

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 61 Номер 6 2018

• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Применение технологии водо-воздушного охлаждения для термической обработки подшипниковых колец

Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 2

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Сопротивление разрушению переходной зоны трехслойного материала сталь – ванадиевый сплав – сталь после деформационно-термической обработки

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Термодинамика процессов взаимодействия компонентов жидкого металла в системе Fe–Mg–Al–La–O

• ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Математическая модель диагностирования перебега зазора в шарнире кривошип–шатун кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 6, 2018

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 61

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

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

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

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

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)

АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)

БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)

БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

БРОДОВ А.А., редактор раздела «**Экономическая эффективность металлургического производства**» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)

ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГОРБАТНОК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «**Металлургические технологии**» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

ПРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тулский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)

КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)

КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)

ЛИНН Х. (ООО «Линн Хаи Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)

МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «**Ресурсосбережение в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «**Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах**» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)

РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)

РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела

«**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

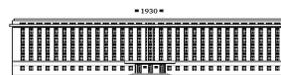
ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

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

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

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONT'EV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)

G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsvetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishev Chemical-Metallurgical
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "**Economic
efficiency of metallurgical production**" (IP Bardin
Central Research Institute for Ferrous Metallurgy,
Moscow)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "**Material
science**" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "**Metallur-
gical Technologies**" (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.S. LAZUTKIN (Group of Companies "MetProm",
Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,
Sidney, Australia)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section
"**Resources Saving in Ferrous Metallurgy**" (National
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section
"**Innovations in metallurgical industrial and
laboratory equipment, technologies and materials**"
(Russian Research Institute of the Pipe Industry,
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "**Superduty steel**"
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "**Ecology
Rational Use of Natural Resources**" (National Research
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University,
Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "**Information
Technologies and Automatic Control in Ferrous
Metallurgy**" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)

TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMLYANTSEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

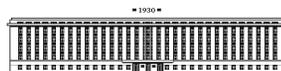
M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
Siberian State Industrial University

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel./fax: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456**

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ярошенко Ю.Г., Липунов Ю.И., Смаханов А.Б., Столярова М.В. Применение технологии водо-воздушного охлаждения для термической обработки подшипниковых колец 423
- Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 2 431

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., Агапов Е.А., Ерохов Т.В., Козлова О.Н. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 439

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Нечайкина Т.А., Никулин С.А., Рогачев С.О., Турилина В.Ю., Баранова А.П. Сопротивление разрушению переходной зоны трехслойного материала сталь – ванадиевый сплав – сталь после деформационно-термической обработки 447
- Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Коналов С.В. Перераспределение атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при длительной эксплуатации 454

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамика процессов взаимодействия компонентов жидкого металла в системе Fe–Mg–Al–La–O 460

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Никитин А.Г., Абрамов А.В., Горяшин В.В. Математическая модель диагностирования перебега зазора в шарнире кривошип–шатун кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки 466
- Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Совершенствование вибрационных питателей–грохотов для горно-металлургической промышленности 470

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Зимин В.В., Буркова И.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Оптимизация объема пилотного тестирования ERP-системы 478

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н. Ситуационные модели производительности человеко-машинных систем (на примере волочильных станков) 485
- Дашевский В.Я., Александров А.А. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni – Cr, содержащих алюминий 490
- Орлов Г.А., Котов В.В., Орлов А.Г. Анализ изменения разностенности труб под действием внутреннего давления 494
- К 90-летию Бориса Вадимовича Линчевского 496

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Yu.G. Yaroshenko, Yu.I. Lipunov, A.B. Smakhanov, M.V. Stolyarova Application of water-air cooling technologies for heat treatment of bearing rings 423
- O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev, M.M. Shevelev Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets for welded pipes. Report 2 431

RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

- G.S. Podgorodetskii, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov, T.V. Erokhov, O.N. Kozlova Challenges and opportunities of utilization of ash and slag waste of TPP (thermal power plant). Part 1 439

MATERIAL SCIENCE

- T.A. Nechaikina, S.A. Nikulin, S.O. Rogachev, V.Yu. Turilina, A.P. Baranova Fracture resistance of “transition” area in three-layer steel/vanadium alloy/steel composite after thermomechanical treatment 447
- V.E. Gromov, A.A. Yur’ev, Yu.F. Ivanov, V.A. Grishunin, S.V. Kononov Redistribution of carbon atoms in differentially charged rails for long-term operation 454

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- G.G. Mikhailov, L.A. Makrovets, L.A. Smirnov Thermodynamics of the processes of interaction of liquid metal components in Fe–Mg–Al–La–O system 460

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- A.G. Nikitin, A.V. Abramov, V.V. Garyashin Mathematical model of crank-type joint clearance overtravel assessment in oscillating crank drive of jaw crusher 466
- V.I. Lyashenko, V.Z. Dyatchin, V.P. Franchuk Improvement of vibrating feeders-screens for mining and metallurgical industry 470

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- V.V. Zimin, I.V. Burkova, V.V. Mit’kov, A.V. Zimin Scoping of pilot testing of enterprise resource planning 478

SHORT REPORTS

- S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov Digital prototypes of man-machine system performance (in the case of drawing mills) 485
- V.Ya. Dashevskii, A.A. Aleksandrov Thermodynamics of oxygen solutions in aluminum-containing Ni–Cr melts 490
- G.A. Orlov, V.V. Kotov, A.G. Orlov Analysis of the wall thickness variation of pipes under internal pressure 494
- To the 90th Anniversary of Boris Vadimovich Linchevskii 496

УДК 621.785.68

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОДО-ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ

Ярошенко Ю.Г.¹, д.т.н., профессор-консультант кафедры теплофизики
и информатики в металлургии (yury-y@planet-a.ru)

Липунов Ю.И.², к.т.н., директор Центра новых систем охлаждения
и технологий термоупрочнения металлов (vniimt@yandex.ru)

Смаханов А.Б.¹, магистрант кафедры теплофизики и информатики
в металлургии (47alisher@gmail.com)

Столярова М.В.², к.т.н., научный сотрудник Центра новых систем охлаждения
и технологий термоупрочнения металлов (vniimt@yandex.ru)

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» («ВНИИМТ»)
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

Аннотация. В статье представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в ходе разработки технологии дифференцированного водо-воздушного охлаждения подшипниковых колец из стали ШХ15 производства ЗАО «Вологодский подшипниковый завод». Наложение рассчитанных по разработанной в ОАО «ВНИИМТ» математической модели кривых изменения температуры по сечению подшипника на термокинетическую диаграмму распада переохлажденного аустенита показало, что в широком диапазоне режимов дифференцированного водо-воздушного охлаждения достигается требуемая микроструктура термообработанного металла. Экспериментальные исследования термоупрочнения подшипниковых колец водо-воздушными струями проведены на специально смонтированном опытно-промышленном устройстве с системой охлаждения, оснащенной смесителями и коллекторами с плоско-факельными форсунками оригинальной конструкции, которые обеспечивают устойчивость факела и равномерность распыла водо-воздушной смеси в широком диапазоне изменения расхода и давления воды и воздуха. Проведенное на различных режимах охлаждения термическое упрочнение колец с последующим определением механических свойств и структурных характеристик стали подтвердило, что технология водо-воздушного охлаждения позволяет достичь требуемых структурных и механических характеристик подшипниковых колец и является конкурентоспособной экологически чистой альтернативой технологии объемной закалки в масляном баке.

Ключевые слова: термическая обработка, закалка, подшипниковая сталь, водо-воздушное охлаждение, форсунка, математическое моделирование, твердость, микроструктура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-423-430

В настоящее время в машиностроительной промышленности основную часть изделий термически упрочняют погружением в закалочный бак. В зависимости от марки стали, конфигурации и размеров изделия в качестве закалочной среды используют воду, масло, соляные, щелочные или полимерные растворы [1 – 7]. При такой закалке не всегда достигается требуемый для конкретного изделия уровень механических свойств из-за невозможности управлять скоростью его охлаждения. Закалка изделий в масляном баке имеет и ряд неустраняемых недостатков, в частности: недостаточная интенсивность охлаждения изделий в интервале структурных превращений, высокая пожароопасность, загрязнение окружающей среды вредными выбросами, высокая стоимость технологии и т.д.

В России и за рубежом проводятся исследования по замене технологии закалки в масляном баке на альтернативные варианты с использованием технологии тер-

мической обработки металла как водяными струями, так и водо-воздушной смесью [8 – 13].

В ОАО «ВНИИМТ» разработаны несколько вариантов систем охлаждения, в которых охлаждение изделий при закалке осуществляется водо-воздушной смесью ВВС, (туманом). Такая охлаждающая среда формируется в генераторах ВВС и через коллекторы с форсунками подается на охлаждаемое изделие. При использовании ВВС скорость охлаждения изделия зависит от многих параметров (в частности, от давления воды и воздуха, содержания воды в смеси [14, 15]), что позволяет управлять интенсивностью охлаждения изделий в широких пределах. Конструктивные и режимные параметры разработанных систем водо-воздушного охлаждения при достаточно простой системе управления позволяют изменять до 5 – 6 раз интенсивность охлаждения в течение одного цикла закалки. Такие системы способны обеспечить охлаждение изделий по режиму,

не только близкому к закалке в масле, но и осуществить более мягкое охлаждение изделий, а также реализовать различные варианты дифференцированного охлаждения, устанавливая требуемую интенсивность охлаждения в процессе термической обработки за счет изменения параметров ВВС [16, 17]. При дифференцированном охлаждении обеспечивается высокая интенсивность охлаждения в начальной стадии в интервале температур структурного превращения, что позволяет получать необходимую структуру изделия и более высокий уровень механических свойств, чем при закалке в водяном баке. При снижении температуры до определенного значения осуществляется переход к мягкому охлаждению в интервале мартенситного превращения, как в масле, если необходимо, и ниже, что позволяет минимизировать термические напряжения и устранить вероятность трещинообразования.

Типовые режимы термической обработки изделий из сталей типа ШХ при их закалке погружением в масле и воде представлены в табл. 1. При закалке таких изделий с начальной температурой 830 °С в масле и отпуске при 160 °С в течение 2 ч их микроструктура представляла собой мелкоигольчатый мартенсит и равномерно распределенные избыточные карбиды [18].

В ОАО «ВНИИМТ» были проведены исследования по термическому упрочнению водо-воздушной смесью подшипниковых колец производства ЗАО «Вологодский подшипниковый завод», изготовленных из стали ШХ15. В соответствии с требованиями прочность металла после термической обработки должна быть 62 – 66 НРС, а микроструктура должна состоять из скрыто- и мелкокристаллического мартенсита и мелких равномерно распределенных карбидов.

Математическая модель, разработанная во ВНИИМТ для расчета температурного поля в изделиях сложной формы при различных граничных условиях теплообмена на поверхности изделия, позволила осуществить расчетное моделирование режимов закалки подшипниковых колец в масляном баке и водо-воздушной смесью.

Математическая модель отражает все особенности физико-химических процессов, сопровождающих термическое упрочнение подшипниковых колец. Модель включает дифференциальное уравнение теплопроводности для двумерной задачи, начальное условие (при-

нято, что начальная температура изделия постоянна) и граничные условия.

При задании граничных условий для расчета процесса охлаждения в масляном баке использованы зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры поверхности образца, приведенные в работах [16, 19, 20]. При водо-воздушном охлаждении интенсивность охлаждения в первую очередь зависит от соотношения воды и воздуха в ВВС и количества смеси, подаваемой на единицу площади охлаждаемой поверхности (плотности орошения). Для инженерных расчетов при задании граничных условий для спрейерного охлаждения применяются зависимости снимаемого с поверхности удельного теплового потока от плотности орошения и температуры поверхности [13].

Граничные условия для водо-воздушного охлаждения (в устройстве охлаждения) следующие:

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}, \end{cases} \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{окр.ср}}$ – температура поверхности кольца и окружающей среды соответственно; $\alpha(t)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, зависящий от температуры поверхности кольца; $\lambda(t)$ – удельная теплопроводность металла; x, y – координаты в поперечном сечении кольца; q – удельный тепловой поток, отводимый от поверхности кольца.

Граничные условия для охлаждения на воздухе при транспортировке образца после нагрева в печи до устройства охлаждения и пребывания его на воздухе после выхода из устройства охлаждения, когда идет процесс выравнивания температуры по сечению образца, запишутся в виде

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_{\text{м}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_{\text{м}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \end{cases}, \quad (2)$$

Т а б л и ц а 1

Типовые режимы термической обработки сталей типа ШХ

Table 1. Typical heat treatment modes for bearing steels

Сталь	Температура, °С, при				
	отжиге	нормализации	закалке в масле	закалке в воде	отпуске
ШХ6, ШХ9	780 – 790	870 – 890	800 – 835	780 – 815	150 – 150
ШХ15	790 – 810	900 – 920	815 – 850	785 – 830	150 – 160
ШХ15СГ	790 – 800	890 – 910	810 – 835	–	–

где ϵ_m – степень черноты поверхности металла; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Предварительную оценку возможной структуры по сечению колец после термической обработки в различных средах можно получить наложением расчетных кривых охлаждения на термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита. Следует отметить, что температурно-временные интервалы превращений аустенита на диаграммах различных авторов существенно различаются. Поэтому оценка вероятности получения той или иной структуры носит качественный характер.

При моделировании закалки водо-воздушной смесью анализировали динамику температурных полей при различных схемах охлаждения. При дифференцированном охлаждении моделировали режимы закалки с различной интенсивностью охлаждения: такой же, как в баке с водой, и с более высокой в интервале температур от начала охлаждения до температуры начала мартенситного превращения, равной приблизительно 250 °С, и в последующем – мягкого охлаждения в интервале мартенситного превращения. Такая технология закалки обеспечивает требуемую мартенситную структуру на максимально возможную глубину слоя и минимизирует напряжения при мартенситном превращении.

На рис. 1 приведены расчетные значения температуры колец с толщиной стенки 20 мм при закалке в масляном баке с температурой масла 120 °С и при дифференцированном охлаждении ВВС. Кривые изменения температуры поверхности и середины образца наложены на термокинетическую диаграмму, на которой выделены области превращений в стали, отмеченные следующими обозначениями: А – аустенит, М – мартенсит, Б – бейнит, Ф – феррит, П – перлит, К – карбид, AC_1 – область формирования аустенита при нагревании, M_n – линия начала мартенситного превращения аустенита. При закалке в масле для колец такого размера в срединных слоях возможно появление нежелательных структур (типа бейнита), тогда как при водо-воздушном охлаждении после закалки структура по сечению таких колец будет мартенситная, а уровень термических напряжений не превысит значений, которые формируются при закалке в масле.

Для исследования процессов охлаждения нагретых изделий по различным технологиям термического упрочнения (охлаждение погружением в бак, струйное водяное, водо-воздушное, воздушное) в экспериментальном цехе ОАО «ВНИИМТ» смонтирована полупромышленная установка, схема которой представлена на рис. 2. В состав ее входят нагревательная печь, рама с рольгангом для транспортировки образца, размещенное на раме охлаждающее устройство и вспомогательное оборудование, бак для воды, шкаф управления и щит контрольно-измерительной аппаратуры. Кольца помещали на сетчатый поддон, нагревали в печи и

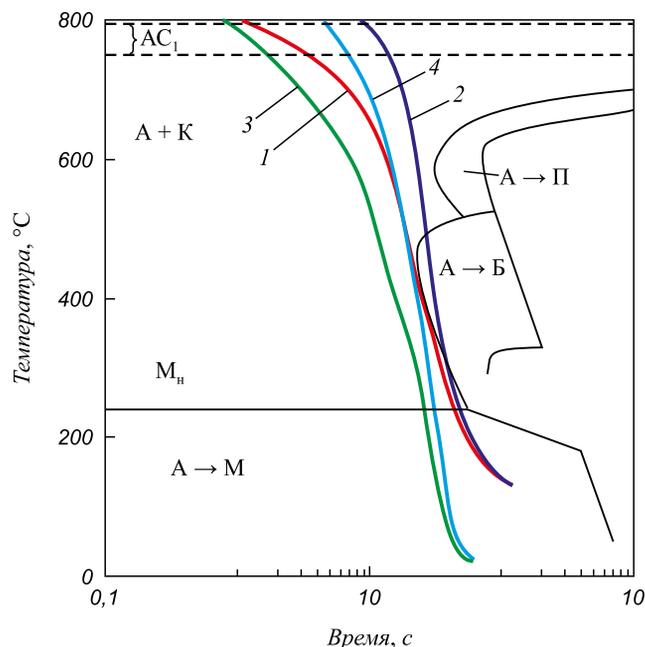


Рис. 1. Расчетное значение температуры подшипникового кольца с толщиной стенки 20 мм при его охлаждении в масле с температурой 120 °С и при дифференцированном водо-воздушном охлаждении:

1 и 2 – поверхность и середина кольца при охлаждении в масле; 3 и 4 – поверхность и середина кольца при дифференцированном водо-воздушном охлаждении

Fig. 1. The calculated temperature value of bearing ring with wall thickness of 20 mm when it is cooled in oil with temperature of 120 °С and at a differential water-air cooling:

1 and 2 – the surface and the middle of the ring at cooling in oil; 3 and 4 – the surface and the middle of the ring at a differential water-air cooling

охлаждали снизу и сверху плоскими водо-воздушными потоками при реверсивном перемещении поддона в зоне охлаждения. Контроль температуры в печи осуществляли по показаниям пирометров, а температуру поверхности колец измеряли приваренными на поверхность колец термопарами ТХА. Частоту записи показаний термопар при охлаждении колец установили в 0,1 секунды.

Для производства ВВС использовали оригинальной конструкции смеситель, подачу смеси на образцы осуществляли через систему коллекторов с плоско-факельными форсунками.

Водо-воздушная смесь относится к типу газожидкостных дисперсных сред. Степень распыления дисперсной фазы (воды), определяется размером ее капель. Степень дисперсности ВВС оценивали при помощи визуального и тактильного наблюдений, для этого при проведении испытаний вели видео-фото съемку. Характеристика дисперсности ВВС в зависимости от параметров воды и воздуха приведена в табл. 2.

Характеристики факелов и их геометрические размеры стабильны в широком диапазоне изменения параметров воды и воздуха, таких как давление, расход, соотношение в смеси содержания воды и воздуха.

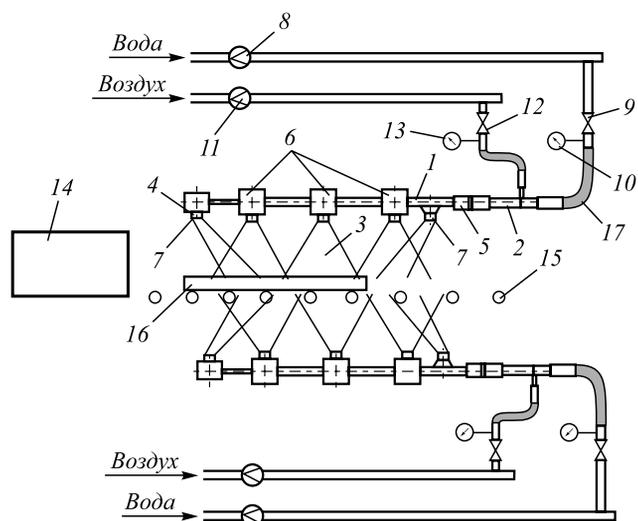


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – корпус коллектора; 2 – смеситель воды и воздуха; 3 – водо-воздушный факел; 4 – форсунка; 5 – соединитель для изменения длины и/или вставки диффузора разных диаметров; 6 – форсунки с центральной выдачей; 7 – форсунки с боковой выдачей; 8 – расходомер для воды; 9 – вентиль для воды; 10 – манометр для воды; 11 – диафрагма для воздуха; 12 – вентиль для воздуха; 13 – манометр для воздуха; 14 – печь для нагрева колец; 15 – рольганг; 16 – сетчатый поддон с кольцами; 17 – гибкие подводы

Fig. 2. Scheme of experimental unit:

1 – collector case; 2 – water and air mixer; 3 – water-air torch; 4 – nozzle; 5 – connector for length and/or insertion of the diffuser of different diameter; 6 – nozzles with the central supply; 7 – nozzles with lateral supply; 8 – flowmeter for water; 9 – valve for water; 10 – manometer for water; 11 – diaphragm for air; 12 – valve for air; 13 – manometer for air; 14 – furnace for rings heating; 15 – roller bed; 16 – mesh pallet with rings; 17 – flexible feeds

При проведении экспериментальных исследований термической обработки подшипниковых колец параметры ВВС варьировали в широких пределах: расход

воды изменялся от 0,75 до 3,0 м³/ч, расход воздуха – от 26 до 197 м³/ч, отношение расхода воздуха к расходу воды – от 17,4 до 167.

Термическую обработку колец проводили, как по технологии закалки, при которой образец нагревался до температуры, выше температуры образования аустенита, и охлаждался со скоростью, выше критической до среднемассовой температуры ниже 100 °С. Кроме того, термическую обработку колец проводили технологии прерванного охлаждения с самоотпуском: образец охлаждался до среднемассовой температуры выше 100 °С, и при охлаждении на воздухе за счет тепла внутренних слоев происходит разогрев и самоотпуск поверхностных слоев образца. В табл. 3 приведены режимы термической обработки колец по технологии закалки и закалки с самоотпуском.

По экспериментальным данным, полученным при режимах прерванного охлаждения колец, рассчитан средний удельный тепловой поток, снимаемый с поверхности колец в процессе их охлаждения. Значения среднего удельного теплового потока для параметров водо-воздушной смеси, при которых проводились исследования, лежат в пределах от 0,22 до 1,2 МВт/м², что позволяет реализовать широкий диапазон режимов охлаждения как сравнимых с охлаждением в масляном и водяном баках, так и дифференцированных во времени.

Анализ механических свойств и оценка микроструктуры металла проведены для двух экспериментальных образцов подшипниковых колец, термически обработанных по технологии закалки таким образом, чтобы скорость охлаждения ВВС была близка к скорости охлаждения в масле. Образцы вырезаны из подшипникового кольца наружным диаметром 72 мм и толщиной стенки 6,1 мм. Режим охлаждения следующий: расход воды 2,9 м³/ч, расход воздуха 121 м³/ч. На рис. 3 приве-

Т а б л и ц а 2

Результаты определения степени распыления дисперсной фазы и характеристики дисперсности водо-воздушной смеси

Table 2. The results of determining the degree of dispersion of the dispersed phase and the dispersion characteristics of water-air mixture

Номер опыта	Расход воды, м ³ /ч	Расход воздуха, м ³ /ч	Соотношение расходов воздуха и воды, доли	Характеристика распыления
1	1,20	85	70	Отдельные струи воды в факеле не наблюдаются. Начало полного распыления воды
2	1,19	96	80	Наблюдаются крупные капли воды
3	1,20 – 1,21	109 – 121	90 – 100	Состояние плотного водяного тумана, визуальнo капли воды не наблюдаются
5	0,91 – 1,02	120 – 126	123 – 131	Состояние полупрозрачного водяного тумана, визуальнo капли воды не наблюдаются, тактильнo в смеси ощущаются капли воды
7	0,75 – 0,85	129 – 137	161 – 172	Состояние прозрачного водяного тумана, капли воды не определяются ни визуальнo, ни тактильнo

Т а б л и ц а 3

Экспериментальные режимы охлаждения

Table 3. Experimental cooling modes

Температура нагрева в печи, °С	Выдержка в печи, мин	Время охлаждения, с	Среднемассовая температура окончания охлаждения, °С
Технология закалки			
820 – 860	15 – 20	15 – 20	≤ 100
Технология закалки с самоотпуском			
820 – 860	15 – 20	1,4 – 7,0	250 – 600

дены показания термопар, приваренных к поверхности образцов (кривые 2 и 3), и расчетное значение температуры поверхности кольца таких же размеров при его охлаждении в масляном баке с температурой масла 40 °С (кривая 1).

Механические свойства и описание микроструктуры металла образцов подшипниковых колец в исходном состоянии, термоупрочненных в масляном баке и термически обработанных по технологии закалки в устройстве водо-воздушного охлаждения приведены в табл. 4.

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов металла, полученные при 500 и 1000-кратных увеличениях. В исходном состоянии микроструктура образца при увеличении в 500 раз представлена на рис. 4, а зернистым перлитом, а на рис. 4, б после закалки в масляном баке при увеличении в 1000 раз – мелкоигльчатый мартенсит и карбидами, что соответствует требованиям. На рис. 4, б, з отражены при увеличении в 1000 раз микроструктуры образцов № 3 и № 4. Эти образцы были обработаны по технологии закалки в устройстве водо-воздушного охлаждения. Динамика их охлаждения отражена на рис. 3: линия 2 для образца № 3 и линия 3 для образца № 4. Микроструктура металла этих экспериментальных образцов состоит из мелкоигльчатого мартенсита и карбидов. Из сравнения микроструктур (рис. 4) и механических свойств (табл. 4) образцов, подвергнутых термической обработке в мас-

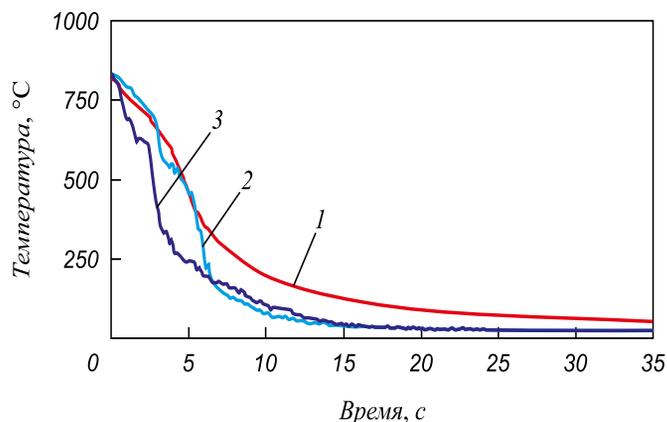


Рис. 3. Температура поверхности подшипникового кольца при охлаждении в масляном баке и устройстве водо-воздушного охлаждения:

1 – расчетное значение температуры поверхности кольца при охлаждении в масляном баке с температурой масла 40 °С; 2 и 3 – показания термопар образцов колец № 3 и № 4 при водо-воздушном охлаждении

Fig. 3. Calculated value of the ring surface temperature of at its cooling in oil tank and in unit of water-air cooling:

1 – calculated value of the surface temperature of the ring at cooling in the oil tank with an oil temperature of 40 °С; 2 and 3 – registration of the thermocouple of samples of the rings no. 3 and no. 4 at water-air cooling

ляном баке (образец 2) и в установке водо-воздушного охлаждения (образцы 3 и 4), следует отметить идентичность этих показателей.

Таким образом, и микроструктура, и твердость металла образцов подшипниковых колец, термоупрочненных в устройстве водо-воздушного охлаждения, соответствуют предъявляемым к термоупрочненной подшипниковой стали требованиям.

Выводы. Изучено температурное состояние подшипниковых колец из стали ШХ15 при их термической обработке в масляном баке и водо-воздушными струями, для чего были использованы:

– математическая модель, разработанная в ОАО «ВНИИМТ», которая способна учесть все особенности тепловых процессов и физико-химических явлений при термическом упрочнении подшипниковых колец;

Т а б л и ц а 4

Механические свойства и микроструктура металла образцов подшипниковых колец

Table 4. Mechanical properties and microstructure of metal of bearing rings samples

Образец	Режим термообработки	HRC	Микроструктура металла
1	Исходное состояние	31 – 32	Зернистый перлит 4 балла, шкала № 8 ГОСТ 801-78
2	Закалка в масляном баке	63 ÷ 65	Мелкоигльчатый мартенсит (5 баллов, шкала №3 ГОСТ8233-56) и карбиды
3, 4	Закалка в устройстве водо-воздушного охлаждения	63 – 65	Мелкоигльчатый мартенсит (5 баллов, шкала №3 ГОСТ8233-56) и карбиды

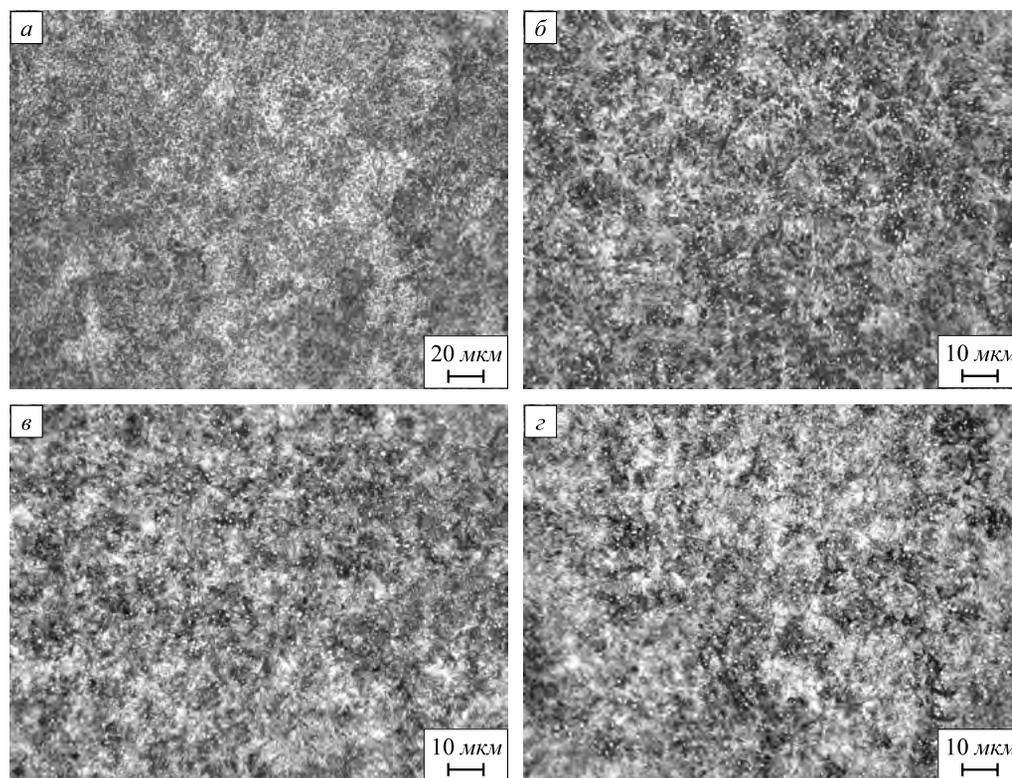


Рис. 4. Микроструктура металла экспериментальных образцов:
а – исходное состояние; *б* – после объемной закалки в масляном баке; *в* и *г* – после водовоздушной закалки

Fig. 4. Microstructure of metal of the samples:
a – initial condition; *б* – after volume quenching in an oil tank; *в* and *г* – after water-air quenching

– экспериментальная установка, созданная в ОАО «ВНИИМТ», на которой была реализована технология водо-воздушного охлаждения подшипниковых колец и установлены параметры водо-воздушной смеси, способные обеспечить требуемые показатели механических свойств и структуру колец из подшипниковой стали.

