ТБК. Причем основные положения этой методики являются общими как для предварительно обжатых колонн, так и для ТБК классической конструкции.

Расчет прочности нормальных сечений ТБК предлагается производить на основе нелинейной деформационной модели железобетона с учетом особенностей деформирования бетонного ядра и стальной оболочки в условиях объемного напряженного состояния. Исходной базой для расчетов по нелинейной деформационной модели являются диаграммы деформирования и аналитические связи между напряжениями и деформациями для бетона и стали.

Основной особенностью расчета сжатых трубобетонных элементов по нелинейной деформационной модели является

отсутствие диаграмм для бетонного ядра « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ » (рис. 2) и металлической оболочки « $\sigma_{pz} - \varepsilon_{pz}$ » (рис. 3), работающих в условиях неоднородного напряженного состояния. В связи с этим расчет нормальных сечений ТБК по прочности выполняют в два этапа.

На первом этапе расчетным путем определяют зависимости между напряжениями и деформациями осевого направления в бетонном ядре и стальной оболочке при кратковременном действии на трубобетонный элемент центрально приложенной нагрузки. Основная сложность построения данных зависимостей связана с тем, что боковое давление бетона на стальную обойму σ_{br} , в значительной степени определяющее их параметры, имеет переменную величину. Оно постепенно возрастает от значений близких к нулю до некоей предельной величины σ_{bru} , зависящей от конструктивных и геометрических параметров ТБК. В предлагаемой методике все необходимые параметры указанных диаграмм рассчитываются из совместного решения систем уравнений, представляющих собой физические соотношения между главными напряжениями и деформациями вида $\{\varepsilon\}_n = [c_b]_n \{\sigma\}_n$, в которых $\{\varepsilon\}_n$ и $\{\sigma\}_n$ – вектор-столбцы главных относительных деформаций и главных напряжений, а $[c_b]_n$ – матрица податливости материала. При этом бетон рассматривается как трансверсально-изотропный материал, а стальная оболочка – как изотропный. Методика аналитического построения диаграмм « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ » и « $\sigma_{pz} - \varepsilon_{pz}$ » приведена в работе [1].

Упруговязкопластические свойства бетона и стали учитываются за счет использования в расчете их неупругих деформаций и изменения коэффициентов поперечных деформаций по мере роста уровня напряжений. Для вычисления коэффициентов упругости бетона и стали можно принимать любые известные зависимости, обеспечивающие достаточную точность оценки напряженно-деформированного состояния конструкции, например формулу Н.И. Карпенко [3].

На втором этапе производится проверка прочности внецентренно загруженного ТБК. При этом расчет выполняется в соответствии с основными положениями, изложенными в [4].

Анализ опубликованных в литературе подходов и данных многочисленных экспериментальных исследований позволил принять следующий критерий предельного состояния сжатого трубобетонного элемента. Предельное состояние наступает при выполнении условий:

- достижение нормальными напряжениями осевого направления в бетоне ядра значения прочности бетона при трехосном сжатии $\sigma_{bz} = R_{b3}$;
- достижение интенсивности напряжений в наиболее сжатом волокне стальной оболочки физического или условного предела текучести $\sigma_{pi} = \sigma_{py}$;
- достижение нормальными напряжениями осевого направления в наиболее растянутом волокне стальной оболочки предела текучести $\sigma_{pz} = \sigma_{py}$.

Учитывая внутреннюю статическую неопределенность трубобетонной конструкции, первое условие

наступления предельного состояния должно выполняться совместно со вторым или третьим.

С целью обеспечения эксплуатационной пригодности ТБК при действии на них расчетных нагрузок величины деформаций стальной оболочки (в наиболее сжатом волокне – интенсивность деформаций ε_{pi} , в наиболее растянутом волокне – осевая деформация ε_{pz}), а также осевые деформации бетонного ядра ε_{bz} должны ограничиваться соответствующими значениями.

Основные зависимости трубобетонных колонн

Прочность бетонного ядра ТБК круглого сечения R_{b3} определяется по известной формуле

$$R_{b3} = R_{bc} + k \sigma_{bru}, \quad (1)$$

где R_{b3} – значение расчетного сопротивления бетона сжатию в осевом направлении при неоднородном напряженном состоянии; σ_{bru} – боковое давление стальной обоймы на бетон в предельном состоянии; k – коэффициент бокового давления; R_{bc} – расчетное со-

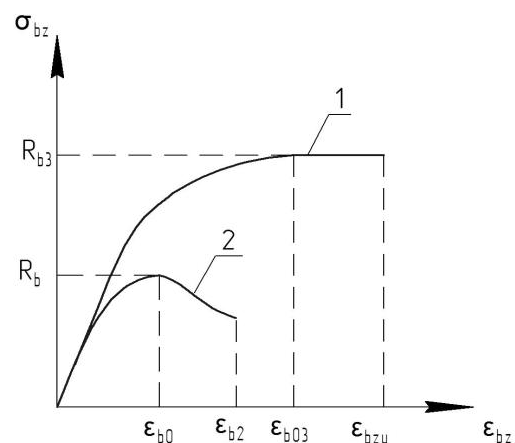


Рис. 2. Принятые диаграммы « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ » для бетона, работающего в условиях объемного (1) и одноосного (2) сжатия

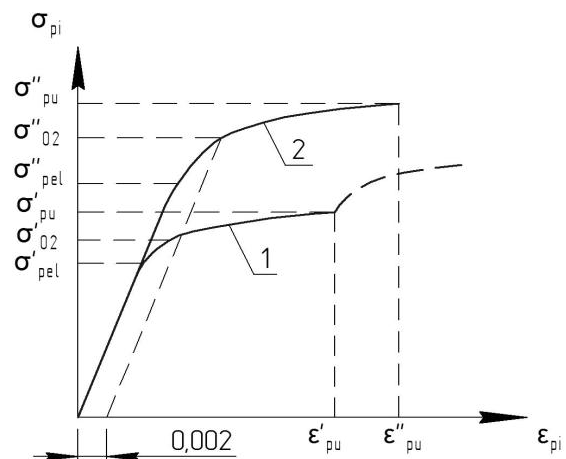


Рис. 3. Диаграммы состояния стальной оболочки и продольной стержневой арматуры: 1 – с физической, 2 – с условной площадкой текучести (для стержневой арматуры индекс «pi» меняется на индекс «s»)

противление бетонного цилиндра осевому сжатию.

При расчетах ТБК круглого сечения расчетные значения сопротивления бетона сжатию в осевом направлении следует принимать с учетом повышения прочности бетона при объемном напряженном состоянии и определять по формуле

$$R_{b3} = k_b R_{bc}, \quad (2)$$

где k_b – коэффициент упрочнения объемно сжатого бетонного ядра, определяемый по формуле

$$k_b = 9\gamma / (k - 1), \quad (3)$$

в которой γ – коэффициент, учитывающий масштабный фактор ($\gamma = 1$ при размерах поперечного сечения, не превышающих 500 мм, $\gamma = 0,85$ при больших размерах поперечного сечения); k – коэффициент бокового давления ($2 \leq k < 7$).

Величина бокового давления на бетон в предельном состоянии σ_{bru} зависит от геометрических и конструктивных параметров трубобетонного элемента, т.е. в начальной стадии расчета она неизвестна. Значение коэффициента бокового давления k определяется уровнем бокового обжатия $m = \sigma_{bru} / R_{b3}$ и также неизвестно. Принимать его постоянным, как это делалось ранее многими исследователями, для ТБК не рекомендуется, так как это приводит к большим погрешностям в расчетах. Таким образом, определить прочность бетонного ядра при трехосном сжатии R_{b3} по формуле (1) затруднительно.

Для разрешения данной задачи было сделано предположение, что значение коэффициента k должно в первую очередь определяться конструктивным коэффициентом трубобетона ρ , который вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{R_{s,p} A_p}{R_{bc} A}, \quad (4)$$

в которой A , R_{bc} , A_p , $R_{s,p}$ – площади поперечного сечения и расчетные сопротивления бетонного ядра и стальной оболочки.

В результате статистической обработки опытных значений для 94 образцов ТБК получена аналитическая зависимость (с коэффициентом корреляции 0,94), которая после округлений имеет следующий вид:

$$k = 7 - 1,2\rho. \quad (5)$$

При известном k боковое давление с небольшой погрешностью можно определить по формуле

$$\sigma_{bru} = \frac{11 - k}{k(k - 1)} R_{bc}. \quad (6)$$

С учетом этой формулы получаем простую зависимость для определения расчетного сопротивления бетона ТБК круглого сечения

$$R_{b3} = \frac{10}{k - 1} R_{bc}. \quad (7)$$

Наличие предварительного обжатия в ТБК усовершенствованной конструкции учитывают введением в расчет начального бокового давления стальной оболочки на бетонное ядро σ_{br0} и увеличением расчетного сопротивления бетона. Для таких конструкций величина R_{b3} определяется по зависимости (7) с подстановкой вместо R_{bc} прочности опрессованного бетона R_{bp} , вычисляемой по формуле

$$R_{bp} = R_{bc} \left(1 + \alpha \sqrt{P \Delta f} \right), \quad (8)$$

в которой P – расчетная величина прессующего давления; $\alpha \approx 1$ – коэффициент, зависящий от состава бетонной смеси (значение коэффициента α уточняется с использованием зависимости (8) по результатам предварительных испытаний стандартных образцов исходного и опрессованного бетона); Δf – поправка на прочность бетона, определяемая по формуле

$$\Delta f = \frac{0,44}{\sqrt{1,2 R_{bn}}}, \quad (9)$$

где нормативное сопротивление бетона сжатию R_{bn} принимается в МПа.

Введением поправки Δf учитывается то обстоятельство, что с увеличением прочности исходного бетона R_{bn} эффект прессования снижается.

Значения предельных относительных деформаций бетона ε_{bzu} при однозначной равномерной эпюре принимают равными деформациям бетонного ядра центрально сжатого трубобетонного элемента ε_{b03} . Для ее определения рекомендуется использовать формулу

$$\varepsilon_{b03} = \frac{k_0}{k_1} \varepsilon_{b0}, \quad (10)$$

в которой ε_{b0} – величина относительной деформации бетона в вершине диаграммы « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ » при осевом сжатии и однородном напряженном состоянии бетона, принимаемая согласно [5]; k_0 – коэффициент, учитывающий неоднородное напряженное состояние бетонного ядра ТБК (рассчитывается по формуле Еврокода [5]); k_1 – коэффициент, учитывающий влияние стальной оболочки на осевые деформации ТБК, значение которого рекомендуется вычислять по формуле

$$k_1 = 1 + 4\alpha \frac{v_{pu} \delta}{v_{bzu} d}, \quad (11)$$

где α – соотношение модулей упругости стали $E_{s,p}$ и бетона E_b ; δ – толщина стенки стальной трубы; d – диаметр сечения стальной трубы; v_{bzu} , v_{pu} – предельные значения коэффициентов упругости бетонного ядра и стальной оболочки (при отсутствии точных данных отношение v_{pu} / v_{bzu} допускается принимать равным 1).

Для исключения чрезмерных деформаций ТБК предельные относительные деформации ε_{bzu} во всех случаях рекомендуется ограничивать величиной 0,006. Предельное значение интенсивности относи-

тельных деформаций наиболее сжатого участка ε_{pi} стальной оболочки и относительных деформаций удлинения растянутого участка стальной оболочки $\varepsilon_{pz, \max}$ рекомендуется назначать следующим образом:

- для сталей с физической площадкой текучести $\varepsilon_{pu} = R_{s,p} / E_{s,p} + 0,015$;
- для сталей с условной площадкой текучести $\varepsilon_{pu} = 0,025$.

При расчете прочности ТБК по нелинейной деформационной модели очень важно учитывать изменение коэффициентов поперечных деформаций бетона и стали с ростом уровня напряжений. Только правильный подбор соотношений между этими коэффициентами позволяет находить реальную величину бокового давления стальной оболочки на бетон на любом этапе работы конструкции.

Для определения текущих значений коэффициентов поперечной деформации бетона продольного и радиального направлений μ_{jr} ($j = z, r$) предлагается следующая формула:

$$\mu_{jr} = \mu_{jru} - (\mu_{jru} - \mu_b) \left(\frac{v_{bi} - v_{biu}}{v_{oj} - v_{biu}} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

в которой $\mu_b \approx 0,2$ – коэффициент Пуассона для бетона; μ_{jru} – предельное значение коэффициента поперечной деформации μ_{jr} для бетонного ядра, которое вычисляется по формуле, предложенной в работе [3].

Стальная оболочка ТБК в сжатой зоне работает в условиях объемного напряженного состояния.

Для аналитического описания напряженно-деформированного состояния стальной оболочки используется известная гипотеза единой кривой, предложенная А.А. Ильиным. Согласно этой гипотезе зависимость между напряжениями и деформациями « $\sigma_{pr} - \varepsilon_{pz}$ », полученную при одноосном растяжении (сжатии), можно считать действительной для всех напряженных состояний при замене текущих напряжений σ_p и текущих деформаций ε_p на интенсивность текущих напряжений σ_{pi} и интенсивность текущих деформаций ε_{pi} соответственно.

Значение коэффициента поперечной деформации стальной оболочки с ростом уровня напряжений и деформаций определяется по формуле

$$\mu_p = 0,48 - (0,48 - \mu_o) \left(\frac{v_p - v_{pu}}{v_{p0} - v_{pu}} \right), \quad (13)$$

в которой μ_o – коэффициент Пуассона стали оболочки; 0,48 – примерное значение коэффициента μ_p в конце площадки текучести.

В такой постановке значение коэффициента упругости стальной оболочки может быть найдено по формуле

$$v_p = v_{pu} + (v_{p0} - v_{pu}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta_p - \omega_2 \eta_p^2}, \quad (14)$$

в которой η_p – уровень интенсивности напряжений в стальной оболочке.

$$0 \leq \eta_p = \frac{\sigma_{pi} - \sigma_{p,el}}{\sigma_{pu} - \sigma_{p,el}}. \quad (15)$$

Остальные параметры зависимости (14) могут быть вычислены с учетом предложений работы [3].

Заключение

Предложенная универсальная методика расчета позволяет оценивать не только прочность, но и напряженно-деформированные состояния ТБК на любом уровне их загрузки. Данная методика учитывает физическую нелинейность компонентов, неоднородность напряженного состояния, процессы перераспределения усилий между стальной оболочкой и ядром. Основные положения этой методики могут быть использованы при расчете различных конструкций сжатых элементов с косвенным армированием.

Список литературы

1. Krishan A.L. Steel pipe-concrete columns with preliminary pressed core // Applications. Opportunities: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5–7 July 2005. P. 725–733.
2. Кришан А.Л., Гареев М.Ш. К вопросу о практическом использовании опрессованного трубобетона // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2003. № 2. С. 6–9.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
4. Krishan A.L., Troshkina E.A. New approach to the estimation of durability of compressed pipe-concrete columns // Applications. Opportunities: Proceedings of the 7th International Congress held at the University of Dundee, Scotland, UK on 8–10 July 2008. P. 143–151.
5. Eurocode 4: EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. Brussels, 2004. 127 p.

Bibliography

1. Krishan A.L. Steel pipe-concrete columns with preliminary pressed core // Applications. Opportunities: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5–7 July 2005. P. 725–733.
2. Krishan A.L., Gareev M.S. Some aspects of practical application of compressed pipe-concrete // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2003. № 2. P. 6–9.
3. Karpenko N.I. General models of mechanics of reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat, 1996. 416 p.
4. Krishan A.L., Troshkina E.A. New approach to the estimation of durability of compressed pipe-concrete columns // Applications. Opportunities: Proceedings of the 7th International Congress held at the University of Dundee, Scotland, UK on 8–10 July 2008. P. 143–151.
5. Eurocode 4: EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. Brussels, 2004. 127 p.

Харченко О.А., Матвеева Г.Н., Михайловский В.Н.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Проблемы экономии и рационального использования водных ресурсов и особенно пожарно-питьевой воды (ППВ) актуальны на любом промышленном предприятии. Вода – важный покупной энергетический ресурс, запасы которого ограничены. В моногородах сети предприятий и жилищного фонда взаимосвязаны; чтобы избежать отключений ППВ в жилищном фонде, необходимо провести целый комплекс мероприятий по жесткой экономии ППВ.

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» обеспечивается ППВ от магистральных сетей МП «Водоканал» и является крупнейшим потребителем ППВ в г. Магнитогорске. Он имеет разветвленную структуру водоснабжения, принципиальная схема которой изображена на рис. 1. Сети ППВ имеют протяженность 145,4 км, средний диаметр 181,5 мм, диапазон изменения диаметров трубопроводов от 50 до 600 мм.

В связи со сложившейся инфраструктурой водоснабжения подача ППВ на промплощадку осуществляется как «тупиковым» потребителям, так и «транзитным» (см. рис. 1). «Тупиковые» потребители – это площадка цеха покрытий, ККЦ, ГОП, «транзитные» потребители – нитки А, В, С, Д.

Через транзитных потребителей по водоводам А, В, С, Д осуществляется водоснабжение жилых районов левобережной его части г. Магнитогорска.

Баланс потребления ППВ на промышленных предприятиях имеет свои особенности, что обусловлено необходимостью использовать ППВ на технологические нужды, связанные с производством металлопродукции; в настоящее время это водопотребление составляет 6,2 м³/ч. Однако основное потребление ППВ – хозяйственно-бытовые нужды (питьевой режим, душевые) и система пожаротушения. Структура годового потребления ППВ представлена на рис. 2.

Основные пути экономии ППВ можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся мероприятия, которые изменяют принципиальные схемы водоснабжения и требуют значительных капитальных затрат и времени на разработку технико-экономического обоснования, согласование проектной документации, строительство (прокладка новых трасс, реконструкция действующих сетей и т.д.). Ко второй группе относятся мероприятия организационного и эксплуатационно-технологического характера (организация коммерческого учета, проведение манометрической съемки и т.д.). Проведение мероприятий по экономии по второй группе является менее затратным и позволя-

ет достичь положительного экономического эффекта за меньшие промежутки времени.

Указанные группы мероприятий по экономии ППВ можно реализовать:

- у потребителей ППВ;
- у сетевой организации (структурного подразделения предприятия), на балансе которой нахо-

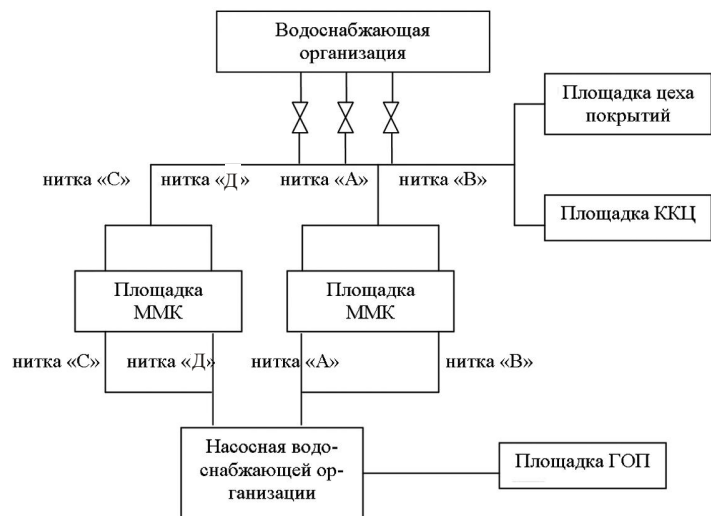


Рис. 1. Принципиальная схема водоснабжения промышленного предприятия

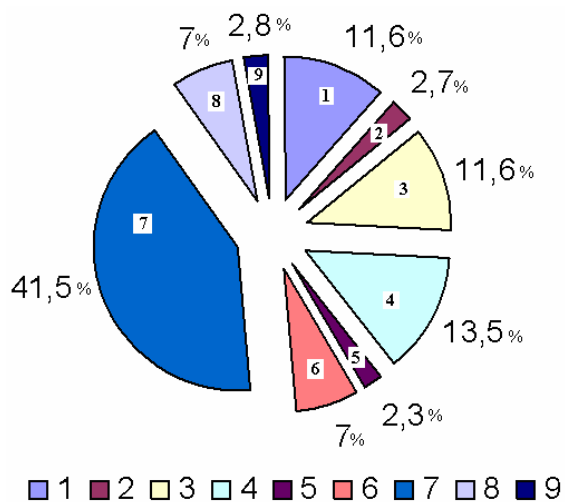


Рис. 2. Структура годового потребления пожарно-питьевой воды, %:

- 1 – горно-обогатительное производство; 2 – коксохимическое производство; 3 – сталеплавильное производство; 4 – прокатное производство; 5 – цеха главного энергетика; 6 – вспомогательные цеха; 7 – потери в сетях; 8 – дочерние организации; 9 – сторонние организации

дятся распределительные сети для подачи воды потребителям.

Энергосберегающие мероприятия у потребителей должны включать:

- организацию учета расходов ППВ;
- установку и внедрение энергосберегающего оборудования и технологий;
- автоматизацию управления режимами водопотребления и водоотведения;
- рациональное использование ППВ.

Энергосберегающие мероприятия у сетевых организаций следует направить на:

- сокращение потерь и неучтенных расходов воды;
- автоматизацию управления режимами водоснабжения;
- автоматизацию гидравлических режимов работы водопроводных сетей.

Особо актуальны вопросы, касающиеся неучтенных расходов и потерь воды в водопроводных сетях, поскольку они оказывают существенное влияние на себестоимость продукции. Обоснованность этих расходов и потерь воды регламентируется нормативными документами. Величина потерь и неучтенных расходов воды в системах водоснабжения представляет собой разницу между количеством воды, поданной в водопроводную сеть предприятия и отпущенной всем потребителям.

Понятие «потери» и «неучтенные расходы» ППВ необходимо разграничить. К потерям воды относятся:

- утечки воды в водопроводных сетях и сооружениях;
- естественная убыль воды при ее транспортировке потребителям (зависит от диаметра и протяженности трубопровода). Диапазон значений для стальных труб (на 1 км водопроводной сети) составляет от 16 л/ч ($d_y = 100$ мм) до 126 л/ч ($d_y = 2000$ мм).

Потери в водопроводных сетях могут составлять значительную величину вследствие следующих факторов: аварийного состояния сетей; разбалансированности системы водоснабжения; отсутствия достаточ-

ного внимания к эксплуатации и методологического подхода к развитию системы водоснабжения при строительстве новых объектов промышленного, жилищного, гражданского и социального назначения. Высокая степень износа водопроводных сетей и оборудования обуславливает большое количество аварий и значительные объемы потерь и утечек воды.

К неучтенным расходам относятся технологические и организационно-учетные расходы (рис. 3).

Технологические расходы воды включают промывку и дезинфекцию водопроводных сетей, технологические нужды эксплуатации сетей водоотведения (промывка и прочистка сетей), расходы воды на тушение пожаров, проверку пожарных гидрантов.

Организационно-учетные расходы подразделяют на расходы воды, не зарегистрированные средствами измерений вследствие недостаточной чувствительности средств измерений (наличие погрешности приборов у потребителей ППВ и на насосных станциях), а также связанные с самовольным использованием ППВ из-за несанкционированного подключения к трубопроводам.

Неучтенные расходы включают в себя также полезные расходы (затраты воды на собственные нужды предприятий, противопожарные нужды и др.) и потери воды из водопроводной сети через водоразборные колонки, уплотнения сетевой арматуры, потери воды при авариях, скрытые утечки воды из водопроводной сети и емкостных сооружений.

Наибольшую сложность представляет определение размера скрытых утечек воды из водопроводной сети. Объемы утечек зависят от состояния водопроводной сети, возраста, материала труб, грунтовых и климатических условий и других местных особенностей. Они составляют от 75 до 90% общего объема потерь воды в водопроводных сетях.

Важный этап работы по оптимизации системы водоснабжения – это организация учета расходов ППВ. Систему учета можно разделить на две составляющие:

- коммерческий учет (учет между поставляемым и потребляемым объемом энергоресурса; это касается взаиморасчетов с МП «Трест Водоканал» и со сторонними и дочерними организациями);
- внутризаводской учет (касается регулирования ППВ между структурными подразделениями предприятия).

Следует отметить, что сама система учета не дает сокращения потребления энергоресурсов, она позволяет оценить уровень расходов, разработать и реализовать мероприятия по их сокращению, а также упорядочить взаимоотношения между энергопоставляющей организацией и потребителем в части списания потерь при транспортировке энергоресурсов до потребителя.

Система учета расходов ППВ по ОАО «ММК» базируется на схеме учета, типовый фрагмент которой изображен на рис. 4. Данная схема учета позволяет экономиче-

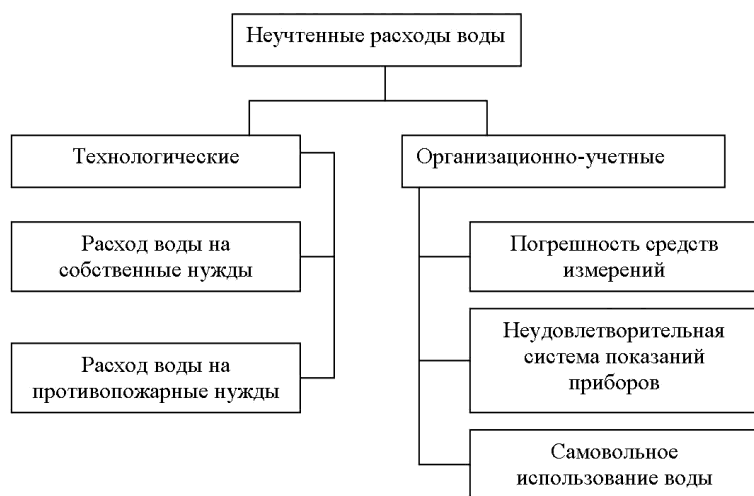


Рис. 3. Структура неучтенных расходов воды

ски заинтересовать потребителя в оптимизации своей системы водопотребления, а именно:

1) закрыть задвижку на байпасной линии (задвижка 3) с обязательной опломбировкой представителем водоснабжающей организации и пропустить весь объем ППВ через узел учета;

2) перенести узел учета $Q_{и}$ на зону балансового разграничения АВС, чтобы не оплачивать потенциально нормативные потери $Q_{пот}$, которые возникают между зоной балансового разграничения и узлом учета.

Величина нормативных потерь $Q_{пот}$ в зависимости от длины водопровода и его диаметра определяется либо условиями договора, либо наличием нормативных документов по предприятию.

Для дальнейшего уменьшения неучтенных расходов и потерь воды необходимо выполнение следующих мероприятий:

- установка приборов учета и регистраторов давления на границах балансовой принадлежности по схеме, представленной на **рис. 4**, с последующей возможностью сбора и обработки па-

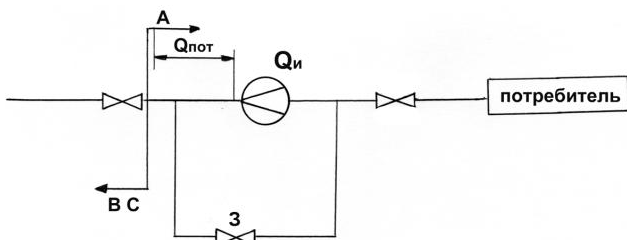


Рис. 4. Схема учета расхода питьевой воды у потребителя

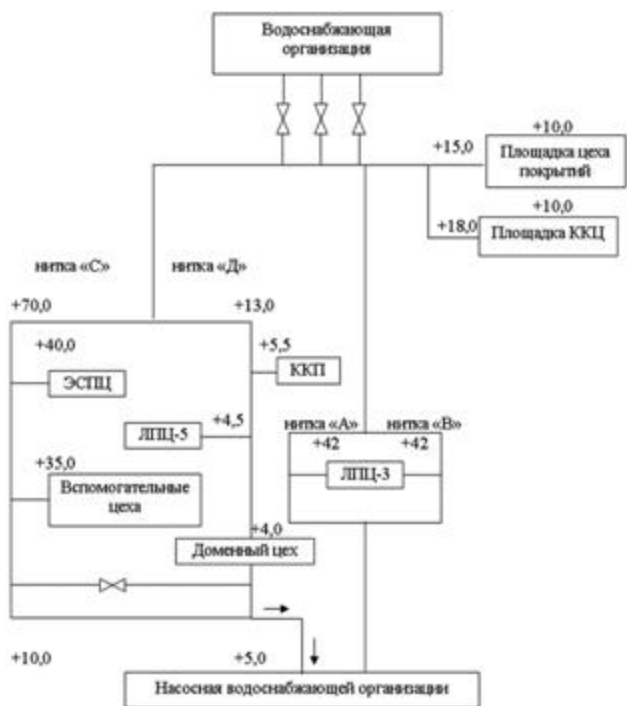


Рис. 5. Манометрическая съемка водопроводных сетей ОАО «ММК» до оптимизации режимов водоснабжения, м вод. ст. («+» – вода выходит с промплощадки на насосную станцию)

раметров системы для контроля и управления функционированием системы водообеспечения;

- организация коммерческого учета;
- организация внутреннего учета и аудита водоснабжения с диспетчеризацией водопотребления в режиме реального времени;
- приобретение и установка запорно-регулирующей арматуры, отвечающей по качеству изготовления требованиям европейских стандартов;
- использование современной запорно-регулирующей арматуры, которая позволяет не только сократить потери в водопроводной сети, но и снизить эксплуатационные расходы, избежать загрязнения питьевой воды и повысить экологическую безопасность;
- оптимизация технических параметров ППВ (давление, расход и т.д.);
- реконструкция эксплуатирующихся сооружений и водоводов;
- строительство новых объектов водоснабжения с применением современных технологий и оборудования, отвечающих требованиям стандартов качества для питьевой воды;
- определение потерь давления в сети, напоров у потребителей;
- определение оптимального режима совместной работы распределительной водопроводной сети;
- выявление участков с повышенным гидравлическим сопротивлением.

С целью оптимизации гидравлических режимов работы в ОАО «ММК» была проведена предварительная манометрическая съемка водопроводных сетей, результаты которой представлены на **рис. 5**.

Для оптимизации технических параметров ППВ (давления и расхода) разработана математическая модель, которая представляет собой систему уравнений, описывающих зависимость величины гидравлических сопротивлений от давления и расходов ППВ. Рассчитывались и анализировались различные схемы водопроводных сетей: тупиковые, закольцованные, смешанные.

Основные исходные параметры сетей ППВ для расчетов с использованием математической модели:

- часовое, суточное и месячное водопотребление;
- протяженность участков водоснабжения;
- диаметры трубопроводов и материал;
- давление в контрольных точках системы.

Для количественного расчета распределяемых объемов ППВ в сетях использовались данные из баланса водопотребления ОАО «ММК».

Исходными уравнениями для расчетов являлись уравнение Бернулли и формула Дарси-Вейсбаха, на основании которых принято, что величина местных сопротивлений зависит от расхода и давления в начальных сечениях трубопроводов и подчиняется квадратичному закону скорости.

Формировали следующую матрицу гидравлических потерь ΔH :

$$\Delta H = \begin{bmatrix} h_{11}h_{12}...h_{1i}; \\ h_{21}h_{22}...h_{2i}; \\ \dots \\ h_{j1}h_{j2}...h_{ji}, \end{bmatrix}$$

где h_{ji} – средние гидравлические потери i -го элемента на j -м участке водопровода.

Оптимизация целевой функции проводилась по критерию минимума гидравлических потерь с учетом ограничений на управляемые переменные. Дополнительные ограничения при решении уравнений вводятся по суточному потреблению воды в пределах лимитов и обеспечению давления у потребителей в допустимом диапазоне.

Разработана сетевая модель транспортной задачи оптимизации обеспечения потребителей ППВ. Рассмотрим ее подробнее: пусть m – число источников водоснабжения, обеспечивающих n потребителей; i – участок, имеющий пропускную способность не более S_i ; j – потребителю требуется не менее D_j объема воды.

Величины S_m и D_n на рассматриваемом интервале времени принимаются постоянными. Гидравлические потери от i -го источника до j -го потребителя равны h_{ij} и зависят от давления, расхода, диаметра и типа трубопровода, количества местных сопротивлений и т.д.

Связь между гидравлическими потерями и давлением в сети устанавливали по уравнению Бернулли и Дарси-Вейсбаха. Целевой функцией является выбор схемы и параметров водоснабжения для заданного интервала времени при минимальных гидравлических потерях.

Поскольку в реальных водопроводных сетях кроме потребителей существуют потери ППВ в водопроводах, то имеем несбалансированную транспортную задачу, которую сводим к сбалансированной путем введения дополнительного фиктивного потребителя с фиктивным спросом.

$$\sum_{i=1}^m S_i - \sum_{j=1}^n D_j.$$

При этом в дополнительной строке или дополнительном столбце указываются гидравлические потери, равные нулю.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Минимизировать

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij}x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

При ограничениях

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = S_i, \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = D_j, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

При этом необходимо учитывать пропускную способность трубопровода U_{ij} :

$$0 \leq x_{ij} \leq U_{ij}.$$

Если в силу каких-то причин некоторые источники водоснабжения являются недоступными для определенного потребителя, то соответствующая величина x_{ij} исключается из задачи. Задача решается симплексным алгоритмом.

Оптимизация по математической модели для различных временных интервалов (часы, сутки, месяц) выполняется переопределением соответствующих задействованных переменных.

Результатом решения математической модели является определение оптимальной схемы водоснабжения и давлений P_{ij} в контрольных точках системы по условию не уменьшения давления ниже нормативного $P_{нормат} \leq P_{ij}$.

На водопроводных сетях, имеющих большой срок эксплуатации, целесообразно проводить дополнительную оптимизацию минимизации неучтенных потерь g_{ij} , которые определяются по эксплуатационным показателям как разница между поступившим объемом воды на вводе и количеством израсходованной воды у потребителя, отразив эти потери в виде коэффициента в применяемых формулах.

Оптимизация сети по давлению существенно снижает расходы воды у потребителя и неучтенные потери в сетях.

Отличительной особенностью разработанной модели является реальная содержательно-временная составляющая, соотнесенная с эксплуатационной составляющей.