Технология водо-воздушного охлаждения позволяет устанавливать требуемую интенсивность охлаждения в процессе термической обработки за счет изменения параметров водо-воздушной смеси и тем самым обеспечивать термическую обработку подшипниковых колец с улучшенными технико-экономическими и экологическими показателями в сравнении с технологией закалки подобных изделий в масляном баке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люты В. Закалочные среды. Справочник / Под ред. С.Б. Масленкова; / Пер. с польск. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 192 с.
2. Heat treatment problems solved by new quenching medium // Metallwork Praduc. 1967. Vol. 3. No. 4. P. 65, 66.
3. Lasday Stanley B. Metal quenching with oils and syntezetie media // Industrial Heating. 1976. Vol. 43. No. 10. P. 8 – 13, 16.
4. Suttie N.R. The use of polymer quenchants for aluminium alloy heat treatment // Heat Treatment Metals. 1979. Vol. 6. No. 1. P. 19 – 21.
5. AQUATENSID /AQUACOOOL/ /http://www.petrofer.com/images/petrofer/dokumente/produkte/en/PET_1_QUECHANTS_EN.pdf
6. Aqua-Quench/ <https://www.houghtonintl.com/en-gb/find-your-products?search=&application=All&industry=All>
7. http://www.spray.de/spray_nozzles/spray_nozzles_overview.aspx
8. Желудкевич М.С. Теплотехнологические основы управляемого водовоздушного охлаждения при закалке изделий из железоуглеродистых сплавов: Автореф. дис. д.т.н.: – Минск, 2001. – 34 с.
9. Машеков С.А., Абсадыков Б.Н., Алимкулов М.М. Физическое моделирование при исследовании влияния режимов прокатки и охлаждения водо-воздушной смесью на качество рельсов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 2.
10. Глазков Л.А., Желудкевич М.С., Желянин Т.Л., Табулин А.А., Ресурсосберегающий технологический процесс термической обработки крупногабаритных штампов // Вестник БНТУ. 2009. № 2. С. 31 – 34.
11. Golovko A.N., Rodman D., Nürnberger F. etc. Investigation of the Water-Air Cooling Process of the ThickWalled Extruded Profile Made of Alloy En Aw-6060 on the Output Table // Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4. No. 2. P. 66 – 74.
12. Yaroshenko Y.G., Startseva M.V., Lipunov Y.I. etc. Developing a Modern Thermal Strengthening Technique for Regulated Fishplate Cooling // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190. No. 1. P. 491 – 499.
13. Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Старцева М.В. Внедрение современного энерго- и ресурсосберегающего оборудования и экологически чистой технологии термоупрочнения в производстве рельсовых накладок // Бюллетень «Черная металлургия». 2013. № 12. С. 61 – 64.
14. Будрин Д.В., Кондратов В.М. Водовоздушное охлаждение при закалке // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 6. С. 22 – 25.

15. Systems for accelerated cooling of plates. Bernhard Ludwig, MDS Mannesmann Demag Sack GmbH, Düsseldorf // *Metallurgical Plate and Technology*. 1988. No. 4. P.10 – 17.
16. Lipunov Y.I., Zaynullin L.A., Startseva M.V. Development of high-efficiency technologies and devices of controlled cooling for thermohardening of metal // *Advanced metals, ceramics and composites: proceedings of the XI China-Russia Symposium on Advanced Material & Technologies*, ed. Hailing Tu, Solntsev K., Ring Zhou. Part I / China, Kunming, Yunnan Publishing Group Corporation, Yunnan Science & Technology Press, 2013. P. 295 – 298.
17. Мандзяк И.И., Перерва В.Я., Шевченко Г.Л. Исследование водо-воздушного охлаждения при термической обработке металла. – В кн.: Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: Материалы Международной науч.-тех. конф. студ., аспирантов, ученых. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2013. Т. 1. № 1. С. 206 – 209.
18. Наседкина Я.И., Караваева М.В., Кайбышев О.А. Влияние комбинированной термомеханической обработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали // *Вестник УГАТУ. Машиностроение*. 2012. Т. 16. № 5 (50). С. 145 – 148
19. Эйсмонт Ю.Г. Исследование закалочных сред, альтернативных закалочным маслам // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 11. С. 32 – 36.
20. Петраш Л.В. Закалочные среды. – М.: МАШГИЗ. 1959. – 111 с.

Поступила 28 июня 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 6, pp. 423–430.

APPLICATION OF WATER-AIR COOLING TECHNOLOGIES FOR HEAT TREATMENT OF BEARING RINGS

*Yu.G. Yaroshenko¹, Yu.I. Lipunov², A.B. Smakhanov¹,
M.V. Stolyarova²*

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”) Ekaterinburg, Russia

Abstract. The paper presents the results of mathematical modeling and experimental researches executed during the development of the technology of differential water-air cooling of bearing rings made of 52100 (EN1.3505) steel produced by JSC “Vologda Bearing Plant”. Overlapping the mathematical model of temperature variation curves across the bearing cross-section on the thermokinetic diagram of the decomposition of supercooled austenite calculated according to the mathematical model developed by JSC VNIIMT has shown that a required microstructure of the heat-treated metal is achieved in a wide range of differentiated water-air cooling modes. Experimental studies of heat-strengthening of bearing rings by water-air jets were carried out on a specially assembled experimental industrial device with a cooling system equipped with mixers and collectors with flat-jet nozzles of the original design that ensure the stability of the torch and the uniformity of spraying the water-air mixture over a wide range of flow rates and water and air pressure. The thermal hardening of the rings carried out at various cooling regimes, followed by the determination of the mechanical properties and structural characteristics of the steel, has confirmed that the water-air cooling technology achieves the required structural and mechanical characteristics of the bearing rings and is a competitive, environmentally friendly alternative to the technology of volume quenching in oil tank.

Keywords: heat treatment, quenching, bearing steel, water-air cooling, nozzle, mathematical modeling, hardness, microscopic structure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-423-430

REFERENCES

1. Luty W. *Chtodziwa hartownicze*. Warszawa, 1986. (Russ.ed.: Luty W. *Zakalochnye sredy: Sprav. izd.* Trans. from Polish. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1990, 192 p.) (In Pol.).
2. Heat treatment problems solved by new quenching medium. *Metallwork Praduc*. 1967, vol. 3, no. 4, pp. 65–66.
3. Lasday Stanley B. Metal quenching with oils and syntezet media. *Industrial Heating*. 1976, vol. 43, no. 10, pp. 8–13, 16.
4. Suttie N.R. The use of polymer quenchants for aluminium alloy heat treatment. *Heat Treatment Metals*. 1979, vol. 6, no. 1, pp. 19–21.
5. *AQUATENSIS /AQUACOOOL*. Available at: http://www.petrofer.com/images/petrofer/dokumente/produkte/en/PET_1_QUENCHANTS_EN.pdf
6. *Aqua-Quench*. Available at: <https://www.houghtonintl.com/en-gb/find-your-products?search=&application=All&industry=All>
7. *Spraying Systems Co.* Available at: http://www.spray.de/spray_nozzles/spray_nozzles_overview.aspx
8. Zheludkevich M.S. *Teplotekhnologicheskie osnovy upravlyаемого vodovozdushnogo okhlazhdeniya pri zakalke izdelii iz zhelezouglerodistykh spлавov: avtoref. diss...dokt. tekhn. nauk* [Heat engineering basics of controlled water-air cooling during quenching of products of iron-carbon alloys: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Minsk: 2001, 34 p. (In Russ.).
9. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Alimkulov M.M. Physical modeling in the study of the effect of modes of rolling and water-air mixture cooling on the rails quality. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015, no. 2, p. 2. (In Russ.).
10. Glazkov L.A., Zheludkevich M.S., Zelenin T.L., Tabolin A.A. Resource-saving technological process of heat treatment of large dies. *Vestnik BNTU*. 2009, no. 2, pp. 31–34.
11. Golovko A.N., Rodman F., Njurnberger F. Investigation of the water-air cooling process of the thick walled extruded profile made of alloy En Aw-6060 on the output table. *Metallurgical and Mining Industry*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 66–74.
12. Yaroshenko Y.G., Startseva M.V., Lipunov Y.I., Eismont K.Y., Nekrasova E.V. Developing modern thermal strengthening technique for regulated fishplate cooling. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014, vol. 190, no. 1, pp. 491–499.
13. Lipunov Yu.I., Eismont K.Yu., Startseva M.V., Yaroshenko Yu.G., Nekrasova E.V. Introduction of modern energy-saving equipment and environmentally pure strengthening technology into the production of rail pads. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2013, no. 12, pp. 61–64. (In Russ.).
14. Budrin D.V., Kondratov V.M. Quenching in air-water mixtures. *Metallurgy and Heat Treatment*. 1965, vol. 7, no. 6, pp. 367–370.
15. Systems for accelerated cooling of plates. Bernhard Ludwig, MDS Mannesmann Demag Sack GmbH, Düsseldorf. *Metallurgical Plate and Technology*. 1988, no. 4, pp. 10–17.
16. Lipunov Yu.I., Zaynullin L.A., Startseva M.V. Development of high-efficiency technologies and devices of controlled cooling for thermohardening of metal. *Proceedings of the XI China-Russia Symposium on Advanced Material & Technologies*, Hailing Tu, Solntsev K., Ring Zhou eds. Part I. China, Kunming, Yunnan Publishing Group Corporation, Yunnan Science & Technology Press, 2013, pp. 295–298.
17. Mandzyak I.I., Pererva V.Ya., Shevchenko G.L. Investigation of water-air cooling at heat treatment of metal. In: *Energo- i resur-*

sosberezhenie v teploenergeticheskoi i sozial'noi sfere. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii stud., aspir., uchenykh. 2013. Chelyabinsk [Energy and resource saving in heat power and the social sphere. Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. of Students, Postgraduates and Scientists 2013. Chelyabinsk]. Chelyabinsk: SUSU, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 206–209. (In Russ.).

18. Nasedkina Ya.I., Karavaeva M.V., Kaibyshev O.A. Effect of combined thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties of high carbon bearing steel. *Vestnik UGATU. Mashinostroenie*. 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 145–148. (In Russ.).
19. Eismondt K.Yu. Study of the quenching medium, alternative to the quenching oils. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2000, no. 11, pp. 32–36. (In Russ.).
20. Petrash L.V. *Zakalochnye sredy* [Quenching medium]. Moscow: Mashgiz, 1959, 111 p. (In Russ.).

Information about the authors:

Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor-Consultant of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yury-y@planet-a.ru)

Yu.I. Lipunov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Center of Modern Cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies (vniimt@yandex.ru)

A.B. Smakhanov, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (47alisher@gmail.com)

M.V. Stolyarova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Center of Modern cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies (vniimt@yandex.ru)

Received June 28, 2017

УДК 621.746+621.771

НАГРУЖЕННОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БОЙКОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПОЛОСЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ. СООБЩЕНИЕ 2

Лехов О.С.¹, д.т.н., профессор кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин (MXLehov38@yandex.ru)

Михалев А.В.¹, старший преподаватель кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения

Шевелев М.М.², начальник лаборатории неразрушающего контроля

¹ **Российский государственный профессионально-педагогический университет**
(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² **ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»**
(620057, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

Аннотация. Описаны основные нагрузки, действующие на стенки-бойки сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Изложена методика определения суммарных напряжений в стенках-бойках установки от усилий обжатия и температурной нагрузки. Описаны температурные граничные условия для определения температурных полей в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки при получении листов из стали для сварных труб. Приведена зависимость для определения плотности теплового потока от горячего металла очага деформации, действующего на рабочую поверхность стенки-бойка при обжатии заготовки. Изложена методика определения значений эффективных коэффициентов теплоотдачи при охлаждении стенок-бойков водой. Описана процедура определения температурных полей и термоупругих напряжений на стенках-бойках установки с использованием пакета ANSYS. Описаны исходные данные для определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Результаты расчета температурных полей и термоупругих напряжений выполнены в пяти сечениях стенки-бойка и приведены для характерных линий. Показан характер распределения температуры по толщине стенки-бойка при охлаждении его водой на холостом ходу и контакте с заготовкой при ее обжатии. Для рассчитанных полей температур определены осевые и эквивалентные напряжения, возникающие в стенках-бойках без каналов при обжатии заготовки и охлаждении их водой во время холостого хода. Представлены величины и закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя и по высоте и толщине стенок-бойков при обжатии заготовки и на холостом ходу. Приведены величины и закономерности распределения суммарных осевых напряжений по толщине приконтактного слоя, высоте и толщине стенок-бойков от усилий обжатия и температурной нагрузки.

Ключевые слова: стенка-боек, кристаллизатор, установка, непрерывное литье, деформация, температура, напряжение, обжатие, усилие, труба.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-431-438

В предыдущей работе [1] представлены результаты определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и напряжений в стенках-бойках установки от усилий обжатия.

Основными нагрузками, действующими на стенки-бойки, являются нагрузка от усилия обжатия и циклическая температурная нагрузка. С использованием аппарата линейной термической упругости компоненты тензора напряжений, возникающие в стенке-бойке, можно записать в виде суммы

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^p + \sigma_{ij}^t,$$

где σ_{ij}^p – напряжения от усилия обжатия; σ_{ij}^t – термоупругие напряжения от температурной нагрузки.

Для определения величины σ_{ij}^t следует сначала найти температурное поле, возникающее в стенках-бойках

при обжатии заготовок, затем по найденному полю температур определить термоупругие напряжения.

В соответствии с принятой конструкцией системы охлаждения стенок-бойков при обжатии заготовки действуют следующие температурные граничные условия: контакт с горячим металлом, нагрев излучением от горячего металла, а также водяное и воздушное охлаждение. Водяное охлаждение и излучение действуют в зоне очага циклической деформации заготовки. Температурное поле стенок-бойков определяется на основе решения сравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [2]. Среднюю плотность теплового потока от горячего металла очага деформации, действующую на рабочую поверхность стенки-бойка, определяем по формуле [3]

$$q_{cp} = \sqrt{\lambda C_V} \frac{2(\theta_3 - \theta_0)}{\sqrt{\pi \tau_1}}.$$

Для расчета принимаем следующие значения параметров, входящих в формулу: $\lambda = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – значение теплопроводности материала бойка; $C_V = 5 \text{ МДж/(м}^3\cdot\text{К)}$ – объемная теплоемкость (значение C_V для стали принято согласно данным работы [4]); $\theta_3 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура металла очага деформации; $\theta_0 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура рабочей поверхности стенки-бойка в квазиустановившемся режиме при рабочем ходе; $\tau_1 = 0,1364 \text{ с}$ – время контакта стенки-бойка с металлом.

Принимаем расчетное значение плотности теплового потока $q_{cp} = 20 \text{ МВт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Значение эффективного коэффициента теплоотдачи α_1 , принятого в граничных условиях на рабочую поверхность во время паузы, подбирали многочисленными итерационными расчетами из условия, чтобы в квазистационарном состоянии температура рабочей поверхности стенки-бойка была на уровне $400 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате принято $\alpha_1 = 50 \text{ 000 Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Значение коэффициента теплоотдачи α_2 при охлаждении поверхностей стенки-бойка водой принимаем равным $500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ [5 – 8].

Таким образом, для определения термоупругих напряжений в стенке-бойке необходимо: в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечноэлементной сетки; затем для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости. При этом в качестве граничных условий необходимо задать на всей поверхности стенки-бойка только отсутствие внешних сил. Тогда разрешающие уравнения [9, 10] позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечноэлементного разбиения, а затем определяются температурные деформации и напряжения.

Такая схема выполнения расчетов с использованием метода конечных элементов повторяется и реализуется в одном из модулей пакета ANSYS 15 [11 – 15].

Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ. Теплофизические свойства для этой марки стали приведены в работе [16].

Принятые для расчета значения модуля упругости E , плотности ρ , теплопроводности λ , теплоемкости C , коэффициента линейного расширения α для стали 45ХНМ в интервале температур от 20 до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ приведены ниже:

Значение параметра при температуре, $^\circ\text{C}$								
20	100	200	300	400	500	600	700	
$E \cdot 10^{-5}, \text{ МПа}$								
2,16	2,07	1,97	1,88	1,76	1,68	1,52	1,36	
$\rho \cdot 10^6, \text{ кг/мм}^3$								
7,75	7,73	7,72	7,69	7,69	7,66	7,62	7,60	
$\lambda \cdot 10^3, \text{ Вт/(мм}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$								
34	34	33	32	41	30	29	27	
$C, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$								
480	480	500	520	540	555	556	556	
$\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$								
11,6	12,6	12,1	12,7	13,2	13,6	13,9	14,0	

При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

- на торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка – охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи $500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ и температурой окружающей среды $60 \text{ }^\circ\text{C}$;
- на рабочую поверхность бойка во время рабочего хода в течение $0,1364 \text{ с}$ действует тепловой поток плотностью $20 \text{ МВт/(м}^2\cdot\text{К)}$;
- во время холостого хода ($0,4092 \text{ с}$) эффективный коэффициент теплоотдачи равен $50 \text{ 000 Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Следует отметить, что для решения задачи нестационарной теплопроводности некоторые параметры, такие как, например плотность теплового потока от металла очага деформации, действующей на рабочую поверхность во время рабочего хода, а также эффективный коэффициент теплоотдачи, принятый на рабочую поверхность во время паузы, можно определить (и то приближенно) лишь путем численного моделирования процесса работы стенки-бойка с различными значениями параметров и сравнения этих результатов с экспериментальными данными. Однако для исследуемого процесса работы стенок-бойков отсутствуют какие-либо экспериментальные данные. Таким образом, температурные поля стенок-бойков и уровень возникающих в них термоупругих напряжений могут быть уточнены в последующем при получении экспериментальных данных на действующем оборудовании [17 – 20].

Расчет температур и затем термоупругих напряжений, как и в работе [1], выполнены в пяти сечениях, и результаты приведены для характерных линий (см. рис. 4, 5 Сообщения 1). На рис. 1 показан характер распределения температуры по толщине стенки-бойка без каналов при охлаждении водой на холостом ходу в течение $0,4092 \text{ с}$ и контакте с заготовкой при ее обжатии в течение $0,1364 \text{ с}$. Во время холостого хода осуществляется охлаждение водой стенки-бойка с боковых поверхностей и суппорта. Распределение температуры приведено вдоль линии Р4, распределение температур по другим линиям такое же.

Из приведенных результатов следует, что температурное поле стенки- бойка во время обжатия заготовки и холостого хода изменяется на глубине $2 - 3 \text{ мм}$. От воздействия теплового потока во время обжатия заготовки контактная поверхность стенки-бойка нагревается до максимальной температуры $511 \text{ }^\circ\text{C}$, и далее на холостом ходу при охлаждении его водой температура стенки-бойка на глубине $2 - 3 \text{ мм}$ уменьшается до $135 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура стенки бойка по толщине уменьшается и на его задней поверхности составляет $75 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для рассчитанных полей температур были определены значения осевых термоупругих напряжений (SX , SY и SZ) и эквивалентных напряжений по Мизесу ($SEQV$), возникающих в стенках-бойках без каналов при обжатии заготовки и при охлаждении их водой во

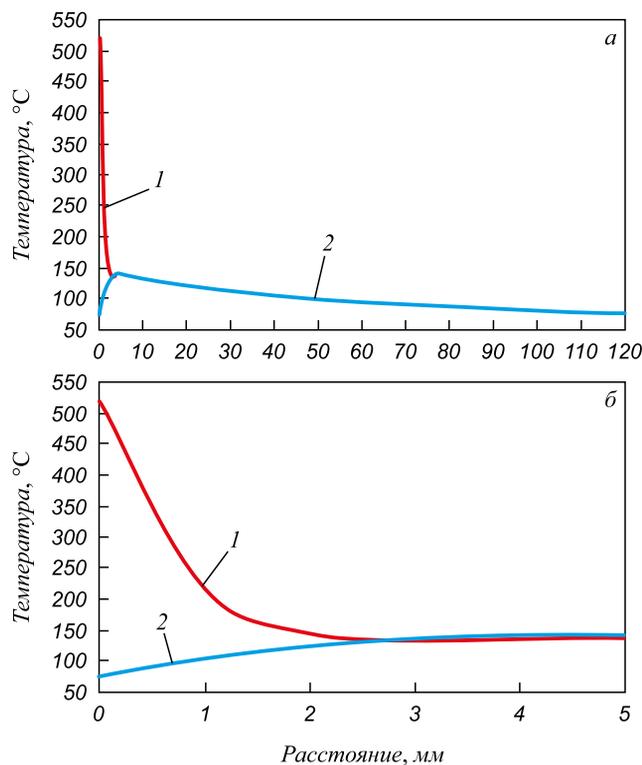


Рис. 1. Характер распределения температур вдоль линии P4 от воздействия на боек теплового потока (1) и охлаждения водой (2): а – по толщине бойка; б – от поверхности контакта вглубь на 5 мм

Fig. 1. Nature of the temperature distribution along the P4 line under the impact of heat flow (1) and water cooling on the backup (2): а – along the thickness of the backup; б – from the contact surface to 5 mm deep

время холостого хода. Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу в приконтактном слое стенки-бойка без каналов приведены на рис. 2 и в табл. 1 и 2.

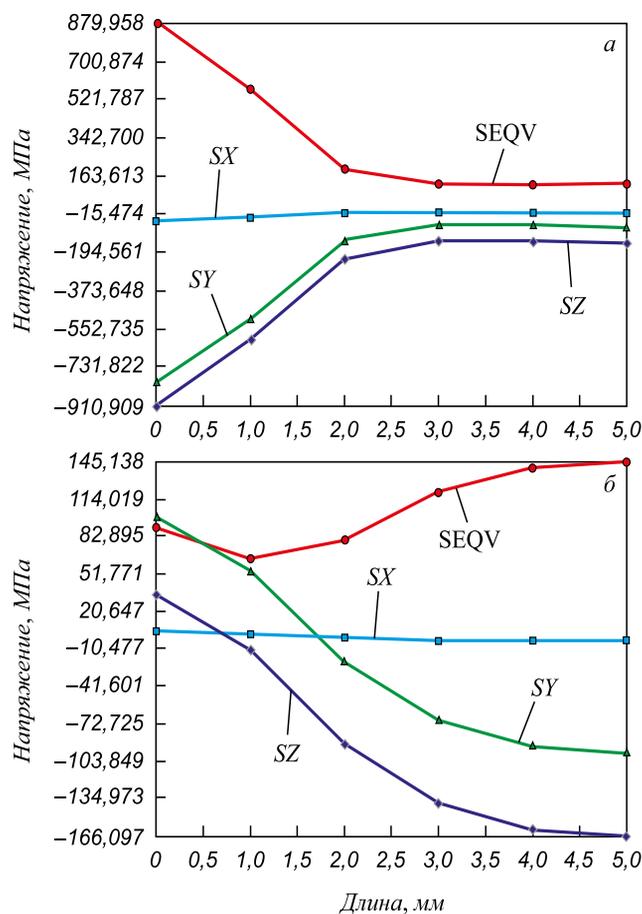


Рис. 2. Характер температурных напряжений вдоль линий P2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой: а – в конце контакта; б – в конце паузы

Fig. 2. Nature of the temperature stresses along the P2 lines under the temperature field impact on the backup without the channels. Cooling of the lateral surfaces of the backup and the support with water: а – at the end of the contact; б – at the end of a pause

Таблица 1

Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки

Table 1. Stress state of the contact layer of the backup-wall without channels during drafting of the workpiece

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, линия P1	-48	-78	-255	91	-742	-115	646	130
2, линия P2	-45	-15	-831	-105	-910	-140	880	128
4, линия P3	-25	15	-730	-25	-870	-115	820	120
5, линия P4	-20	-30	-240	89	-702	-108	617	130
1, линия P5	-43	-40	-195	100	-648	-85	561	78
2, линия P6	-40	6	-790	-35	-790	6	803	105
4, линия P7	2	2	-740	0	-740	6	744	2
5, линия P8	-9	-74	-230	10	-607	-10	528	75

Примечание. КП – контактная поверхность стенки бойка с заготовкой; ПС – приконтактный слой стенки-бойка глубиной 5 мм.

Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов в конце холостого хода

Table 2. Stress state of the contact layer of the backup-wall without channels at the end of the idle move

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, линия P1	5	28	44	-10	10	-120	52	124
2, линия P2	-5	-8	88	-85	35	-166	90	145
4, линия P3	0	-8	151	-40	55	-146	136	120
5, линия P4	2	26	37	-9	30	-90	38	110
1, линия P5	6	26	45	-12	92	-37	82	60
2, линия P6	3	-2	107	-87	156	-50	143	80
4, линия P7	0	-5	148	-48	168	-44	160	40
5, линия P8	1	28	39	-10	117	-20	103	45

Эти данные характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя, а также по высоте и ширине стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки и на холостом ходу. Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое стенки-бойка возникают сжимающие напряжения, имеющие максимальные значения на контактной поверхности. Затем сжимающие термоупругие напряжения снижаются и достигают минимальных значений на глубине приконтактного слоя 2 мм (рис. 2, табл. 1). Максимальные термоупругие напряжения возникают вдоль осей Y и Z и достигают значений $-740 \div 910$ МПа. Затем по толщине приконтактного слоя эти напряжения снижаются и на глубине 2 мм они становятся равными $-108 \div 140$ МПа. Напряжение по Мизесу по высоте стенки-бойка без каналов распределяется неравномерно и изменяется в диапазоне 528 – 880 МПа.

Так же важно оценить закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенок-бойков без каналов при охлаждении их водой на холостом ходу. Из рис. 2 и табл. 2 видно, что термоупругие напряжения распределяются по толщине приконтактного слоя стенок-бойков крайне неравномерно; имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Наибольшие растягивающие напряжения (до 168 МПа) возникают в направлении осей Y и Z на контактной поверхности стенки-бойка с заготовкой, затем по толщине стенки-бойка они переходят в сжимающие (табл. 2).

Для определения напряженного состояния стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки проведены специальные расчеты. На рис. 3 показаны закономерности распределения осевых суммарных напряжений в стенках-бойках

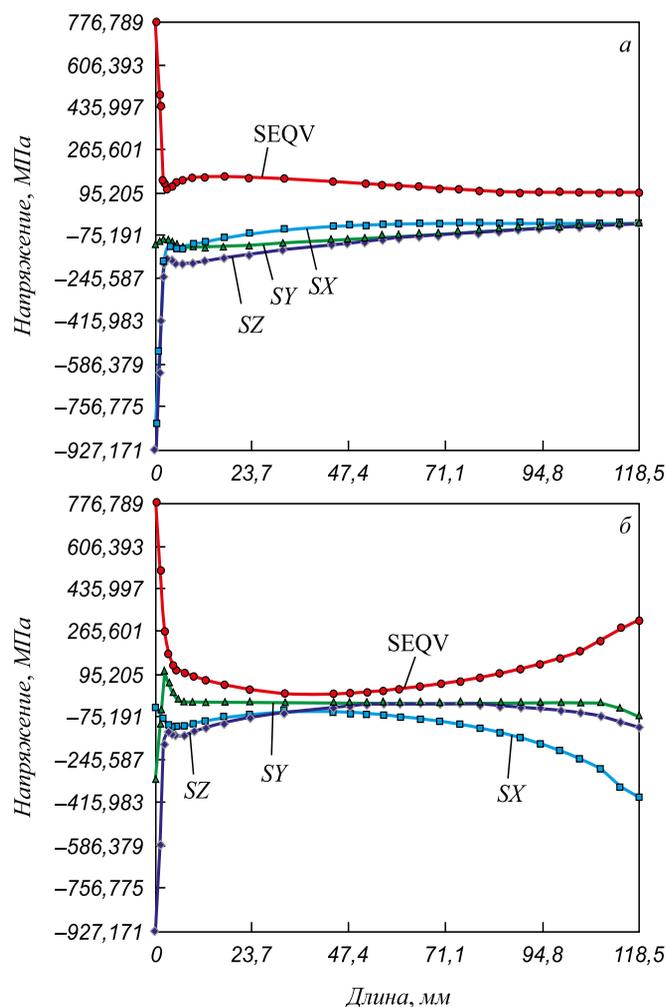


Рис. 3. Характер суммарных напряжений вдоль линий P3 (а) и P4 (б) от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 3. Nature of the total stresses along the P3 (a) and P4 (b) lines under the impact the temperature field generated by contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

от усилия обжатия и температурной нагрузки по толщине и высоте стенки-бойка без каналов.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой имеют место сжимающие напряжения, причем наибольшей величины они достигают на контактной поверхности, а затем по толщине стенки-бойка уменьшаются (рис. 3, табл. 3 и 4).

Так, суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки в направлении осей *Y* и *Z* в сечении 3 достигают соответственно максимальных значений (–980 и –1033 МПа). В других сечениях осевые суммарные напряжения меньше и в направлении осей

Y и *Z* они изменяются соответственно в диапазонах –235 ÷ –820 МПа и –436 ÷ –600 МПа (табл. 3).

Рис. 4 характеризует распределение суммарных напряжений в приконтактном слое стенки-бойка без каналов по его высоте.

Наибольших значений суммарные напряжения достигают на контактной поверхности стенки-бойка при обжатии заготовки и их максимумы в направлении осей *X*, *Y* и *Z* соответственно составляют –319, –935 и –1033 МПа. Однако в приконтактном слое стенки-бойка на глубине 5 мм эти напряжения значительно меньше и в направлении осей *X*, *Y* и *Z* их значения составляют –263, –169 и –245 МПа (рис. 4).

Таблица 3

Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки

Table 3. Stress state of the backup-wall without channels after the impact of drafting force and the temperature load

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	<i>SX</i>		<i>SY</i>		<i>SZ</i>		<i>SEQV</i>	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
1, линия P1	–48	–300	–255	–75	–637	–94	645	229
2, линия P2	–24	24	–637	0	–600	0	690	110
4, линия P3	–120	–35	–756	–20	–590	–20	606	95
5, линия P4	–42	–304	–238	–42	–570	–75	546	263
1, линия P5	–43	–220	–285	–43	–557	–73	562	199
2, линия P6	–39	–6	–756	–23	–603	–20	620	82
3, линия P7	–113	–63	–820	–27	–567	–63	592	120
4, линия P8	–39	–265	–235	–39	–436	–65	494	358

Примечание. ТС – распределение напряжений по толщине стенки-бойка.