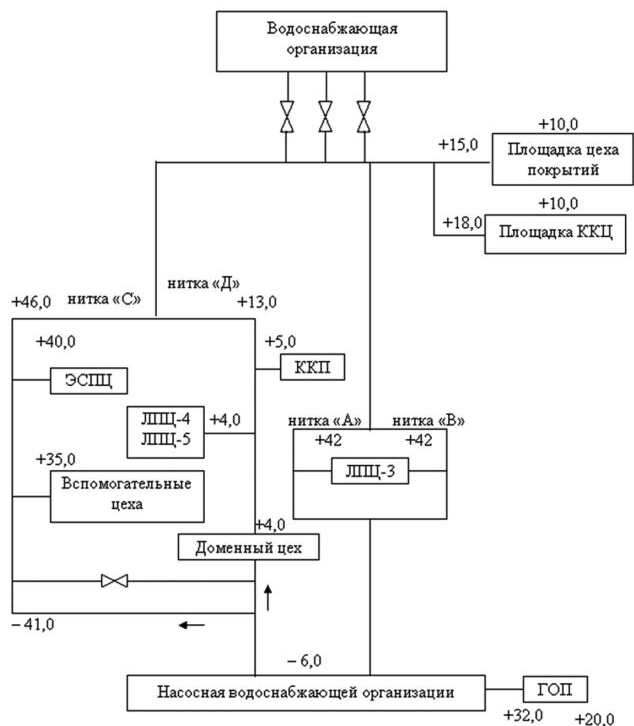


Рис. 6. Манометрическая съёмка водопроводных сетей ОАО «ММК» после оптимизации режимов водоснабжения, м вод. ст.:

«+» – вода выходит с промплощадки на насосную станцию;
«->» – вода от насосной станции поступает на промплощадку

Пересчет кольцевой схемы водоснабжения позволил провести мероприятия по распределению давления в магистральных сетях без ущерба для потребителей. Представленная оптимизация схемы проведена в 2008 г.; это позволило снизить потери в водопроводных сетях при минимальных капитальных затратах.

Манометрическая съемка после оптимизации гидравлических режимов приведена на **рис. 6**.

В результате проведенных исследований и использования математического моделирования было рекомендовано:

- снизить давление ППВ по нитке «С–вход» с 70 до 46 м вод. ст. Снижение давления осуществлялось дросселированием с помощью запорно-регулирующей арматуры на нитке «С–вход». Снижение расхода по нитке «С» составило 280 м³/ч (с 450 до 170 м³/ч);
- при снижении давления по нитке «С–вход» изменено направление движения потока в узле «С–выход», а именно от насосной водоснабжающей организации на промплощадку ОАО «ММК» (на **рис. 5, 6** направление движения воды показано стрелками);
- уровень ППВ в насосной станции поддерживают подачей воды через трубопроводы ниток «А» и «В».

Потребление ППВ на промышленной площадке ОАО «ММК» до и после оптимизации приведено в **таблице**.

Потребление пожарно-питьевой воды на промышленной площадке ОАО «ММК», тыс. м³

Месяц	Год			
	2007	2008	2009	2010
Январь	593,131	651,554	607,129	557,527
Февраль	522,3213	596,877	570,284	531,329
Март	602,804	633,709	660,666	572,018
Апрель	589,232	628,856	626,864	548,793
Май	630,727	632,228	650,188	572,802
Июнь	614,976	592,497*	645,147	572,256
Июль	631,251	608,650	624,311	593,863
Август	622,797	568,566	596,340	
Сентябрь	611,193	551,366	545,159	
Октябрь	643,506	597,050	548,924	
Ноябрь	623,307	598,762	552,346	
Декабрь	647,589	585,016	579,316	
Всего:	7332,837	7245,131	7206,674	

* Начало оптимизации по режимам водоснабжения.

Таким образом, проведение организационно-технологических мероприятий, связанных с организацией учета расходов ППВ у потребителей и совершенствованием гидравлических режимов водоснабжения промплощадки ОАО «ММК» позволило снизить потребление ППВ в ОАО «ММК» на 12% с годовым экономическим эффектом 4,5 млн руб.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 332.12

Бессонова Ю.А., Слуккина С.А.

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР

Во второй половине XX века в мире произошли крупные перемены в формах собственности вследствие концентрации производства и создания корпораций, способствующих сращиванию промышленного, торгового и финансового капиталов [1]. Российские предприятия не стали исключением из этого веяния: несколько волн реструктуризационных преобразований, зачастую кардинальных, пережили крупнейшие представители различных отраслей промышленности. Следствием этого стало возникновение различного вида интегрированных структур.

Рассмотрим некоторые подходы к оценке эффективности реструктуризации. Одним из самых распространенных является подход, основанный на оценке изменения стоимости бизнеса. Например, по мнению Н.П. Харченко [2], критерием оценки эффективности процесса реструктуризации целесообразно считать показатель прироста (уменьшения) стоимости бизнеса, которую рационально определять на основе прогноза движения потоков наличности. В качестве параметра, характеризующего экономический эффект деятельности хозяйствующего субъекта (выраженный в стоимостных показателях), целесообразно использовать показатель «профицита/дефицита денежных средств», определяемого как разность прихода и расхода денежных средств в отчетном периоде. Для определения реальной величины эффекта на текущий момент времени экономически верным будет использование показателя чистой текущей (дисконтированной) стоимости денежных потоков.

В свою очередь Т.В. Колосова [3] считает, что исходным пунктом любого из существующих методов оценки эффективности реструктуризации является признание факта изменений показателей от одного отчетного периода к другому. Такая оценка реструктуризации может применяться в единичных случаях и имеет серьезные ограничения по следующим причинам: не всегда можно корректно задать исходные данные; результаты более зависимы от избранной компанией учетной политики; в методиках не рассматривается возможность интеграции или разделения предприятий. Данный автор не отрицает приемлемости существующих методов оценки на основе инвестиционных показателей, но значения этих показателей не всегда адекватно характеризуют процесс реструктуризации. С целью разрешения этой проблемы предложен комплексный механизм оценки эффек-

тивности реструктуризации, основанный на использовании интегрального показателя, а именно – оценки рыночной стоимости предприятий.

Рассчитать стоимость предприятия для оценки эффективности реструктуризации предлагается по следующей формуле:

$$PV = A + EVA, \quad (1)$$

где PV – рыночная стоимость предприятия; A – чистые активы, которые включают рыночную стоимость недвижимого имущества, машин и оборудования, финансовых вложений, товарно-материальных запасов; EVA – экономическая добавленная стоимость, отражающая изменения на предприятии после реструктуризации.

Эффект проекта реструктуризации предприятия (EVA) отражается следующей формулой:

$$EVA = (P - T) - IC \cdot WACC, \quad (2)$$

где P – прибыль предприятия от операционной деятельности предприятия, руб.; T – налоги и другие обязательные платежи, руб.; IC – затраты на реструктуризацию, руб.; $WACC$ – средневзвешенная стоимость капитала, %.

Для оценки эффективности реструктуризации автором предлагается не только определить будущую стоимость предприятия, но и рассчитать изменение стоимости за период проведения преобразований по следующей формуле:

$$\Delta PV = PV_k - PV_n, \quad (3)$$

где ΔPV – изменение стоимости предприятия за время проведения реструктуризации; PV_n – стоимость предприятия до реструктуризации; PV_k – стоимость предприятия после реструктуризации.

Значение $\Delta PV > 1$ соответствует увеличению стоимости предприятия после проведенных преобразований и характеризует эффективность проводимых мероприятий; значения $\Delta PV = 1$ и $\Delta PV < 1$ соответствуют уменьшению стоимости.

По мнению Т.Д. Низамовой [4], для оценки экономической привлекательности проекта реструктуризации необходимо исходить из: размера инвестиций (вложений капитала), величины денежных потоков. Результаты такого анализа характеризуются общепринятыми показателями, среди которых наиболее

важными являются: чистая текущая стоимость (*NPV*) с учетом ставки дисконта, рентабельность инвестиций (*PI*), внутренняя норма доходности (*IRR*), срок окупаемости (*PBP*), точка безубыточности. Данный автор считает, что, исходя из сложности экономического обоснования инвестиционных проектов в процессе реструктуризации, их необходимо разделить на две условные группы:

- проекты, предусматривающие повышение эффективности деятельности предприятия в рамках сложившихся условий, заданных исходным экономическим состоянием предприятия;
- проекты, предполагающие расширение деятельности предприятия, его влияния и доли на рынке сбыта, характеризующие рост инвестиционной активности и развитие предприятия.

В свою очередь Г.С. Мерззликина, Е.А. Семикин [5] считают, что, как правило, эффективность реструктуризации может оцениваться в долгосрочной перспективе. Этот период колеблется от 3 до 5 лет, в зависимости от типа компании и производства. Оценить эффективность мероприятий по реструктуризации можно с использованием множества частных финансово-экономических показателей, таких как рост доходности, прибыли на акцию, повышение оборачиваемости активов, увеличение объемов производства и сбыта продукции и т.д. При этом замечают, что ни в одном из перечисленных случаев нельзя получить достоверной на сто процентов информации. Наиболее комплексным и объективным показателем эффективности мероприятий служит оценка изменения стоимости бизнеса. Основное условие проведения реструктуризации компании является стоимостной разрыв, т.е. разница между стоимостью, которой обладает компания в настоящее время (текущей стоимостью), и потенциальной стоимостью, которая достигается при изменении ряда обстоятельств. Стоимостной разрыв является чистой текущей стоимостью эффекта реструктуризации.

Для оценки эффективности создания интегрированных структур достаточно часто применяется [6] модернизированная Z-модель Альтмана, которая описывает финансовую устойчивость отдельно взятых предприятий до слияния и устойчивость вертикально интегрированной компании после слияния.

Данная Z-модель имеет вид

$$Z = 1,2X_1 + 1,4X_2 + 3,3X_3 + 0,6X_4 + 1,0X_5, \quad (4)$$

где X_1 – отношение рабочего капитала к общим активам, где рабочий капитал определяется как разность между оборотными средствами и текущими (краткосрочными) обязательствами; X_2 – отношение накопленного капитала к общим активам. Накопленный капитал – та часть капитала корпорации, которая образовалась за счет нераспределенной прибыли прошлых лет; X_3 – отношение балансовой прибыли к общим активам; X_4 – отношение капитала корпорации к общему долгу; X_5 – отношение объема продаж к общим активам.

Сравнение величин Z-модели до и после слияния позволяет сделать вывод об эффективности создания

вертикально интегрированной компании. Если величина Z после слияния возросла по сравнению с величинами Z компаний до слияния, то интегрированная компания имеет большую финансовую устойчивость, чем отдельные компании.

По нашему мнению, данный показатель может служить достаточно объективным критерием для сопоставления и выбора различных вариантов развития. Однако величина Z носит условный характер, не позволяющий оценить экономический эффект от реализации принимаемых решений.

Различия приведенных подходов во многом обусловлены тем, что оценка эффективности реструктуризационных процессов и создания интегрированной структуры может производиться на разных этапах и с различными целями.

1. После проведенной реструктуризации для подведения ее итогов. В этом случае приемлемы все три подхода к оценке прироста стоимости бизнеса – на основе рыночной оценки, чистой текущей стоимости и стоимости активов. В определенной мере, отражая разные аспекты производимых перемен, эти подходы могут дополнять друг друга. Некоторые оговорки следует сделать о рыночном подходе, применимость которого в современных экономических условиях весьма ограничена, в чем мы согласны с такими авторами, как Т.В. Колосова [3], Г.С. Мерззликина, Е.А. Семикин [5].

Даже при условии стабильной экономики рыночная оценка фирмы подвержена значительным колебаниям с изменением конъюнктуры рынка, никак не связанным с внутренними реструктуризационными преобразованиями. В еще большей мере это характерно для современной российской экономики.

2. До проведения реструктуризации – при выборе ее стратегии и тактики, при формировании оптимальной программы преобразований. В этом случае, на наш взгляд, наиболее адекватным способом оценки эффективности реструктуризационных процессов является оценка увеличения стоимости бизнеса на основе прироста денежных потоков (чистой текущей стоимости).

Уже отмеченная выше ограниченность рыночного подхода при этом усугубляется необходимостью прогнозирования будущей рыночной стоимости фирмы при различных вариантах реструктуризационных преобразований. Обоснованность принимаемых на базе таких оценок управленческих решений невысока. Неприемлемость в этом случае подхода, основанного на оценке стоимости активов, обусловлена тем, что выбор всегда окажется в пользу более дорогостоящего варианта независимо от его эффективности.

Рассмотрим способы оценки эффективности отдельных составляющих механизма формирования интегрированной структуры, предложенных нами в работах [7, 8].

Методика мониторинга участников и партнеров интегрированной структуры [7] ориентирована на повышение обоснованности реструктуризационных решений и обеспечение роста эффективности функционирования интегрированной структуры в целом. Для каждого инициированного в результате мониторинга реструктуризационного проекта (интеграцион-

ного или дезинтеграционного) при его принятии оценивается эффект, выражаемый в приросте чистой текущей стоимости интегрированной структуры в целом. Разность базовой величины чистой текущей стоимости $PV_{\text{баз}}$ и получаемой в результате реализации проекта $PV_{\text{нр}}$ может являться эффектом применения предлагаемой методики.

Экономическим результатом применения метода оптимизации производственной мощности [8] однотипных производств является повышение общего уровня эффективности работы интегрированной структуры. Оптимизация производственной мощности может не приводить к приросту денежных потоков, но позволяет уменьшить оттоки, в частности, сократить затраты на производство продукции последующих переделов. Соответственно экономический эффект применения метода выражается в минимизации средних ожидаемых затрат, связанных с созданием и содержанием мощностей, а также дополнительных расходов, связанных с закупками ресурсов на стороне при недостатке собственных производственных мощностей. В каждой конкретной ситуации величина получаемого эффекта может быть различной в зависимости от того, настолько далека от оптимума реальная мощность. Чем дальше от оптимального значения стартовая (базовая) величина мощности, тем выше эффект от ее оптимизации. И оценивается он как разность суммарных затрат при сохранении имеющихся мощностей и их оптимальном уровне. При этом базовый уровень затрат $C(V_{\text{баз}})$ можно выразить как

$$C(V_{\text{баз}}) = S(V_{\text{баз}} - M)P\{M \leq V_{\text{баз}}\} + h(M - V_{\text{баз}})P\{M > V_{\text{баз}}\}, \quad (5)$$

где $V_{\text{баз}}$ – базовый уровень суммарной производственной мощности; M – потребность в продукции рассматриваемых производств (случайная величина с изученным законом распределения); S – удельные затраты на создание и содержание производственных мощностей; h – затраты, связанные с дефицитом производственных мощностей; $P\{M \leq V_{\text{баз}}\}$ и $P\{M > V_{\text{баз}}\}$ – вероятности выполнения соответствующих неравенств.

Оптимальное значение $V_{\text{опт}}$ минимизирует эту сумму затрат (5).

Эффект от оптимизации мощности определяется следующей разностью:

$$\Delta = C(V_{\text{опт}}) - C(V_{\text{баз}}), \quad (6)$$

где $C(V_{\text{опт}})$ – уровень затрат, рассчитываемых по формуле (5), при оптимальном уровне производственной мощности.

Экономический результат реализации предлагаемого методического подхода к распределению общих инвестиционных ресурсов интегрированной структуры [8] выражается в повышении эффективности осуществляемых инвестиций. Количественно сумма эффекта оценивается как изменение величины прироста чистой текущей стоимости $\Delta PV_{\text{нр}}(K)$, достигаемой при использовании оптимизационного подхода и объеме инвестиций K , по сравнению с базовой величиной

прироста $\Delta PV_{\text{баз}}(K)$, обеспечиваемой тем же объемом инвестиций при существующем подходе:

$$\Delta = \Delta PV_{\text{нр}}(K) - \Delta PV_{\text{баз}}(K), \quad (7)$$

где K – общий объем инвестиций в оцениваемом периоде.

Оценивая эффективность участия в интегрированной структуре, с точки зрения рассматриваемого критерия (чистой текущей стоимости предприятия), в притоках необходимо учесть их снижение за счет низких корпоративных цен на производимую продукцию, дополнительные притоки за счет роста (и большей стабильности) объемов производства, притоки за счет централизованных инвестиций в развитие производства. В оттоках должно быть учтено их снижение за счет более низких цен на ресурсы и услуги, снижение за счет исключения коммерческих расходов, снижение логистических затрат на обеспечение предприятия материальными ресурсами, связанное с гарантированным снабжением от партнеров по интегрированной структуре, что ведет также к большей стабильности производства и сокращению запасов сырья, материалов, полуфабрикатов. Для участника, стабильно находящегося в составе интегрированной структуры и не имеющего намерения выхода, эффект его нахождения в структуре можно оценить как разность перечисленных выше дополнительных притоков и оттоков. Экономический эффект от вхождения в интегрированную структуру, строго говоря, можно корректно рассчитать только для предприятий, на определенном этапе своего существования функционировавших вне интегрированной структуры и планирующих вхождение либо уже вошедших. Для таких предприятий существует определенная база сравнения: ситуация до присоединения, сопоставляемая с последствиями после, следовательно, эффект, прослеженный по отдельным составляющим денежных потоков, можно в целом оценить как:

$$\Delta PV = PV - PV_{\text{баз}}, \quad (8)$$

где ΔPV – изменение стоимости предприятия; PV – чистая текущая стоимость предприятия после присоединения; $PV_{\text{баз}}$ – базовая величина чистой текущей стоимости предприятия.

Для предприятий, существующих в составе головной, материнской компании, не имевших самостоятельной истории, такая база сравнения отсутствует, и эффект их существования внутри интегрированной структуры может быть оценен по сравнению с гипотетическим самостоятельным существованием вне структуры, в чисто рыночных условиях. Такие расчеты имеют смысл при наличии намерения (или анализируемой возможности) выхода предприятия из состава интегрированной структуры. В этом случае оценки также можно провести по критерию (8) с учетом прогнозов PV после выхода из состава интегрированной структуры. Для конкретного предприятия эффект его участия в интегрированной структуре может оказаться отрицательным. Это может быть вызвано дискриминационной

политикой управляющей компании в отношении данного участника либо объективной общей ситуацией в интегрированной структуре. В этом случае возможны различные внеэкономические интересы и механизмы, удерживающие участника в рамках интегрированной структуры. При их отсутствии может быть целесообразен выход из состава интегрированной структуры (если это позволит его юридический статус), либо внесение изменений в характер экономических взаимоотношений с другими участниками.

Список литературы

1. Антонов Г.Д., Иванова О. П. Предпосылки интеграции и эволюция интегрированных структур в России // Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 5. С. 12–18.
2. Харченко Н.П. Необходимость оценки эффективности реструктуризации [Электронный ресурс] // Материалы VIII регион. конф. «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». Т. 3. Экономика. Ставрополь: СевКав ГТУ. 2004. <http://www.ncstu.ru>.
3. Колосова Т.В. Стоимостная оценка предприятия как показатель эффективности реструктуризации // Архитектура. Геоэкология. Экономика: сб. трудов аспирантов и магистрантов. Н.Новгород: ННГАСУ, 2004. С. 192–193.
4. Низамова Т.Д. Проблемы реструктуризации предприятий Республики Таджикистан // Экономика Таджикистана: проблемы и решения. Приложение к Евразийскому междунар. науч.-аналит. журналу «Проблемы современной экономики» (Сборник научных статей). Душанбе: СПб., 2005. С. 26–34.
5. Мерзликина Г.С., Семикин Е.А. Теоретические вопросы реструктуризации. Волгоград: Волгоградский дом печати, 2001. 343 с.
6. Annual reports on Russian economy. Trends and prospects. Moscow: Institute for the Economy in Transition, 1992–1999.

7. Бессонова, Ю.А. Оптимизация производственных мощностей интегрированных структур // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. 2008. № 1(33). С. 215–217.
8. Бессонова Ю.А. Функционирование интегрированных структур: оптимизация производственных мощностей // Вестник ИНЖЭКОН. Сер. Экономика. 2008. № 5. С. 284–287.

Bibliography

1. Antonov G.D., Ivanova O.P. Preconditions for integration and evolution of integrated structures in Russia // Management in Russia and abroad. 2001. № 5. P. 12–18.
2. Harchenko N.P. The need for estimation of efficiency of restructuring [Internet resources] // Materials of the VII regional conference «University science to Northern Caucasia». Vol. 3. Economics. Stavropol: NC STU. 2004. <http://www.ncstu.ru>.
3. Kolosova T.V. Estimation value of the company as an efficiency index of restructuring // Architecture. Geoecology. Economics: Papers of post-graduate students and undergraduates. Nizhny Novgorod: NN GASU, 2004. P. 192–193.
4. Nizamova T.D. Problems of enterprise restructuring of the Republic of Tajikistan // Economics of Tajikistan: problems and solutions. Appendix to Eurasian international scientific and analytical journal «Problems of Modern Economy» (Collected scientific papers). Dushanbe: St. Petersburg, 2005. P. 26–34.
5. Merzlikina G.S., Semikin E.A. Theoretical issues of restructuring. Volgograd: Volgograd publishing house, 2001. 343 p.
6. Annual reports on Russian economy. Trends and prospects. Moscow: Institute for the Economy in Transition, 1992–1999.
7. Bessonova J.A. Optimization of production capacities of integrated structures // Bulletin of Irkutsk state technical university. 2008. № 1(33). P. 215–217.
8. Bessonova J.A. Operation of integrated structures: optimization of production capacities // Bulletin of INZHEKON. Series «Economics». 2008. № 5. P. 284–287.

УДК 332.135:005.52

Поликарпова М.Г.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СЕКТОРОВ ЭКОНОМИКИ РОССИИ*

В процессе решения широкого круга социально-экономических, исследовательских и управленческих задач, связанных с интеграционными процессами, возникает необходимость анализа и формализации задач, связанных со сравнением и классификацией российских секторов экономики. Термин «классификация» тесно связан с такими понятиями, как группировка, типологизация, систематизация, дискриминация, кластеризация и является одним из основополагающих в практической и научной деятельности.

Под классификацией понимают разделение рассматриваемой совокупности объектов или явлений на однородные, в определенном смысле, группы либо отнесение каждого объекта (из заданного множества классифицируемых объектов) к одному из заранее известных классов (при этом классифицируемое «за-

данное множество» может состоять из единственного объекта) [3]. Систематизация современного математического инструментария разбиения объектов на однородные группы в зависимости как от наличия обучающих выборок, так и от наличия априорных сведений о законе распределения вероятностей внутри классов представлена в **табл. 1**.

Главное отличие схемы параметрического дискриминантного анализа от метода расщепления смесей вероятностных распределений состоит в способе оценивания неизвестных параметров, от которых зависят функции, описывающие классы. В методе расщепления смесей вероятностных распределений параметры оцениваются не по обучающим выборкам, а по классифицируемым наблюдениям с помощью одного из известных методов статистического оценивания параметров.

Так как секторы экономики России отличаются неравномерностью протекания интеграционных процессов, при исследовании пространственной структу-

* Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-449.2010.6).

ры интеграционной деятельности основное внимание было уделено показателю из системы показателей интеграционной деятельности на макроуровне – стоимостной объем рынка сделок М&А, отражающему в интегрированной форме различные аспекты интеграционной деятельности того или иного сектора экономики [1]. Данный показатель может служить адекватной характеристикой интеграционной активности секторов экономики РФ.

С целью максимального использования информации, содержащейся в значениях этого признака, были выбраны параметрические методы классификации. Экономико-математическое моделирование интеграционной активности секторов экономики России предполагает декомпозицию закона распределения $f(x)$. Его представляют в виде смеси k законов распределения, каждый из которых $f_j(x, \theta_j)$ описывает распределение однородной группы объектов, долю которого в общей совокупности определяет весовой коэффициент q_j в модели:

$$f(x) = \sum_{j=1}^k q_j f_j(x; \theta_j), \tag{1}$$

где θ_j – вектор параметров закона распределения объектов j -й группы. Сумма всех весовых коэффициентов должна быть равна единице.

Для исследования интеграционной активности секторов экономики РФ был использован метод расщепления смесей вероятностных распределений, поскольку каждый класс интерпретируется как параметрически заданная одномодальная генеральная совокупность при неизвестном значении определяющего его векторного значения параметра θ_j и соответственно каждое из клас-

сифицируемых наблюдений считается извлеченным из одной из этих генеральных совокупностей.

При одинаковом виде законов распределения $f(x; \theta)$ каждой из однородных групп задачу расщепления смеси вероятностных распределений можно представить в виде:

$$f(x) = \sum_{j=1}^k q_j f(x; \theta_j). \tag{2}$$

При этом основной проблемой является выбор вида закона распределения. Анализируемый признак «стоимостной объем рынка интеграционных сделок» представляет собой результат совокупного действия множества факторов, среди которых, в силу достаточного разнообразия элементов хозяйственной деятельности каждого сектора экономики РФ, отсутствуют явно доминирующие, а характер действия каждого фактора, как наблюдаемого, так и латентного, на результирующее значение показателя можно считать мультипликативным. Поэтому можно предположить, что для однородной группы в этом смысле российских секторов экономики закон распределения признака будет логарифмически нормальным:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \tag{3}$$

где μ и σ – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины $\ln x$.

Оценку вектора параметров модели $\theta = (q_1, \dots, q_k; \theta_1^T, \dots, \theta_k^T)^T$ целесообразно производить методом максимального правдоподобия путем максимизации логарифма функции правдоподобия:

$$\ln l(\hat{\theta}_{om}) = \max \sum_{j=1}^k \ln f(x, \theta). \tag{4}$$

После получения оценок встает вопрос классификации объектов. Для получения однозначного правила отнесения произвольного объекта к одному из выделенных классов можно применить байесовский подход, использующий в качестве критерия минимум среднего риска ошибочной классификации:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k r(i, j) P(i, j) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k r(i, j) P(i / j) P(j) = \min. \end{aligned} \tag{5}$$

Решающее правило зависит от выбранной функции стоимости $r(i, j)$ отнесения i -го объекта к j -му классу. При простой функции стоимости $r(i, j) = -\delta_{ij}$, где $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ – символ Кронекера, условие правильной классификации будет определяться выражением

Таблица 1

Систематизация современных методов классификации объектов

Априорная информация о законе распределения вероятностей внутри классов	Предварительная выборочная информация	
	Отсутствие обучающих выборок («без учителя»)	Наличие обучающих выборок («с учителем»)
Вид закона распределения вероятностей внутри классов неизвестен	Кластерный анализ	Непараметрические методы дискриминантного анализа
Вид закона распределения вероятностей внутри классов известен (параметры неизвестны)	Метод расщепления смесей вероятностных распределений	Параметрические методы дискриминантного анализа
Вид закона распределения вероятностей внутри классов известен (параметры известны)	Статистические критерии проверки статистических гипотез	

$$-\sum_{i=1}^n P(i/i)P(i) = \min \text{ или } \sum_{i=1}^n P(i/i)P(i) = \max. \quad (6)$$

Вероятность правильной классификации на интервале шириной Δx в окрестности точки x может быть представлена приближенным равенством $P(i/i) \approx f_i(x)\Delta x$, которое связывает вероятность $P(i/i)$ правильного отнесения объекта i -му классу и плотность вероятности i -го компонента смеси законов распределений. Используя эту связь, перейдем к правилу классификации:

$$\sum_{i=1}^n P(i) f_i(x) = \max. \quad (7)$$

Величина $P(i)$ представляет собой априорную вероятность отнесения объекта к i -му классу, равную доле объектов i -го класса в общей совокупности. Ее эмпирическим аналогом является оценка весового коэффициента q_i : $\bar{P}(i) = \bar{q}_i$. Данную оценку можно использовать в итоговом решающем правиле:

$$\sum_{i=1}^n \bar{f}_i(x) \bar{q}_i = \max, \quad (8)$$

определяющем границу между соседними группами как абсциссу точки пересечения их взвешенных модельных плотностей вероятности [4]. Иллюстрация решающего правила для модельного распределения в виде смеси трех компонент приведена на рис. 1.

Для моделирования интеграционной активности секторов экономики России были использованы данные, предоставленные в апреле 2010 г. аналитической группой M&A – Intelligence журнала «Слияния и поглощения» за 2003–2009 гг. Для анализа данной структуры были взяты 2 предкризисных года: 2005 и 2007, а также кризисный 2009. Секторы экономики, у которых в перечисленные выше годы интеграционная активность была равна нулю, предварительно были выделены в отдельную группу (табл. 2).

В 2009 г. несмотря на то, что произошло снижение стоимости покупаемых активов ниже планки в 5 млн \$ на 24% увеличилось количество секторов экономики с нулевой интеграционной активностью по сравнению с 2005 г. и на 21% по сравнению с 2007 г., что объясняется рядом причин, связанных с кризисом:

- отсутствие доступных кредитных средств на проведение сделок в прежних объемах ввиду углубления мирового кризиса ликвидности;
- отмена или затягивание ряда сделок ввиду трудности справедливой
- оценки продаваемого/покупаемого бизнеса и др.

Исследование гистограммы логарифма анализируемого признака «стоимостной объем рынка интеграционных сделок» подтвердил справедливость выдвинутого предположения о логарифмически нормальном законе распределения для отдельной группы секторов экономики РФ. Однако полимодальность распределения свидетельствует о присутствии в вы-

борке элементов различных однородных совокупностей. Следовательно, можно считать анализируемую совокупность смесью однородных совокупностей, каждая из которых имеет логарифмически нормальное распределение.

Согласно гистограмме логарифма стоимостного объема рынка интеграционных процессов за 2005 и 2009 гг. можно предположить наличие трех страт, а за 2007 г. можно предположить наличие двух страт с колоколообразными функциями распределения. Среднее значения μ_j для логарифма каждой страты определяли как абсциссу точки ее предполагаемого максимума, стандартное отклонение логарифма признака – расстоянием по оси абсцисс от предполагаемой точки максимума до точки перегиба плотности вероятности логарифма признака; весовой коэффициент каждой страты пропорционален площади под предполагаемой взвешенной кривой ее распределения в смеси (табл. 3).

Далее было рассчитано начальное приближение теоретического распределения и проведено его сравнение с эмпирическим распределением. Существенное отличие гистограмм в первую очередь объясняет-

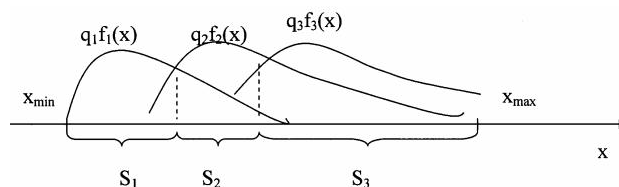


Рис. 1. Компоненты общего закона распределения с границами страт

Таблица 2

Секторы экономики РФ с нулевой интеграционной активностью

№	2005 год	2007 год	2009 год
1	ЖКХ	–	–
2	Медицина	–	Медицина
3	Телекоммуникации	Телекоммуникации	–
4		Оборонная промышленность	Оборонная промышленность
5		Стекольная промышленность	Стекольная промышленность
6		Целлюлозно-бумажная промышленность	Целлюлозно-бумажная промышленность
7			Добыча полезных ископаемых
8			Реклама
9			Сельское хозяйство
10			Лесная промышленность
11			Торговля
12			Фармацевтика
13			Химическая промышленность

ся тем, что параметры, использованные для построения теоретического распределения, не являются оптимальными. Получение наилучших значений параметров требует выбора критерия оптимальности и организации процедуры получения оценок. Для этого был выбран метод максимального правдоподобия. Он предусматривает использование в качестве оценок таких значений параметров, которые максимизируют многомерную плотность вероятности распределения признака для всей совокупности наблюдаемых значений (функция правдоподобия):

$$L = f(x_1, \dots, x_n, \mu_1, \dots, \mu_k, \sigma_1, \dots, \sigma_k, q_1, \dots, q_k).$$

Аргументами функции правдоподобия для данной выборки являются значения оцениваемых параметров. В случае независимой выборки плотность вероятности многомерного распределения эквивалентна произведению одномерных плотностей вероятности:

$$L = f(x_1, \dots, x_n, \mu_1, \dots, \mu_k, \sigma_1, \dots, \sigma_k, q_1, \dots, q_k) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \mu_1, \dots, \mu_k, \sigma_1, \dots, \sigma_k, q_1, \dots, q_k).$$

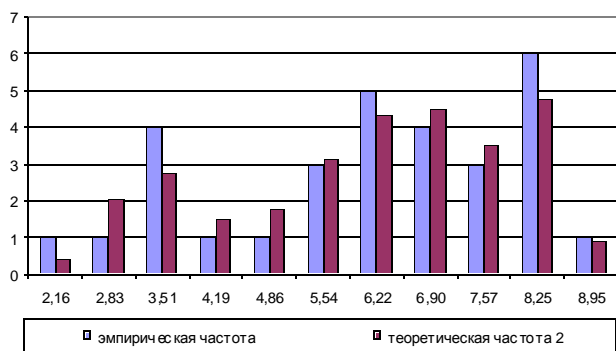


Рис. 2. Гистограммы эмпирического и теоретического распределений стоимостного объема рынка интеграционных процессов, 2005 г.

Таблица 3

Начальные приближения параметров смеси распределений за 2005 г.

Номер страты	$\mu_{теор}$	$\sigma_{теор}$	$q_{теор}$
1	3,51	1,35	0,3
2	6,22	1,36	0,5
3	8,25	0,68	0,2

Таблица 4

Оценки параметров смесей логарифмически нормальных распределений

Номер страты	2005 г.			2007 г.			2009 г.		
	$\mu_{теор}$	$\sigma_{теор}$	$q_{теор}$	$\mu_{теор}$	$\sigma_{теор}$	$q_{теор}$	$\mu_{теор}$	$\sigma_{теор}$	$q_{теор}$
1	2,95	0,53	0,19	—	—	—	1,61	0,00014	0,10
2	6,30	1,26	0,72	4,16	0,70	0,26	4,29	0,55	0,16
3	7,87	0,02	0,09	7,67	1,38	0,74	7,50	1,07	0,74

Значения параметров $\mu_1, \dots, \mu_k, \sigma_1, \dots, \sigma_k, q_1, \dots, q_k$, максимизирующие функцию правдоподобия, будут максимально правдоподобными оценками этих параметров (i – номер сектора экономики РФ, n – общее число секторов экономики). Максимизацию функции правдоподобия можно заменить максимизацией монотонно связанной с ней функцией логарифма отношения правдоподобия:

$$l = \ln L = \sum_{i=1}^n f(x_i, \mu_1, \dots, \mu_k, \sigma_1, \dots, \sigma_k, q_1, \dots, q_{k-1}).$$

Полученные в результате проведенного анализа параметры за 2005, 2007 и 2009 гг. представлены в табл. 4.

На основе максимально правдоподобных оценок была построена гистограмма теоретического распределения стоимостного объема рынка интеграционных процессов секторов российской экономики (на рис. 2 представлены гистограммы эмпирического и теоретического распределений стоимостного объема рынка интеграционных процессов за 2005 г.).

Параметрическая модель хорошо описывает имеющиеся данные об интеграционной активности секторов экономики, о чем свидетельствует близость теоретической и эмпирической гистограмм. Отклонение теоретического от эмпирического распределения стоимостного объема рынка интеграционных процессов в 2005 г. составило $\xi = \sum \frac{|y_m - y_e|}{n} = 0,24$, в 2007 г. – $\xi = 0,18$, в 2009 г. – $\xi = 0,19$.