Таблица 4

Распределение осевых напряжений от усилий обжатия и температурной нагрузки по толщине приконтактного слоя, высоте и ширине стенки-бойка без каналов

Table 4. Distribution of axial stresses from the drafting forces and temperature load along the thickness of the contact layer, the height and width of the backup-wall without channels

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	<i>SX</i>		<i>SY</i>		<i>SZ</i>		<i>SEQV</i>	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
Линия P9	–76	–319/–372	–272	–935/–272	–750	–1030/–672	679	869
Линия P10	–80	–263/–90	–10	–169/79	–128	–245/–100	121	121
2, линия P11	–50	–50	–765	–607	–898	–246	856	510
2, линия P12	–11	–11	–71	–37	–143	95	121	108
4, линия P13	–117	–117	–836	–670	–927	–245	776	608
4, линия P14	–100	–183	–120	–120	–183	20	160	231
3, линия P15	–324	–324	–980	–30	–724	–30	560	90
3, линия P16	–324	–324	–980	–768	–1033	–320	738	561
Линия P17	–57	–320/8	–263	–967/–263	–620	–870/–615	560	792

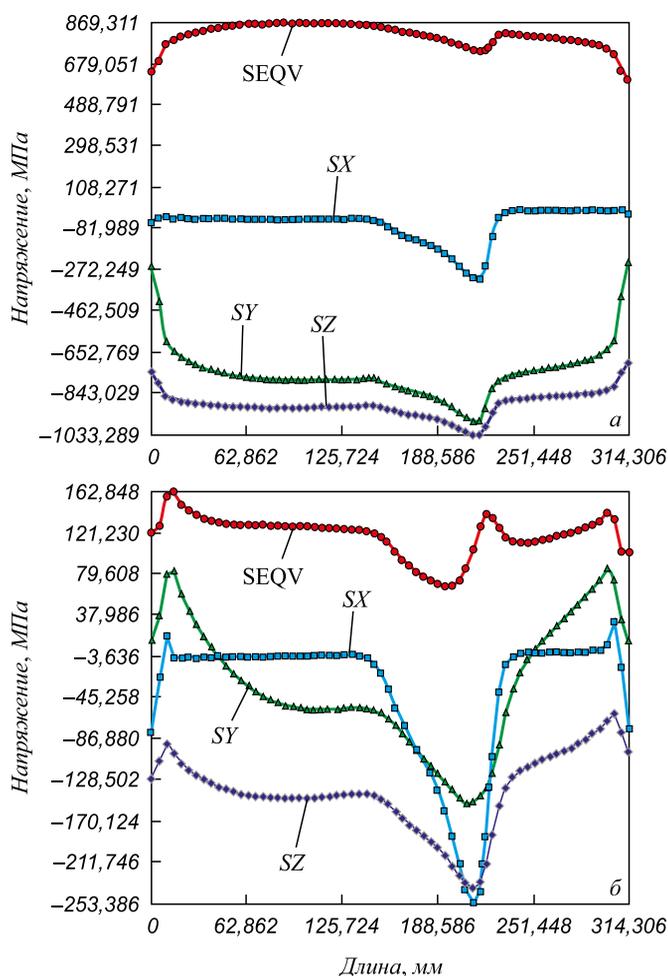


Рис. 4. Характер суммарных напряжений вдоль линий P9 (а) и P10 (б) от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 4. Nature of the total stresses along the P9 (a) and P10 (b) lines under the impact of the temperature field arising at contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

На рис. 5 и в табл. 4 показан характер распределения по ширине стенки-бойка суммарных напряжений в приконтактном слое стенки-бойка в сечениях 2 и 4 (см. рис. 4 сообщения 1). Максимальные значения суммарных напряжений имеют место на контактной поверхности и в направлении осей X и Z они достигают значений -836 и -927 МПа, соответственно.

Распределение осевых суммарных напряжений на контактной поверхности стенок-бойков по их высоте показано на рис. 5.

Максимальные значения напряжения в направлении осей X, Y и Z достигают при обжатии заготовки (соответственно -320 , -967 и -870 МПа).

Выводы. Поставлена и решена задача определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Определены значения и закономерности распределения температуры и термо-

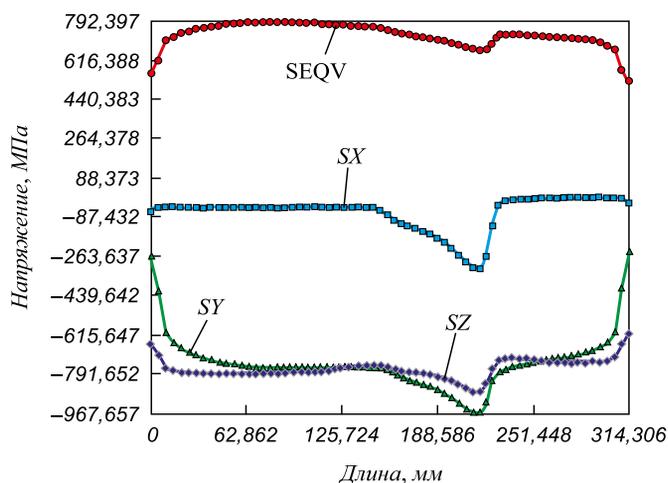


Рис. 5. Характер распределения суммарных напряжений вдоль линий P17 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 5. Nature of distribution of the total stresses along the P17 lines under the impact of the temperature field generated by contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

упругих напряжений в стенках-бойках установки. Установлены закономерности распределения в стенках-бойках суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полоса при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 4. С. 268 – 273.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. 1967. – 600 с.
3. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А. Технологические процессы в машиностроении. Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 200 с.
4. Буланов Л.В., Карлинский С.Е., Волегова В.Е. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении. – В кн.: Надежность крупных машин. Сб. науч. тр. НИИтяжмаш. – Свердловск: изд. НИИтяжмаш, 1990. С. 126 – 132.
5. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вала. – В кн.: Труды МИСиС. – М.: изд. МИСиС, 1977. № 100. С. 90 – 93.
6. Астахов И.Г., Белосевич В.К., Ионов С.М., Лебедев Л.С. Определение коэффициента теплоотдачи прокатных валков при охлаждении водой. – В кн.: Труды МИСиС. – М.: изд. МИСиС, 1977. № 102. С. 4 – 9.
7. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П., Надуттов В.Г. Новый метод расчета конвективного теплообмена валков листовых станов // Производство толстолистовой стали. 1981. № 5. С. 54 – 57.
8. Астахов А.А., Мазур И.П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. № 112. Т. 7. С. 83 – 86.
9. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волоснякова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 15 – 19
11. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadferm.ru>
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
13. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
15. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
16. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
17. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
18. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – 112 с.
19. Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали // Сталь. 2016. № 1. С. 59 – 62.
20. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1976. – 349 с.

Поступила 12 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, pp. 431–438.

LOAD AND STRAIN STATUS OF CCM BACKUPS AND STRIPE DEFORMATION AT PRODUCTION OF STEEL SHEETS FOR WELDED PIPES. REPORT 2

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev¹, M.M. Shevelev²

¹Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²JSC “Center of Thermal Imaging Diagnostics”, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The main loads acting on the backup-walls of the assembled mold of the combined continuous casting and deformation unit in production of steel sheets for welded pipes are described. The technique for determining the total stresses in backup-walls of the installation of the compression forces and the temperature load is given. The temperature boundary conditions for determining the temperature fields in the backup-walls of the assembled mold of the unit for steel sheets for welded pipes production are depicted. The dependence for determining the heat flux density of the deformation center hot metal influencing working surface of the backup-wall during workpiece drafting is considered, as well as the technique for determining values of effective heat transfer coefficients for backup-walls cooling by water. The procedure for determining temperature fields and thermoelastic stresses on backup-walls of the installation is described using the ANSYS package. The article considers the initial data for determining temperature fields and thermoelastic stresses in backup-walls of the assembled casting mold of the installation. The results of temperature fields and thermoelastic stresses calculation are achieved in five sections of the backup-wall and are provided for the typical lines. The nature of temperature distribution along the backup-wall thickness during cooling by water at idle and at contact with the workpiece during its compression is shown. For the calculated temperature fields, axial and equivalent stresses, that arise in the backup-walls without channels when the workpiece is drafted and cooled with water at idle, are determined. The values and regularities of distribution of axial and equivalent stresses along the thickness of the contact layer and along the height and thickness of the backup-walls during drafting of the workpiece and at idle are presented. The values and regularities of the distribution of total axial stresses along the thickness of the contact layer, the height and thickness of the backup-walls from the drafting forces and the temperature load are given.

Keywords: backup-wall, casting mold, installation, continuous casting, deformation, temperature, stress, drafting, force, pipe.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-431-438

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets

for welded pipes. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, no. 4, pp. 268–273. (In Russ.).

2. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
3. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii. Ch. II. Obrabotka metallov davleniem i svarochnoe proizvodstvo* [Technological processes in mechanical engineering. Part. II. Metal forming and welding]. Omsk: OmGTU, 2005, 200 p. (In Russ.).
4. Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of CCM rollers at external and internal cooling. In: *Nadezhnost' krupnykh mashin. Sb. nauch. tr. NIItzashmash*. Sverdlovsk: NIItzashmash, 1990, pp. 126–132. (In Russ.).
5. Khloponin V.N., Kosyreva M.V., Kosyak A.S. Effect of the cooling system on thermal conditions of the roll's surface layer. In: *Trudy MISiS*. Moscow: MISiS, 1977, no. 100, pp. 90–93. (In Russ.).
6. Astakhov I.G., Belosevich V.K., Ionov S.M., Lebedev L.S. Determination of the heat transfer coefficient of milling rolls with water cooling. In: *Trudy MISiS*. Moscow: MISiS, 1977, no. 102, pp. 4–9. (In Russ.).
7. Garber E.A., Goncharskii A.A., Sharavin M.P., Nadutov V.G. New method for calculating convective heat transfer of rolls of sheet mills. *Proizvodstvo tolstolistovoi stali*. 1981, no. 5, pp. 54–57. (In Russ.).
8. Astakhov A.A., Mazur I.P. Development of a model for studying the thermal state of working rolls of hot rolling mills. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. 112, vol. 7, pp. 83–86. (In Russ.).
9. Sorokin V.G., Volosnyakova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik stali i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
10. Lekhov O.S. Study of stress-strain state of the rolls during rolling of band-beam in the stands of universal beam mill. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 15–19. (In Russ.).
11. ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*. Available at URL: <http://www.cadferm.ru>
12. Segerlind Larry J. *Applied finite element analysis*. New York etc., 1976. (Russ.ed.: Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1979, 393 p.).
13. Norrie D. H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. Academic Press, New York, 1978. (Russ.ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981, 304 p.).

14. Gallagher R.H. *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Prentice-Hall, New Jersey, 1975, 420 p. (Russ.ed.: Gallagher R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow: Mir, 1984.).
15. Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. New York: Wiley, 1983, 328 p. (Russ.ed.: Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya*. Moscow: Mir, 1986, 318 p.).
16. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of the deformable solid]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.).
17. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye protsessy nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined processes of continuous casting and deformation for rolling stock production]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.).
18. Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Installation of combined process of continuous casting and deformation. Theory and design]. Ekaterinburg: URFU, 2014, 112 p. (In Russ.).
19. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Investigation of the combined process of continuous casting and cyclic deformation for production of steel sheets. *Stal'*. 2016, no. 1, pp. 59–62. (In Russ.).
20. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).

Information about the authors:

O.S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Cars and Industrial Machines (MXLehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy, Welding Production and Methods of Vocational Training

M.M. Shevelev, Head of Nondestructive Testing Laboratory

Received July 12, 2017

УДК 662.613.12.003

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ. ЧАСТЬ 1

Подгоредецкий Г.С., к.т.н., директор научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (podgs@misis.ru)

Горбунов В.Б., к.т.н., зам. директора научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (vbg1953@mail.ru)

Агапов Е.А., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (ageger@yandex.ru)

Ерохов Т.В., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (timofeyerokhov@gmail.com)

Козлова О.Н., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (o_kozlova1@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Дальнейшее развитие угольной электроэнергетики России, особенно в районах Сибири и Дальнего Востока в соответствии с Энергетической стратегией, предопределяет необходимость решения проблемы утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) во вновь реализуемых проектах. Общее количество золы и шлака в золоотвалах в России составляет более 1,5 млрд. т, а площадь, занимаемая такими отходами, более 220 км². При этом степень использования ЗШО не превышает 10 %. Показано, что основными решениями утилизации образующихся промышленных твердых отходов ТЭЦ считается их применение в производстве строительных материалов, дорожном строительстве или комплексная переработка ЗШО с извлечением металлов и производством строительных материалов. Некоторые золы уноса могут применяться в сельском хозяйстве. Физико-химические свойства золошлаковых отходов и, соответственно, направления их применения, а также выбор технологии определяются минеральной частью ископаемых углей и способом их сжигания. Для использования зол уноса в стройиндустрии необходимо переводить систему удаления ЗШО на сухой метод, сопровождающийся, с одной стороны, большим объемом капитальных вложений в оборудование и сооружения по хранению, классификации, дроблению и измельчению, преданию золошлаковым отходам новых физико-химических свойств, а с другой стороны, увеличением организационных и транспортных барьеров. Приведены примеры предлагаемых технологий по утилизации золошлаковых отходов в виде извлечения металлов и производства строительных материалов. Для получения железосодержащих концентратов применяется в основном одностадийная магнитная сепарация, но качество концентрата при этом не соответствует современным требованиям. Наиболее технологически эффективными для экстракции металлов из золошлаковых отходов являются технологии, основанные на методах флотации. В то же время из приводимых данных следует, что их применение может ограничиваться экономическими, организационными факторами и возникновением новых экологических рисков. Сделан вывод о возможности использования вышеперечисленных технологий для уже действующих угольных ТЭЦ при наличии государственной поддержки.

Ключевые слова: уголь, утилизация золошлаковых отходов, строительные материалы, извлечение металлов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446

Проектом Энергетической стратегии России на период до 2035 года [1, 2] предполагается рост добычи и потребления угля в стране при опережающем развитии угледобывающих районов Восточной Сибири и Дальнего Востока с перспективой формирования энергоугольных кластеров, то есть строительства электрогенерирующих мощностей в непосредственной близости от места добычи твердого топлива. Также одной из задач ставится развитие локальных и интегрируемых в общие сети распределенных источников энергоснабжения.

Целями строительства новых мощностей могут быть снижение энергодефицита региона, экспорт электроэнергии в другие регионы и страны, локальное

обеспечение электрической и тепловой энергией угледобывающего предприятия и сопутствующей районной инфраструктуры (близлежащих городов и поселков, электрификация железной дороги и так далее). Наиболее энергодефицитными районами, одновременно обладающими значительными запасами угля, являются такие регионы, как Алтайский край, Приморский край, Сахалинская область, Республика Тыва, Еврейская АО и другие [3]. В настоящее время вопрос о развитии энергетики Восточной Сибири и Дальнего Востока активно решается и в основном решается за счет развития угольной генерации, о чем говорит, например, инвестиционная программа ПАО «РусГидро» [4].

Одной из острейших экологических проблем теплоэлектрогенерации с использованием угля является утилизация шлаков и золы уноса (пыли газоочистных установок). Общее количество золы и шлака в золоотвалах в России составляет более 1,5 млрд. т, а площадь, занимаемая золошлаковыми отходами – более 220 км². При этом степень использования ЗШО не превышает 10 % [5].

Основными решениями утилизации образующихся промышленных твердых отходов ТЭЦ считается их применение в производстве строительных материалов, дорожном строительстве [6 – 8] или комплексная переработка ЗШО с извлечением металлов и производством строительных материалов [5, 6, 8 – 10]. Некоторые золы уноса применяются в сельском хозяйстве [9, 10].

Физико-химические свойства золошлаковых отходов и, соответственно, направления их применения, а также выбор технологии определяются минеральной частью ископаемых углей и способом их сжигания. Для классификации зол и шлаков ТЭС в России существует достаточно обширная нормативная и научно-техническая база [11], но в основном для производства строительных материалов руководствуются ГОСТ 25818 – 2017, для строительства дорог – отраслевым методическим документом ОМД 218.031 – 2013, для производства вяжущих материалов ориентируются на классификацию по А.В. Волженскому [6] или Е.А. Галибиной [12].

Для максимального повышения уровня утилизации золошлаковых отходов необходимо переводить систему удаления ЗШО на сухой метод. По данным консорциума «Феникс» стоимость такой системы для удаления ЗШО на золоотвал Рефтинской ГРЭС (выход отходов 5 500 000 т/год), состоящей из двух односекционных силосов объемом единовременного хранения 22 000 м³ и закрытого транспортера длиной 4,5 км для перемещения увлажненной зольной смеси, составила около 11 млрд. рублей по ценам на 2013 г. [13]. Далее предполагается выстраивание системы продаж ЗШО или строительство производства.

При реализации ЗШО как сырьевого товарного продукта для стройиндустрии будет необходимо проводить сертификацию с учетом требований к отходам в определенных пределах по химическому составу и по физическим свойствам в соответствие с нормативными документами. Это потребует установки оборудования для классификации, строительства большого количества силосов для раздельного складирования ЗШО по товарной номенклатуре, оборудования для получения определенных свойств товарного продукта из золы уноса, оборудования для дробления, разделения по крупности и складирования шлаков [13]. При этом необходимость в золошлаковом отвале пусть и в меньших размерах остается, так как для многих предприятий стройиндустрии характерны сезонные колебания производства.

Существует достаточно большое количество технических решений по строительству производства

строительных материалов из ЗШО непосредственно на площадке ТЭС [8, 10, 14]. Номенклатура товарной продукции таких заводов стройматериалов очень обширна: от производства вяжущих, клинкера, сухих строительных смесей до бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Наиболее часто предлагаются технологические схемы, основой производства которых является производство цемента или клинкера. Типичный пример такой схемы переработки ЗШО для строящейся Омской ТЭЦ-6, предлагаемый ЗАО «Проф-ЦементВектор», представлен на рис. 1 [15]. При этом производство клинкера осуществляется на агломерационной машине, то есть в дополнение к выбросам самой ТЭЦ добавляются выбросы от агломашины. Известно из опыта металлургии и производства извести, что технология агломерации является экологически вредным и опасным производством [16]. Существенным фактом в экономике организации производства цемента будет также повышение объема грузопотоков – потребность в известняке в зависимости от основного модуля исходных золошлаков может колебаться от 50 до 200 % от выхода ЗШО.

Анализ технологических схем организации производства рядом с ТЭЦ строительных изделий, например, в виде бетонных блоков, тротуарной плитки и других цементно-песчаных изделий, где ЗШО будет использоваться как наполнитель, показывает, что приемлемое качество изделий сохраняется при добавлении золы не более 30 – 40 % [10, 17]. Следовательно, потребуется транспортировка цемента к месту производства в объеме минимум 60 – 70 % от валового выхода ЗШО. Таким образом, организация производства цемента и строительных материалов и изделий при ТЭЦ потребует или высоких капитальных вложений, или масштабного подвоза дополнительных материалов, или того и другого вместе, что может сделать экономику производства неустойчивой. Кроме того, снижая экологические риски хранения золы уноса как вещества 3-го класса опасности, организация производства увеличивает экологические риски контролируемых и неконтролируемых выбросов в атмосферу.

С точки зрения ресурсосбережения более привлекательными являются технологии комплексной переработки ЗШО с извлечением соединений металлов и производством сырья для строительных материалов, которые могут различаться по степени полноты переработки.

В основе этих решений заложены технологии обогащения ЗШО, продуктами которых являются углеродный и железосодержащий концентраты, алюмосиликатный продукт для стройиндустрии [5, 18 – 26]. В РФ в настоящее время существуют только опытные установки для комплексной переработки.

Типичным примером такого технического решения является опытная установка ОИВТ РАН для переработки ЗШО (рис. 2) [22]. Из золы уноса Каширской

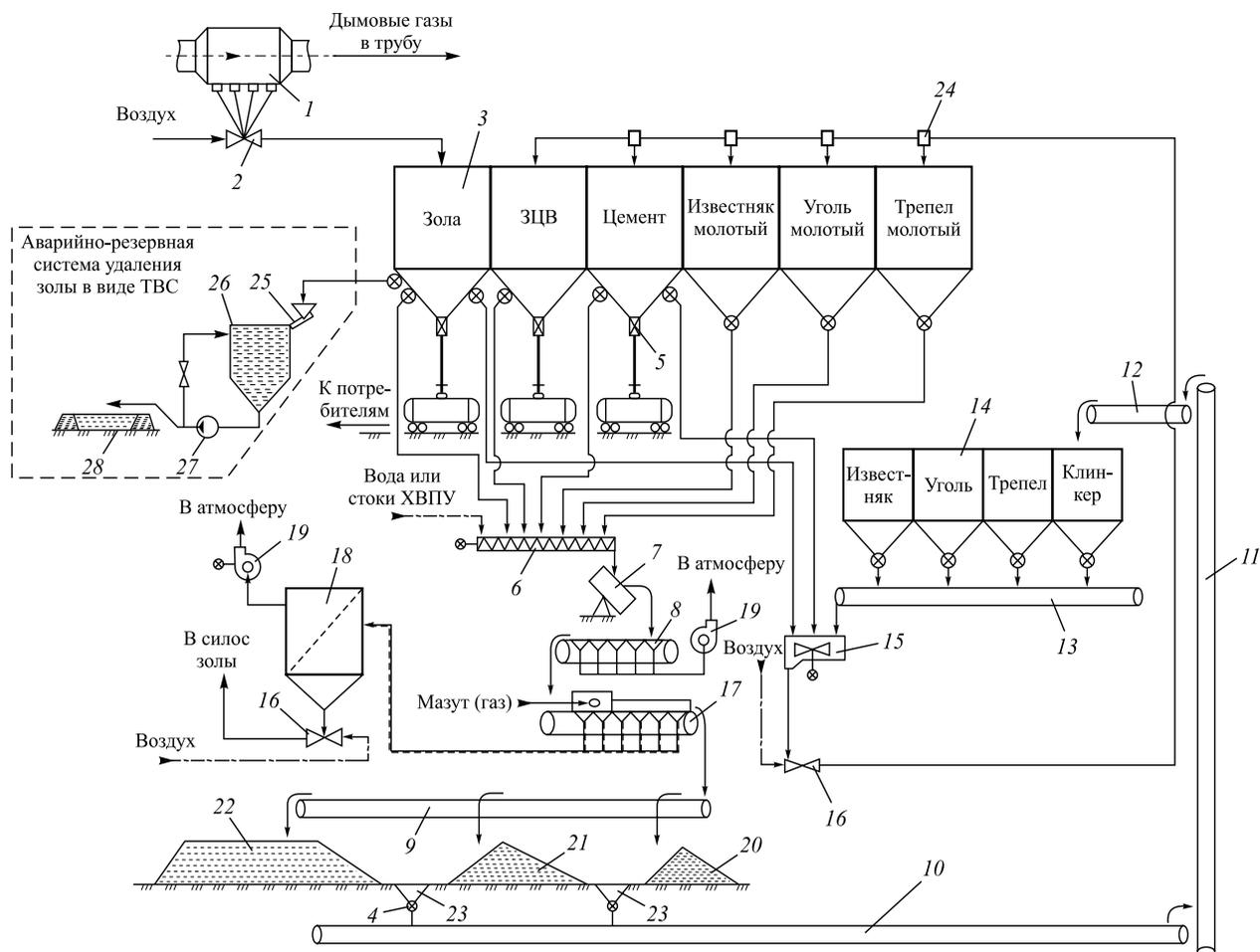


Рис. 1. Схема комплекса золошлакопереработки Омской ГТЭС-6 (проект) [15]:

1 – электрофильтр котлоагрегата; 2 – система пневмоудаления; 3 – склад золы, молотых сырьевых и готовых вяжущих материалов; 4 – питатель, дозатор; 5 – загрузочное устройство; 6 – смеситель; 7 – гранулятор; 8 – конвейер предварительного упрочнения гранул; 9 – 13 – конвейер ленточный; 14 – склад сырьевых материалов; 15 – смеситель; 16 – пневмотранспортная установка; 17 – агломерационная машина; 18 – скруббер; 19 – эксгаустер; 20 – склад золыного гравия; 21 – склад клинкера; 22 – гранулохранилище; 23 – бункер; 24 – переключатель; 25 – гидравлический смеситель; 26 – бак-мешалка; 27 – багерный насос; 28 – отвал твердеющей водозольной смеси

Fig. 1. Scheme of a complex of ash and slag utilization at Omsk TPP-6 (project) [15]:

1 – electrofilter of the boiler; 2 – pneumatic removal system; 3 – ash warehouse, ground raw and finished binding materials; 4 – feeder, dispenser; 5 – loading device; 6 – mixer; 7 – granulator; 8 – conveyor of granules preliminary hardening; 9 – 13 – belt conveyor; 14 – raw materials warehouse; 15 – pneumatic conveying system; 16 – pneumatic conveying system; 17 – sintering machine; 18 – scrubber; 19 – air exhauster; 20 – ash gravel storage; 21 – clinker warehouse; 22 – granule storage facility; 23 – bunker; 24 – switch; 25 – hydraulic mixer; 26 – tank-mixer; 27 – shaking pump; 28 – blade of hardening water-ash mixture

и Троицкой ГРЭС были получены углеродсодержащий концентрат с содержанием углерода 68 – 80 %, железосодержащий концентрат с содержанием 46 – 50 % Fe, остальное – так называемый алюмосиликатный продукт с содержанием 3 – 4 % углерода и 2 – 3 % железа. В данной схеме для получения железосодержащего концентрата применялся метод флотации. Качество концентрата, полученного другими методами обогащения, представлены в табл. 1 [23].

Для основных металлургических технологий предпочтительно получать концентрат железа с содержанием выше 60 %, что может быть достигнуто либо методами многостадийной магнитной сепарацией или выщелачиванием (на основании табл. 1), экономическая эффективность которых неочевидна.

В минеральной части углей многих угольных месторождений России содержание оксида алюминия составляет 25 – 35 %, что позволяет рассматривать золошлаковые остатки сжигания как ресурсную базу для производства глинозема. Разрабатываемые технологии основываются на известных способах щелочного или кислотного выщелачивания, спекания-выщелачивания [23, 24]. Фактически эти способы переработки ведут или к обогащению золы до 39 – 46 % Al_2O_3 [24] с последующей передачей концентрата на глинозёмные заводы, работающие по методу спекания, или предполагают строительство подобного завода. Следует отметить, что в последнем случае на 1 т переработанной золы образуется 0,35 т глинозема и примерно 2 т отходов – белитовых шламов, утилизация которых является очередной проблемой.

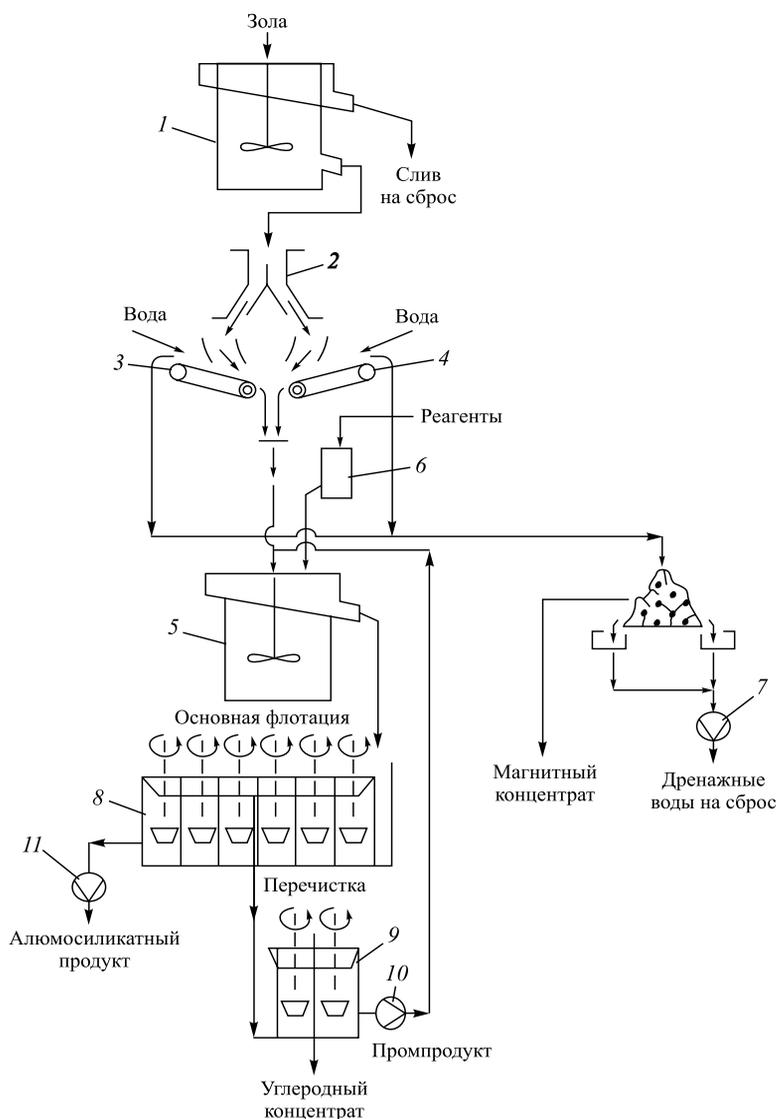


Рис. 2. Технологическая схема получения магнитного (Fe-содержащего), углеродного и алюмосиликатного продукта из золы уноса [16]: 1, 5 – контактный чан; 2 – пульпоотделитель; 3, 4 – электродинамические сепараторы; 6 – реагентный питатель; 7 – дренажный узел магнитного концентрата; 8, 9 – флотационные машины; 10, 11 – насосы

Fig. 2. Technological scheme for obtaining magnetic (Fe-containing), carbon and aluminosilicate product from fly ash [16]: 1, 5 – contact vat; 2 – pulp separator; 3, 4 – electrodynamic separators; 6 – reagent feeder; 7 – drainage unit of magnetic concentrate; 8, 9 – flotation machines; 10, 11 – pumps

В углях России, особенно угольных бассейнов Сибири и Дальнего Востока, известны промышленные и полупромышленные концентрации германия, золота, платины, урана, редкоземельных элементов, которые в процессе сжигания переходят в золошлаковые отходы [25]. Наличие этих элементов в достаточном количестве предопределяет создание технологий с извлечением ценных компонентов помимо вышеописанных. В качестве примера на рис. 3 представлена схема комплексной переработки золошлаковых отходов ТЭЦ Дальневосточного федерального округа [26].

Как следует из вышеизложенного, комплексная переработка твердых золошлаковых отходов, образующихся при сжигании угля в факеле или кипящем слое, с извлечением полезных компонентов требует применения

флотационных технологий обогащения. В большинстве случаев флотореагенты, применяемые в данных технологиях, представляют собой вещества, относящиеся ко 2-му или 3-му классу опасности (табл. 2) [27].

Выводы. При использовании технологий комплексной переработки золошлаковых отходов появляются новые экологические риски, многие из которых соответствуют экологическим рискам хранения ЗШО в отвалах. Для переработки уже накопленных золошлаковых отходов с экологической точки зрения наиболее приемлемыми направлениями утилизации ЗШО являются технологии стройиндустрии. Но так как они являются экономически низко маржинальными и организационно сложными, необходима высокая степень государственного присутствия в этой области [28, 29].

Методы получения железосодержащего концентрата из золошлаковых отходов ТЭЦ [23]**Table 1. Methods of obtaining Fe-containing concentrate from ash and slag wastes of TPP [23]**

Метод обогащения	Содержание Fe ₂ O ₃ , % (по массе)		Коэффициент обогащения	Выход*, % (по массе)
	Зола – унос ТЭС	Железный концентрат		
Одностадийная мокрая электромагнитная сепарация	3,9	29,5	7,6	–
Одностадийная мокрая интенсивная электромагнитная сепарация	6,3	49,8	7,9	–
Двухстадийная магнитная сепарация: – на первой стадии мокрая сепарация с использованием электромагнита; – на второй стадии сухая сепарация с использованием постоянного магнита	7 – 10	16 – 21	1,6 – 2,3	–
	–	До 50	5 – 7	–
Двухстадийная сухая магнитная сепарация	–	50	–	10
Двухстадийная мокрая магнитная сепарация с измельчением золы после первой стадии	Более 15	До 50 (после стадии I)	3,3	23
	–	Более 60 (после стадии II)	4,0	
Многостадийная сухая высокоградиентная сепарация с использованием постоянного магнита	–	Более 64	–	10 – 15
Кислотное выщелачивание	12,5	82,8	6,6	–
Кислотное выщелачивание с добавлением хлорида натрия	4	79,8	20	–

* В расчете на количество переработанной золы.

Класс опасности некоторых реагентов, применяемых при обогащении [27]**Table 2. Hazard class of some reagents used in enrichment [27]**

Вещество	Класс опасности	Вещество	Класс опасности	Вещество	Класс опасности
<i>Обогащение угля</i>		<i>Обогащение горно-химического сырья</i>		<i>Обогащение руд цветных металлов</i>	
Четыреххлористый углерод	2	Дифосфоновые кислоты (тетранатриевая соль)	3	Тиокарбаматы	канцерогены
Дихлорэтан	2	Серная кислота	2	Изопропилметилтиокарбамат	3
Бензол	2	Ортофосфорная кислота	2	Изопропилэтилтиокарбамат	3
Фенол	2	Алкиларилсульфонаты	3 – 4	Ферроцианид калия	3
Соляровое масло	3	Алкиламины	2	Пиразолы	3
Эфиры фталевой кислоты	2	Метилизобутилкарбинол	3	Тиосульфат натрия	3
Гексаметафосфат натрия	4	<i>Обогащение золота</i>		Этилксантогент калия	3
Фениларсоновая кислота	2	Диметилфталат	4	Бутилксантогент калия	3
<i>Обогащение алмазов</i>		Тиомочевина	2	Алкилдитиофосфат цинка	3
Сульфат свинца	1	Меркаптаны	2	Монобутиловых эфиры Полипропиленгликолей	3
Тетрабромэтан	2	Дитиофосфаты	2	Сульфид натрия	2
Крезоловая кислота	2	Полиакриламид	4	Цинковый купорос	2
Нефтяное масло	3 – 4	Медный купорос	2	Хлорное железо	2
–	–	Цианид натрия	1	–	–

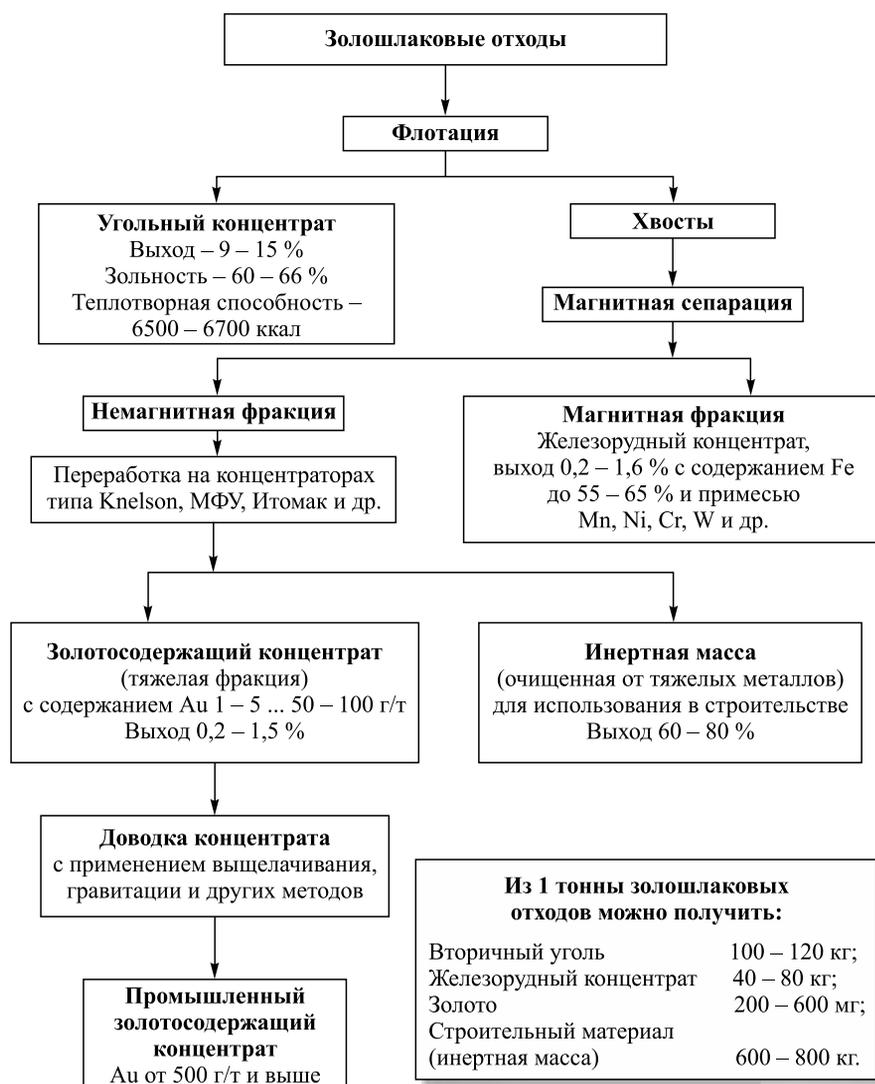


Рис. 3. Схема комплексной переработки ЗШО Дальневосточных ТЭЦ

Fig. 3. Scheme of complex utilization of ash and slag wastes of Far Eastern TPPs

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проект Энергетической стратегии России на период до 2035 года (редакция от 01.02.2017) [Электронный ресурс] URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920> (дата обращения 15.03. 2018)
2. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / Под ред. А.А. Макарова. – М.: ИНЭН РАН-АЦ при правительстве РФ, 2016. – 200 с.
3. Рейтинг регионов по уровню энергодостаточности. РИАРЕЙТИНГ. [Электронный ресурс] URL: <http://vid1.rian.ru/ig/ratings/energodeficit012017.pdf> (дата обращения 15.03. 2018)
4. Инвестиционная программа ОАО «РусГидро» на 2015 – 2019 годы Приложение 3 к Бизнес-плану ОАО «РусГидро» на 2015 – 2019 годы. [Электронный ресурс] URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/4cb/IP-2015-2019-dlya-razmesheniya-na-sajte.pdf> (дата обращения 23.03. 2018)
5. Делицын Л.М. Презентация доклада, представленного на Ученом Совете ОИВТ РАН 16 ноября 2015 года. [Электронный ресурс] URL: http://jiht.ru/science/science_council/lecture_detail.php?ID=58463 (дата обращения 23.03. 2018).
6. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 225 с.
7. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. – М.: ФГУП «СОЮЗДОРНИИ», 2003. – 58 с.
8. Дворкин Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности. Учебно-справочное пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2007. – 368 с.
9. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей (Библиотека горного инженера. Т. 5 «Переработка и обогащение минерального сырья» Кн. 3). – М.: Изд-во «Горное дело», 2013. – 432 с.
10. Беспалов В.И., Беспалова С.У., Вагнер М.А. Природоохранные технологии на ТЭС: Учебное пособие. 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 240 с.
11. Путилов В.Я., Путилова И.В. Кондиционирование золошлаков энергетики в России. Раздел 3. Обращение с золошлаками. 3.4. Кондиционирование и управление качеством золошлаков. [Электронный ресурс] URL: <http://osi.ecopower.ru/ru/2010-11-28-18-46-37.html> (дата обращения 28.03. 2018).
12. Галибина Е.А. Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строитель-

- ных материалов. В кн.: Строительная теплофизика. Долговечность конструкций // Исследования по строительству. НИИ строительства Госстроя ЭССР. – Таллин: Валгус, 1981. – 132 с.
13. Калачёв А.И. Комплексная система утилизации ЗШМ. [Электронный ресурс] URL: <http://ksfenix.org/files/fenix-web-ru.pdf>. (дата обращения 25.03. 2018).
 14. Саломатов В.В. Экологически чистая ТЭС с вихревой технологией сжигания канско-ачинских углей // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 14 – 29.
 15. Вишня Б.Л. Технологии грануляции золы. Перспективы применения на угольных ТЭС. Презентация. Международная научно-практическая конференция УгольЭко 2016. 27 – 28 сентября 2016, Москва, НИУ «МЭИ». [Электронный ресурс] URL: <http://coaleco.ru/news/coaleco-2016-presentations/> (дата обращения 23.03. 2018).
 16. Ладыгичев М.Г., Чижикова В.М. Сырье для черной металлургии. Справочное издание: В 2-х томах. Т. 2. Экология металлургического производства. – М.: Теплотехник, 2005. – 448 с.
 17. Гусев К.П., Ларичкин В.В., Ларичкина Н.И. Перспективы использования золошлаковых отходов теплоэнергетики Сибири в производстве тротуарного камня // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1(8). С. 2058 – 2061.
 18. Черепанов А.А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 2. С. 98 – 115.
 19. Yao Z.T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China // Fuel. 2014. March (120). P. 74 – 85.
 20. Шамрай Е.И., Таскин А.В., Иванников С.И., Юдаков А.А. Исследование возможностей комплексной переработки отходов предприятий энергетики Приморского края // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 3. С. 68 – 75.
 21. Арсентьев В.А. Новая технология сухого обогащения золы уноса угольных электростанций на основе методов прикладной минералогии // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 521 – 525.
 22. Делицын Л.М., Рябов Ю.В., Власов А.С. Возможные технологии утилизации золы // Энергосбережение. 2014. № 2. С. 60.
 23. Ежова Н.Н., Власов А.С., Сударева С.В., Делицын Л.М. Золошлаковые отходы тепловых электростанций – ценный сырьевой ресурс для черной и цветной металлургии // Экология промышленного производства. 2010. № 2. С. 45 – 52.
 24. Делицын Л.М., Рябов Ю.В., Власов А.С. Новая обогатительная технология переработки золы угольных электростанций с получением глиноземной и другой товарной продукции // Экология промышленного производства. 2012. № 1. С. 74 – 79.
 25. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
 26. Алексейко Л.Н., Таскин А.В., Черепанов А.А., Юдаков А.А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ г. Хабаровск и Биробиджан // Современная наука. 2016. № 1(17). С. 21 – 34.
 27. Соловьянов А.А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. Источники и виды загрязнения // Экологический вестник России. 2015. № 3. С. 46 – 52.
 28. Шевцов В.Р. Стратегия повторного возобновления ресурсов из золошлаковых отходов теплоэлектростанций. 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://www.sibacc.ru/upload/iblock/fc8/11.pdf> (дата обращения 04.04. 2018).
 29. Цыльковский Ю.К. Экологические и экономические аспекты утилизации золошлаков ТЭС // Энергия: экономика, техника, экология. 2006. № 4. С. 27 – 34.

Поступила 18 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, PP. 439–446.

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE OF TPP (THERMAL POWER PLANT). PART 1

*G.S. Podgorodetskii, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov,
T.V. Erokhov, O.N. Kozlova*

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The further development of the Russian coal industry, especially in the regions of Siberia and the Far East, in line with the Energy Strategy, predetermines the need to address the problem of utilization of ash and slag wastes in newly implemented projects. The total amount of ash and slag in the ash dumps in Russia is more than 1.5 billion tons, and the area occupied by fly ash and slag wastes (FASW) is more than 220 km². At the same time, the degree of FASW use does not exceed 10 %. It is shown that the main solutions for the recycling of the industrial solid waste generated by thermal power plants are their use in the production of building materials, road construction, or the complex processing of FASW with the extraction of metals and the production of building materials either. Some fly ash can be used in agriculture. The physicochemical properties of fly ash and slag wastes and, accordingly, the directions of their use, as well as the choice of technology, are determined by the mineral part of the fossil coals and the way they are burned. To use fly ash in the construction industry, it is necessary to transfer the ash removal system to the dry method, accompanied, on the one hand, by a large volume of capital investments in equipment and facilities for storage, classification, crushing and grinding, the transfer of new physical and chemical properties to fly ash and slag waste, and on the other side, an increase in organizational and transport barriers. Examples of proposed technologies for utilization of ash and slag wastes in the form

of metal recovery and production of building materials are given. To obtain iron-containing concentrates, one-stage magnetic separation is used, but the quality of the concentrate does not meet modern requirements. The most technologically effective for the extraction of metals from ash and slag wastes are technologies based on flotation methods. At the same time, it follows from the provided data that their application can be limited to economic, organizational factors and the emergence of new environmental risks. The conclusion is made on the possibility of using the above technologies for existing coal-fired power plants only with state support.

Keywords: coal, utilization of ash and slag wastes, building materials, extraction of metals.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446

REFERENCES

1. *Proekt Energeticheskoi strategii Rossii na period do 2035 goda (redaktsiya ot 01.02.2017)* [Project of energetic strategy of Russia for the period up to 2035 (edition from 01.02.2017)]. Available at URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>. (Accessed 15.03.2018). (In Russ.).
2. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2016* [Forecast for development of energy sector in the world and in Russia, 2016]. Makarov A.A. ed. Moscow: INEN RAN-ATs pri pravitel'stve RF, 2016, 200 p. (In Russ.).
3. *Reiting regionov po urovnyu energodostatochnosti. RIAREITING* [Rating of regions by level of energy sufficiency. RIAREITING]. Available at URL: <http://vid1.rian.ru/ig/ratings/energodeficit012017.pdf>. (Accessed 15.03.2018). (In Russ.).

4. *Investitsionnaya programma OAO «RusGidro» na 2015 – 2019 gody. Prilozhenie 3 k Biznes-planu OAO «RusGidro» na 2015 – 2019 gody* [Investment program of JSC “RusGidro” for 2015 – 2019. Annex 3 to the Business plan of JSC “RusGidro” for 2015 – 2019]. Available at URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/4cb/IP-2015-2019-dlya-razmesheniya-na-sajte.pdf>. (Accessed 23.03.2018). (In Russ.).
5. Delitsyn L.M. *Prezentatsiya doklada, predstavlenogo na Uchenom Sovete OIVTRAN 16 noyabrya 2015 goda* [Presentation of the report presented at the Scientific Council of the OIVT RAS, November 16, 2015]. Available at URL: http://jiht.ru/science/science_council/lecture_detail.php?ID=58463 (Accessed 23.03.2018). (In Russ.).
6. Volzhenskii A.V., Ivanov I.A., Vinogradov B.N. *Primeneniye zol i toplivnykh shlakov v proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Application of fly ash and fuel slag in production of building materials]. Moscow: Stroizdat, 1984, 225 p. (In Russ.).
7. Putilin E.I., Tsvetkov V.S. *Primeneniye zol unosa i zoloshlakovykh smesei pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog. Obzornaya informatsiya otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya otkhodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES* [Application of fly ash and ash-slag mixtures in construction of automobile roads. Overview of domestic and foreign experience in application of waste from solid fuel burning at TPP]. Moscow: FGUP “SOYUZDORNIP”, 2003, 58 p. (In Russ.).
8. Dvorkin L. I. *Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti. Uchebno-spravochnoe posobie* [Building materials from industrial wastes. Manual]. Rostov-on-Don: Izd-vo “Feniks”, 2007, 368 p. (In Russ.).
9. Shpirt M.Ya., Artem'ev V.B., Silyutin S.A. *Ispol'zovanie tverdykh otkhodov dobychi i pererabotki uglei: Biblioteka gornogo inzhenera. T. 5 “Pererabotka i obogashchenie mineral'nogo syr'ya” Kn. 3* [Usage of solid wastes of coal mining and processing: Library of mining engineer, Vol. 5 “Processing and enrichment of mineral raw materials”. Book 3]. Moscow: “Gornoe delo”, 2013, 432 p. (In Russ.).
10. Bespalov V.I., Bespalova S.U., Vagner M.A. *Prirodookhrannyye tekhnologii na TES: uchebnoe posobie* [Environmental technologies at TPP: Manual. 2nd ed.]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010, 240 p. (In Russ.).
11. Putilov V.Ya., Putilova I.V. *Konditsionirovaniye zoloshlakov energetiki v Rossii. Razdel 3. Obrashcheniye s zoloshlakami. 3.4. Konditsionirovaniye i upravleniye kachestvom zoloshlakov* [Conditioning of ash and slag of energetics in Russia. Section 3. Treatment of ash and slag. 3.4. Conditioning and quality management of ash and slag]. Available at URL: <http://osi.ecopower.ru/ru/2010-11-28-18-46-37.html>. (Accessed 28.03.2018). (In Russ.).
12. Galibina E.A. Classification of pulverized ash depending on material composition, providing its rational use for building materials production. In: *Stroitel'naya teplofizika. Dolgovechnost' konstruktivnykh issledovaniya po stroitel'stvu. NII str-va Gosstroya ESSR* [Building thermophysics. Durability of structures. Research in construction NII str-va Gosstroya ESSR]. Tallin: Valgus, 1981, 132 p.
13. Kalachev A.I. *Kompleksnaya sistema utilizatsii ZShM* [Complex system of ash and slag utilization]. Available at URL: <http://ksfenix.org/files/fenix-web-ru.pdf>. (Accessed 25.03.2018). (In Russ.).
14. Salomatov V.V. Clean TPP with vortex technology for burning of the Kansk-Achinsk coals. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2014, no. 3, pp. 14–29. (In Russ.).
15. Vishnya B.L. *Tekhnologii granulatsii zoly. Perspektivy primeneniya na ugol'nykh TES. Prezentatsiya. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Ugol'Eko 2016. 27–28 sentyabrya 2016, Moskva, NIU “MEI”* [Technologies of ash granulation. Prospects of application at coal TPP. Presentation. Int. Sci. and Pract. Conf. Ugol'Eco 2016. 27–28 September, 2016, Moscow, NIU “MEI”]. Available at URL: <http://coaleco.ru/news/coaleco-2016-presentations>. (Accessed 23.03.2018). (In Russ.).
16. Ladygichev M.G., Chizhikova V.M. *Syr'e dlya cherno metallurgii. Spravochnoe izdanie: V 2-kh tomakh. T. 2. Ekologiya metal-lurgicheskogo proizvodstva* [Raw materials for ferrous metallurgy. Reference book: In 2 vols. Vol. 2. Ecology of metallurgical production]. Moscow: Teplotekhnika, 2005, 448 p. (In Russ.).
17. Gusev K.P., Larichkin V.V., Larichkina N.I. Prospects of ash and slag wastes application of the Siberian thermal power industry in production of pavement stone. *Izvestiya Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2011, vol. 13, no. 1(8), pp. 2058–2061. (In Russ.).
18. Cherepanov A.A. Complex processing of ash and slag wastes of TPP (results of laboratory and semi-industrial tests). *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2009, no. 2, pp. 98–115. (In Russ.).
19. Yao Z.T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China. *Fuel*. 2014, march (120), pp. 74–85.
20. Shamrai E.I., Taskin A.V., Ivannikov S.I., Yudakov A.A. Investigation of complex processing possibilities of wastes of energy companies of the Primorsky Krai. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*. 2017, no. 3, pp. 68–75. (In Russ.).
21. Arsent'ev V.A. New technology of dry enrichment of fly ash from coal-fired power plants on the basis of applied mineralogy methods. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016, vol. 220, pp. 521–525. (In Russ.).
22. Delitsyn L.M., Ryabov Yu.V., Vlasov A.S. Potential technologies of ash utilization. *Energoberechenie*. 2014, no. 2, pp. 60. (In Russ.).
23. Ezhova N.N., Vlasov A.S., Sudareva S.V., Delitsyn L.M. Ash and slag waste from thermal power plants as a raw material commodity for ferrous and non-ferrous metallurgy. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2010, no. 2, pp. 45–52. (In Russ.).
24. Delitsyn L.M., Ryabov Yu.V., Vlasov A.S. New enrichment technology for processing of coal-fired power plants ash in production of alumina and other commercial products. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2012, no. 1, pp. 74–79. (In Russ.).
25. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennyye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable impurity elements in coals]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006, 538 p. (In Russ.).
26. Alekseiko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A., Yudakov A.A. Complex processing of ash and slag wastes of TPP. Khabarovsk and Birobidzhan. *Sovremennaya nauka*. 2016, no. 1 (17), pp. 21–34. (In Russ.).
27. Solov'yanov A.A. Past (accumulated) environmental damage: problems and solutions. Sources and types of pollution. *Ekologicheskii vestnik Rossii*. 2015, no. 3, pp. 46–52. (In Russ.).
28. Shevtsov V.R. *Strategiya povtornogo vozobnovleniya resursov iz zoloshlakovykh otkhodov teploelektrostantsii* [Strategy of resumption of resources from TPP ash and slag wastes. 2010]. Available at URL: <http://www.sibacc.ru/upload/iblock/fc8/11.pdf>. (Accessed 04.04.2018). (In Russ.).
29. Tselykovskii Yu.K. Ecological and economic aspects of utilization of TPP ash and slag. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2006, no. 4, pp. 27–34. (In Russ.).

Information about the authors:

G.S. Podgorodetskii, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center “Innovative Metallurgical Technologies” (podgs@isis.ru)

V.B. Gorbunov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Scientific and Educational Center “Innovative Metallurgical Technologies” (vbg1953@mail.ru)

E.A. Agapov, Engineer of the Scientific and Educational Center “Innovative Metallurgical Technologies” (ageger@yandex.ru)

T.V. Erokhov, Engineer of the Scientific and Educational Center “Innovative Metallurgical Technologies” (timofeyerokhov@gmail.com)

O.N. Kozlova, Engineer of the Scientific and Educational Center “Innovative Metallurgical Technologies” (o_kozlova1@mail.ru)

Received May 18, 2018

УДК 621.7

СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ТРЕХСЛОЙНОГО МАТЕРИАЛА СТАЛЬ – ВАНАДИЕВЫЙ СПЛАВ – СТАЛЬ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ*

*Нечайкина Т.А., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики
прочности (nechaykinata@gmail.com)*

*Никулин С.А., д.т.н., заведующий кафедрой металловедения и физики
прочности (nikulin@misis.ru)*

Рогачев С.О., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности (csaap@mail.ru)

*Турилина В.Ю., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики
прочности (veronikat77@gmail.com)*

Баранова А.П., учебный мастер (sashulka.baranova2009@yandex.ru)

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)**

Аннотация. Создание нового конструкционного материала для оболочек ТВЭЛ атомных реакторов на быстрых нейтронах является актуальной задачей современной атомной энергетики. В последние годы был разработан трехслойный радиационноустойчивый и коррозионноустойчивый материал на основе ванадиевого сплава и коррозионной стали, потенциально удовлетворяющий требованиям работы оболочек ТВЭЛов быстрых реакторов в сверхжестких условиях эксплуатации (высоких температур, радиационного облучения и агрессивных сред). Важнейшим аспектом, определяющим работоспособность этого материала при эксплуатации, является качество соединения слоев различных материалов между собой, определяемое режимами деформационно-термической обработки. В настоящей работе изучено влияние отжига на химический состав, структуру и сопротивление разрушению зоны соединения ванадиевого сплава со сталью в трехслойной трубе сталь – ванадиевый сплав – сталь, полученной совместным горячим прессованием трехслойной трубной заготовки при 1100 °С. В качестве компонентов трубы использовали сталь 20Х13 для наружных слоев и ванадиевый сплав V–4Ti–4Cr для сердцевины. Структуру и химический состав в зоне соединения слоев исследовали методами оптической микроскопии и электронной микроскопии с микро-рентгеноспектральным анализом. Прочность зоны соединения сталь – ванадиевый сплав оценивали при испытании на сжатие кольцевого трехслойного образца с надрезом с измерением акустической эмиссии (АЭ). Показано, что при совместном прессовании между ванадиевым сплавом и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия переменного химического состава толщиной 10 – 15 мкм, которая представляет собой непрерывный ряд твердых растворов, без выделения хрупких фаз, что обеспечивает прочное соединение в трехслойном материале. На границе соединения сталь – ванадиевый сплав пор, расслоений и дефектов не обнаружено. Однако при испытании на сжатие полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования в стальном слое в вершине надреза образуется трещина. Отжиг при температуре 800 °С благоприятно влияет на формирование «переходной» зоны за счет увеличения толщины зоны диффузионного взаимодействия, вследствие чего при механических испытаниях трехслойный материал ведет себя как монолит без образования трещин и расслоений на границе между стальным и ванадиевым слоями.

Ключевые слова: трехслойные трубы, коррозионноустойчивые стали, ванадиевые сплавы, микроструктура, деформация, разрушение, трещина, акустическая эмиссия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-447-453

Создание новых конструкционных материалов, предназначенных для работы в условиях агрессивных сред, повышенных температур, радиационного облучения, механического воздействия, является актуальной задачей современного материаловедения [1 – 6]. Такие материалы применяются и для изготовления оболочек ТВЭЛов атомных реакторов нового поколения на быстрых нейтронах (БН), работающих в замкнутом ядерном

топливном цикле (ЗЯТЦ) [7, 8]. Существующие конструкционные материалы (стали аустенитного и феррито-мартенситного классов) не способны обеспечить полноценную работу оболочек ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах в режиме ЗЯТЦ (длительный срок эксплуатации, высокие повреждающие дозы) [9, 10].

Перспективными конструкционными материалами являются ванадиевые сплавы типа V – (5 ÷ 10) % Ti – (4 ÷ 6) % Cr. Такие сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению со сталями аустенитного и феррито-мартенситного классов: прежде всего высокой кратковременной и длительной прочностью при температурах до 700 °С и высокой радиационной

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор № RFMEFI57815X0139).

стойкостью [11, 12]. Сдерживающим фактором использования жаропрочных и радиационноустойчивых сплавов системы V–Ti–Cr в качестве конструкционного материала в атомной энергетике является их охрупчивание при взаимодействии с кислородом и азотом при температурах выше 400 °C [13–17]. Из-за высокой химической активности ванадиевых сплавов и их способности интенсивно растворять кислород и азот их поверхности надо защищать коррозионноустойчивыми материалами, например, путем создания многослойных композиций.

В последние годы был разработан трехслойный радиационноустойчивый и коррозионноустойчивый материал на основе ванадиевого сплава и коррозионной стали, потенциально удовлетворяющий требованиям работы в сверхжестких условиях [18, 19]. Прочность трехслойного материала определяется структурой и качеством соединения «переходной» зоны на границе сталь – ванадиевый сплав [19], что, в свою очередь, определяется режимами деформационно-термической обработки.

Целью настоящей работы является исследование структуры, химического состава и процесса разрушения «переходной» зоны образцов трехслойной трубы сталь 20X13 – сплав V–4Ti–4Cr – сталь 20X13 непосредственно после совместного горячего прессования, а также после последующего отжига.

Трехслойная труба была получена из трубных заготовок ванадиевого сплава V–4Ti–4Cr как материала основы (сердцевины) и стали 20X13 как материала покрытия с внутренней и наружной стороны [18].

Изготовление трехслойной трубы включало следующие этапы: сборка составной трехслойной заготовки по схеме «труба в трубе» сталь 20X13 – сплав V–4Ti–4Cr – сталь 20X13; совместное горячее прессование, отжиг.

Прессование трехслойной трубы проводили при температуре 1100 °C на вертикальном гидравлическом прессе типа ПА 8340. Полученная труба была разрезана электроискровой резкой на кольцевые фрагменты, которые подвергли термической обработке (вакуумный отжиг в течение 2 ч при температуре 800 °C с медленным охлаждением в печи). Диаметр трехслойной трубы после прессования составил $65 \pm 0,2$ мм, толщина стенки $16,0 \pm 1,5$ мм, толщина стального покрытия внутри и снаружи $1,6 \pm 0,2$ мм.

Сравнительное исследование химического состава, структуры и прочности соединения переходной зоны проводили на кольцевых образцах непосредственно сразу после прессования и на образцах, подвергнутых отжигу после прессования.

Металлографические поперечные шлифы трехслойных образцов изготавливали на шлифовально-полировальной машине Buehler Vector Phoenix с использованием абразивной бумаги разной дисперсности (с постепенным уменьшением зернистости абразива) и абразивной суспензии для заключительной полировки (размер абразивных частиц 0,05 мкм).

Для исследования структуры на поперечных шлифах использовали травитель следующего состава: 30 % H₂O + 30 % HNO₃ + 30 % HCl + 10 % HF. Исследования структуры проводили на оптическом микроскопе AxioObserver D1m CarlZeiss в режиме отраженного света при увеличениях 200–1000.

Исследования фазового состава и распределения химических элементов в зоне соединения ванадиевого сплава и стального покрытия проводили методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе JSM-6610 LV (JEOL) с энергодисперсионным анализатором Advanced AZtec. Данные получали в виде концентрационных профилей распределения химических элементов. Этот же микроскоп использовали также для детального исследования микроструктуры границы соединения между ванадиевым сплавом и сталью в образцах трехслойного материала (в режиме отраженных электронов при увеличениях 1000–5000).

Одним из основных требований к трехслойному материалу является прочное соединение слоев, которое обеспечивает монолитность материала [19]. Для оценки прочности сцепления между ванадиевым сплавом и сталью проводили испытания на сжатие полукольцевых образцов прессованной трехслойной трубы (с боковым надрезом глубиной 1 мм со стороны внешнего стального слоя) в неотожженном и отожженном состояниях (рис. 1).

Испытания на сжатие проводили при комнатной температуре на машине Instron 150LX при скорости деформирования 1 мм/мин с максимальным смещением захватов испытательной машины 4 мм с записью диаграмм нагрузка – смещение и акустической эмиссии (АЭ). Регистрацию сигналов АЭ осуществляли пьезодатчиком GT300, который крепили через слой глицерина непосредственно на образец. Сигналы от датчика поступали в модульную измерительную платформу NI PXIe-1082 DC. Оцифрованные сигналы записывали высокоскоростным модулем HDD-8261. Средний уровень технологических шумов аппаратуры составил примерно 10 мВ, динамический диапазон 7 В. Обработку сигналов АЭ проводили в среде LabVIEW 2016 [20]. Диаграммы нагрузка – смещение и АЭ-диаграммы совмещали по меткам времени.