Границы страт при использовании байесовского критерия минимума среднего риска ошибок классификации в отсутствие дополнительной априорной информации можно определить как абсциссы точек пересечения взвешенных кривых распределения соседних страт. На рис. 3 представлена параметрическая модель секторов экономики России по уровню интеграционной активности в 2005 г. и ее декомпозиция.

В 2005 г. секторы экономики, у которых $\ln x < 3,84$, следует отнести к числу отстающих (страта 1), при $3,84 \leq \ln x < 7,82$ – к числу средних (страта 2), при значениях $\ln x \geq 7,82$ – к третьей, самой передовой страте по уровню интеграционной активности. В 2007 г. секторы экономики, у которых $\ln x < 5,23$, следует отнести к числу средних (страта 2), при значениях $\ln x \geq 5,23$ – к самой передовой 3 страте. В 2009 г. секторы экономики, у которых $\ln x < 1,62$, следует отнести к числу отстающих (страта 1), при $1,62 \leq \ln x < 5,22$ – к числу средних (страта 2), при значениях $\ln x \geq 5,22$ – к третьей, самой передовой страте.

За рассматриваемый период (рис. 4) уменьшилось число секторов экономики с низкой интеграционной активностью (с 6 в 2005 г. до 2 в 2009 г.), а также резко уменьшилось число секторов со средней интеграционной активностью (с 19 в 2005 г. до 4 в 2009 г.). При этом в 2009 г., несмотря на то, что резко увеличилось количество секторов экономики с нулевой интеграционной активностью, резко возросло число секторов экономики РФ с высокой степенью интеграционной активности

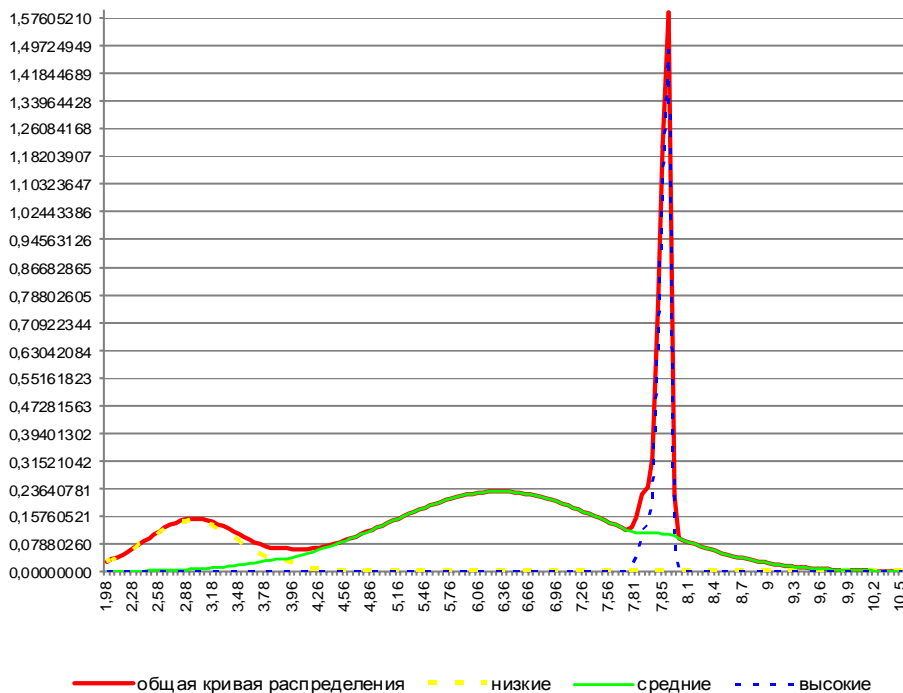


Рис. 3. Параметрическая модель секторов экономики России по уровню интеграционной активности в 2005 г. и ее декомпозиция

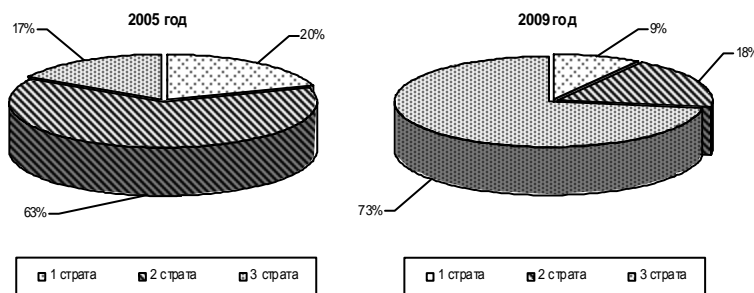


Рис. 4. Структура секторов экономики России по уровню интеграционной активности в 2005 и в 2009 гг.

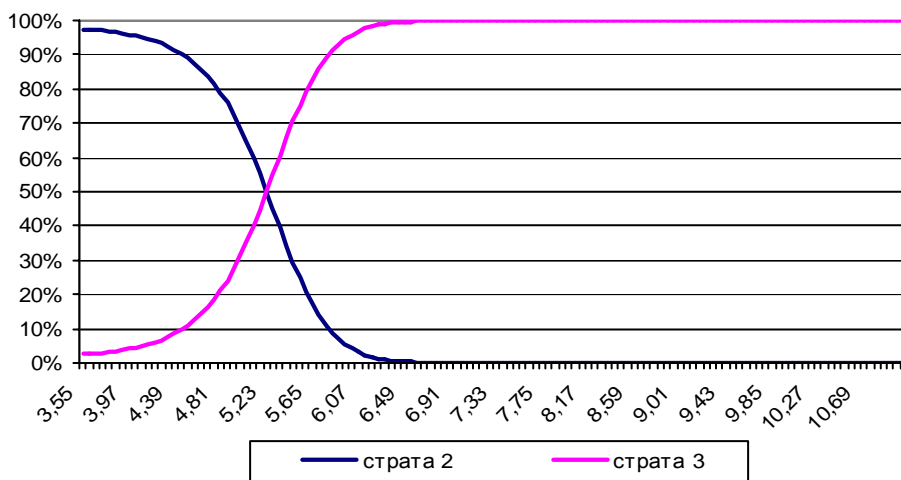


Рис. 5. Функция принадлежности секторов экономики РФ к каждой из выделенных страт, 2007 г.

(с 5 в 2005 г. до 16 в 2009 г.), что связано с появлением в кризис возможности купить конкурента по сравнительно более низкой цене (резко подешевевшие в кризис активы).

График функции принадлежности, рассчитанный на основе декомпозиции теоретического распределения для предкризисного 2007 г. приведен на рис. 5. Изменение значений функции принадлежности во времени обуславливает наглядное представление о динамике перехода объекта из одной страты в другую. Каждая страта может быть охарактеризована по ее наиболее ярким представителям, обладающим близкими к единице значениями функции принадлежности к данной страте. Так, например, для 2 страты наиболее яркими представителями являются киноиндустрия, медицина, сельское хозяйство, для 3 страты – металлургия, электроэнергетика, нефтегазовая сфера.

Состав лидирующей третьей страты представлен в табл. 5.

Таким образом, проведенное исследование показало, что наблюдаются существенные межотраслевые различия по основному показателю, характеризующему интеграционную активность. Финансово-экономический кризис объективно обозначил целые отрасли-аутсайдеры по экономическим показателям, в то же время выявил и ряд конкретных компаний-лидеров, в том числе и по количеству транзакций и стоимостному объему рынка в сфере слияний и поглощений [2].

В наименьшей степени кризис коснулся капитализации золото добывающих компаний (ДПИ-золото). А некоторых компаний данной отрасли, например, таких как "Полиметалл", кризис, можно сказать, не коснулся, поскольку на сегодняшний момент капитализация данной компании значительно превышает

Таблица 5

Состав лидирующей страты за 2005, 2007 и 2009 гг.

№	2005	2007	2009
1	ДПИ-золото	ДПИ-золото	ДПИ-золото
2	Металлургия	Металлургия	Металлургия
3	Нефтегазовая	Нефтегазовая	Нефтегазовая
4	Пищевая	Пищевая	Пищевая
5	Строительство и недвижимость	Строительство и недвижимость	Строительство и недвижимость
6		Информационные технологии	Информационные технологии
7		ДПИ	–
8		Машиностроение	Машиностроение
9		Ритейл	Ритейл
10		Связь	–
11		СМИ	СМИ
12		Спорт	Спорт
13		Страхование	–
14		Торговля	–
15		Транспорт	Транспорт
16		Услуги	Услуги
17		Фармацевтика	–
18		Финансы	Финансы
19		Химическая	–
20		Электрoэнергетика	Электрoэнергетика
21		Прочее	Прочее
22			Телекоммуникации

ее докризисный уровень. Это обусловлено тем, что в кризис значительная часть инвесторов решила выйти из теряющих капитализацию компаний и вложиться в "вечные" ценности, то есть в золото.

При этом в 2009 г. в состав третьей лидирующей страты вошла телекоммуникационная сфера: за 2009 г. было совершено 15 сделок на общую сумму 11941 млн \$. Крупнейшей из объявленных среди сделок слияний и поглощений в мире в октябре 2009г. стала сделка по приобретению ОАО «Вымпел-коммуникации»¹, контрольного пакета акций ЗАО «Киевстар Дж. Эс. Эм.»² за 9999,90 млн \$ [6].

Altimo, управляющая телекоммуникационными активами Альфа-групп, и норвежская Telenor прервали один из самых продолжительных корпоративных конфликтов в современной России и договорились объединить мобильных операторов ВымпелКом и Киевстар, а также приостановить все находящиеся в производстве дела о спорах. Можно предположить, что основными целями объединения компаний могут быть:

- выход на неосвоенные рынки;
- создание за счет инновационных проектов новых рынков;
- продажа по более высокой цене интегрированной компании.

¹ Собственник покупателя: Altimo («Альфа-Групп») – 44,00%, Telenor – 29,90%, в свободном обращении (NYSE) – 26,10%.

² Собственник объекта: Telenor – 56,51%, ООО «Сторм» (Altimo) – 43,49%.

Таким образом, наибольший "профит" от M&A в кризис сосредоточен в секторах 3 лидирующей страты, а именно в строительстве и недвижимости, банковском бизнесе и ритейле. При этом среди российских бизнесменов в 2009 г. наиболее успешно использовал возможность приобретения активов по низким мультипликаторам стоимости Сулейман Керимов, купив ОАО Группа компаний «ПИК» (строительство и недвижимость), ОАО «Полюс Золото» (ДПИ-золото) и ОАО «Главстрой» (строительство и недвижимость). ООО УК "Металлоинвест" (ДПИ, металлургия) – один из наиболее проницательных стратегических инвесторов как на российском, так и мировом рынке интеграционных процессов.

ОК "Русал" (металлургия), с одной стороны, оказалась на грани банкротства, с другой – сумела системно вести переговоры с кредиторами, клиентами и инвесторами. Наконец, ОК "Русал" удалось довести идею IPO до конца, а в 2009 г. провести рг-кампанию по размещению своих акций в Гонконге.

Наиболее активным игроком рынка интеграционных процессов в 2009 г. было государство. Антикризисные меры были оформлены в виде предоставления субсидий и субвенций, оказания мер поддержки отдельным секторам экономики. В 2009 г. на все эти цели в РФ были предусмотрены дополнительные бюджетные ассигнования в размере 450 млрд руб. Субсидии и госгарантии по кредитам, взносы в уставной капитал компаний с госучастием перечислялись из Резервного фонда. При этом государство поддерживало российских предпринимателей и при осуществлении ими трансграничных сделок³. В России в 2009г. общий объем мер поддержки секторов экономики составил 7,1% ВВП [5].

На основе данных, предоставленных московским офисом компании Tax Consulting U.K., были выделены категории участников рынка M&A, выигравших в кризис от интеграционных сделок (табл. 6).

Проведя анализ 265 интеграционных сделок 22 секторов экономики РФ 2009 г. на общую сумму 42770 млн \$⁴, можно сделать вывод, что финансово-экономический кризис не повлек массового передела собственности в России. При этом кризис и M&A самым причудливым образом могут трансформировать роли "победителей" и "проигравших" от таких сделок. Нередко основные бонусы от интеграционных сделок использует сторона, которая внешне выглядит "проигравшей".

В данной работе на основе обобщения материала по M&A в различных секторах российской экономики за 2008–2009 гг. были выделены следующие характерные категории сделок слияния и поглощения в кризис:

– *Продажа непрофильных активов.*

В условиях недостатка финансирования собственники компаний используют любую возможность

³ Например, покупка бывшим министром энергетики РФ В.Юсуфовым судостроительных верфей Wadan Yards. Данная интеграционная сделка была одобрена канцлером Германии А.Меркель и президентом РФ Д.Медведевым, а комитет кредиторов Wadan Yards согласился продать верфи российскому бизнесмену за 40,5 млн.евро.

⁴ Уточненные данные аналитической группы M&A – Intelligence на 01.04.2010г.

Стратегические игроки, выигравшие в кризис от сделок M&A

№	Выигравшая сторона	Выигрыш	Пример	Потенциальный размер выигрыша
1	Амбициозно настроенные, динамично развивающиеся страны	Получают возможность выхода на рынки, которые до кризиса были для них закрыты (сырьевые, технологические, банковские и т.д.). Создают для своей экономики надежную сырьевую базу и мощную платформу для технологического рывка в будущем	Китай	Сотни миллиардов долларов
2	Госкомпании	В основном практически за бесценок получают активы, инфраструктуру, персонал и технологии «пошатнувшихся» конкурентов-частников	Покупка инвестбанка «КИТ-Финанс» структурами РЖД и Алросы за 500 руб.	Миллиарды долларов
3	Структуры, проходящие процесс оздоровления в рамках поглощения госкомпаниями	Зачастую огромный (близкий к «неограниченному») административный ресурс и дешевое заемное финансирование	Связь-банк, Глобекс, приобретенные ВЭБом	Сотни миллионов долларов
4	Компании, не испытывающие проблем с фондированием	Скупка конкурентов, активов, технологий и персонала с огромным дисконтом	Покупка 80 супермаркетов «Патэрсон» группой X5 Retail Group	Сотни миллионов долларов
5	Структуры, сознательно прошедшие процедуру слияния / объединения	Повышение капитализации компании, оптимизация численности персонала, бизнес-процессов и т.д.	Слияние МДМ-Банка и УРСА-Банка	Сотни миллионов долларов
6	Собственники, готовые продать бизнес (даже с дисконтом), на развитие которого не хватает средств	Выход из бизнеса хоть в какие-то деньги против альтернативы банкротства через определенный промежуток времени	Продуктовая сеть «Лента», проданная TPG Capital и «ВТБ-Капитал»	Сотни миллионов долларов
7	Собственники, готовые уступить контроль над бизнесом для реструктуризации долгов	Реструктуризация долга и получение дополнительного финансирования по перспективным проектам	Дон-Строй и ВТБ, Сбербанк Универсал Трансгрупп (УТГ) и Альфа-Банк	Сотни миллионов долларов
8	Дебиторы, которые «ждут», пока обанкротится кредитор	Излишняя агрессивность на рынке поглощений приводит к ослаблению (и даже банкротству) не рассчитавшего свои силы «поглотителя»	«Уралхим» и его дебиторы	Сотни миллионов долларов
9	Потенциальные инвесторы и конкуренты информационно закрытых структур	Информационно закрытая структура вынуждена «открыться» в процессе совершения крупных M&A-сделок под давлением антимонопольных и прочих госорганов	Покупка 21,2% венгерской MOL у австрийской OMV «Сургутнефтегазом»	Сотни миллионов долларов
10	Объединившиеся структуры под угрозой потери лицензии	Повышение капитализации компании, оптимизация численности и персонала, бизнес-процессов и т.д.	Инвестбанк	Сотни миллионов долларов

направить средства на текущие нужды своих предприятий. Продать актив, который непосредственно не связан с основным бизнесом, – один из способов получить необходимые ресурсы.

Как разновидность данной категории сделок соответственно присутствуют на рынке и приобретения непрофильных активов. Однако подобные приобретения характерны именно для российских инвесторов и могут представлять собой частные инвестиции крупных российских предпринимателей⁵. Учитывая сложившуюся экономическую конъюнктуру, в дальнейшем стоимость актива, купленного по минимальной цене, будет только расти.

⁵ Например, покупка в 2009г. радиостанции Business FM Владимиром Лисиным.

– Сделки по приобретению активов, которые представляют собой спасение государством отдельных компаний.

Фактически государство взяло на себя проблемы отдельных компаний и ответственность за исполнение такими компаниями своих обязательств. В основном спасение компаний государством (в том числе, госбанками) было направлено на предотвращение негативных социально-экономических последствий банкротства компаний, в том числе предотвращения "цепной реакции" банкротств контрагентов таких проблемных предприятий, поскольку угроза такого развития ситуации при банкротстве существует всегда.

– Сделки, на которые вынуждены идти банки, становясь участниками бизнеса своих заемщи-

ков, которые не способны расплатиться по кредитам.

Альтернатива участию банка в покупке неплатежеспособного заемщика – участие в процедуре банкротства заемщика, либо как минимум обращение взыскания на заложенный банку актив заемщика. И в первом, и во втором случае возможность получить существенную часть долга (а тем более весь долг) не очевидна. Следствием данных обстоятельств является то, что банки становятся приобретателями неплатежеспособных компаний.

– Рыночные сделки.