Микроструктура. Установлено, что слой стального покрытия равномерно распределен по всей внутренней и внешней поверхности трехслойной трубы; на границе соединения сталь – ванадиевый сплав не обнаружено пор, расслоений и каких-либо включений второй фазы.

Микроструктура стального слоя по сечению трехслойных образцов во всех состояниях представлена на панорамных изображениях (рис. 2). Структура стального слоя трехслойной трубы после горячего прессования при 1100 °C неоднородная по сечению (рис. 2, а). Вблизи границы с ванадиевым сплавом зарождается мелкое зерно феррита размером до 10 мкм. Со стороны сталь-

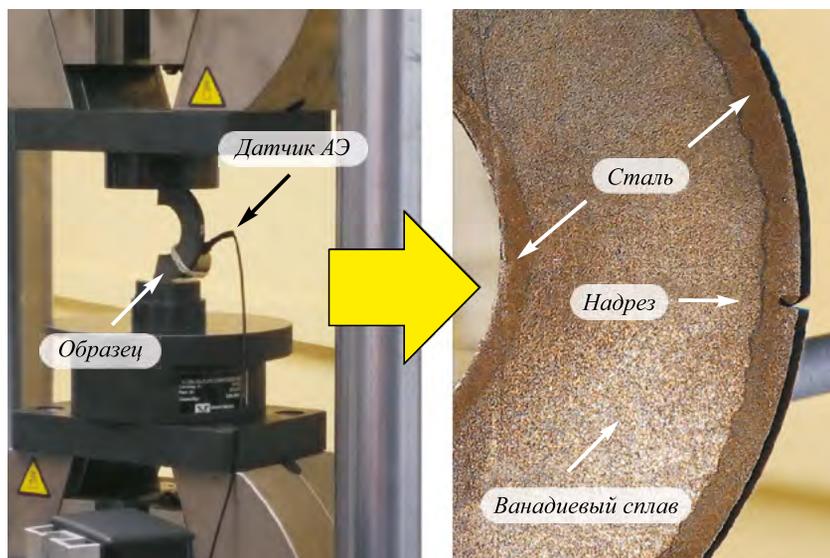


Рис. 1. Испытание на сжатие полукольцевого трехслойного образца с надрезом с регистрацией АЭ

Fig. 1. Compression test of a notched semi-ring three-layer sample with AE registration

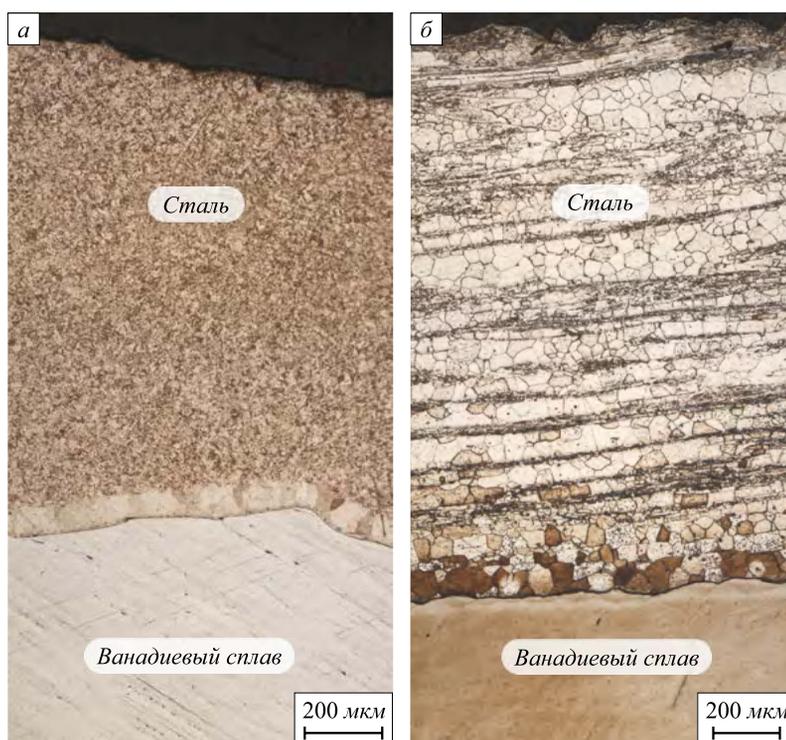


Рис. 2. Изменение структуры стального слоя по сечению трехслойной трубы сталь – ванадиевый сплав – сталь (оптическая микроскопия) после горячего прессования (а) и после горячего прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 2. Change of the steel layer structure along the cross-section of steel/vanadium alloy/steel three-layer tube (optical microscopy) after co-extrusion (a); after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours (b)

ного слоя вблизи границы соединения был обнаружен слой с радиально ориентированными крупными зернами феррита размером до 65 мкм. В направлении внешней поверхности размер зерна феррита в стальном слое увеличивается до 60 мкм: формируется сорбит. После отжига при 800 °С в результате рекристаллизации на границах старых, деформированных зерен происходит

зарождение новых мелких зерен феррита. Также видны полосы деформации. В структуре центрального ванадиевого слоя трехслойной трубы после горячего прессования присутствуют вытянутые зерна с небольшим количеством рекристаллизованных зерен (менее 20 %). Отжиг при температуре 800 °С не приводит к изменению структуры ванадиевого сплава, поскольку темпе-

ратура рекристаллизации ванадиевого сплава несколько выше.

Анализ микроструктуры вблизи границы соединения между сталью 20Х13 и ванадиевым сплавом V–4Ti–4Cr показал, что после совместного прессования при 1100 °С и последующего отжига при температуре 800 °С наблюдается формирование «переходной» зоны, отличающейся по травимости от стали и ванадиевого сплава. Ширина этой зоны увеличивается с ростом температуры отжига.

Распределение химических элементов. Методом СЭМ с микрорентгеноспектральным анализом исследовано изменение химического состава вблизи границы соединения (75 мкм от границы сталь – ванадиевый сплав) путем построения концентрационных профилей химических элементов (рис. 3).

Видно, что после совместной деформации трехслойного материала сталь – ванадиевый сплав – сталь при 1100 °С глубина диффузии ванадия в сталь составляет около 7–10 мкм, между сплавом ванадия и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия шириной не менее 10–15 мкм, представляющая собой непрерывный ряд твердых растворов с переменным химическим составом. Отжиг при температуре 800 °С в течение 2 ч приводит к увеличению ширины «переходной» зоны до 22 мкм. При диффузионном перераспределении элементов в про-

цессе совместной деформации и последующего отжига в переходной зоне не образуются карбидные и другие хрупкие фазы.

Механические испытания. Диаграммы деформации при сжатии полукольцевых образцов трехслойных труб, совмещенные с АЭ-диаграммами, показаны на рис. 4. Метод АЭ использовали для анализа процесса разрушения трехслойного образца [21, 22].

При сжатии образцов трехслойной трубы после горячего прессования сигналы АЭ небольшой мощности сопровождают, как обычно, переход от упругой к пластической деформации. При дальнейшем нагружении образцов нет сигналов АЭ большой амплитуды, однако при величине абсолютной деформации 2 мм на диаграмме сжатия наблюдался резкий спад нагрузки, что сопровождалось импульсом АЭ большой амплитуды (свыше 6 В). Визуальный анализ полукольцевых образцов показал, что спад нагрузки на диаграмме и сопровождающий его импульс АЭ связан с образованием трещины в стальном слое в вершине надреза (рис. 4, а). Дальнейшая деформация образца сопровождалась многочисленными импульсами АЭ большой амплитуды, сопровождающими начало и развитие расслоения на границе между стальным и ванадиевым слоями.

Отжиг трехслойного образца при температуре 800 °С изменяет характер АЭ при сжатии. Сигналы АЭ, сопровождающие переход от упругой к пластической

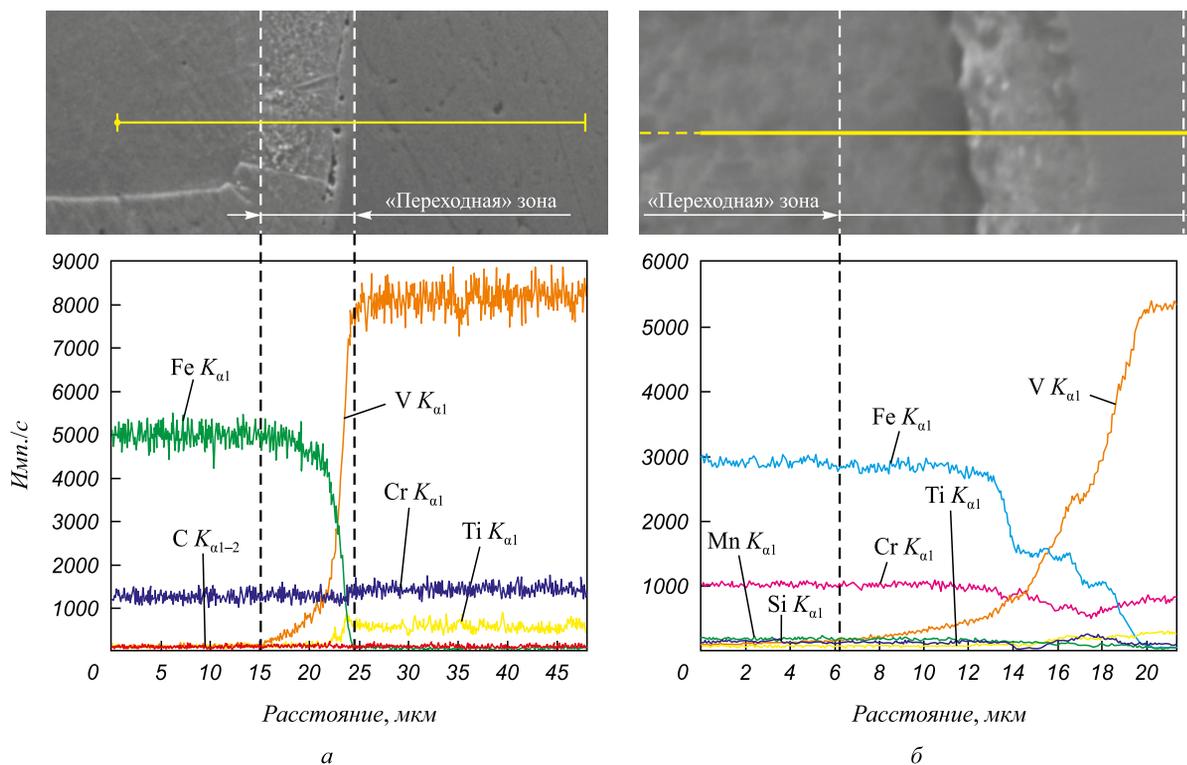


Рис. 3. Профили распределения химических элементов вблизи границы соединения в трехслойном материале после горячего прессования (а) и после горячего прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 3. Distribution profiles of chemical elements near the “steel/vanadium alloy” interface in the three-layer material after co-extrusion (a); after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours (b)

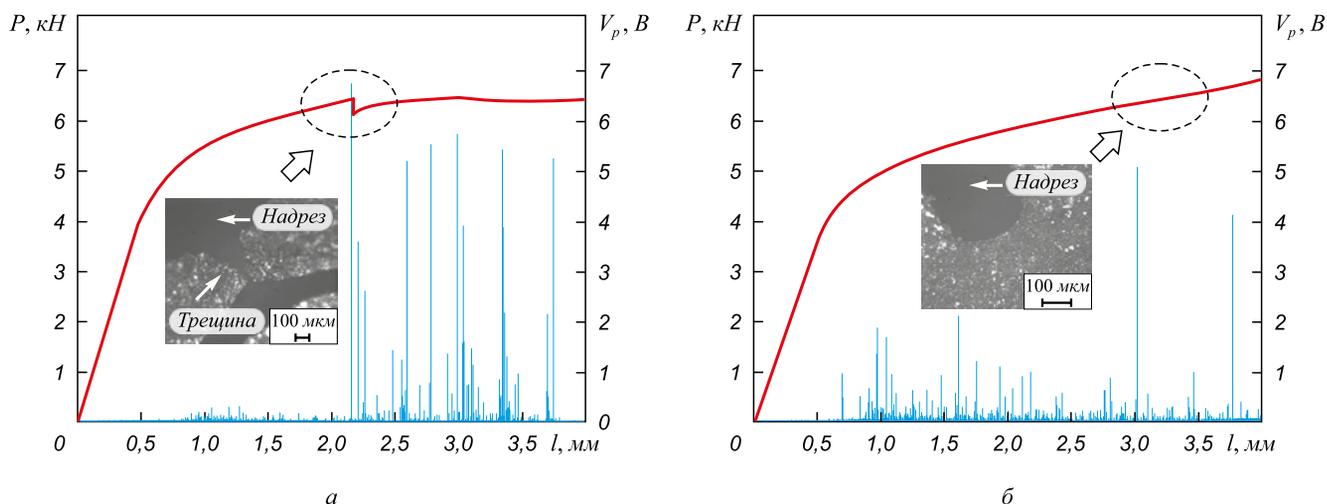


Рис. 4. Диаграммы нагрузка–смещение ($P-l$) и АЭ-диаграммы (V_p-l) при сжатии полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования (а) и после горячего совместного прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 4. Load-displacement curves ($P-l$) and AE-diagrams (V_p-l) during compression of notched semi-ring three-layer samples in different conditions:

a – after co-extrusion; b – after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours

деформации, монотонно уменьшаются при дальнейшей деформации. Единичные сигналы АЭ (1–2) большой амплитуды (4–5 В) наблюдали только по достижении абсолютной деформации свыше 3 мм.

Таким образом, отжиг образцов трехслойного материала при 800 °С в течение 2 ч благоприятно влияет на свойства переходной зоны, в результате чего при деформации трехслойного образца в зоне соединения слоев расслоений не происходит и трехслойный материал при деформации ведет себя как монолитный.

Выводы. При совместном прессовании при температуре 1100 °С в трехслойном материале сталь – ванадиевый сплав – сталь между сплавом ванадия и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия шириной не менее 10–15 мкм, представляющая собой непрерывный ряд твердых растворов переменного химического состава. Отжиг при 800 °С приводит к увеличению ширины этой зоны до 22 мкм. При диффузионном перераспределении элементов в процессе совместной деформации и последующего отжига в переходной зоне не происходит образования карбидных и других хрупких фаз. При испытаниях на сжатие полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования установлено, что спад нагрузки на диаграмме деформации и сопровождающий его импульс АЭ связан с образованием трещины в стальном слое в вершине надреза. При сжатии образцов трехслойных труб в отожженном после прессования состоянии трещин и расслоений на границе между стальным и ванадиевым слоями не наблюдали. Таким образом, отжиг при температуре 800 °С в течение 2 ч после прессования является обязательной операцией при получении трехслойных труб, поскольку приводит к увеличению ширины переходной зоны

соединения между ванадиевым сплавом и сталью и к увеличению прочности соединения между ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Smith D.L., Chung H.M., Loomis B.A., Witzenburg W. Van. Development of vanadium-base alloys for fusion first-wall – blanket applications // Journal of Fusion Engineering and Design. 1995. Vol. 29. P. 399 – 410.
- Nagasaka T., Muroga T., Fukumoto K., Watanabe H., Grossbeck M.L., Chen J. Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials // Nuclear Fusion. 2006. Vol. 46. P. 618 – 625.
- Bray T.S., Tsai H., Nowicki L.J., Billone M.C., Smith D.L., Johnson W.R., Trester P.W. Tensile and Impact Properties of V–4Cr–4Ti Alloy Heats 832665 and 832864 // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283–287. P. 633 – 636.
- Votinov S.N., Kolotushkin V.P., Nikulin S.A., Turilina V.Y. Making vanadium-based radiation-resistant alloys for fast-neutron reactor pin sheaths // Metal Science and Heat Treatment. 2009. Vol. 51. P. 238 – 244.
- Rowcliffe A.F., Zinkle S.J., Hoelzer D.T. Effect of Strain Rate on the Tensile Properties of Unirradiated and Irradiated V–4Cr–4Ti // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283–287. P. 508 – 512.
- Votinov S.N., Solonin M.I., Kazennov Yu.I., Kondratjev V.P. Prospects and problems using vanadium alloys as a structural material of the first wall and blanket of fusion reactors // Journal of Nuclear Materials. 1996. Vol. 233. P. 370 – 375.
- Fukumoto K., Narui M., Matsui H., Nagasaka T., Muroga T., Li M., Hoelzer D.T., Zinkle S.J. Environmental effects for irradiation creep behavior of highly purified V–4Cr–4Ti alloys (NIFS-Heats) irradiated by neutrons // Journal of Nuclear Materials. 2009. Vol. 386–388. P. 575 – 578.
- Kurtz R.J., Abe K., Chernov V.M., Hoelzer D.T., Matsui H., Muroga T., Odette G.R. Recent Progress on Development of Vanadium Alloys for Fusion // Journal of Nuclear Materials. 2004. Vol. 329–333. P. 47 – 55.
- Muroga T., Nagasaka T., Abe K., Chernov V.M., Matsui H., Smith D.L., Xu Z.-Y., Zinkle S.J. Vanadium Alloys – Overview and Recent Results // Journal of Nuclear Materials. 2002. Vol. 307–311. P. 547 – 554.

10. Fukumoto K., Matsui H., Narui M., Yamazaki M. Irradiation creep behavior of V-4Cr-4Ti alloys irradiated in a liquid sodium environment at the JOYO fast reactor // *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 437. P. 341 – 349.
11. Li X., Zhang C., Zhao J., Johansson B. Mechanical properties and defective effects of bcc V-4Cr-4Ti and V-5Cr-5Ti alloys by first-principles simulations // *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50. P. 2727 – 2731.
12. Loomis B.A., Kestel B.J., Smith D.L. Microstructural evolution and yield stress increase for ion-irradiated V-15Cr-5Ti alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 1988. Vol. 155-157. P. 1305 – 1309.
13. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V-Cr-Ti alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2000. Vol. 283-287. P. 876 – 879.
14. Chen J., Qiu S., Yang L., Xu Z., Deng Y., Xu Y. Effects of oxygen, hydrogen and neutron irradiation on the mechanical properties of several vanadium alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 302. P. 135 – 142.
15. Natesan K., Soppet W.K., Uz M. Effects of Oxygen and Oxidation on Tensile Behavior of V-4Cr-4Ti // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 258-263. P. 1476 – 1481.
16. Matsushima T., Satou M., Hasegawa A., Abe K., Kayano H. Tensile properties of a series of V-4Ti-4Cr alloys containing small amounts of Si, Al and Y, and the influence of helium implantation // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 258-263. P. 1497 – 1501.
17. Heo N.J., Nagasaka T., Muroga T., Matsui H. Effect of Impurity Levels on Precipitation Behavior in the Low-activation V-4Cr-4Ti Alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 307-311. P. 620 – 624.
18. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Zavodchikov S.Yu., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of the three-layer material based on a vanadium alloy and corrosion-resistant steel // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 2014. P. 793 – 799.
19. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Votinov S.N., Zavodchikov S.Yu. Combined Technique for Estimating the Quality of Joining the Layers in Three-Layer Pipes // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 2014. P. 347 – 350.
20. Khanzhin V.G. Designing computer systems for acoustic emission materials testing // *Metal Science and Heat Treatment*. 2009. Vol. 51. P. 245 – 249.
21. Khanzhin V.G., Nikulin S.A., Belov V.A., Turilina V.Yu., Rozhnov A.B. Hydrogen embrittlement of steels: I. Analysis of the process kinetics using acoustic emission measurements // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. P. 308 – 312.
22. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Rogachev S.O., Nechaykina T.A., Anikeenko V.I., Turilina V.Yu. Improvement of mechanical properties of large-scale low-carbon steel cast products using spray quenching // *Materials Letters*. 2016. Vol. 185. P. 499 – 502.

Поступила 15 января 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 6, pp. 447–453.

FRACTURE RESISTANCE OF “TRANSITION” AREA IN THREE-LAYER STEEL/VANADIUM ALLOY/STEEL COMPOSITE AFTER THERMOMECHANICAL TREATMENT

T.A. Nechaikina, S.A. Nikulin, S.O. Rogachev, V.Yu. Turilina, A.P. Baranova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. The creation of new structural materials for cladding tubes of fast neutron reactors is an urgent task of modern nuclear power engineering. A three-layer radiation-resistant and corrosion-resistant material based on vanadium alloy and stainless steel, intended for work under extreme conditions (high temperatures, radiation and aggressive environment) of operation of fast neutron reactor cladding tubes has been developed in recent years. The most important aspect determining the operability of this material during operation is the quality of the joining of different materials layers among themselves, determined by the modes of thermomechanical treatment. The effect of the annealing on the chemical composition, structure, and fracture resistance of the “steel/vanadium alloy” interface in the steel/vanadium alloy/steel three-layer tube, obtained by hot co-extrusion of three-layer tube billet at 1100 °C was studied. The 20Kh13 (AISI 420 type) steel for the outer layers and V-4Ti-4Cr vanadium alloy for the core were used as the components of the tube. The structure and chemical composition in the layer joining zone were studied using the optical microscopy and electron microscopy with X-ray microspectral analysis. The fracture resistance of the “steel/vanadium alloy” interface was evaluated by a compression test of a three-layer ring sample with notch using an acoustic emission (AE) measurement. It is shown that after co-extrusion a “transition” area of diffusion interaction having a variable chemical composition with a width of 10–15 μm is formed between vanadium alloy and steel, which represents the continuous series of solid solutions, without precipitation of brittle phases, providing a strong bonding between vanadium alloy and steel in the three-layer material. No voids, delaminations or defects

were detected at the “steel/vanadium alloy” interface. However, a crack is formed in the steel layer during the compression tests of the notched semi-ring three-layer samples after hot co-extrusion. Annealing favorably influences the formation of the “transition” area due to the increase in the width of the diffusion interaction area. No cracks or delaminations at the boundary between steel and vanadium layers were observed in the three-layer tube samples after annealing, and the three-layer material behaves like a monolith material during testing.

Keywords: three-layer tubes, corrosion-resistant steels, vanadium alloys, microstructure, deformation, fracture, crack, acoustic emission.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-447-453

REFERENCES

1. Smith D.L., Chung H.M., Loomis B.A., Witzenburg W. Van. Development of vanadium-base alloys for fusion first-wall – blanket applications. *Journal of Fusion Engineering and Design*. 1995, vol. 29, pp. 399–410.
2. Nagasaka T., Muroga T., Fukumoto K., Watanabe H., Grossbeck M.L., Chen J. Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials. *Nuclear Fusion*. 2006, vol. 46, pp. 618–625.
3. Bray T.S., Tsai H., Nowicki L.J., Billone M.C., Smith D.L., Johnson W.R., Trester P.W. Tensile and impact properties of V-4Cr-4Ti alloy heats 832665 and 832864. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283-287, pp. 633–636.
4. Votinov S.N., Kolotushkin V.P., Nikulin S.A., Turilina V.Y. Making vanadium-based radiation-resistant alloys for fast-neutron reactor pin sheaths. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, pp. 238–244.
5. Rowcliffe A.F., Zinkle S.J., Hoelzer D.T. Effect of strain rate on the tensile properties of unirradiated and irradiated V-4Cr-4Ti. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283-287, pp. 508–512.

6. Votinov S.N., Solonin M.I., Kazennov Yu.I., Kondratjev V.P. Prospects and problems using vanadium alloys as a structural material of the first wall and blanket of fusion reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 1996, vol. 233, pp. 370–375.
7. Fukumoto K., Narui M., Matsui H., Nagasaka T., Muroga T., Li M., Hoelzer D.T., Zinkle S.J. Environmental effects for irradiation creep behavior of highly purified V–4Cr–4Ti alloys (NIFS-Heats) irradiated by neutrons. *Journal of Nuclear Materials*. 2009, vol. 386–388, pp. 575–578.
8. Kurtz R.J., Abe K., Chernov V.M., Hoelzer D.T., Matsui H., Muroga T., Odette G.R.. Recent progress on development of vanadium alloys for fusion. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 329–333, pp. 47–55.
9. Muroga T., Nagasaka T., Abe K., Chernov V.M., Matsui H., Smith D.L., Xu Z.-Y., Zinkle S.J. Vanadium alloys – overview and recent results. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307–311, pp. 547–554.
10. Fukumoto K., Matsui H., Narui M., Yamazaki M. Irradiation creep behavior of V–4Cr–4Ti alloys irradiated in a liquid sodium environment at the JOYO fast reactor. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 437, pp. 341–349.
11. Li X., Zhang C., Zhao J., Johansson B. Mechanical properties and defective effects of bcc V–4Cr–4Ti and V–5Cr–5Ti alloys by first-principles simulations. *Computational Materials Science*. 2011, vol. 50, pp. 2727–2731.
12. Loomis B.A., Kestel B.J., Smith D.L. Microstructural evolution and yield stress increase for ion-irradiated V–15Cr–5Ti alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 1988, vol. 155–157, pp. 1305–1309.
13. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V–Cr–Ti alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283–287, pp. 876–879.
14. Chen J., Qiu S., Yang L., Xu Z., Deng Y., Xu Y. Effects of oxygen, hydrogen and neutron irradiation on the mechanical properties of several vanadium alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 302, pp. 135–142.
15. Natesan K., Soppet W.K., Uz M. Effects of oxygen and oxidation on tensile behavior of V–4Cr–4Ti. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 258–263, pp. 1476–1481.
16. Matsushima T., Satou M., Hasegawa A., Abe K., Kayano H. Tensile properties of a series of V–4Ti–4Cr alloys containing small amounts of Si, Al and Y, and the influence of helium implantation. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 258–263, pp. 1497–1501.
17. Heo N.J., Nagasaka T., Muroga T., Matsui H. Effect of impurity levels on precipitation behavior in the low-activation V–4Cr–4Ti Alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307–311, pp. 620–624.
18. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Zavodchikov S.Yu., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of the three-layer material based on a vanadium alloy and corrosion-resistant steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, pp. 793–799.
19. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Votinov S.N., Zavodchikov S.Yu. Combined Technique for Estimating the Quality of Joining the Layers in Three-Layer Pipes. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, pp. 347–350.
20. Khanzhin V.G. Designing computer systems for acoustic emission materials testing. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, pp. 245–249.
21. Khanzhin V.G., Nikulin S.A., Belov V.A., Turilina V.Yu., Rozhnov A.B. Hydrogen embrittlement of steels: I. Analysis of the process kinetics using acoustic emission measurements. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, vol. 2013, pp. 308–312.
22. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Rogachev S.O., Nechaykina T.A., Anikeenko V.I., Turilina V.Yu. Improvement of mechanical properties of large-scale low-carbon steel cast products using spray quenching. *Materials Letters*. 2016, vol. 185, pp. 499–502.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education of Russia in the framework of the implementation of the FTP “Research and development in priority areas for the development of Russian scientific and technological complex for 2014–2020” (unique identifier No. RFMEFI57815X0139).

Information about the authors:

T.A. Nechaikina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (nechaykinata@gmail.com)

S.A. Nikulin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (nikulin@misis.ru)

S.O. Rogachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (csaap@mail.ru)

V.Yu. Turilina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (veronikat77@gmail.com)

A.P. Baranova, Training Master
(sashulka.baranova2009@yandex.ru)

Received January 15, 2018

УДК 669.539.382:669.17

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ УГЛЕРОДА В ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой

естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Юрьев А.А.¹, инженер-исследователь УНИ (ant-yurev@yandex.ru)

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

Гришунин В.А.¹, к.т.н., доцент кафедры транспорта и логистики

Коновалов С.В.⁴, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологий

металлов и авиационного материаловедения (ksv@ssau.ru)

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

² Институт сильноточной электроники СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

⁴ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
(443086, Россия, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии на различном расстоянии от поверхности катания по центральной оси проведены исследования изменения структуры, фазового состава и дефектной субструктуры головки дифференцированно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто. Подтверждено, что длительная эксплуатация рельсов сопровождается протеканием одновременно двух процессов преобразования структуры и фазового состава колоний пластинчатого перлита: перерезания пластин цементита и растворения пластин цементита. Первый процесс осуществляется по механизму перерезания карбидных частиц и растаскивания их осколков, сопровождается лишь изменением их линейных размеров и морфологии. Второй процесс разрушения пластин цементита колоний перлита осуществляется путем ухода атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации, вследствие чего возможно фазовое преобразование металла рельсов. Это происходит из-за заметной релаксации средней энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в кристаллической решетке цементита (0,4 эВ). Рассмотрены стадии преобразования пластин цементита: окутывание пластин скользящими дислокациями с последующим разбиением их на слаботориентированные фрагменты; проникновение скользящих дислокаций из решетки феррита в решетку цементита; растворение цементита с образованием наноразмерных частиц. Отмечено наличие наноразмерных частиц цементита в ферритной матрице благодаря их выносу туда в процессе дислокационного скольжения. С использованием выражений современного физического материаловедения и данных рентгеноструктурного анализа проведена оценка содержания атомов углерода на структурных элементах рельсовой стали. Показано, что длительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным перераспределением атомов углерода в поверхностном слое. В исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита, а после длительной эксплуатации рельсов местом расположения углерода, наряду с частицами цементита, являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали атомы углерода обнаружены и в кристаллической решетке на основе α -железа.

Ключевые слова: атомы углерода, перераспределение, дифференцированно закаленные рельсы, разрушение цементита.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-454-459

Увеличение интенсивности железнодорожного движения и грузонапряженности вызывает необходимость дальнейшего повышения эксплуатационной стойкости рельсов. Проблема формирования и эволюции структуры и свойств рельсов при длительной эксплуатации представляет сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Учитывая, что кинетика процессов формирования структурно-фазовых состояний связана с основами теории прочности и пластичности, исключительно важной представляется информация о параметрах тонкой структуры рельсов в разных сечениях. Изучение поведения рельсов при

длительной эксплуатации и анализ причин их изъятия из эксплуатации вызывает в последнее время большой интерес [1 – 5]. Увеличение объема информации в этой области связано как со стремлением к более глубокому пониманию фундаментальных проблем физического материаловедения, так и с практической значимостью, диктуемой непрерывным возрастанием требований к надежности рельсов в современных условиях больших нагрузок на ось и высоких скоростей движения. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы

(рекристаллизационные, релаксационные, фазовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и т.д.), приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний, которая сопровождается изменением (ухудшением) механических свойств. При длительной эксплуатации на поверхности отмечается аномально высокая микротвердость, наблюдается явление деформационно-индуцированного распада цементита, стабильного в обычных условиях [6 – 10].

В процессе пластической деформации разрушение пластин цементита колоний перлита протекает преимущественно по двум механизмам: путем разрезания скользящими дислокациями и в результате ухода атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации [11, 12]. Модель распада цементита может быть представлена следующим образом. Пластическая деформация перлитной стали вызывает образование ячеистой субструктуры с границами ячеек, расположенными у межфазной границы цементит–феррит. При наличии термодинамического стимула (энергия связи атомов углерода с дислокациями выше, чем с атомами железа в цементите) атомы углерода, подвижность которых инициируется пластической деформацией, переносятся из поверхностных слоев цементита к дислокациям, локализованным на границе раздела фаз. Разрушение пластин цементита по рассмотренным в работах [11, 12] механизмам приводит к перераспределению атомов углерода. Не только концентрация, но и расположение атомов углерода в структуре углеродсодержащих сталей оказывает влияние на их свойства [13 – 16].

Целью настоящей работы является анализ перераспределения атомов углерода в рельсах после длительной эксплуатации, основанный на данных электронно-микроскопических исследований структуры в процессе эволюции структурно-фазовых состояний.

Материалом исследования являлись образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ производства АО «ЕВРАЗ-ЗСМК» в исходном состоянии и после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

Концентрацию атомов углерода в кристаллической решетке α -железа определяли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000, Shimadzu).

Исследование дефектной субструктуры, морфологии фаз и состояния карбидной фазы рельсов осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии [17 – 21].

Процесс разрушения пластин цементита, отмечаемый в работах [11, 12], проходит по механизму перерезания карбидных частиц и растаскивания их осколков, сопровождается лишь изменением линейных размеров и морфологии (рис. 1).

Изменение элементного состава цементита в процессе дробления минимально. При протекании второго процесса (механизм растворения «на месте») наблюдается совершенно иная картина. На начальной стадии преобразования цементитные пластины перлитной колонии опутываются скользящими дислокациями, что сопровождается разбиванием пластин цементита на отдельные слабо разориентированные фрагменты. Далее с увеличением степени пластической деформации материала вследствие вытягивания атомов углерода из кристаллической решетки цементита может происходить изменение структуры карбида. Этот процесс возможен вследствие заметной разницы средней энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в кристаллической решетке цементита (0,4 эВ) [22, 23].

Характерное изображение формирующейся в результате реализации этого механизма преобразования

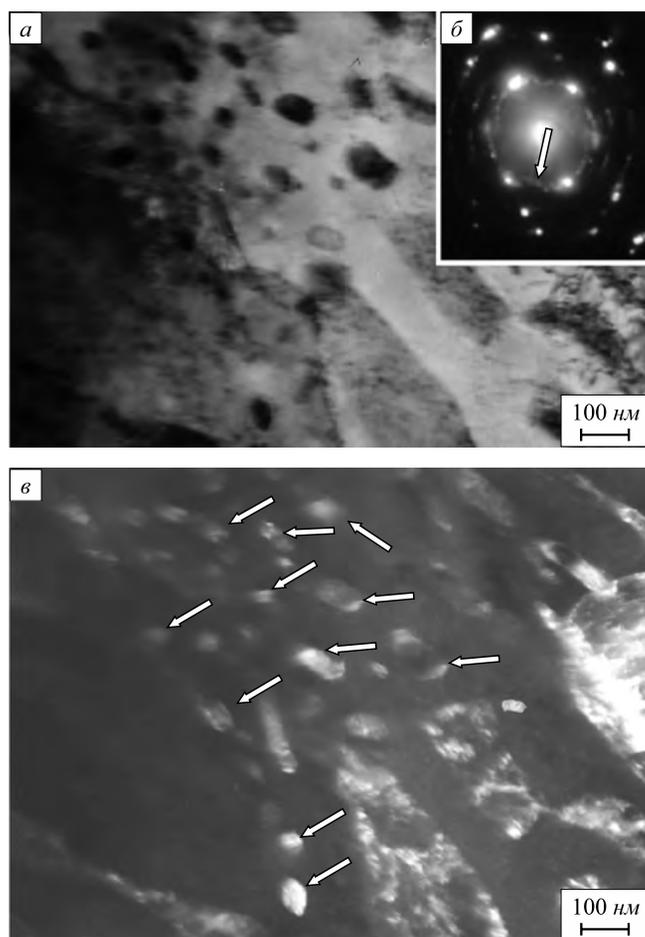


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности катания: *a* – светлое поле; *б* – микроэлектронграмма; *в* – темное поле, полученное в рефлексе $[012]Fe_3C$ (на поз. *б* стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле; на поз. *в* – частицы цементита)

Fig. 1. Electron microscopic image of the rolling surface structure: *a* – bright field; *b* – microelectronogram; *c* – dark field obtained in reflex $[012]Fe_3C$ (reflex in which the dark field is obtained is indicated by the arrow, and the particles of cementite are at position *c*)

структуры пластинчатого перлита рельсовой стали после длительной эксплуатации на железной дороге приведено на рис. 2, а, б.

На рис. 2, б показано электронно-микроскопическое изображение начальной стадии преобразования пластин цементита перлитной колонии, заключающейся в опутывании пластины скользящими дислокациями с последующим разбиванием пластин цементита на отдельные слабо разориентированные фрагменты.

Вторая стадия преобразования пластин цементита перлитной колонии, реализующаяся по механизму растворения на месте, заключается в вытягивании атомов углерода из кристаллической решетки цементита и сопровождается изменением дефектной субструктуры карбида, что обусловлено проникновением скользящих дислокаций из кристаллической решетки феррита в кристаллическую решетку цементита (рис. 2, б). Следовательно, на этой стадии растворения пластин цементита особую роль играют межфазные границы α -фаза–цементит. Когерентная или полукогерентная граница [24] облегчает проникновение дислокаций из α -фазы в цементит и обратно и тем самым способствует разрушению и растворению карбида. Некогерентная большеугловая межфазная граница стабилизирует структуру карбида и оставляет возможность лишь диффузионному массопереносу. Именно поэтому пластины цементита в перлитной колонии разрушаются, а сферические частицы цементита на границах зерен и субзерен сохраняются.

На следующем этапе растворения цементита весь объем материала, занимаемый ранее цементитной пластиной, заполняется наноразмерными частицами. Характерное изображение формирующейся при этом структуры приведено на рис. 2, в. Кроме этого, наноразмерные частицы карбидной фазы наблюдаются и в ферритной матрице, заполняющей межпластинчатое пространство перлитных колоний. Такие частицы могут быть вынесены туда в процессе дислокационного скольжения, либо, что менее вероятно, образоваться в процессе деформационного распада твердого раствора углерода в кристаллической решетке железа.

Углерод, как известно, в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе α - и γ -железа (на позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид–матрица) и внутрифазных (границы зерен, пакетов и кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита) границах, в частицах карбидной фазы [25 – 27]. Количество углерода в твердых растворах на основе α - и γ -железа обычно оценивается по относительному изменению параметра кристаллической решетки этих фаз [28, 29]. Оценку количества углерода в карбидных частицах проводят исходя из химического состава карбида, типа кристаллической решетки и объемной доли частиц карбидной фазы в стали. Для цементита (в предположении стехиоме-

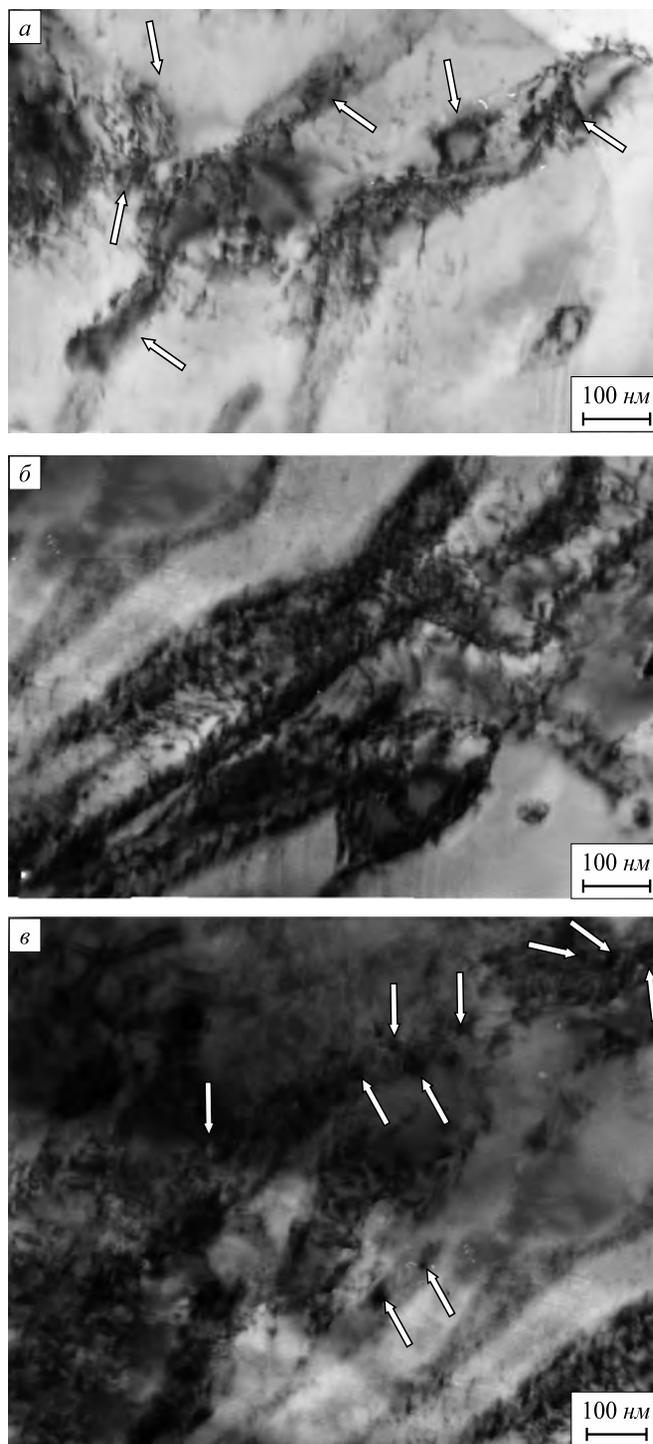


Рис. 2. ПЭМ изображение структуры перлитной колонии, формирующейся при растворения пластин цементита по механизму на месте:

а, б и в – первая, вторая и третья стадии процесса преобразования пластин цементита перлитной колонии (стрелками на поз. а указаны фрагменты в пластинах цементита, на поз. в – наноразмерные частицы карбидной фазы, формирующиеся в структуре пластин цементита)

Fig. 2. TEM image of pearlite colony structure, formed after dissolving of cementite plates by mechanism in place:

а, б and в – the first, second and third stages of transformation process of cementite pearlitic plates (arrows at position а indicate fragments in cementite plates, at position в are nanoscale particles of carbide phase formed in cementite plates structure)

К методу анализа распределения углерода в стали

Table 1. To the method of analysis of carbon distribution in steel

Места расположения углерода	Оценочные выражения	Литературный источник
Твердый раствор на основе α -железа	$\Delta C_{\alpha} = \Delta V_{\alpha} \frac{a_{\alpha} - a_{\alpha}^0}{39 \pm 4} 10^3$	[27, 28]
Частицы карбидных фаз	$\Delta C(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07 \cdot \Delta V_i$	[22, 30]
Элементы дефектной структуры	$\Delta C_{\text{д}} = C_0 - \Delta C_{\alpha} - \Delta C(\text{Fe}_3\text{C})$	[22, 30]

П р и м е ч а н и е. ΔV_{α} , ΔV_i – объемная доля α -железа и карбидных фаз; $a_{\alpha} = 0,28782$ нм – текущий параметр решетки α -фазы; $a_{\alpha}^0 = 0,28668$ нм; C_0 – среднее содержание углерода в стали.

трического состава) подобный расчет осуществлен в работе [30]. Оценка количества углерода, расположенного на дефектах (дислокациях и границах раздела), является наиболее сложным моментом и с большим трудом поддается прямому экспериментальному определению. Весьма часто из этой ситуации выходят, используя косвенные методы (например, методы внутреннего трения и микрорентгеноспектрального анализа), а также проводят теоретические оценки. Представленные ПЭМ изображения (рис. 1, 2) процессов разрушения структуры пластинчатого перлита и количественные результаты изменения структуры и фазового состава дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации [31] свидетельствуют о перераспределении атомов углерода.

Оценку относительного содержания атомов углерода на структурных элементах стали осуществляли по выражениям, обобщенным в табл. 1. Результаты выполненных оценок представлены в табл. 2.

Проведенные оценки показали, что эксплуатация рельсовой стали сопровождается существенным перераспределением атомов углерода в поверхностном слое изделия. Если в исходном состоянии основное количество атомов углерода было сосредоточено в частицах цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода, наряду с частицами цементита, являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали атомы углерода обнаружены и в кристаллической решетке на основе α -железа.

Выводы. Методами рентгеноструктурного анализа и ПЭМ проведены исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры на различном расстоянии от поверхности катания вдоль центральной оси дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации. Это позволило проследить за перераспределением атомов углерода в структуре рельсов. Установлено, что эксплуатация рельсов сопровождается интенсивным разрушением частиц цементита в поверхностном слое стали; атомы углерода, покинув

Распределение углерода в структуре рельсовой стали после наработки тоннажа 691,8 млн. т брутто

Table 2. Distribution of carbon in structure of rail steel after 691.8 million tons of gross tonnage operation

Структурные элементы	Концентрация углерода, % (по массе) на расстоянии от поверхности, мм		
	0	2	10
Частицы цементита	0,3300	0,71	0,75
Кристаллическая решетка α -железа	0,0284	0	0
Дефекты кристаллической структуры	0,3816	0,03	0

шие кристаллическую решетку частиц цементита, располагаются на дефектах кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен). В слое, расположенном на глубине 2 мм и более, основным местом расположения атомов углерода являются частицы цементита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. No. 6. P. 1659 – 1669.
- Ivanisenko Yu., Wunderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation // Scripta Materialia. 2003. Vol. 49. No. 10. P. 947 – 952.
- Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Fecht H.-J. Stress- and Strain Induced Phase Transformations in Pearlitic Steels // Materials Science Forum. 2007. Vol. 539-543. P. 4681 – 4686.
- Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion // Acta Mater. 2003. Vol. 51. No. 18. P. 5555 – 5570.
- MacLaren I., Ivanisenko Yu., Fecht H.-J., Sauvage X., Valiev R.Z. Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. – In book: Ultrafine Grained Materials IV. Ed. By Zhu E.T. – The Minerals, Metals & Materials Society, 2006. P. 1 – 6.

6. Шур Е.А. Повреждение рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
7. Повышение эффективности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации. Сб. научных трудов / Под ред. Л.Г. Крысанова. – М.: Интекст, 2000. – 142 с.
8. Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Сб. Научных трудов / Е.А. Шур и др. – Екатеринбург: ГНЦ РФ ОАО УИМ, 2006. – 235 с.
9. Peregudov O.A., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Konovalov S.V. Structural and phase states in high-quality rail // *Steel in translation*. 2016. Vol. 46. No. 4. P. 260–263.
10. Peregudov O.A., Morozov K.V., Gromov V.E. etc. Formation of internal stress fields in rails during long-term operation // *Russian metallurgy*. 2016. Vol. 2016. No. 4. P. 371 – 374.
11. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Semina O.A. Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer // *Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron techniques*. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1101 – 1105.
12. Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail-steel structure and properties of the surface layer // *Steel in translation*. 2016. Vol. 46. No. 8. P. 567 – 570.
13. Гаврилюк В.Г., Герцрикен Д.С., Полушкин Ю.А., Фальченко В.М. Механизм распада цементита при пластической деформации стали // *ФММ*. 1981. Т. 51. № 1. С. 147 – 152.
14. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г. Распад цементита при пластической деформации стали // *Металлофизика*. 1982. Т. 4. № 3. С. 74 – 87.
15. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
16. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
17. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окшнев, Т.И. Табатчикова, Ю.В. Хлебникова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 312 с.
18. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels*. 2nd ed. – London: The Institute of Materials, 2001. – 460 p.
19. Jian Min Zuo, John C.H. Spence, *Advanced Transmission Electron Microscopy*. – New York: Springer, 2017. – 729 p.
20. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials*, fourth edition. – Berlin: Springer, 2013. – 764 p.
21. Thomas J., Gemming T. *Analytical Transmission Electron Microscopy*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. – 348 p.
22. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
23. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
24. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформируемой стали / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Попова, С.В. Коновалов, Н.А. Конева. – Новокузнецк: Полиграфист, 2016. – 510 с.
25. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин, В.Я. Целлермаер, Ю.Ф. Иванов и др. – М.: Недра, 1997. – 293 с.
26. Мейл Р.Ф., Хагель У.К. Аустенитно-перлитное превращение. – В кн.: *Успехи физики металлов / Пер. с англ.* – М.: Металлургияиздат, 1960. С. 86 – 156.
27. Speich G., Swann P.R. Yield strength and transformation substructure of quenched iron-nickel alloys // *J. Iron and Steel Inst*. 1965. Vol. 203. No. 4. P. 480 – 485.
28. Speich G.R. Tempering of low-carbon martensite // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969. Vol. 245. No. 10. P. 2553 – 2564.
29. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite // *Met. Trans*. 1971. Vol. 2. No. 10. P. 2783 – 2790.
30. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1818 – 1820.
31. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969. Vol. 246. No. 8. P. 1834 – 1836.
32. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. – М.: Металлургия, 1977. – 407 с.

Поступила 28 августа 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, pp. 454–459.

REDISTRIBUTION OF CARBON ATOMS IN DIFFERENTIALLY CHARGED RAILS FOR LONG-TERM OPERATION

V.E. Gromov¹, A.A. Yur'ev¹, Yu.F. Ivanov^{2,3}, V.A. Grishunin¹, S.V. Konovalov⁴

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴Samara University, Samara, Russia

Abstract. Using transmission electron microscopy methods at various distances from the rolling surface along the central axis, changes in structure, phase composition, and defective substructure of the head of differentially hardened rails were studied after passed tonnage of 691.8 million tons of gross weight. It is confirmed that prolonged operation of rails is accompanied by two simultaneous processes of transformation of structure and phase composition of plate-pearlite colonies: cutting of cementite plates and dissolution of cementite plates. The first process is carried out by mechanism of cutting carbide particles and removing their fragments, accompanied only by change in their linear dimensions and morphology. The second process of destruction of the cementite plates of pearlite colonies is carried out by leaving carbon atoms from crystalline lattice of cementite on dislocation, as a result of which phase transformation of rails metal is possible. This is due to a noticeable relaxation of mean energy of carbon atoms binding to dislocations (0.6 eV) and to iron atoms in cementite lattice (0.4 eV). The stages of transformation of cementite plates are

considered: enveloping the plates with sliding dislocations and then splitting them into weakly oriented fragments; penetration of sliding dislocations from ferrite lattice into lattice of cementite; dissolution of cementite and formation of nanoscale particles. The presence of nanosized cementite particles in ferrite matrix is noted due to their removal during dislocation slide. Using expressions of modern physical materials science and X-ray diffraction analysis, influence of content of carbon atoms on structural elements of rail steel was estimated. It is shown that prolonged operation of rails is accompanied by a significant redistribution of carbon atoms in surface layer. In the initial state, the main quantity of carbon atoms is concentrated in cementite particles, and after a long operation of rails, along with cementite particles, carbon is located in defects of crystal structure of steel (dislocation, grain boundaries and subgrains), and in the surface layer of steel atoms carbon is also found in crystal lattice based on α -iron.

Keywords: carbon atoms, redistribution, differentially hardened rails, cementite resolution.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-454-459

REFERENCES

1. Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite. *Acta Mater*. 2006, vol. 54, no. 6, pp. 1659–1669.

2. Ivanisenko Yu., Wunderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*. 2003, vol. 49, no. 10, pp. 947–952.
3. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Fecht H.-J. Stress- and strain induced phase transformations in pearlitic steels. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 539–543, pp. 4681–4686.
4. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion. *Acta Mater.* 2003, vol. 51, no. 18, pp. 5555–5570.
5. MacLaren I., Ivanisenko Yu., Fecht H.-J., Sauvage X., Valiev R.Z. Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. In: *Ultrafine Grained Materials IV*. Zhu E.T. etc. eds. The Minerals, Metals & Materials Society, 2006, pp. 1–6.
6. Shur E.A. *Povrezhdenie rel'sov* [Damage to rails]. Moscow: Intekst, 2012, 192 p. (In Russ.).
7. *Povyshenie effektivnosti raboty verkhnego stroeniya puti v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii: Sb. nauchnykh trudov* [Improving the efficiency of path upper structure in modern operating conditions. Coll. of sci. papers]. Krysanov L.G. ed. Moscow: Intekst, 2000, 142 p. (In Russ.).
8. Shur E.A. etc. *Vliyaniye svoystv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov: Sb. nauchnykh trudov* [Influence of the properties of metal matrix on the rails operational stability. Coll. of sci. papers]. Ekaterinburg: GNTs RF OAO UIM, 2006, 235 p. (In Russ.).
9. Peregudov O.A., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Kononov S.V. Structural and phase states in high-quality rail. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 4, pp. 260–263.
10. Peregudov O.A., Morozov K.V., Gromov V.E. et. al. Formation of internal stress fields in rails during long-term operation. *Russian metallurgy*. 2016, vol. 2016, no. 4, pp. 371–374.
11. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Semina O.A. Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer. *Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron techniques*. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1101–1105.
12. Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail-steel structure and properties of the surface layer. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 8, pp. 567–570.
13. Gavriluyuk V.G., Gertsriken D.S., Polushkin Yu.A., Fal'chenko V.M. Mechanism of cementite decomposition during plastic deformation of steel. *FMM*. 1981, vol. 51, no. 1, pp. 147–152. (In Russ.).
14. Gridnev V.N., Gavriluyuk V.G. Decomposition of cementite during plastic deformation of steel. *Metallofizika*. 1982, vol. 4, no. 3, pp. 74–87. (In Russ.).
15. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 647 p. (In Russ.).
16. Kurdyumov V.G., Utevsii L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (In Russ.).
17. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Perlit v uglerodistykh stal'yakh* [Perlite in carbon steels]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006, 312 p. (In Russ.).
18. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in Steels*. 2nd ed. London: The Institute of Materials, 2001, 460 p.
19. Jian Min Zuo, John C.H. Spence. *Advanced Transmission Electron Microscopy*. New York: Springer, 2017, 729 p.
20. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffraction of Materials*. Fourth edition. Berlin: Springer, 2013, 764 p.
21. Thomas J., Gemming T. *Analytical Transmission Electron Microscopy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, 348 p.
22. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016, 196 p.
23. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014, 717 p.
24. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Popova N.A., Kononov S.V., Koneva N.A. *Strukturno-fazovyye sostoyaniya i mekhanizmy uprochneniya deformirovannoi stali* [Structural-phase states and mechanisms of hardening of deformed steel]. Novokuznetsk: Poligrafist, 2016, 510 p. (In Russ.).
25. Gromov V.E., Kozlov E.V., Bazaikin V.I., Tsellermaer V.Ya., Ivanov Yu.F. etc. *Fizika i mekhanika volocheniya i ob'emnoi shtampovki* [Physics and mechanics of drawing and forging]. Moscow: Nedra, 1997, 293 p. (In Russ.).
26. Meil R.F., Khagel' U.K. *Austenitno-perlitnoye prevrashchenie* [Austenite-perlitic transformation]. In: *Uspekhi fiziki metallov* [Progress in Metal Physics]. Trans. from English Moscow: Metallurgizdat, 1960, pp. 86–156. (In Russ.).
27. Speich G., Swann P.R. Yield strength and transformation substructure of quenched iron-nickel alloys. *J. Iron and Steel Inst.* 1965, vol. 203, no. 4, pp. 480–485.
28. Speich G.R. Tempering of low-carbon martensite. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969, vol. 245, no. 10, pp. 2553–2564.
29. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite. *Met. Trans.* 1971, vol. 2, no. 10, pp. 2783–2790.
30. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1818–1820.
31. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969, vol. 246, no. 8, pp. 1834–1836.
32. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 407 p. (In Russ.).

Information about the authors:

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

A.A. Yur'ev, Research Engineer of Department of Scientific Research (ant-yurev@yandex.ru)

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

V.A. Grishunin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Transport and Logistics

S.V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials (ksv@ssau.ru)

Received August 28, 2017

УДК 544.015.3 + 669.017.3 + 669.854

ТЕРМОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ Fe–Mg–Al–La–O*

*Михайлов Г.Г.¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения
и физико-химии материалов (mikhailovgg@susu.ru)*

*Макровец Л.А.¹, инженер кафедры материаловедения и физико-химии
материалов (makrovetc1a@susu.ru)*

Смирнов Л.А.², академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник (sekretar@uim-stavan.ru)

¹ Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76)

² Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. В настоящее время редкоземельные элементы в металлургии используют в виде мишметалла – естественной смеси редкоземельных (РЗМ) элементов (с атомными номерами от 57 до 71). Такая смесь содержит приблизительно 50 % церия (по массе). Основными элементами главным образом являются церий, лантан и ниобий. Конкретный состав определяется рудным месторождением. Негарантированный (непостоянный) состав модификатора, содержащего РЗМ, может существенным образом снизить эффективность его использования. Экспериментально для каждого марочного состава стали соотношение различных РЗМ невозможно подобрать в силу больших затрат на получение технически чистых редкоземельных металлов. Задача определения оптимальных концентраций каждого из редкоземельных элементов и состава комплексной лигатуры может быть решена методом термодинамического моделирования. В работе представлены результаты термодинамического моделирования процессов взаимодействия магния, алюминия и лантана с кислородом в жидком железе. Рассмотрена термодинамическая модель раскисления стали композицией данных активных металлов. На основании имеющихся литературных данных по диаграммам состояния систем MgO–Al₂O₃, MgO–La₂O₃, La₂O₃–Al₂O₃ установлены координаты точек инвариантных равновесий в системе MgO–La₂O₃–Al₂O₃. Построена диаграмма состояния MgO–La₂O₃–Al₂O₃. Это позволило установить все возможные равновесия, реализующиеся при раскислении стали магнием, лантаном и алюминием, а также описать их уравнениями химических реакций. Активность компонентов в жидких оксидных расплавах определяли с использованием теории субрегулярных ионных растворов, учитывающей зависимость координационного числа катионов от состава оксидного расплава. Активности компонентов в сопряженных с оксидными системами металлических расплавах определяли по теории Вагнера с помощью параметров взаимодействия первого порядка. Значения констант равновесия реакций раскисления стали рассматриваемыми элементами установлены косвенными термодинамическими расчетами. На основании полученных данных построена поверхность растворимости компонентов в металлических расплавах системы Fe–Mg–Al–La–O, что позволило установить области составов жидкого металла, сопряженного с соответствующей оксидной фазой.

Ключевые слова: термодинамика, диаграмма состояний, лантан, магний, алюминий, раскисление, моделирование, фазовые равновесия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-460-465

Современные технологии производства низкоуглеродистых конструкционных сталей и сталей специального назначения все в большей степени предусматривают на финишных этапах рафинирования металла применение комплексных сплавов, лигатур, смесевых композиций, содержащих редкоземельные металлы [1–4]. Эффективность использования РЗМ увеличивается, если перед их введением проведено глубокое раскисление и десульфурация стали кальцием и алюминием [5]. В настоящее время в лабораторных и промышленных исследованиях [6] установлено, что применение РЗМ на заключительных этапах рафинирования позволяет существенным образом снизить содержание кислорода и серы в стали [7, 8], модифицировать неметаллические включения и структуру литой стали [9]. После введения РЗМ в стали остаются незна-

чительные количества в основном комплексных глобулярных оксисульфидов [10, 11]. Вводятся редкоземельные элементы в металл в ограниченном (до 0,1–0,2 % (по массе)) количестве в составе комплексных сплавов с ферросилицием или щелочноземельными металлами [12]. Практически все конструкционные стали в агрегатах печь–ковш предварительно раскисляют алюминием и кальцием. Поэтому даже незначительных добавок РЗМ в присутствии остаточного алюминия бывает достаточно для восстановления магния в жидкий металл из огнеупоров ковшей и жидкометалльной проводки. В последующем этот магний может входить в состав вновь образующихся неметаллических включений [13], содержащих Al₂O₃ и оксиды РЗМ [11, 12]. После введения РЗМ максимальные размеры неметаллических включений находятся в пределах до 3–4 мкм, имеют в подавляющем большинстве глобулярную форму и достаточно равномерно распределены по объему

* Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011.

слитка. Эти включения обнаруживаются в большей части не по границам зерна, а внутри зерен и кристаллитов, что, в свою очередь, снижает показатели анизотропии и повышает ударную вязкость стали, особенно при низких температурах [13 – 15].

В силу идентичности химических свойств разделение редкоземельных элементов на составляющие технологически затруднено и поэтому рафинирующие добавки с РЗМ характеризуются интегральным процентным показателем [5]. Но физические свойства РЗМ все-таки отличаются. Например, плотность лантана составляет 6,14 г/см³, а плотность церия 8,24 г/см³. Это означает, что при взаимодействии церия или лантана с кислородом даже в случае проявления одинаковой валентности на связь с кислородом расходуется различное количество этих элементов, если состав лигатуры выражается в процентах по массе. Следует отметить также, что при взаимодействии с кислородом церий, например, образует трех- и двухвалентные соединения, а лантан в соединениях в основном трехвалентен. Но соединения CeO₂ и Ce₂O₃ – это и кристаллографически различные соединения, различные фазы. Этот факт нужно учитывать при анализе фазовых равновесий [8, 14, 16 – 18] с отдельными редкоземельными металлами. Необходимо изучить рафинирующее и модифицирующее действие каждого из редкоземельных элементов в отдельности. Подобное исследование можно провести с использованием методики построения поверхностей растворимости компонентов в жидком металле [19]. В термодинамической модели фазовых равновесий многокомпонентного жидкого металла с сопряженными неметаллическими фазами необходимо исследовать систему термодинамических данных: общее количество и природу оксидных фаз, которые могут находиться в равновесии с жидким металлом; общее количество протекающих химических реакций; термодинамические модели многокомпонентного жидкого металла. Экспериментально или путем косвенных

термодинамических расчетов необходимо установить температурные зависимости констант равновесия реакций, определяющих возможные равновесия в исследуемой термодинамической системе.