В рамках данных сделок профильный инвестор приобретает соответствующий бизнес (например, своего конкурента), и такие приобретения не были вызваны финансовыми проблемами приобретаемой компании. Однако и в количественном, и в стоимостном выражении подобные сделки представляли собой лишь небольшую часть M&A – активности в 2009 г.

Вторая и третья категории сделок характеризуются рядом интересных особенностей. Это сделки либо безденежные, либо подразумевающие переход актива за символическую сумму⁶. Основная цель сделки – сохранение компании в качестве действующей на рынке. Основное обязательство покупателя по отношению к самой компании или продавцу – финансирование деятельности компании или рефинансирование долгов. В целом такие «кризисные» сделки характеризуются:

- короткими сроками их совершения;
- отказом от ограничений ответственности продавца;
- использованием различных механизмов отсрочки/рассрочки платежей (в том числе, посредством использования счетов escrow), условных выплат и т.д.

Существующая линия поведения банков и государства как участников рынка слияний и поглощений беспроигрышна для всех его участников. Владельцы бизнеса "сдают" покупателю проблемный актив, за это с них снимается ответственность за возврат долгов и некоторые иные потенциально проблемные аспекты (например, социальные вопросы). При этом и банки, и государство будут впоследствии выходить из таких проектов, которые, по сути, представляют собой санацию той или иной компании.

Кроме этого, если сравнивать отечественный рынок M&A с другими странами, то сегодня Россия выглядит достаточно перспективно, поскольку, если в развитых странах капитализация компаний различных секторов экономики снизилась в кризис примерно на 30%, стоимость российских компаний упала в 5 раз [7]. Это потенциально может дать в ближайшие годы

новый импульс для слияний и поглощений в различных секторах экономики России.

Таким образом, на основе разработанной параметрической модели классификации секторов экономики РФ по уровню интеграционной активности было выявлено, что наблюдаются существенные межотраслевые различия по основному показателю, характеризующему интеграционную активность. Финансово-экономический кризис объективно обозначил целые отрасли-аутсайдеры по экономическим показателям, в то же время выявил и ряд конкретных компаний-лидеров, в том числе и по количеству транзакций, и по стоимостному объему рынка интеграционных процессов. На основе представленного анализа возможна выработка мер государственной политики в целях повышения эффективности интеграционной деятельности различных секторов экономики России.

Список литературы

1. Поликарпова М.Г. Формирование базы интеграционного анализа в целях повышения конкурентоспособности экономики Российской Федерации // Вестник УГТУ-УПИ. 2010. № 4. С. 62–72.
2. Поликарпова М.Г. Интеграционные процессы в современной экономике Российской Федерации // Вестник экономической интеграции. 2009. № 9–10. С. 24–30.
3. Прикладная статистика. Основы эконометрики: учебник для вузов: в 2 т. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика / Айвазян С.А., Мхитарян В.С. 2-е изд., испр. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 656 с.
4. Сиротин В.П., Арhipова М.Ю. Расщепление смеси вероятностных распределений в задачах моделирования социально-экономических процессов: учеб. пособие. М.: МЭСИ, 2007. 64 с.
5. www.consulting.rbc.ru.
6. www.ma-journal.ru.
7. www.mergers.ru.

Bibliography

1. Polikarpova M.G. Forming of the basis of integration analysis for the purpose of competitiveness growth of Russian Federation economy // Bulletin of UGTU-UPI. 2010. № 4. P. 62–72.
2. Polikarpova M.G. Integration processes in the modern economy of Russian Federation // Bulletin of economic integration. 2009. № 9–10. P. 24–30.
3. Applied statistics. Basics of econometrics: University textbook: 2 volumes, second edition, amendments – first volume: Aivazyan S.A., Mhitarayan V.S. Probability theory and applied statistics. Moscow: UNITY–DANA, 2001. 656 p.
4. Sirotin V.P., Arhipova M.U. Splitting of the mixture of probabilistic distribution in the problems of modeling of social and economic processes: Tutorial. Moscow: MESI, 2007. 64 p.
5. www.consulting.rbc.ru.
6. www.ma-journal.ru.
7. www.mergers.ru.

⁶ Например, покупка в I квартале 2010 г. Внешэкономбанком активов банка «Глобэкс», либо получение в 2009 г. ВТБ контроля над группой компаний «Дон-Строй» за символические 500 руб.

РЕФЕРАТЫ

Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов

УДК 622.717-9:658.511

Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М. Методология создания ресурсо-производящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья.

Разработана методология создания ресурсо-производящих технологий переработки техногенного гидроминерального сырья с использованием методов ионной флотации или электрофлотации, состоящая из четырёх взаимосвязанных уровней – информационно-аналитического, инструментального, технологического и эколого-экономического – с использованием принципа «структура-свойство/активность-свойство». Она отражает многоступенчатую соподчиненность и взаимосвязь научных обобщений различных этапов, объектов и методов исследований квантово-химических, физико-химических и технологических свойств как самих извлекаемых ценных компонентов (тяжелых металлов), так и извлекающих агентов (осадителей, реагентов-собираателей, пенообразователей, окислителей и т.п.), изучение механизма процессов извлечения (осаждения, коагуляции, флокуляции, окисления, флотации и электрофлотации), управление эффективностью процесса извлечения тяжелых металлов с помощью направленного выбора реагентов-собираателей, реутилизацию вторичных продуктов.

Ил. 1. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: методология, техногенное гидроминеральное сырье, тяжелые металлы, ионная флотация, электрофлотация, нейтрализация, коагуляция, флокуляция, окисление, квантово-химическое и фракционное моделирование, реагенты-собираатели, конструкция электродов.

УДК 622.271.75: 622:882

Мельников И.Т., Кутлубаев И.М., Суров А.И., Мельников И.И., Васильев К.П., Плотников Д.П., Шевцов Н.С. Разработка методики определения рациональных параметров намывных хвостохранилищ и отвалов вскрыши.

В статье предложена методика определения рациональных параметров намывных хвостохранилищ и отвалов вскрыши, обеспечивающих максимальную вместимость подотвальных площадей при учёте многообразных факторов. Вместимость хвостохранилищ и внешних отвалов определяется многообразием геотехнических факторов: физико-механическими свойствами пород отвала и основания, формой и площадью земельного отвода, рельефом местности, воздействием гидродинамических сил.

Учёт реального неоднородного строения ограж-

дающей дамбы – области фильтрации и экранирующего действия донных отложений прудковой и переходной зоны – области питания фильтрационного потока, выбор эффективной дренажной системы позволяет реализовывать скрытые резервы и увеличить вместимость хвостохранилищ на 25–30%. При сооружении внешних отвалов вскрыши использование разработанной методики позволяет увеличивать вместимость до 40%, что в конечном итоге снижает экологическую нагрузку на окружающую природу. Разработанная методика может быть использована при проектировании техногенных горнотехнических сооружений и в учебном процессе.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: физико-механические свойства горных пород, коэффициент запаса устойчивости, внешние отвалы вскрыши, хвостохранилище, вместимость, фильтрация, дренаж.

Металлургия черных, цветных и редких металлов

УДК 669.162.262.3

Сибгатуллин С. К., Майорова Т. В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте.

Воздействие на равномерность распределения процессов по высоте, а загружаемых материалов по сечению и окружности позволяет увеличить общий перепад давления газов в доменной печи при ровном сходе шихты, что обеспечивает повышение производительности и снижение удельного расхода кокса. Предложен показатель, характеризующий степень использования потенциальной энергии газового потока.

Улучшение равномерности распределения материалов по сечению и окружности печи увеличивает количество полезной работы потока газов.

Ил. 3. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: доменный процесс, перепад давления газов, интенсивность дутья, распределение материалов по высоте и сечению, работа газового потока, показатели доменной плавки.

УДК 621.74:669.13

Андреев В.В. Физико-химические основы формирования включений графита в высокопрочных чугунах.

Исследованы физико-химические параметры чугуновых расплавов, обуславливающие формирование различных форм графита при затвердевании. Структурно-закалочным методом выявлены особенности кристаллизации чугунов с различной формой графита, последовательность выделения отдельных фаз и фор-

мообразование структурных составляющих по мере их роста при затвердевании расплава. Методами ионного и глубокого электролитического травления исследованы внутреннее строение и внешний облик включений вермикулярного графита в чугунах.

Ил. 7. Табл. 1. Библиогр. 9 назв.

Ключевые слова: чугун, графит, поверхностное натяжение, химический состав, структура, кристаллизация.

Литейное производство

УДК [621.745.55:669.046.516]:669

Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Повышение свойств отливок из чугунов специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов.

В работе показано влияние различных материалов на структуру и свойства чугунов. Определены оптимальные количества модификаторов, обеспечивающих наибольшее повышение свойств.

Ил. 10. Табл. 2. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: модификатор, чугун, рафинирование, структура, повышение, свойства, износостойкость, жаростойкость, расплав.

УДК 621.744.3:539.4:001.891

Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей.

Целью проведенной работы являлось расширение базы данных по исследованию податливости сырой и сухой песчано-глинистых формовочных смесей (ПГС) в зависимости от содержания связующего, степени уплотнения, влажности, нагружения. Полученные данные подвергались нейросетевой обработке, по результатам которой были построены нейросетевые многослойные модели.

Разработка данного математического аппарата направлена на моделирование граничных условий при постановке задачи о силовом взаимодействии формирующейся отливки с формой при ее кристаллизации и охлаждении, что в конечном итоге направлено на снижение брака по ужиминам и горячим трещинам отливки.

Ил. 4. Библиогр. 6 назв.

Ключевые слова: песчано-глинистые смеси, деформационная способность смеси, моделирование, силовое взаимодействие, устройство по изучению деформационной способности.

УДК 621.746.5.047

Казакон А.С., Столяров А.М. Настройка модели расчета режима вторичного охлаждения слябовой непрерывной заготовки.

Произведена настройка модели расчета режима вторичного охлаждения слябовой заготовки с учетом внутреннего охлаждения роликов. Оценена точность настройки по экспериментальным данным.

Ил. 1. Табл. 2. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: сляб, вторичное охлаждение, внутреннее охлаждение роликов, модель, настройка.

УДК 621.771:621.777

Загиров Н.Н., Аникина В.И., Усынина Г.П., Юриков А.С., Иванов Е.В. Технологическая схема получения литатурного прутка из стружки силумина, исключая ее переплав.

Рассмотрен один из энергосберегающих вариантов переработки стружки силумина в прутки и проволоку модифицирующего назначения. Технологическая схема включает этапы горячего брикетирования и экструзии, дополненные проведением операции холодного волочения. Каждая из операций, выполняемая при определенных параметрах, имеет свои средства воздействия на формирование структуры и свойств получаемых изделий. В совокупности они обеспечивают необходимый модифицирующий эффект, подтвержденный результатами полупромышленных испытаний технологического процесса литья под низким давлением заготовок алюминиевых автомобильных дисков колес.

Ил. 8. Табл. 2. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: стружка, силумин, брикетирование, экструзия, волочение, структура, механические свойства, модифицирование.

Материаловедение и термическая обработка металлов

УДК 544.344.3-16: 546.72: 546.11

Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю., Шабуров А.Д. Взаимодействие водорода с примесями замещения в альфа-железе.

На основании экспериментальных данных различных авторов определены значения энергии взаимодействия водорода с атомами замещения в решетке α -Fe в рамках модели ближнего порядка. В порядке ослабления взаимодействия с водородом элементы располагаются в последовательности Pd, Ti, V, Pd, Mn, Si, W, Ni, Mo, Ge, Cr, Al. Для Ti, V, Pd параметр взаимодействия составляет $-16...-19,5$ кДж/моль, что должно резко увеличивать растворимость водорода в соответствующих сплавах при низких температурах.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр. 24 назв.

Ключевые слова: железо, водород, сплавы Fe-Me-H, растворимость.

Нanomатериалы и нанотехнологии

УДК 621.778

Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г. Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой.

Для получения проволоки с ультрамелкозернистой структурой предложен метод равноканальной

угловой свободной протяжки. Разработаны принципы проектирования непрерывных технологий с использованием данного способа для производства стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой. Практическая реализация РКУ протяжки достигается установкой на многократном волочильном стане необходимого количества комплектов технологического инструмента разработанной конструкции.

Ил. 2. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: стальная проволока, ультрамелкозернистая структура, непрерывная схема интенсивной пластической деформации, равноканальная угловая свободная протяжка, принцип проектирования технологии.

УДК 620.17: 539.52: 539:374

Жеребцов Ю.В., Самойлова А.Ю., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У. Определение сверхпластических свойств по результатам тестовых формовок прямоугольных мембран при постоянном давлении.

Предлагаются методики определения реологических параметров сверхпластичности K' , m' и n , входящих в определяющее соотношение $\sigma = K \xi^m \varepsilon^n$, где σ – напряжение течения, ξ , ε – скорость и степень деформации соответственно. Входными данными являются продолжительность тестовых формовок прямоугольных мембран при постоянном давлении, выходными – значения постоянных K' , m' и n , которые предназначены для последующего использования в среде программного комплекса ANSYS при решении краевых задач механики сверхпластичности. Работоспособность методик проверена на тестовых задачах. Приведен пример практического применения методик на примере промышленного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V).

Табл. 1. Библиогр. 20 назв.

Ключевые слова: сверхпластичность, реология, сверхпластическая формовка, прямоугольная мембрана.

Стандартизация, сертификация и управление качеством

УДК 669.14.018.291.3

Наливайко А.В., Стеблов А.Б., Тулупов О.Н., Кинзин Д.И. Разработка комплексного показателя качества арматурной стали и обоснование рационального применения слиттинг-процесса в условиях отечественного мини-завода.

В целях совершенствования технологии производства, повышения уровня механических и потребительских свойств арматуры была выполнена работа по количественной оценке влияния параметров сквозной технологии на качество проката.

Для условий ГУП «ЛПЗ» разработан комплексный критерий оценки качества арматурной стали, который в процессе развития технологии на заводе адаптируется, уточняется и совершенствуется.

Анализ разработанного комплексного показателя качества показал, что при использовании слиттинг-про-

цесса наилучшее качество обеспечивается при разделении раската на 3 части. Исходя из этого была разработана соответствующая калибровка валков для прокатки арматуры № 10, 12 и 14 слиттинг-процессом. Данная калибровка позволяет освоить производство профиля № 10 и повысить производительность стана на 60 и 40% при прокатке арматуры № 12 и 14 соответственно.

Ил. 1. Табл. 1.

Ключевые слова: калибровка валков, сортовая прокатка, эффективность, арматура, комплексный показатель эффективности, слиттинг-процесс.

УДК 658.562

Моллер А.Б., Лимарев А.С., Логинова И.В. Квалиметрическая оценка компетентности персонала металлургического предприятия.

Эффективность работы металлургического предприятия зависит от уровня квалификации персонала. Характеристика качества профессиональной подготовки персонала может быть представлена с использованием количественных показателей. Одним из таких показателей является комплексный показатель компетентности персонала.

Табл. 5. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: система менеджмента качества, компетентность персонала, оценка компетентности, квалиметрическая оценка.

Энергетика металлургии, энергообережение и теплоэнергетика

УДК 621.313

Мугалимов Р.Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе.

Обсуждается концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов путем применения явления феррорезонанса токов в электромагнитных устройствах. Предложенная идея позволяет уменьшить потребляемый ток на 10–15%, повысить $\cos \phi$ до единицы, энергетический КПД – на 13–20%.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 9 назв.

Ключевые слова: энергоэффективность, концепция, асинхронный двигатель, феррорезонанс.

УДК 621.311.1:658.26

Буланова О.В., Малафеев А.В., Ахметханов А.М. Исследование статической устойчивости генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» при параллельной работе с энергосистемой.

В работе рассмотрены вопросы определения предела выдаваемой мощности генераторами заводских электростанций. Исследована статическая устойчивость генераторов собственных электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: заводская электростанция, ста-

тическая устойчивость, коэффициент запаса, действительный предел передаваемой мощности, метод последовательного эквивалентирования, метод последовательного утяжеления, система электроснабжения.

Строительные материалы и строительные технологии в металлургии

УДК 691:539.3/4

Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн.

В статье рассматривается методика расчета прочности и оценки напряженно-деформированного состояния трубобетонных колонн (ТБК). Расчет прочности нормальных сечений ТБК предлагается производить на основе нелинейной деформационной модели железобетона с учетом особенностей деформирования бетонного ядра и стальной оболочки в условиях объемного напряженного состояния.

Расчет прочности выполняют в два этапа. На первом этапе расчетным путем определяют зависимости между напряжениями и деформациями осевого направления в бетонном ядре и стальной оболочке при кратковременном действии на трубобетонный элемент центрально приложенной нагрузки. На втором этапе производится проверка прочности внецентренно нагруженного ТБК по общепринятой методике.

При этом расчет выполняется в соответствии с опубликованными ранее положениями.

Ил. 3. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, нелинейная деформационная модель, трансверсально-изотропный материал, расчет прочности.

УДК 628.1:658.562

Харченко О.А., Матвеева Г.Н., Михайловский В.Н. Оптимизация систем водоснабжения промышленных предприятий.

Рассмотрены проблемы водоснабжения и рационального использования пожарно-питьевой воды, предложены основные пути ее экономии. Определены виды потерь в водопроводных сетях, рекомендованы энергосберегающие мероприятия.

Разработана математическая модель оптимизации гидравлических режимов работы водопроводных сетей. Приведены результаты улучшения водоснабжения промышленного предприятия.

Ил. 6. Табл. 1.

Ключевые слова: системы водоснабжения, математическая модель, гидравлический режим.

Экономика, управление и рынок продукции

УДК 332.12

Бессонова Ю.А., Слукина С.А. Подходы к оценке эффективности создания и функционирования интегрированных структур.

Для выстраивания действенного механизма управления интегрированными структурами необходимо умение количественно оценивать эффективность их создания и реструктуризационных преобразований, а также функционирования и участия в них отдельных предприятий. Проведенный анализ существующих подходов к оценке эффективности реструктуризации и функционирования интегрированных структур позволил обосновать основной оценочный показатель – прирост чистой текущей стоимости денежных потоков.

Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: интегрированные структуры, реструктуризация, чистая текущая стоимость денежных потоков, эффективность, методика, методический подход.

УДК 332.135:005.52

Поликарпова М.Г. Параметрическое моделирование интеграционной активности секторов экономики России.

В статье предложена разработанная экономико-математическая модель классификации секторов экономики РФ по уровню интеграционной активности на основе расщепления смесей вероятностных распределений. На основе обобщения материала по слияниям и поглощениям (M&A) за 2008–2009 гг. были выделены характерные категории интеграционных сделок в условиях финансово-экономического кризиса, а также категории стратегических игроков, выигравших в период кризиса от сделок M&A. На основе представленного анализа возможна выработка мер государственной политики в целях повышения эффективности интеграционной деятельности различных секторов экономики России.

Ил. 5. Табл. 6. Библиогр. 7 назв.

Ключевые слова: интеграционная активность, параметрическая модель, смесь вероятностных распределений, финансово-экономический кризис.

REPORTS

Processing and Utilization Technologies of Formations and Wastes

UDC 622.7 17–9:658.511

Medyanik N.L., Kalugina N.L. Varlamova I.A., Strokan A.M. Methodology of Developing Resource Reproducing Technologies of Technogenic Hydro-mineral Raw Materials Reprocessing.

The authors worked out a methodology of developing resource reproducing technologies of technogenic hydro-mineral raw materials reprocessing. The methodology consists of four interconnected levels such as information-and-analytical, instrumental, technological, ecological-and-economic, using the principle «structure-property/activity-property». It reflects the multistage hierarchy and interdependence of scientific generalizations of different stages, of objects and research methods of quantum-chemical, physicochemical and technological properties of both recoverable valuable elements (heavy metals) and recovering agents (precipitators, collecting agents, foaming agents, oxidizers, etc.). It also dwells on the study of recovering processes (precipitation, coagulation, flocculation, oxidation, flotation and electro flotation), efficiency control of heavy metals recovering by means of purposeful selection of collecting agents, salvage of secondary products.

Fig. 1. Bibliogr. 5 names.

Key words: methodology, technogenic hydro-mineral raw materials, heavy metals, ionic flotation, electro flotation, neutralization, coagulation, flocculation, oxidation, quantum-chemical and fractal modeling, collecting agents, electrode design.

UDC 622.271.75: 622:882

Melnikov I.T., Kutlubaev I.M., Surov A.I., Melnikov I.I., Vasilyev K.P., Plotnikov D.P., Shevtsov N.S. Development of determination methods of rational parameters for tail-storing and dump rocks.

In the article the authors offered methods of determining rational parameters of tailings storage and dump, providing maximum capacity of dump areas taking into account various factors. The capacity of tailings storage and external dumps are determined by a number of various geotechnical factors: physical and mechanical properties of the outside dump and basis, the form and area of the land allotment, local topography, the influence of hydrodynamic forces.

Taking into account the non-uniform structure of the damming up – a filtering and screening area of the bottom sediments pond and connecting zone – a feed area of the filtration flow, the choice of efficient drainage system make it possible to use hidden reserves and enlarge the capacity of tailings storage by 25–30%. Application of the developed method makes it possible to increase capacity by 40 % on

the stage of the dump construction that results in reducing of environmental pressure. The developed methods can be used during the design of technological mining structures and in the process of specialists training.

Fig. 4. Table 1. Bibliogr. 8 names.

Key words: physical-mechanical properties of rocks, safety factor, outside dump, tailings storage, capacity, filtering, drainage.

Metallurgy of Ferrous, Non-ferrous and Rare Metals

UDC 669.162.262.3

Sibagatullin S.K., Majorova T.V. The increase of gas flow performance in a blast furnace as a result of the increase of total pressure drop through the furnace height.

The improvement of process distribution uniformity through the furnace height as well as distribution uniformity of charge materials across the furnace make it possible to raise total gas pressure drop in the blast furnace during the smooth descent of the charge and it results in higher productivity and decrease of specific coke consumption. The authors offered an indicator characterizing the energy efficiency of a gas flow.

The improvement of distribution uniformity of materials across the furnace cross section increases gas flow performance.

Fig. 3. Bibliogr. 5 names.

Key words: blast furnace process, gas pressure drop, blast intensity, materials distribution through the furnace height and cross section, gas flow performance, characteristics of blast furnace smelting.

UDC 621.74:669.13

Andreev V.V. Physical and chemical basics of graphite inclusions formation in high-strength cast iron.

The author studied physical and chemical characteristics of iron melts that cause formation of different kinds of graphite during solidification. Structural and quenching method was applied to find out solidification characteristics of cast iron with different kinds of graphite, sequence of separate phases precipitation as well as formation of structural elements and their growth during the melt solidification. Methods of ion etching and deep electrolytic etching were used to study the internal structure and physical configuration of vermicular graphite inclusions in cast iron.

Fig. 7. Table 1. Bibliogr. 9 names.

Key words: cast iron, graphite, surface tension, chemical composition, structure, solidification.

Foundry Engineering

UDC [621.745.55:669.046.516]:669

Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Properties improvement of castings of special purpose white cast-irons by means of refining and melts modifying.

The authors study the influence of various materials on the structure and properties of cast-irons in this research work. Optimum quantities of modifiers providing the maximum improvement of properties are defined.

Fig. 10. Table 1. Bibliogr. 2 names.

Key words: modifier, pig-iron, refining, structure, increase, properties, wear resistance, heat resistance, melt.

UDC 621.744.3:539.4:001.891

Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Sinitsky E.V. Research of deformation ability of sandy-argillaceous mixtures.

The purpose of the research work was database expansion in the field of greensand and dry sandy-argillaceous forming mixtures pliability depending on the binder content, degree of compaction, humidity, loading. The obtained data was subjected to neural network processing and as a result, neural network multilayer models were developed.

The development of this mathematical tool is aimed at modeling of boundary conditions of force interaction between the solidifying casting and the mold during crystallization and cooling that will eventually reduce wastes due to sandbuckle and hot cracks of casting.

Fig. 4. Bibliogr. 6 names.

Key words: sandy-argillaceous mixtures, deformation capacity of the mixture, modeling, force interaction, a tool for studying deformation capacity

UDC 621.746.5.047

Kazakov A.S., Stolyarov A.M. Adjustment of the calculation model of secondary cooling mode for a continuous cast slab.

The adjustment of the calculation model of secondary cooling mode for a continuous cast slab was carried out taking into account internal cooling of rollers. The accuracy of adjustment was estimated on experimental data.

Fig. 1. Table 2. Bibliogr. 2 names.

Key words: slab, secondary cooling, internal cooling of rollers, model, adjustment.

UDC 621.771:621.777

Zagirov N.N., Anikina V.I., Usynina G.P., Yurikov A.S., Ivanov E.V. Manufacturing scheme of alloyed rod production of silumin chip without its remelting.

One of the power saving options for processing silumin chip into bars and wire is presented in the article. The manufacturing scheme includes hot briquetting, extrusion and cold drawing. Each operation performed with certain parameters influences the structure and properties of the products. Together they provide necessary inoculating effect that was proved by the results of semi-industrial testing of low-pressure casting of aluminum automobile

wheel rims.

Fig. 8. Table 2. Bibliogr. 5 names.

Key words: chip, silumin, briquetting, extrusion, drawing, structure, mechanical properties, modification.

Material Science and Thermal Metal Treatment

UDC 544.344.3-16: 546.72: 546.11

Mirzayev D.A., Okishev K.Yu., Shaburov A.D. Interaction of Hydrogen with Substitutional Impurities in Alpha Iron.

On the basis of experimental data obtained from different authors values of interaction energy between hydrogen and substitutional atom in α -Fe matrix for short range model are defined. The elements can be placed in the following sequence where their interaction with hydrogen weakens: Pd, Ti, V, Pd, Mn, Si, W, Ni, Mo, Ge, Cr, Al. For Ti, V, Pd the interaction parameter is $-16...-19,5$ kJ/mole, this should sharply increase the hydrogen solubility in the appropriate alloys under low temperature.

Fig. 2. Table 2. Bibliogr. 24 names.

Key words: iron, hydrogen, Fe-Me-H alloys, solubility.

Nanomaterials and Nanotechnology

UDC 621.778

Korchunov A.G., Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G. Engineering principles of continuous manufacturing process of steel wire with ultrafine-grained structure.

Method of EPA free broaching is suggested for producing of wire with ultrafine-grain structure. Principles of continuous technology engineering with the application of this method for producing of steel wire with ultrafine-grain structure are developed. Practical realization of EPA drawing is obtained by installation of required quantity of technological tool kits with developed construction on a multiple drawing mill.

Fig. 2. Bibliogr. 5 names.

Key words: steel wire, ultrafine-grain structure, continuous scheme of intensive plastic deformation, EPA free broaching, technology design principle.

UDC 620.17: 539.52: 539:374

Zherebtsov Yu.V., Samoiloa A.Yu., Zagirov T.M., Enikeev F.U. Determination of superplastic properties from the results of constant pressure forming of rectangular membranes.

Some procedures for determining the rheological values of superplasticity K' , m' and n from defining relationship $\sigma = K\xi^m \varepsilon^n$ are suggested. Here σ is the flow stress while ε and ξ are the strain and strain rate respectively. The durations of constant pressure forming of rectangular sheets are used as input data into the procedures developed. The values of the material constants, K' , m' and n , are then used as input data into the finite element software intended to solve the boundary value problems in the mechanics of superplasticity. The procedures suggested have

been tested by means of are check problems. The values of material constants, K' , m' and n , for the commercial titanium alloys Ti-6Al-4V are determined by using the procedures developed.

Table 1. Bibliogr. 20 names.

Key words: superplasticity, rheology, superplastic forming, rectangular membrane.

Standardization, Certification and Quality Management

UDC 669.14.018.291.3

Nalivaiko A.V., Steblov A.B., Tulupov O.N., Kinzin D.I. Development of complex quality criterion for reinforcing bar steel and justification of rational application of slitting pass at domestic mini-mill.

The research work was carried out in order to improve production technology, mechanical properties and consumer qualities of reinforcing bar. The authors tried to calculate the influence of technological parameters on the quality of rolled stock.

A complex criterion for evaluating the quality of reinforcing bar has been developed for GUP "LPZ", which can be adapted, refined and improved in the process of technology development at the mill.

Analysis of the developed complex quality index showed that the use of slitting rolling process ensures the best quality when the rolled stock is divided into 3 strands. On this basis the appropriate roll pass design has been developed for rolling reinforcing bar № 10, 12 and 14 using slitting rolling. This roll pass design makes it possible to manufacture profile № 10 and improves the performance of the mill by 60 and 40% when rolling reinforcing bars № 12 and 14, respectively.

Fig. 1. Table 1. Bibliogr. 1 name.

Key words: roll pass design, shape rolling, effectiveness, reinforcing bar, complex efficiency index, slitting process.

UDC 658.562

Moller A.B., Limarev A.S., Loginova I.V. Quality estimation of personnel competence of a metallurgical enterprise.

Operating efficiency of a metallurgical enterprise depends on personnel qualification level. Qualitative performance of personnel may be assessed by using quantity indices. One of such indices is the complex index of personnel competence.

Table 5. Bibliogr. 5 names.

Key words: quality management system, personnel competence, competence estimation, qualimetry estimation.

Power Supply of Metallurgy, Energy Saving and Heat Power

UDC 621.313

Mugalimov R.G. The concept of energy efficiency of induction motors and electric drives based on them.

The author develops the concept of energy efficiency improvement of induction motors and electric drives using the phenomenon of currents ferroresonance in electromagnetic devices. The proposed idea makes it possible to reduce current consumption by 10–15%, increase $\cos\varphi$ to 1 and improve energy efficiency by 13–20%.

Fig. 4. Table 1. Bibliogr. 9 names.

Key words: energy efficiency, concept, induction motor, ferroresonance.

UDC 621.311.1:658.26

Bulanova O.V., Malafeev A.V., Ahmethanov A.M. The study of generators static stability of JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» power stations operating in parallel with power supply system.

The problem of calculation the limit of power generated by in-plant power stations was considered. Generators static stability of JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» power stations was studied.

Fig. 3. Table. 1. Bibliogr. 2 names.

Key words: in-plant power station, static stability, reserve coefficient, actual limit of transmission capacity, method of successive equivalenting, method of successive loading, power-supply system.

Construction Materials and Structural Engineering in Metallurgy

UDC 691:539.3/4

Krishan A.L., Troshkina E.A., Kuzmin A.V. Improvements of calculation of concrete filled steel tubes durability.

The article considers the procedure of calculation of durability and an estimation of tensely – deformed conditions of concrete filled steel tubes (CFST). Calculation of durability of standard cross-sections CFST is offered to be made on the basis of nonlinear deformation model of reinforced concrete taking into account features of warping of concrete kernel and a steel shell in conditions of a three-dimensional stress state.

The calculation of standard cross-sections CFST durability is carried out in two stages. At the first stage they calculate dependences between pressure and deformations of an axial direction in a concrete kernel and steel shell at short-term action on the pipe-concrete element when central load is applied. At the second stage durability check of eccentric loaded CFST is made using the standard technique.

The calculation is carried out according to the provisions published earlier.

Fig. 3. Bibliogr. 5 names.

Key words: concrete filled steel tubes, nonlinear deformation model, transversely isotropic material, strength calculation.

UDC 628.1:658.562

Harchenko O.A., Matveeva G.N., Mihajlovsky V.N. Optimisation of water supply systems of industrial enterprises.

Problems of water supply and rational use of fire-potable water are considered, the basic ways of its economy are offered. The authors defined the kinds of losses in water supply systems and recommended some power saving measures.

The mathematical model of hydraulic operating modes optimization of water supply systems was developed. The results of improvement of water supply of the industrial enterprise are given in the article.

Fig. 6. Table 1.

Key words: systems of water supply, mathematical model, hydraulic operating.

Economics, Management and Production Market

UDC 332.12

Bessonova J.A., Slukina S.A. Different Approaches to Estimation of Efficiency of Integrated Structures Forming and Operation.

In order to develop an effective control mechanism of integrated structures, one should be able to provide quantitative estimation of efficiency of forming such structures and their restructuring as well as operation and involving separate enterprises into them. The analysis of current approaches to the estimation of efficiency of restructuring and operation of integrated structures made it possible to establish the basic estimated figure, the increase of net current value of cash flows.

Bibliogr. 8 names.

Key words: integrated structures, restructuring, net current value of cash flows, efficiency, methods, technical approach

UDC 332.135:005.52

Polikarpova M.G. Parametric modeling of the integration activities of economic sectors of the Russian Federation.

In this article we proposed a developed economic and mathematical model of the Russian Federation economic sectors according to their level of integration activities on the basis of splitting of mixtures of the probabilistic distributions. On the basis of the material concerning mergers and acquisitions (M&A) for the period from 2008 till 2009 we singled out several typical categories of integration transactions in the terms of financial and economic crisis and categories of strategic players who won due to M&A transactions in the period of crisis. On the basis of the submitted analysis it is possible to work out measures of government policy for the purpose of effectiveness growth of integration activities among different sectors of Russian economy.

Fig. 5. Table 6. Bibliogr. 7 names.

Key words: integration activities, parametric model, mixture of the probabilistic distributions, financial and economic crisis.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Валерий Вячеславович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО НПО «ЦНИИ-ИТМАШ», г. Москва. Тел.: (495)6758194.

Аникина Валентина Ильинична – канд. техн. наук, доц. кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Направление исследований: материаловедение и термическая обработка сплошных и пористых металлических материалов. Тел. (391)2133286.

Ахметханов Альберт Маратович – студент 5 курса кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: устойчивость промышленных электростанций. Тел. (3519)298581.

Бессонова Юлия Александровна – канд. экон. наук, ст. преп. кафедры экономики и управления на металлургических предприятиях ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: medyanik@inbox.ru.

Буланова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: устойчивость промышленных электростанций. Тел. (3519)298581. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Варламова Ирина Александровна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, технологии упаковочных производств ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Васильев Кирилл Павлович – горный инженер ГОП ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Емалева Динара Гумаровна – канд. техн. наук, инженер кафедры машиностроительных и металлургических технологий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: EmaleevaDG@mail.ru.

Еникеев Фарид Усманович – д-р техн. наук, доц. кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики Уфимского государственного нефтяного технического университета. Направление исследований: механика сверхпластичности. Тел. (347)2431714. E-mail: kobros@narod.ru.

Жеребцов Юрий Владимирович – аспирант кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики Уфимского государственного нефтяного технического университета. Направление исследований: компьютерное моделирование технологических процессов обработки давлением ультрамелкозернистых материалов в состоянии сверхпластичности. Тел. (347)2431714. E-mail: zhuv@bk.ru.

Загиров Николай Наильич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Направление исследований: обработка давлением сыпучих металлических материалов. Тел. (391)2133550. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Загиров Тимур Мансурович – аспирант кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики Уфимского государственного нефтяного технического университета. Направление исследований: математическое моделирование реологического поведения микрокристаллических материалов в процессах обработки давлением в режиме сверхпластичности. Тел. (347)2431714. E-mail: bc10204@mail.ru.