В настоящей работе предлагается рассмотреть особенности фазовых равновесий с одним конкретным представителем редкоземельных металлов – лантаном. В современной металлургической литературе отсутствует информация, пригодная для однозначной интерпретации фазовых равновесий в жидком металле, содержащем кислород, алюминий, магний и лантан на уровне отдельных составов оксидных фаз системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃. Так, по данным справочника [20] тройное эвтектическое превращение происходит при температуре 1835 °С и содержании La₂O₃·Al₂O₃ 39 % (мол.). В справочнике [20] для системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃ указаны лишь отдельные структурные составляющие, а сама диаграмма состояний не построена. При термодинамической обработке отдельных данных по системам MgO–Al₂O₃ [20, 21], MgO–La₂O₃ [20], La₂O₃–Al₂O₃ [22, 23] были рассчитаны координаты эвтектического превращения на квазибинарной системе MgO·Al₂O₃–La₂O₃·Al₂O₃ (1869 °С и 43 % (мол.) La₂O₃·Al₂O₃), а также диаграмма состояний системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃. Используемые при расчетах параметры теории субрегулярных ионных растворов этой системы представлены в табл. 1. Константы равновесия процессов перехода компонентов в жидкую фазу (плавления) приведены в табл. 2.

Выполненный анализ приведенных в табл. 1 и 2 данных позволил установить координаты инвариантных четырехфазных превращений и, таким образом, впервые построить диаграмму состояний системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃ (рис. 1). В табл. 3 представлены результаты расчета координат точек инвариантного равновесия.

Из диаграмм состояний FeO–MgO–La₂O₃, FeO–MgO–Al₂O₃, FeO–La₂O₃–Al₂O₃ [22] и рассчитанной

Т а б л и ц а 1

Энергетические параметры теории субрегулярных растворов для системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃

Table 1. Energy parameters of the subregular ionic solution theory of MgO–La₂O₃–Al₂O₃ system

Система	Энергетические параметры, кал/моль			Источник
MgO–La ₂ O ₃	–1594	179	4007	16
MgO–Al ₂ O ₃	–14 317	2876	–1339	18
La ₂ O ₃ –Al ₂ O ₃	–3927	–460	–4007	16
MgO–La ₂ O ₃ –Al ₂ O ₃	–16 482	–3256	–3490	Результаты настоящей работы

Т а б л и ц а 2

Зависимость от температуры констант реакций перехода в жидкую фазу (плавление)

Table 2. Temperature dependence of the reaction constants for to the liquid phase (melting)

Реакция	lg K = –A/T + B	
	A	B
|MgO| → (MgO)	4044	1,304
|La ₂ O ₃| → (La ₂ O ₃)	3934	1,529
|Al ₂ O ₃| → (Al ₂ O ₃)	5683	2,447
|La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃| → (La ₂ O ₃) + (Al ₂ O ₃)	7724	1,858
|La ₂ O ₃ ·11Al ₂ O ₃| → (La ₂ O ₃) + 11(Al ₂ O ₃)	40 571	14,712
|MgO·Al ₂ O ₃| → (MgO) + (Al ₂ O ₃)	10 399	3,390

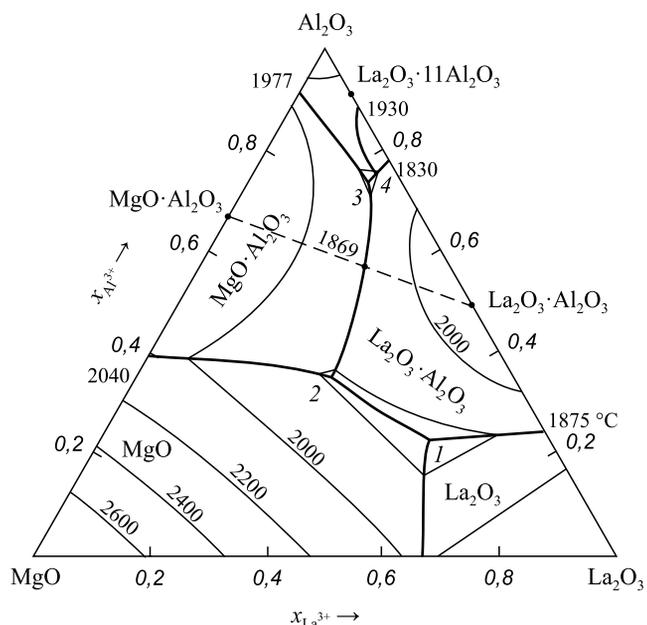


Рис. 1. Расчетная диаграмма состояний системы MgO–La₂O₃–Al₂O₃

Fig. 1. Design phase diagram of MgO–La₂O₃–Al₂O₃ system

в настоящей работе диаграммы MgO–La₂O₃–Al₂O₃ следует, что на поверхности растворимости компонентов в жидком железе при температурах сталеварения будут установлены области составов металла, равновесного только с твердыми оксидными фазами: оксидами La₂O₃, Al₂O₃, моноалюминатом лантана La₂O₃·Al₂O₃, а также твердыми растворами оксидов [FeO, MgO] и шпинелей [FeO·Al₂O₃, MgO·Al₂O₃] со следами оксида FeO. Активности компонентов в жидком металле определяли с использованием параметров взаимодействия Вагнера, приведенными в работах [24–28]. Температурные зависимости констант равновесия, использованные при расчетах, приведены в работах [19, 29].

Так как поверхность растворимости компонентов в металле (ПРКМ) для системы Fe–Mg–Al–La–O является по температуре и концентрациям компонентов многомерной, приходится строить изомерные сечения ПРКМ. На рис. 2 представлены ПРКМ системы Fe–Mg–Al–La–O при концентрации алюминия

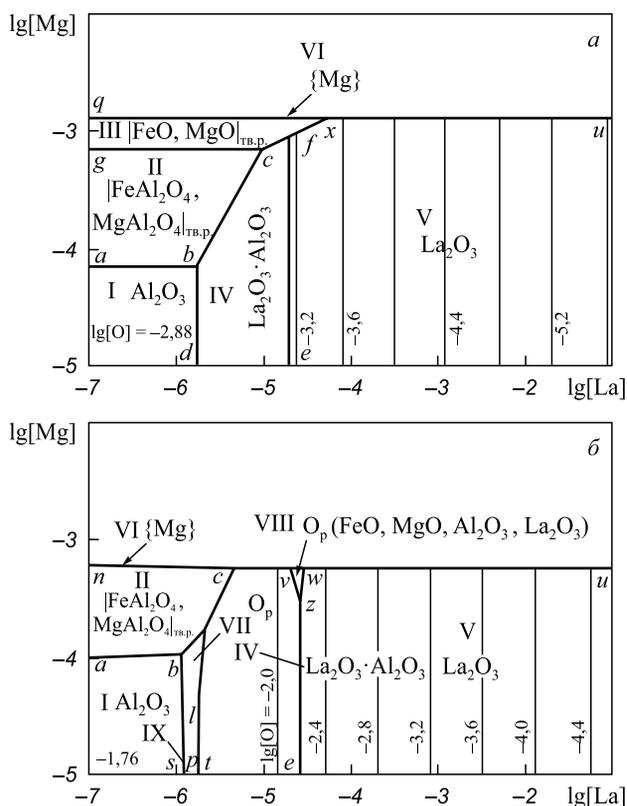


Рис. 2. ПРКМ системы Fe–Mg–Al–La–O, [Al] = 0,003 % (по массе), T = 1600 °C и P_{атм} = 1 атм, VII – O_p(FeO, MgO, Al₂O₃, La₂O₃), IX – La₂O₃·11Al₂O₃:
a – T = 1600 °C; б – T = 1800 °C

Fig. 2. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of Fe–Mg–Al–La–O system, [Al] = 0,003 % (mass.), T = 1600 °C and P_{tot} = 1 atm, O_m – (FeO, MgO, Al₂O₃, La₂O₃), IX – La₂O₃·11Al₂O₃:
a – T = 1600 °C; б – T = 1800 °C

0,003 % (по массе) и температурах 1600 и 1800 °C. На полях рис. 2, a указаны оксидные фазы, находящиеся в равновесии с жидким металлом, составы которого заданы на осях ординат и абсцисс, различных по температуре. Так, в области I заданы составы металла, равновесного с корундом, в области II – с твердыми растворами шпинелей [FeO·Al₂O₃, MgO·Al₂O₃], в области III – с твердыми растворами [FeO, MgO], в области IV – с La₂O₃·Al₂O₃, в области V – с La₂O₃. При перегреве

Таблица 3

Координаты точек инвариантных превращений в системе MgO–La₂O₃–Al₂O₃ (рис. 1)

Table 3. Coordinates of the points of invariant transformations in MgO–La₂O₃–Al₂O₃ system (Fig. 1)

Точки	Фазовое равновесие	T, °C	Состав жидких оксидов, ионные доли		
			x _{Mg²⁺}	x _{La³⁺}	x _{Al³⁺}
1	La ₂ O ₃ + La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃ + MgO + жидкость	1721	0,20	0,57	0,23
2	MgO·Al ₂ O ₃ + La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃ + MgO + жидкость	1790	0,30	0,34	0,36
3	MgO·Al ₂ O ₃ + La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ + жидкость	1784	0,04	0,21	0,75
4	La ₂ O ₃ ·11Al ₂ O ₃ + La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ + жидкость	1791	0,03	0,21	0,76

металла до температуры 1800 °С возможно изменение природы фазовых равновесий и образование дополнительных фаз: оксидного расплава – области VII и VIII, а также $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ (область IX) (рис. 2, б).

При концентрации лантана в стали порядка тысячных долей процента (рис. 2) образующиеся неметаллические включения будут содержать в основном оксид лантана. Следует также учитывать и то, что при наличии следов алюминия и лантана в металле в образовании неметаллических включений может принять участие и восстанавливаемый из футеровки магний. Обозначенный на ПРКМ оксид железа FeO может находиться в магнезиальной оксидной фазе лишь в следах.

Выводы. Установлены энергетические параметры теории субрегулярных растворов для системы $\text{MgO} - \text{La}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Впервые построена модель диаграммы состояний для оксидной системы $\text{MgO} - \text{La}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Впервые построена поверхность растворимости компонентов в жидком металле, раскисленном лантаном, алюминием и магнием. Изучено влияние перегрева металла на образование оксидных фаз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лунев В.В., Шульте Ю.В. Применение комплексных лигатур с РЗМ и ЩЗМ для улучшения свойств литых и деформированных сталей. – В кн.: Влияние комплексного раскисления на свойства сталей: Тематический отраслевой сб. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1982. С. 33 – 50.
2. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Орыщенко А.С. и др. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 // *Металлург.* 2015. № 11. С. 57 – 63.
3. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Орыщенко А.С. и др. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 2 // *Металлург.* 2016. № 1. С. 41 – 48.
4. Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe // *International Conference on Applied Economics (ICOAE) 2015. Procedia Economics and Finance.* 2015. Vol. 24. P. 126 – 135.
5. Рябчиков И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. – М.: ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.
6. Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Мурзин А.В. и др. Влияние технологии модифицирования кальцием и РЗЭ на морфологию неметаллических включений и технологические свойства трубной стали // *Металлург.* 2015. № 11. С. 69 – 73.
7. Голубцов В.А., Воронин А.А., Тетюев Т.В. и др. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла // *Металлург.* 2005. № 4. С. 73 – 77.
8. Pan F., Zhang J., Chen H.-L., Su Y.-H., Su Y.-H., Hwang W.-S. Thermodynamic Calculation among Cerium, Oxygen, and Sulfur in Liquid Iron // *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6. P. 35843.
9. Голубцов В.А., Рябчиков И.В., Усманов Р.Г. Микроструктурные комплексные модификаторы в производстве стали. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2017. – 137 с.
10. Григорович К.В., Шибаева Т.В., Арсенкин А.М. Влияние технологии раскисления трубных сталей на состав и количество неметаллических включений // *Металлы.* 2011. № 5. С. 164 – 170.
11. Opiela M., Grajcar A. Modification of non-metallic inclusions by rare-earth elements in microalloyed steels // *Archives of Foundry Engineering.* 2012. Vol. 12. No. 2. P. 129 – 134.
12. Аверин В.В. Применение РЗМ в металлургии стали. – В сб. «Металлургические методы повышения качества стали». – М.: 1979. С. 33 – 40.
13. Жалыбин В.И., Ершов Г.С. О восстановлении магния футеровки при выплавке стали, легированной алюминием // *Известия АН СССР. Металлы.* 1966. № 1. С. 49 – 53.
14. Снок Ю.Я. Исследование раскислительной способности комплексных сплавов, содержащих ЩЗМ и РЗМ // *Процессы литья.* 2010. № 3 (81). С. 8 – 12.
15. Kasińska J. Influence of rare earth metals on microstructure and inclusions morphology G17CrMo5-5 cast steel // *Arch. Metall. Mater.* 2014. No. 59. P. 993 – 996.
16. Minkova N., Aslania S. Isomorphic Substitutions in the $\text{CeO}_2 - \text{La}_2\text{O}_3$ System at 850°C // *Cryst. Res. Technol.* 1989. Vol. 24. No. 4. P. 351 – 354.
17. Hamm C.M., Alff L., Albert B. Synthesis of Microcrystalline Ce_2O_3 and Formation of Solid Solutions between Cerium and Lanthanum Oxides // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2014, Vol. 640. No. 6. P. 1050 – 1053.
18. Andrievskaya E.R., Kornienko O.A., Sameljuk A.V., Sayi A. Phase relation studies in the $\text{CeO}_2 - \text{La}_2\text{O}_3$ system at 1100 – 1500 °C // *Journal of the European Ceramic Society.* 2011. Vol. 31. No. 7. P. 1277 – 1283.
19. Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. Термодинамика металлургических процессов и систем. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 519 с.
20. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск четвертый. Тройные оксидные системы / В.П. Барзаковский, В.В. Лапин, А.И. Бойкова, Н.Н. Курцева – Л.: Наука, 1974. – 514 с.
21. Slag Atlas. 2nd Edition. Edited by Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). – Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH., 1995. P. 44.
22. Михайлов Г.Г., Макроец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами, содержащими РЗМ. Сообщение 1. Диаграммы состояния оксидных систем с La_2O_3 // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».* 2014. Т. 14. № 3. С. 5 – 11.
23. Wu P., Pelton A.D. Coupled thermodynamic-phase diagram assessment of the rare earth oxide-aluminium oxide binary systems // *Journal of Alloys and Compounds.* 1992. Vol. 179. No. 1-2. P. 259 – 287.
24. Михайлов Г.Г., Макроец Л.А. Фазовые равновесия при взаимодействии бария с компонентами жидкой стали // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».* 2014. Т. 14. № 2. С. 5 – 10.
25. Bůžek Z. Základní termodynamické údaje o metalurgických reakcích a o interakcích prvků v soustavách významných pro hutnickou teorii a praxi // *Hutnické actuality.* 1979. Vol. 20. No. 1-2. P. 3 – 111.
26. Балковой Ю.В., Алеев Р.А., Баканов В.К. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа: Обзор. информ. – М.: Черметинформация, 1987. – 42 с.
27. *Steelmaking Data Sourcebook*, Japan Society for the Promotion of Science. The 19th Committee on Steelmaking, Gordon and Breach Science Publishers. – New York, NY, 1988. P. 288 – 289.
28. Wang L.J., Liu Y.Q., Wang Q., Chou K.C. Evolution Mechanisms of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Inclusions by Cerium in Spring Steel Used in Fasteners of High-speed Railway // *ISIJ International.* 2015. Vol. 55. No. 5. P. 970 – 975.
29. Park J.H., Todoroki H. Control of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Spinel Inclusions in Stainless Steels // *ISIJ International.* 2010. Vol. 50. No. 10. P. 1333 – 1346.
30. Михайлов Г.Г., Макроец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование процессов взаимодействия лантана с компонентами металлических расплавов на основе железа // *Изв. вуз. Черная металлургия.* 2015. Т. 58. № 12. С. 877 – 884.

Поступила 18 апреля 2018 г.

THERMODYNAMICS OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF LIQUID METAL COMPONENTS IN Fe–Mg–Al–La–O SYSTEM

G.G. Mikhailov¹, L.A. Makrovets¹, L.A. Smirnov²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. At the present time, rare-earth elements in metallurgy are used in the form of mischmetal – a rare-earth elements natural mixture (with atomic numbers from 57 to 71). It contains about 50 wt. % of cerium. The remaining elements are mainly lanthanum and niobium. The specific composition is determined by the ore deposit. Inconstant composition of the modifier containing rare-earth metals (REM) can significantly reduce its efficiency. Experimentally, for every branded steels composition the ratio of various REMs can't be selected because of the high costs of obtaining technically pure rare-earth metals. The task of determining the each rare earth element optimum concentrations and complex ligature composition can be solved by thermodynamic modeling. In the framework of thermodynamic modeling, the interaction between magnesium, aluminum and lanthanum with oxygen in liquid iron is presented. And the thermodynamic model of steel deoxidation by these active metals composition is considered. On the basis of available literature data on the phase diagrams of the systems MgO–Al₂O₃, MgO–La₂O₃ and La₂O₃–Al₂O₃, the coordinates of the invariant equilibria points in the system MgO–La₂O₃–Al₂O₃ were determined. The phase diagram of the system MgO–La₂O₃–Al₂O₃ was constructed. It made possible to establish all phase equilibria realized in the process of deoxidation of steel with magnesium, lanthanum and aluminum and to describe these phase equilibria by chemical reactions equations. The activity of the components in liquid oxide melts was determined using the theory of subregular ionic solutions, which takes into account the dependence of the coordination number of cations on the composition of the oxide melt. The activity of components in metal melts conjugated with oxide systems were determined by Wagner's theory using the parameters of the first order interaction. Equilibrium constants values for the steel deoxidation reactions are installed indirectly by thermodynamic calculations. On the basis of the obtained data the components solubility surface in the metal melts of Fe–Mg–Al–La–O system was constructed, which allowed to determine the liquid metal composition regions associated with the corresponding oxide phase.

Keywords: thermodynamics, phase diagram, lanthanum, magnesium, aluminum, deoxidation, modeling, phase equilibrium.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-460-465

REFERENCES

- Lunev V.V., Shul'te Yu.V. The use of complex ligatures with REM and AEM for improving the properties of cast and deformed steels. In: *Vliyaniye kompleksnogo raskisleniya na svoystva staley: Tematicheskii otnaslevoi sb. MChM SSSR* [Effect of complex deoxidation on the properties of steels: Thematic branch collection of MChM USSR]. Moscow: Metallurgiya, 1982, pp. 33–50. (In Russ.).
- Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Oryshchenko A.S., Kalinin G.Y., Milyuts V.G. Modification of steel and alloys with rare-earth elements. Part 1. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1053–1061.
- Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Oryshchenko A.S., Kalinin G.Y., Milyuts V.G. Modification of steel and alloys with rare-earth elements. Part 2. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 1–2, pp. 38–46.
- Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe. International Conference on Applied Economics (ICOAE) 2015. *Procedia Economics and Finance*. 2015, vol. 24, pp. 126–135.
- Ryabchikov I.V. *Modifikatory i tekhnologii vnepechnoi obrabotki zhelezouglerodistykh splavov* [Modifiers and technologies for secondary treatment of iron-carbon alloys]. Moscow: EKOMET, 2008, 400 p. (In Russ.).
- Burmasov S.P., Gudov A.G., Murzin A.V., Dresvyankina L.E., Toporov V.A. Effect of technology for modification with calcium and ree on pipe steel nonmetallic inclusion morphology and production properties. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 69–73.
- Golubtsov V.A., Voronin A.A., Tetyuev T.V., Roshchin V.E., Usmanov R.G. Origin of nonmetallic inclusions and ways of alleviating their contamination of steel. *Metallurg*. 2005, no. 4, pp. 73–77. (In Russ.).
- Pan F., Zhang J., Chen H.-L., Su Y.-H., Su Y.-H., Hwang W.-S. Thermodynamic calculation among cerium, oxygen, and sulfur in liquid iron. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, pp. 35843.
- Golubtsov V.A., Ryabchikov I.V., Usmanov R.G. *Mikrokristallicheskie kompleksnye modifikatory v proizvodstve stali* [Microcrystalline complex modifiers in the production of steel]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2017, 137 p. (In Russ.).
- Grigorovich K.V., Shibaeva T.V., Arsenkin A.M. Effect of a pipe-steel killing technology on the composition and number of non-metallic inclusions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 929–933.
- Opiela M., Grajcar A. Modification of non-metallic inclusions by rare-earth elements in microalloyed steels. *Archives of Foundry Engineering*. 2012, vol. 12, no. 2, pp. 129–134.
- Averin V.V. Application of REM in metallurgy of steel. In: *Metallurgicheskie metody povysheniya kachestva stali* [Metallurgical methods for improving the quality of steel]. Moscow: 1979, pp. 33–40. (In Russ.).
- Zhalybin V.I., Ershov G.S. On recovery of magnesium of lining in casting of steel alloyed with aluminum. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1966, no. 1, pp. 49–53. (In Russ.).
- Skok Yu.Ya. Study of deoxidizing ability of complex alloys containing AEM and REM. *Protsessy lit'ya*. 2010, no. 3 (81), pp. 8–12. (In Russ.).
- Kasińska J. Influence of rare earth metals on microstructure and inclusions morphology G17CrMo5-5 cast steel. *Arch. Metall. Mater.* 2014, no. 59, pp. 993–996.
- Minkova N., Aslania S. Isomorphic Substitutions in the CeO₂–La₂O₃ System at 850 °C. *Cryst. Res. Technol.* 1989, vol. 24, no. 4, pp. 351–354.
- Hamm C.M., Alff L., Albert B. Synthesis of microcrystalline Ce₂O₃ and formation of solid solutions between cerium and lanthanum oxides. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2014, vol. 640, no. 6, pp. 1050–1053.
- Andrievskaya E.R., Kornienko O.A., Sameljuk A.V., Sayi A. Phase relation studies in the CeO₂–La₂O₃ system at 1100–1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011, vol. 31, no. 7, pp. 1277–1283.
- Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Termodinamika metallurgicheskikh protsessov i sistem* [Thermodynamics of metallurgical processes and systems]. Moscow: ID MISiS, 2009, 519 p. (In Russ.).
- Barzakovskii V.P., Lapin V.V., Boikova A.I., Kurtseva N.N. *Diagrammy sostoyaniya silikatnykh sistem. Spravochnik. Vypusk 4: Troinnye oksidnye sistemy* [State diagrams of silicate systems. Reference book. Issue 4: Triple oxide systems]. Leningrad: Nauka, 1974, 514 p. (In Russ.).
- Slag Atlas*. 2nd Edition. Edited by Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH., 1995, pp. 44.
- Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic modeling of phase equilibria with oxide systems containing REM. Message 1. State diagrams of La₂O₃ oxide systems. *Vestnik*

- YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2014, vol. 14, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.).
23. Wu P., Pelton A.D. Coupled thermodynamic-phase diagram assessment of the rare earth oxide-aluminium oxide binary systems. *Journal of Alloys and Compounds*. 1992, vol. 179, no. 1-2, pp. 259–287.
 24. Mikhailov G.G., Makrovets L.A. Phase equilibria in interaction of barium with the components of liquid steel. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2014, vol. 14, no. 2, pp. 5–10. (In Russ.).
 25. Bůžek Z. Základní termodynamické údaje o metalurgických reakcích a o interakcích prvků v soustavách významných pro hutnickou teorii a praxi. *Hutnické actuality*. 1979, vol. 20, no. 1-2, pp. 3–111.
 26. Balkovoi Yu.V., Aleev R.A., Bakanov V.K. *Parametry vzaimodeistviya pervogo porjadka v rasplavakh na osnove zheleza: Obzor. inform* [Parameters of first order interaction in iron-based melts: Information overview]. Moscow: Chermetinformatsiya, 1987, 42 p. (In Russ.).
 27. *Steelmaking data sourcebook, Japan Society for the Promotion of Science*. The 19th Committee on Steelmaking. Gordon and Breach Science Publishers. NY, 1988, pp. 288–289.
 28. Wang L.J., Liu Y.Q., Wang Q., Chou K.C. Evolution mechanisms of MgO·Al₂O₃ inclusions by cerium in spring steel used in fasteners of high-speed railway. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 5, pp. 970–975.
 29. Park J.H., Todoroki H. Control of MgO·Al₂O₃ spinel inclusions in stainless steels. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 10, pp. 1333–1346.
 30. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic modeling of lanthanum interaction processes using iron-based metallic melts. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 12, pp. 877–884. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work is supported by the Government of the Russian Federation (Order No. 211 of 16 March 2013), agreement No. 02.A03.21.0011.
- Information about the authors:**
- G.G. Mikhailov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Material Science and Physical Chemistry of Materials (mikhailovgg@susu.ru)
- L.A. Makrovets**, Engineer of the Chair of Material Science and Physical Chemistry of Materials (makrovetsla@susu.ru)
- L.A. Smirnov**, Academician of Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (sekretar@uim-stavan.ru)

Received April 18, 2018

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЕРЕБЕГА ЗАЗОРА В ШАРНИРЕ КРИВОШИП – ШАТУН КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ

*Никитин А.Г.¹, д.т.н., профессор, директор института машиностроения
и транспорта (nikitin1601@yandex.ru)*

Абрамов А.В.¹, аспирант кафедры механики и машиностроения (alex.abram@mail.ru)

Гаряшин В.В.², к.т.н., начальник конструкторского отдела (vlgrsh@rambler.ru)

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

² **ООО «СпецСвязьОборудование»**
(654005, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 28А)

Аннотация. Уменьшение величины динамических нагрузок, возникающих при работе машин вообще и металлургических в частности, является одной из основных задач общей проблемы повышения их надежности и долговечности. Проведен анализ работы рычажных механизмов щековой дробилки, имеющих внутренние степени свободы, которые обусловлены наличием зазоров в шарнирах. Наличие неуравновешенных сил инерции движущихся масс при работе кривошипно-коромыслового механизма приводит к размыканию контактных поверхностей в сочленениях шатуна с кривошипом и к последующему пересопряжению рабочих поверхностей этой кинематической пары, которое сопровождается соударением масс подвижных звеньев. Возникают значительные динамические нагрузки, являющиеся причиной поломок деталей исполнительного механизма и источником упругих колебаний (вибраций) и генерации вредных акустических колебаний. С целью устранения влияния зазоров в шарнирах на возникновение дополнительных динамических сил необходимо выявить закономерности появления импульсных нагрузок. Закономерности появления таких нагрузок в кривошипно-коромысловых механизмах с зазорами в сочленениях кинематических пар из-за нарушения контакта в результате пересопряжения рабочих поверхностей устанавливаются путем кинестатического анализа. Проведен анализ работы шарнира кривошип – шатун с зазором кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки. На основании полученных результатов определено, что условием нарушения контакта в сочленении элементов кинематической пары кривошип – шатун является перемена знака силы реакции. Перебег зазора в шарнире кривошип – шатун происходит, когда оба звена находятся на одной линии. Определение положений звеньев механизма, при которых происходит пересопряжение контактных поверхностей шарнира кривошип – шатун, позволяет рационально использовать механизмы для выборки зазоров с упругими элементами, которые в течение всего цикла работы кривошипно-коромыслового механизма выбирают зазор в сочленении кривошип – шатун и тем самым предотвращают появление дополнительных динамических нагрузок. При этом повышается надежность работы щековой дробилки в целом.

Ключевые слова: щековая дробилка, кривошипно-коромысловый механизм, шарнир, зазор, пересопряжение поверхностей, дополнительные динамические силы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-466-469

Уменьшение величины динамических нагрузок, возникающих при работе машин вообще и металлургических в частности, является одной из основных задач общей проблемы повышения их надежности и долговечности.

Щековые дробилки служат для измельчения материала. В этих дробилках материал измельчается за счет раздавливания, раскалывания и частичного истирания в пространстве между двумя щеками при их периодическом сближении [1 – 10].

Характер движения подвижной щеки зависит от кинематических особенностей механизма щековой дробилки. За время использования щековых дробилок было предложено и осуществлено большое количество самых разнообразных кинематических схем механизма дробилок.

В основу классификации щековых дробилок, предложенной Б.В. Клушанцевым [9], положен характер

движения подвижной щеки, так как именно он определяет важнейшие технико-экономические параметры дробилок. При всем многообразии приведенных в классификации кинематических схем механизма качания подвижной щеки следует отметить, что все они реализуются с использованием в конструкции шарниров, которые обеспечивают подвижность деталей машины.

Наиболее распространенным механизмом качания подвижной щеки является кривошипно-коромысловый.

Наличие неуравновешенных сил инерции движущихся масс при работе кривошипно-коромыслового механизма приводит к размыканию контактных поверхностей в сочленениях шатуна с кривошипом, к последующему пересопряжению рабочих поверхностей этой кинематической пары, сопровождающемуся соударением масс подвижных звеньев и возникновению значительных динамических нагрузок. Эти нагрузки и яв-

ляются причиной поломок деталей исполнительного механизма, источником упругих колебаний (вибраций) и генерации вредных акустических колебаний.

В механизмах с беззазорным соединением кинематических пар (так называемых «идеальных») практически все нормальные силы, действующие на детали, можно отнести к квазистатическим.

Реальные механизмы всегда имеют внутренние степени свободы, связанные с наличием зазоров в кинематических парах, а также с имеющимися погрешностями изготовления – погрешностями формы сопрягаемых элементов деталей и погрешностями сборки. Эти обстоятельства являются существенными, так как обуславливают соударение деталей во время их относительного движения в зазоре при работе механизма и, как следствие, возникновение дополнительных динамических нагрузок [11 – 19].

Точное аналитическое решение задачи определения величины нагрузок, возникающих при соударении элементов кинематических пар, требует решения систем сложных нелинейных дифференциальных уравнений [12]. Однако при выявлении закономерности появления импульсных нагрузок и вызывающих их причин возможно применение линейных уравнений. Соответственно, возможна разработка конструктивных решений, предупреждающих возникновение импульсных нагрузок.

Закономерности появления импульсных нагрузок в кривошипно-коромысловых механизмах с зазорами в сочленениях кинематических пар из-за нарушения контакта в результате пересопряжения рабочих поверхностей устанавливаются кинетостатическим анализом следующим образом.

Пусть контакт элементов кинематической пары кривошип–шатун механизма (рис. 1) осуществляется в точке A . Тогда дальнейшее движение элементов может быть двух видов: с сохранением между ними

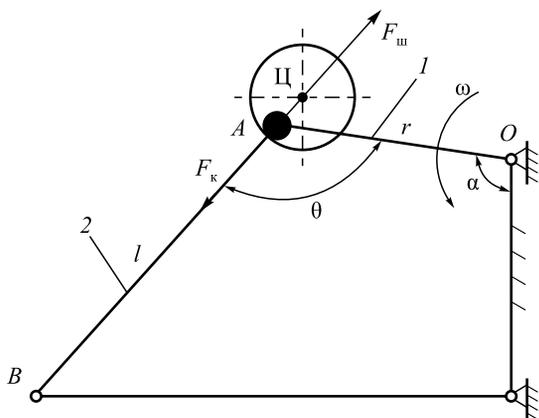


Рис. 1. Схема сил, действующих на шатун при произвольном положении элементов

Fig. 1. The scheme of forces acting on crank rod at random position of the elements

контакта или с его нарушением. То есть при некоторых положениях звеньев механизма происходит отрыв пальца кривошипа от обоймы шатуна, в результате кинематическая цепь разрывается и движение звеньев происходит независимо друг от друга до тех пор, пока кинематическая цепь вновь не замкнется. При этом произойдет соударение, поскольку скорость относительного движения пальца кривошипа в обойме шатуна не равна нулю.