Иванов Евгений Владимирович – ст. преп. кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Направление исследований: волочение цветных металлов и сплавов. Тел. (391)2133550. E-mail: kafOMD_1@mail.ru.

Казаков Александр Сергеевич – аспирант кафедры металлургии черных металлов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (3519)298449. E-mail: mcm@magtu.ru.

Калугина Наталья Леонидовна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, технологии упаковочных производств ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Кинзин Дмитрий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: kinzin@mail.ru.

Колокольцев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, проф., ректор ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. 8(3519)298419, 298530. E-mail: kvm@magtu.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Кришан Анатолий Леонидович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой строительных конструкций ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (3519)298428. E-mail: kris_al@mail.ru.

Кузьмин Александр Владимирович – студент архитектурно-строительного факультета ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: kasim74regl@mail.ru.

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Горные машины и транспортно-технологические комплексы» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Но-

сова». Направление исследований: геотехнология и устойчивость техногенных горнотехнических сооружений. Тел. (3519)298574. E-mail: PTMR74@mail.ru.

Лимарев Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технологии, сертификация и сервис автомобилей» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: повышение эффективности сортопрокатного производства на основе положений всеобщего управления качеством. Тел. (3519)298431. E-mail: aslimarev@mail.ru.

Логина Ирина Владимировна – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: повышение эффективности сортопрокатного производства на основе положений всеобщего управления качеством. E-mail: eegere@mail.ru.

Майорова Татьяна Владимировна – ст. преп. кафедры экономики и коммерции ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: технология доменной плавки. Тел. (3519)298541. E-mail: tvmi@mgn.ru.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: устойчивость промышленных электростанций. Тел. (3519)298581. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Матвеева Галина Николаевна – канд. техн. наук, доц. кафедры теплотехнических и энергетических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: теплоэнергетика. Тел. (3519)298421.

Медяник Надежда Леонидовна – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой химии, технологии упаковочных производств ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519)298522. E-mail: chem.@magtu.ru.

Мельников Иван Тимофеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Открытая разработка месторождений полезных ископаемых» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: безопасность и экологичность гидротехнических сооружений горно-металлургического комплекса. Тел. (3519)298556. E-mail: PTMR74@mail.ru.

Мельников Илья Иванович – канд. экон. наук, ведущий специалист ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Тел. (3519)267507.

Мирзаев Джалал Аминович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры физического металловедения и физики твёрдого тела Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Направления исследований: кинетика фазовых превращений, термодинамика, рентгеноструктурный анализ, термическая обработка сталей. Тел. (351)2679013. E-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

Михайловский Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры теплотехнических и энергетических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: водоснабжение. Тел. (3519)298421.

Моллер Александр Борисович – канд. техн. наук, проф. кафедры «Обработка металлов давлением», декан факультета «Повышение квалификации и профессиональной переподготовки специалистов» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: повышение эффективности сортопрокатного производства на основе положений всеобщего управления качеством. Тел. (3519)235764. E-mail: moller@hotmail.ru.

Мугалимов Риф Гарифович – канд. техн. наук, доц. кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: энергосбережение в электроприводах переменного тока. Тел. (3519)298416. E-mail: energosberenie@rambler.ru.

Наливайко Александр Владимирович – первый заместитель Генерального директора ОАО «АХК ВНИИМЕТМАШ», г. Москва. Тел. (495)7304530. E-mail: mail@vniimetmash.ru.

Окишев Константин Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры физического металловедения и физики твёрдого тела Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Направления исследований: кинетика фазовых превращений в сталях. Тел. (351)2679013. E-mail: okishev@physmet.susu.ac.ru.

Плотников Дмитрий Петрович – студент факультета «Горные технологии и транспорт» по специальности «Открытые горные работы» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (3519)298556.

Поликарпова Мария Геннадьевна – канд. экон. наук, доц. кафедры математических методов в экономике ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: marjyshka@rambler.ru.

Полякова Марина Андреевна – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Савинов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Самойлова Алина Юрьевна – студентка Уфимского государственного нефтяного технического университета. Направление исследований: автоматизированная система идентификации сверхпластических свойств по результатам тестовых формовок прямых мембран при постоянном давлении. Тел. (347)2431714. E-mail: Alina20081963@yandex.ru.

Сибгатуллин Салават Камилович – д-р техн.

наук, доц., проф. кафедры металлургии черных металлов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова». Направление исследований: технология доменной плавки. Тел. (3519)298430. E-mail: 10tks@mail.ru.

Синицкий Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электрометаллургия и литейное производство» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». E-mail: e-v-s@mail.ru.

Слукина Светлана Александровна – канд. экон. наук, доц. кафедры экономики управления на металлургических предприятиях ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Стеблов Анвер Борисович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва. Тел. (495)7304530. E-mail: mail@vniimetmash.ru.

Столяров Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии черных металлов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.8(3519)29-84-49. E-mail: mcm@magtu.ru.

Строкань Алексей Михайлович – инженер кафедры химии, технологии упаковочных производств ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Суров Александр Иванович – ведущий специалист группы мониторинга безопасности гидротехнических сооружений ГОП ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Тел. (3519)247224. Email: surov@mmk.ru.

Трошкина Евгения Анатольевна – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры строительных материалов и изделий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (3519)298589.

Тубольцева Алена Сергеевна – ст. преп. кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». E-mail: a-tus@mail.ru.

Тулупов Олег Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (495)7304999. E-mail: o.tulupov@mail.ru.

Усынина Галина Петровна – канд. техн. наук, начальник лаборатории ООО «КиК», г. Красноярск. Направление исследований: материаловедение и термическая обработка алюминиево-кремниевых сплавов. Тел. (391)2267045.

Харченко Олег Алексеевич – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры теплотехнических и энергетических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: теплотехника, внедоменное получение железа. Тел. (3519)298421. E-mail: olegbnk@mail.ru.

Чукин Михаил Витальевич – д-р техн. наук,

проф., зав. кафедрой машиностроительных и металлургических технологий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: m.chukin@mail.ru.

Шабуров Андрей Дмитриевич – аспирант кафедры физического металловедения и физики твёрдого тела Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Направления исследований: термическая обработка сталей. Тел. (351)2679013. E-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

Шевцов Николай Сергеевич – студент факультета «Автоматизация и вычислительная техника» по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники автоматизированных систем» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел. (3519)409824.

Шевченко Андрей Валерьевич – аспирант ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: arolonav@mail.ru.

Юриков Антон Сергеевич – инженер-конструктор ООО «КиК», г. Красноярск. Направление исследований: литье и материаловедение алюминиево-кремниевых сплавов. Тел. (391)2267045.

THE INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ahmethanov Albert Maratovich – an undergraduate student of the department «Power supply industrial enterprises» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: Stabilization of industrial power station. Phone: (3519)298581.

Andreev Valery Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Chief research officer of the public corporation scientific production association «TSNIT-MASH», Moscow. Phone: (495)6758194.

Anikina Valentina Ilyinichna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Metallurgy and Heat Treatment of Metals» of the Federal state educational institution of higher professional education «Siberian Federal University». Research field: material science and heat treatment of solid and porous metal materials. Phone: (391)2133286.

Bessonova Julia Alexandrovna – Candidate of Economics, senior lecturer of the department of economics and management of metallurgical enterprises of the Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin». E-mail: medyanik@inbox.ru.

Bulanova Olga Victorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Power supply industrial enterprises» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: Stability of industrial power station. Phone: (3519)298581. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Chukin Mikhail Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department of metallurgical and machine-building technologies of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: m.chukin@mail.ru.

Emaleeva Dinara Gumarovna – Candidate of Technical Sciences, engineer of the department of metallurgical and machine-building technologies of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: EmaleevaDG@mail.ru.

Enikeev Farid Usmanovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the department of computer engineering and engineering cybernetics of Ufa state oil university. Research field: mechanics of superplasticity. Phone: (347)2431714. E-mail: kobros@narod.ru.

Harchenko Oleg Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the department «Heat engineering and energy systems» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: heat engineering, nonblast-furnace ironmaking. Phone: (3519)298421. E-mail:

olegbnk@mail.ru.

Ivanov Evgeny Vladimirovich – a senior lecturer of the department «Metallurgy and Heat Treatment of Metals» of the Federal state educational institution of higher professional education «Siberian Federal University». Research field: drawing of non-ferrous metals and alloys. Phone: (391)2133550. E-mail: kafOMD_1@mail.ru.

Kalugina Natalya Leonidovna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the department of chemistry and packaging technology of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov».

Kazakov Alexander Sergeevich – a post-graduate student of the department of metallurgy of ferrous metals of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298449. E-mail: mcm@magtu.ru.

Kinzin Dmitry Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department "Metal forming" of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: kinzin@mail.ru.

Kolokoltsev Valery Mihailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(3519)298419, 298530. E-mail: kvm@magtu.ru.

Korchunov Aleksey Georgievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department of metallurgical plants mechanical equipment of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Krishan Anatoly Leonidovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department of structural units design of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298428. E-mail: kris_al@mail.ru.

Kutubaev Ildar Muchametovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Mining machines and transport-technology complexes» of SEA (State Education Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: geotechnology and stability of industrial mining facilities. Phone: (3519)298574. E-mail: PTMR74@mail.ru.

Kuzmin A.V. – a student of architectural and building faculty of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State

Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: kasim74regl@mail.ru.

Limarev Alexander Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Technologies, certification and service of automobiles» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: increasing of rolled bar production effectiveness on the basis of total quality management principles. Phone: (3519)298431. E-mail: aslimarev@mail.ru.

Loginova Irina Vladimirovna – a post-graduate student of the department «Metal forming» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: increasing of rolled bar production effectiveness on the basis of total quality management principles. E-mail: eegere@mail.ru.

Majorova Tatyana Vladimirovna – senior lecturer of the department of Economics and Commerce of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: technology of blast furnace smelting. Phone: (3519)298541. E-mail: tvmi@mgn.ru.

Malafeyev Alexey Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Power supply industrial enterprises» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: Stability of industrial power station. Phone: (3519)298581. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Matveeva Galina Nikolaevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Heat engineering and energy systems» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: heat power engineering. Phone: (3519)298421.

Medyanik Nadezhda Leonidovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department of chemistry and packaging technology of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298522. E-mail: chem@magtu.ru.

Melnikov Ilya Ivanovich – Candidate of Economics, leading specialist of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Company». Phone: (3519)267507; 241924.

Melnikov Ivan Timofeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Opencast mining of minerals» of SEA (State Education Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: safety and ecological compatibility of hydraulic facilities of mining and smelting enterprises. Phone: (3519)298556. E-mail: PTMR 74@mail.ru.

Michailovsky Vladimir Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Heat engineering and energy systems» of SEI (State Edu-

ational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: water supply. Phone: (3519)298421.

Mirzayev Dzhahal Aminulovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Physical Metallurgy and Solid State Physics Department, Southern Ural State University, Chelyabinsk. Research field: phase transformation kinetics, thermodynamics, X-ray structure analysis, heat treatment of steels. Phone: (351)2679013. E-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

Moller Alexander Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of the department «Metal forming», Dean of the Faculty «Qualification improvement and professional retraining of specialists» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: increasing of rolled bar production effectiveness on the basis of total quality management principles. Phone: (3519)235764. E-mail: moller@hotmail.ru.

Mugalimov Reef Garifovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of electrical and electrotechnical systems department of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: energy saving in AC electric drives. Phone: (3519)298416. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Nalivaiko Alexander Vladimirovich – First Deputy General Director of OJSC "AHK VNIIMETMASH», Moscow. Phone: (495)7304530. E-mail: mail@vniimetmash.ru.

Okishev Konstantin Yurievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Physical Metallurgy and Solid State Physics Department, Southern Ural State University, Chelyabinsk. Research field: phase transformation kinetics. Phone: (351)2679013. E-mail: okishev@physmet.susu.ac.ru.

Plotnikov Dmitri Petrovich – a student of the faculty «Mining technologies and transport» of SEA (State Education Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298556.

Ployakova Marina Andreevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of metallurgical and machine-building technologies of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Polikarpova Maria Gennadyevna – Candidate of Economics, Associate Professor of the department of mathematical methods in economics of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: marjyshka@rambler.ru.

Samoilova Alina Yurjevna – a student of Ufa state oil university. Research field: automation system of determining superplastic properties according to the results of constant pressure forming of rectangular membranes. Phone: (347)2431714. E-mail: Alina20081963@yandex.ru.

Savinov Alexander Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department «Theoretical mechanics and strength of materials» of SEI

(State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Shaburov Andrey Dmitrievich – a post-graduate student of the Physical Metallurgy and Solid State Physics Department, Southern Ural State University, Chelyabinsk. Research field: heat treatment of steels. Phone: (351)2679013. E-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

Shevchenko Andrei Valeryevich – a post-graduate student of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: apolonav@mail.ru.

Shevtsov Nicolay Sergeevich – a student of the faculty «Automation and computer facilities» on a specialty «Software development and automated systems» of SEA (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)409824.

Sibagatullin Salavat Kamilovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department of ferrous metals of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Research field: technology of blast furnace smelting. Phone: (3519)298430. E-mail: 10tks@mail.ru.

Sinitsky Evgeny Valerjevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Electrometallurgy and foundry engineering» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: e-v-s@mail.ru.

Slukina Svetlana Alexandrovna – Candidate of Economics, Associate Professor of the department of economics and management of metallurgical enterprises of the Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin».

Steblov Anver Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, chief research scientist of OJSC "VNIIMETMASH", Moscow. Phone: (495)7304530. E-mail: mail@vniimetmash.ru.

Stolyarov Alexander Mihailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department of metallurgy of ferrous metals of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298449. E-mail: mcm@magtu.ru.

Strokan Aleksey Mihailovich – Engineer of the department of chemistry and packaging technology of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov».

Surov Alexander Ivanovich – Leading specialist of hydraulic facilities security monitoring group of ODP (ore dressing plant) of OJSC (Open Joint Stock Company) «Magnitogorsk Iron and Steel Company». Phone: (3519)247224. E-mail: surov@mmk.ru.

Troshkina E.A. – Candidate of Technical Sciences, a senior lecturer of the department of building materials and

products of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: (3519)298589.

Tuboltseva Alena Sergeevna – a senior lecturer of the department «Theoretical mechanics and strength of materials» of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». E-mail: a-tus@mail.ru.

Tulupov Oleg Nikolayevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "Metal forming" of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov». Phone: 8(495)7304999. E-mail: o.tulupov@mail.ru.

Usynina Galina Petrovna – Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory of Ltd. «K&K» (Krasnoyarsk). Research field: material science and heat treatment of aluminum-silicon alloys. Phone: (391)2267045.

Varlamova Irina Alexandrovna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the department of chemistry and packaging technology of SEI (State Educational Institution) HPE (Higher Professional Education) «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov».

Vasilyev Kirill Pavlovich – a mining engineer of ODP (ore dressing plant) of OJSC (Open Joint Stock Company) «Magnitogorsk Iron and Steel Company».

Yurikov Anton Sergeevich – a design engineer of Ltd. «K&K» (Krasnoyarsk). Research field: casting and material science of aluminum-silicon alloys. Phone: (391)2267045.

Zagirov Nicolai Nailich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department «Metal Forming» of the Federal state educational institution of higher professional education «Siberian Federal University». Research field: shaping of metal bulk. Phone: (391)2133550. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Zagirov Timur Mansurovich – a post graduate student of the department of computer engineering and engineering cybernetics of Ufa state oil university. Research field: mathematical simulation of rheological behaviour of microcrystalline materials during superplastic forming. Phone: (347)2431714. E-mail: bc10204@mail.ru.

Zherebtsov Yuri Vladimirovich – a post graduate student of the department of computer engineering and engineering cybernetics of Ufa state oil university. Research field: computer simulation of metal forming processes for superplastic ultrafinegrain materials. Phone: (347)2431714. E-mail: zhuv@bk.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.

Раздел «Новые исследования» или «Краткие сообщения» предназначен для оперативной публикации работ преимущественно аспирантов. В журнал входят учебно-методический и библиографический разделы. Общее количество разделов и их объем может варьироваться от номера к номеру.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

I. Рекомендуемый объем статьи – не более 6–8 стр.

К статье прилагаются:

- 1) экспертное заключение о возможности опубликования;
- 2) рецензия;
- 3) сведения об авторах (на английском и русском языках): фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения, направление исследований, контактный телефон и E-mail каждого автора (всё перечислить в одном абзаце);
- 4) реферат на английском и русском языках по следующему образцу (~200 знаков):

UDC 622.27
Ivanov I.I., Petrov P.P. Development of gold-ore deposits extraction systems.
The method of sloping is represented...
Fig. 2. Table 2. Bibliogr. 7 names.

- 5) список литературы на английском и русском языках;
- 6) ключевые слова на английском и русском языках.

II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, список литературы и ключевые слова представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word 2003**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word 2003** рекомендуются следующие установки:

- 1) **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 2) при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками;
- 3) **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров). Рисунки предоставлять в виде распечатки на стандартных листах бумаги формата А4 и отдельным файлом в формате *.TIF, *.JPG, с разрешением **300 dpi**, V&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные надписи в местах размещения рисунков. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t)=I_{nr}/I_{no}$
от времени и удалённости КЗ от выводов
асинхронного двигателя

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования представляется 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, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ» М. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 29-85-17.

Факс (3519) 22-41-46.

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