Так как сила действия проходит через центр обоймы шатуна и действует по его оси [20], то точка контакта шатуна с кривошипом при прямом ходе совпадает с точкой пересечения оси шатуна с обоймой из-за того, что при таком положении не возникает силы, стремящейся сдвинуть шатун относительно пальца кривошипа (точка состояния равновесия). Аналогично, при обратном ходе точка состояния равновесия находится с противоположной стороны обоймы на линии продолжения оси шатуна.

Однако в процессе работы кривошипно-коромыслового механизма палец кривошипа постоянно смещается от точки состояния равновесия под действием крутящего момента от привода и происходит проскальзывание пальца по обойме шатуна. Тогда силу R , действующую на шатун со стороны кривошипа под прямым углом, можно разложить на две составляющие (рис. 2): нормальную R_n , направленную вдоль оси шатуна, и тангенциальную R_t , действующую по касательной к обойме шатуна в точке A . Эта сила и стремится сдвинуть шатун в положение равновесия.

Направление действия силы R , проходящей через центр обоймы шатуна, смещается от оси шатуна [21], а для определения ее величины необходимо приравнять нулю, согласно принципу Даламбера, сумму моментов сил, действующих на шатун, с учетом силы инерции шатуна и его момента инерции, а также веса шатуна, относительно точки B .

Так как $F_{2x} = m_2 a_{2x}$, $F_{2y} = m_2 a_{2y}$, $M_{u2} = \frac{m_2 l^2}{12} \varepsilon_2$, то

$$\begin{aligned} \sum M_B = M_{u2} + F_{2x} \frac{l}{2} \cos \gamma + F_{2y} \frac{l}{2} \sin \gamma - \\ - m_2 g \frac{l}{2} \sin \gamma - R l \sin \tau = m_2 \frac{l}{2} \left(\frac{l \varepsilon_2}{6} + a_{2x} \cos \gamma + \right. \\ \left. + a_{2y} \sin \gamma - g \sin \gamma \right) - R l \sin \tau = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_{2x} , a_{2y} – проекции ускорения центра масс шатуна на соответствующие оси; τ – угол, определяющий взаимное положение элементов; ε_2 – угловое ускорение шатуна; g – ускорение свободного падения.

Решая уравнение (1) относительно R , получим:

$$R = \frac{m_2 (a_{2x} \cos \gamma + a_{2y} \sin \gamma) - m_2 \frac{l}{6} \varepsilon_2 - m_2 g \sin \gamma}{2 \sin \tau}. \quad (2)$$

Таким образом, при заданных геометрических и кинематических параметрах кривошипно-коромыслового механизма рассчитывается величина силы реакции при различных положениях кривошипа.

В то же время, из анализа уравнения (2) и рис. 2 видно, что при $\Theta = k\pi$ (где k – целое число) угол τ меняет знак, проходя через ноль, где $\sin \tau = 0$. Следовательно, сила реакции меняет направление, при этом точка состояния равновесия перемещается на противоположную сторону обоймы шатуна. В этих положениях нарушается контакт и происходит свободное движение пальца кривошипа в поле зазора, который при восстановлении контакта ударяется об обойму шатуна, вызывая импульсную нагрузку. Отсюда следует, что условием нарушения контакта в сочленении элементов кинематической пары кривошип – шатун является перемена знака силы реакции. Перебег зазора в шарнире кривошип – шатун происходит, когда оба звена находятся на одной линии.

При соударении элементов шарниров возможны многократные их отскоки с последующим соударением, вызванные упругими свойствами звеньев.

Выводы. Описана причина возникновения дополнительных динамических сил при работе шарниров с зазорами. Проведен анализ работы шарнира кривошип–шатун с зазором кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки. На основании полученных результатов определено, при каких положениях звеньев механизма происходит пересопряжение контактных поверхностей шарнира кривошип – шатун.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner’s Handbook. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
2. Sandvik. Jaw-crushers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mining.sandvik.com/en/products/equipment/crushing-and-screening/jaw-crushers> (Дата обращения: 20.02.2017 г.).
3. Telsmith. Jaw-crushers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://telsmith.com/products/crushing-equipment/jaw-crushers> (Дата обращения: 20.02.2017 г.).
4. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др.; под ред. А.И. Целикова. – М.: Металлургия, 1987. – 440 с.
5. Пат. 2508941 РФ. Щековая дробилка / А.Г. Никитин, А.В. Витушкин, К.В. Тагильцев-Галета; заявл. 25.10.2012; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 7.
6. Patent 5542884 US. Mechanical overload protection device for machines, particularly jaw crushers / Bruno Gotz. Publ. 6.08.1996.
7. Пат. 2453370 РФ. Щековая дробилка / А.Г. Никитин, В.И. Люленков, Д.Ф. Сахаров, А.В. Витушкин; заявл. 30.11.2010; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17.
8. Patent 105682804 US. Jaw-crushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders. Publ. 15.06.2016.
9. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкции, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.

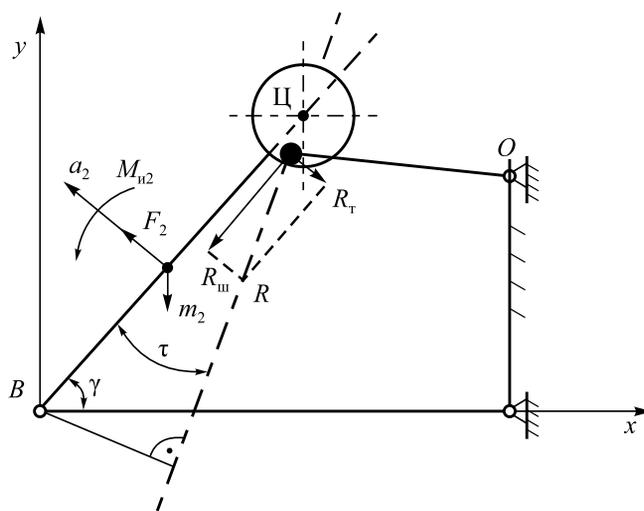


Рис. 2. Схема сил, действующих на шатун при смещении пальца от положения равновесия

Fig. 2. The scheme of forces acting on crank rod with pin offset from the equilibrium position

10. Brach R.M. Moments between impacting rigid bodies // Trans. ASME, I. Mech. Design. 1981. Vol. 103. No. 10. P. 812 – 817.
11. Budd C., Dux F. The effect of frequency and clearance variations on single-degree-of-freedom impact oscillator // J. Sound and vibrations. 1995. Vol. 184. No. 3. P. 475 – 502.
12. Dubowsky S., Moening M.F. An Experimental and Analytical Study of Impact Forces in Elastic Mechanical Systems with Clearances // Machine and Mechanisms Theory. 1978. Vol. 13. P. 451 – 465.
13. Никитин А.Г., Абрамов А.В., Гредина А.А., Горяшин В.В. Анализ работы шарнира кривошип – коренная опора кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 875 – 878.
14. Earles S.W.E., Wu C.L.S. Motion Analysis of a Rigid-Link Mechanism with Clearance at a Bearing, Using Lagrangian Mechanics and Digital Computation. Mechanism 1972. – London, England: Institution of Mechanical Engineers, 1973. P. 83 – 89.
15. Haines R.S. A Theory of Contact Loss at Revolute Joints with Clearance // Journal of Mechanical Engineering Science. 1980. Vol. 22. No. 3. P. 235.
16. Perera O., Seering W.F. Prevention of Impact in Bearings of Four-Bar Linkages // ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design. 1983. Vol. 105. No. 3. P. 592 – 598.
17. Shaw S.W., Holmes P.J. A periodically forced impact oscillator with large dissipation // ASME, J. Of appl. Mech. 1983. Vol. 50. P. 849 – 857.
18. Никитин А.Г., Бойко Д.Ю., Вексесер А.Ю. Математическая модель работы шарнира кривошип – коренная опора кривошипно-кулисного механизма щековой дробилки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 10. С. 66, 67.
19. Никитин А.Г., Лактионов С.А., Бойко Д.Ю., Вексесер А.Ю. Особенности работы шарнира кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки // Вестник машиностроения. 2009. № 12. С. 48, 49.
20. Теория механизмов и машин / Под ред. В.К. Фролова. – М.: Высшая школа, 1987. – 511 с.
21. Сергеев В.И., Юдин К.М. Об одной модели механизмов с зазорами // Машиноведение. 1970. № 5. С. 28 – 32.

Поступила 8 ноября 2017 г.

MATHEMATICAL MODEL OF CRANK-TYPE JOINT CLEARANCE OVERTRAVEL ASSESSMENT IN OSCILLATING CRANK DRIVE OF JAW CRUSHER

A.G. Nikitin¹, A.V. Abramov¹, V.V. Garyashin²

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² LLC “SpetsSvyazOborudovanie”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The magnitude decrease of the dynamic loads that arise during the operation of machines in general and metallurgical ones in particular, is one of the main tasks of general problem of increasing their reliability and durability. The analysis of work of lever mechanisms of jaw crusher with internal degrees of freedom conditioned by presence of clearances in hinges, was made. It has shown that presence of unstable forces of locomotive masses inertia during work of oscillating crank drive results in breakage of pin surfaces in joint of piston-rod with a crank, and in subsequent change of working surfaces of this kinematics pair, followed by hitting of the masses of movable links and in generation of considerable dynamic load, providing the reason of breakages of details of executive mechanism and the source of resilient vibration (vibrations) and harmful acoustic vibration generation. With the purpose of removal of influence of clearances in hinges on the origin of additional dynamic forces it is necessary to reveal regularities of impulse loads appearance. Regularities of such loads appearance in crank-type mechanisms with clearances in joints of kinematics pairs, caused by contact fault as a result of change in working surfaces contact, can be determined by kinetic static analysis. Analysis of work of crank-type hinge with clearance of oscillating crank drive of jaw crusher was conducted. Based on the analysis results it was determined, that contact fault in joint of crank-piston-rod kinematics pair elements is conditioned by change of sign of reaction force. Clearance overtravel in a crank-type hinge takes place when both links are on one line. Determination of mechanism links positions, at which there is interconnection of crank-type hinge contact surfaces, allows to use mechanisms rationally for selection of clearances with resilient elements that during all work cycle of oscillating crank drive choose clearance in crank-type joint and prevent additional dynamic load occurrence. That promotes reliability of jaw crusher operation in whole.

Keywords: jaw crusher, oscillating crank drive, hinge, clearance, surfaces interconnection, additional dynamic forces.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-466-469

REFERENCES

1. Jack de la Vergne. *Hard rock miner's handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
2. *Sandvik. Jaw-crushers*. Electronic resource. Available at URL: <http://mining.sandvik.com/en/products/equipment/crushing-and-screening/jaw-crushers> (Accessed: 20.02.2017). (In Russ.).
3. *Telsmith. Jaw-crushers*. Electronic resource. Available at URL: <http://telsmith.com/products/crushing-equipment/jaw-crushers> (Accessed: 20.02.2017). (In Russ.).
4. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. etc. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh t. T. 1. Mashiny i agregaty domennykh tsekhov* [Machines and units of metallurgical plants. In 3 vols. Vol. 1. Machines and units for blast-furnace production]. Tselikov A.I. ed. Moscow: Metallurgiya, 1987, 440 p. (In Russ.).
5. Nikitin G., Vitushkin A.V., Tagil'tsev-Galetka K.V. *Shchekovaya drobilka* [Jaw crusher]. Patent no. 2508941 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 7. (In Russ.).
6. Bruno Gotz. *Mechanical overload protection device for machines, particularly jaw crushers*. Patent 5542884 US. Publ. 6.08.1996.
7. Nikitin A.G., Lyulenkov V.I., Sakharov D.F., Vitushkin A.V. *Shchekovaya drobilka* [Jaw crusher]. Patent no. 2453370 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 17. (In Russ.).
8. Lindstrom Anders. *Sandvik intellectual property*. Patent 105682804 US. Publ. 15.06.2016.
9. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Drobniki. Konstruktsii, raschet, osobennosti ekspluatatsii* [Crushers. schemes, design, operational features]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
10. Brach R.M. Moments between impacting rigid bodies. *Trans. ASME, I. Mech. Design*. 1981, vol. 103, no. 10, pp. 812–817.
11. Budd C., Dux F. The effect of frequency and clearance variations on single-degree-of-freedom impact oscillator. *J. Sound and vibrations*. 1995, vol. 184, no. 3, pp. 475–502.
12. Dubowsky S., Moening M.F. An experimental and analytical study of impact forces in elastic mechanical systems with clearances. *Machine and Mechanisms Theory*. 1978, vol. 13, pp. 451–465.
13. Nikitin A.G., Abramov A.V., Gredina A.A., Garyashin V.V. Analysis of crank hinge – radical bearing of crank-beam mechanism of jaw crusher. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 875–878. (In Russ.).
14. Earles S.W.E., Wu C.L.S. Motion analysis of a rigid-link mechanism with clearance at a bearing, using Lagrangian mechanics and digital computation. mechanisms. *Institution of Mechanical Engineers*. London, 1973, pp. 83–89.
15. Haines R.S. A Theory of contact loss at revolute joints with clearance. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1980, vol. 22, no. 3, p. 235.
16. Perera O., Seering W.F. Prevention of impact in bearings of four-bar linkages. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*. 1983, vol. 105, no. 3, pp. 592–598.
17. Shaw S.W., Holmes P.J. A periodically forced impact oscillator with large dissipation. *ASME, J. Of appl. Mech.* 1983, vol. 50, pp. 849–857.
18. Nikitin A.G., Boiko D.Yu., Vekesser A.Yu. Mathematical operational model of the joint crank – bearing crank-rocker mechanism of a jaw crusher. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 10, pp. 66–67. (In Russ.).
19. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Boiko D.Yu., Vekesser A.Yu. Features of operation of hinge of oscillating crank-type drive of jaw crusher. *Vestnik mashinostroeniya*. 2009, no. 12, pp. 48–49. (In Russ.).
20. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of machines and mechanisms]. Frolov V.K. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 511 p. (In Russ.).
21. Sergeev V.I., Yudin K.M. On a model of mechanisms with clearances. *Mashinovedenie*. 1970, no. 5, pp. 28–32. (In Russ.).

Information about the authors:

A.G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Institute of Mechanical Engineering and Transport (nikitin1601@yandex.ru)

A.V. Abramov, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (alex.abram@mail.ru)

V.V. Garyashin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Design Department (vlgrsh@rambler.ru)

Received November 8, 2017

УДК 625.144.5 (088.8)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПИТАТЕЛЕЙ-ГРОХОТОВ ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

Ляшенко В.И.¹, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела,
старший научный сотрудник (vilyashenko2017@gmail.com)

Дятчин В.З.², к.т.н., доцент кафедры «Менеджмент и социальная работа» (dsveta49@mail.ru)

Франчук В.П.³, д.т.н., профессор кафедры «Горные машины и инжиниринг» (franchuk@nmu.org.ua)

¹ ГП «УкрНИПИПромтехнологии»

(52204, Украина, Днепропетровская обл., г. Желтые Воды, Бульвар Свободы, 37)

² Институт предпринимательства «Стратегия»

(52204, Днепропетровская обл., г. Желтые Воды, ул. Гагарина, 38)

³ Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

(49005, г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19)

Аннотация. Представлены основные научные и практические результаты совершенствования вибрационных питателей-грохотов для горно-металлургической промышленности на основе материалов динамического расчета вибрационного грохота-питателя с двумя разнонаправленными самобалансными вибраторами. Описаны методы теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, выполнение расчетов и технико-экономических обоснований, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам. Предложены математическое моделирование и расчет параметров вибрационного питателя типа ПВГ. Рекомендовано при выборе динамических параметров питателя использовать коэффициент вибротранспортирования, который принимают в пределах (1,5 – 3,5)g, а при тяжелых режимах нагружения – до 5g. Показано, что при приготовлении коксовой мелочи в корпусе дробления из его бункера поступает от 10 до 50 % мелкого материала крупностью 0 – 3 мм, который дополнительно переизмельчается, снижая качество кокса. Вибрационный питатель-грохот с пространственным колебанием рабочего органа позволит повысить эффективность грохочения материала на 15 – 20 %, улучшить самоочищение сита. Вынуждающие силы вибровозбудителей направлены под разными углами (15 и 45°) к просеивающей поверхности и приложены друг относительно друга на расстоянии, равном половине ширины короба, т.е. 600 мм. Установлено, что в резонансном режиме при постоянной амплитуде с ростом частоты коэффициент режима виброперемещения возрастает по квадратичной зависимости, при рабочей частоте 100 рад/с он также увеличивается от загрузочного края питателя к разгрузочному и от одного борта к другому, причем значения его изменяются в пределах 2,62 – 2,84.

Ключевые слова: горно-металлургическая промышленность, вибрационные питатели-грохоты, динамический расчет, эффективность работ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470-477

В горно-металлургической промышленности грохоты используются на обогатительных и агломерационных фабриках, закладочных комплексах для приготовления твердеющей закладки, в строительной индустрии и на металлургических заводах. Особенности свойств скальных сыпучих материалов (твердость, абразивность, форма кусков и др.) выдвигают повышенные требования к конструкциям вибрационных грохотов для разделения этих материалов на классы крупности в процессе обогащения или получения готового продукта [1]. С учетом разнообразия свойств перерабатываемого материала, условий использования оборудования и его назначения выдвигаются специфические требования к конструкциям. Поэтому совершенствование конструкций грохотов для горнорудной и металлургической промышленности с учетом конструкции короба, просеивающей поверхности, привода и упругих элементов, обеспечивающих высокую надежность

в работе, износостойкость, повышение эффективности грохочения материала, – важная научная и практическая задача, требующая решения [2].

Для решения поставленных задач были выполнены анализ литературных источников, методов теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, расчеты и технико-экономические обоснования, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам [3].

Для исследования были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить математическое и физическое моделирование, а также расчет параметров вибрационного питателя-грохота типа ПВГ.

2. Разработать параметрический ряд комплексов вибрационных питателей-грохотов для горно-металлургической промышленности.

* В работе принимали участие И.К. Поддубный, В.Н. Платонов, А.Х. Дудченко, А.Г. Скотаренко и др.

3. Предложить новый комплекс грохочения, активации (за счет грохочения и подачи коксовой мелочи требуемого класса крупности в дробилку) питателем-грохотом типа ПГВ-3/15.

Питатели и грохоты-питатели со сложным движением рабочей поверхности применяются двух типов – с одним (установленным параллельно рабочей плоскости) и двумя двухвальными вибраторами (установленными под углом β_0 к рабочей поверхности и имеющими различное направление вектора возмущающего усилия). Изменение направления вектора осуществляется за счет разворота дебалансов одного вибратора друг относительно друга (рис. 1).

Сила инерции вибраторов определится из выражений

$$P_1 = 2m_0 r_1 \omega^2 \sin(\omega t + \xi_1), \quad P_2 = 2m_0 r_2 \omega^2 \sin(\omega t + \xi_2),$$

где ω – угловая частота вынужденных колебаний; ξ_1 , ξ_2 – углы разворота дебалансов относительно начального положения.

Вследствие разворота дебалансов появляется возмущающий момент вибраторов

$$M_1 = m_0 r_1 \omega^2 s \cos(\beta_1) \cos(\omega t + \xi_1),$$

$$M_2 = m_0 r_2 \omega^2 s \cos(\beta_2) \cos(\omega t + \xi_2).$$

Результирующая сила проходит через центр тяжести грохота. Прямолинейные колебания происходят в направлении осей x и z . Кроме того, питатель-грохот совершает поворотные колебания вокруг продольной, боковой и вертикальной осей φ_x , φ_y , φ_z . Масса грохота-

питателя с корпусами вибровозбудителей будет m , динамические моменты инерции вокруг трех осей грохота – соответственно I_x , I_y , I_z . Не вдаваясь в подробности определения жесткости других элементов, обозначим их жесткости в соответствии с направлением колебаний как c_x , c_z , c_{φ_x} , c_{φ_y} , c_{φ_z} .

Систему будем рассматривать без неупругих сопротивлений, которые согласно принципу Вольтерры будем учитывать в конце чисто упругого решения, приняв коэффициенты жесткости упругих связей в виде комплексного числа, в котором мнимая часть учитывает неупругие сопротивления в системе. Составим уравнения движения системы, пользуясь уравнением Лагранжа II рода, приняв в качестве обобщенных линейные координаты x и z , а в качестве поворотных φ_x , φ_y , φ_z . Кинетическая (T) и потенциальная (Π) энергия системы описывается следующими выражениями:

$$T = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{z}^2}{2} + \frac{I_x \dot{\varphi}_x^2}{2} + \frac{I_y \dot{\varphi}_y^2}{2} + \frac{I_z \dot{\varphi}_z^2}{2} + \frac{2m_0 [\dot{x} - b_1 \dot{\varphi}_z + r_1 \omega \cos(\omega t + \xi_1) \cos(\beta_0 + \beta_1)]^2}{2} + \frac{2m_0 [\dot{z} - b_1 \dot{\varphi}_x + r_1 \omega \cos(\omega t + \xi_1) \sin(\beta_0 + \beta_1)]^2}{2} + \frac{2m_0 [\dot{x} + b_2 \dot{\varphi}_z + r_2 \omega \cos(\omega t + \xi_2) \sin(\beta_0 + \beta_2)]^2}{2} + \frac{2m_0 [\dot{z} + b_2 \dot{\varphi}_x + r_2 \omega \cos(\omega t + \xi_2) \sin(\beta_0 + \beta_2)]^2}{2};$$

$$\Pi = \frac{c_x x^2}{2} + \frac{c_z z^2}{2} + \frac{c_{\varphi_x} \varphi_x^2}{2} + \frac{c_{\varphi_y} \varphi_y^2}{2} + \frac{c_{\varphi_z} \varphi_z^2}{2}.$$

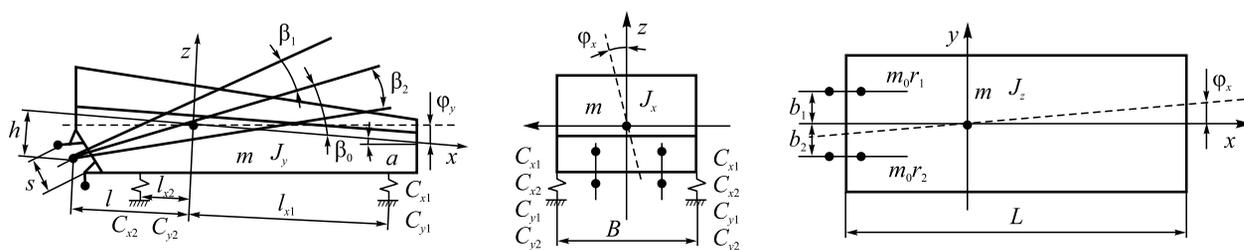


Рис. 1. Динамическая расчетная схема грохота с двумя разнонаправленными самобалансными вибровозбудителями:

h – расстояние от центра вращения дебалансных масс до центра масс грохота по высоте; b_1 и b_2 – расстояние центра вращения дебалансных масс вибровозбудителей по ширине грохота относительно центра его масс; β – базовый угол направления вынуждающей силы вибровозбудителя; β_1 и β_2 – исследуемые углы направления вынуждающих сил; l – расстояние от центра вращения дебалансных масс до центра масс грохота по его длине; C_{x1} , C_{y1} и C_{x2} , C_{y2} – жесткости упругих опор, соответственно, в передней и задней частях грохота; l_{x1} , l_{x2} , l_z – точки расположения упругих опор относительно центра масс грохота соответственно по его длине и ширине; φ_x , φ_y , φ_z – поворотные колебания корпуса относительно осей X , Y и Z ; $m_0 r_1$ и $m_0 r_2$ – кинестатические моменты первого и второго вибровозбудителей; s – расстояние между осями вращения дебалансных масс первого и второго вибровозбудителей

Fig. 1. Dynamic calculation scheme of the screen with two different-directional self-balancing vibrators:

h – distance from the rotation center of unbalanced masses to the center of mass of the screen in height; b_1 and b_2 – distance of the rotation center of unbalanced masses of vibrators in width of the screen relative to the center of its mass; β – basic angle of the excitatory force direction of the vibration exciter; β_1 and β_2 – investigated angles of forces direction; l – distance from rotation center of the unbalanced masses to the center of mass of the screen along its length; C_{x1} , C_{y1} and C_{x2} , C_{y2} – stiffness of elastic supports, respectively, in front and in rear of the screen; l_{x1} , l_{x2} , l_z – location points of the elastic supports in relation to the center of mass of the screen, respectively, along its length and width; φ_x , φ_y , φ_z – rotary oscillations of the box relative to the axes X , Y and Z ; $m_0 r_1$ and $m_0 r_2$ – kinetostatic moments of the first and second vibroexcluders; s – distance between the rotation axes of the unbalanced masses of the first and second vibroexcluders

Внешняя обобщенная сила запишется как

$$Q_{\varphi_y} = M_1 + M_2 = m_0 r_1 \omega^2 s \sin(\beta_1) \cos(\omega t + \xi_1) + m_0 r_2 \omega^2 s \sin(\beta_2) \cos(\omega t + \xi_2).$$

Используя уравнение Лагранжа II рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j, \quad (1)$$

получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движение системы, после преобразования которых будем иметь

$$\begin{aligned} (m + 2m_0)\ddot{x} + 2m_0(b_1 + b_2)\ddot{\varphi}_z + c_x x &= \\ = 2m_0\omega^2 [r_1 \cos(\beta_0 + \beta_1) \sin(\omega t + \xi_1) + & \\ + r_2 \cos(\beta_0 + \beta_2) \sin(\omega t + \xi_2)]; & \\ (m + 2m_0)\ddot{z} + 2m_0(b_1 + b_2)\ddot{\varphi}_x + c_z z &= \\ = 2m_0\omega^2 [r_1 \sin(\beta_0 + \beta_1) \sin(\omega t + \xi_1) + & \\ + r_2 \sin(\beta_0 + \beta_2) \sin(\omega t + \xi_2)]; & \\ [I_{\varphi_x} + 2m_0(b_1^2 + b_2^2)]\ddot{\varphi}_x + 2m_0(b_1 + b_2)\ddot{z} + c_{\varphi_x} \varphi_x &= \\ = m_0\omega^2 [b_1 r_1 \sin(\omega t + \xi_1) \sin(\beta_0 + \beta_1) + & \\ + b_2 r_2 \sin(\omega t + \xi_2) \sin(\beta_0 + \beta_2)]; & \\ [I_{\varphi_z} + 2m_0(b_1^2 + b_2^2)]\ddot{\varphi}_z + 2m_0(b_1 + b_2)\ddot{x} + c_{\varphi_z} \varphi_z &= \\ = m_0\omega^2 [b_1 r_1 \sin(\omega t + \xi_1) \cos(\beta_0 + \beta_1) + & \\ + b_2 r_2 \sin(\omega t + \xi_2) \cos(\beta_0 + \beta_2)]; & \\ I_{\varphi_y} \varphi_y + c_{\varphi_y} \varphi_y = m_0 r_1 \omega^2 s \sin \beta_1 \cos(\omega t + \xi_2) + & \\ + m_0 r_2 \omega^2 s \sin \beta_2 \cos(\omega t + \xi_2). & \end{aligned}$$

С целью упрощения дальнейших выкладок примем параметры грохота-питателя, какие обычно применяются на практике, а именно: $b_1 = -b_2 = b$; $r_1 = r_2 = r$; $\beta_2 = -\beta_1$.

Тогда уравнения значительно упростятся и примут вид

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c_x x &= 2m_0 r \omega^2 [\cos(\beta_0 + \beta_1) \sin(\omega t + \xi_1) + \\ &+ \cos(\beta_0 - \beta_1) \sin(\omega t + \xi_2)]; \\ M\ddot{z} + c_z z &= 2m_0 r \omega^2 [\sin(\beta_0 + \beta_1) \sin(\omega t + \xi_1) + \\ &+ \sin(\beta_0 - \beta_1) \sin(\omega t + \xi_2)]; \\ I_x \ddot{\varphi}_x + c_{\varphi_x} \varphi_x &= m_0 r b \omega^2 [\sin(\omega t + \xi_1) \sin(\beta_0 + \beta_1) - \\ &- \sin(\omega t + \xi_2) \sin(\beta_0 - \beta_1)]; \\ I_z \ddot{\varphi}_z + c_{\varphi_z} \varphi_z &= m_0 r b \omega^2 [\sin(\omega t + \xi_1) \cos(\beta_0 + \beta_1) - \\ &- \sin(\omega t + \xi_2) \cos(\beta_0 - \beta_1)]; \\ I_{\varphi_y} \varphi_y + c_{\varphi_y} \varphi_y &= m_0 r s \omega^2 \sin \beta_1 \times \\ &\times [\cos(\omega t + \xi_1) - \cos(\omega t + \xi_2)], \end{aligned}$$

где $M = m + 4m_0$, $I_x = I_{\varphi_x} + 4m_0 b^2$, $I_z = I_{\varphi_z} + 4m_0 b^2$, $I_y = I_{\varphi_y} + 4m_0 (h^2 + l^2)$ – приведенные масса и моменты инерции грохота-питателя.

Принимая во внимание, что $\xi_1 = -\beta_1$, $\xi_2 = -\beta_2 = \beta_1$, получим уравнения, описывающие движения системы, в виде

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c_x x &= R_x \sin(\Psi_x); \\ M\ddot{z} + c_z z &= R_z \sin(\Psi_z); \\ I_x \ddot{\varphi}_x + c_{\varphi_x} \varphi_x &= R_{\varphi_x} \sin(\Psi_{\varphi_x}); \\ I_z \ddot{\varphi}_z + c_{\varphi_z} \varphi_z &= R_{\varphi_z} \cos(\Psi_{\varphi_z}); \\ I_y \ddot{\varphi}_y + c_{\varphi_y} \varphi_y &= R_{\varphi_y} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} R_x &= 2m_0 r \omega^2 \sqrt{[\cos(\beta_0) \cos(\beta_1)]^2 + [\sin(\beta_0) \sin(\beta_1)]^2}; \\ R_z &= 4m_0 r \omega^2 \sqrt{[\sin(\beta_0) \cos(\beta_1)]^2 + [\cos(\beta_0) \sin(\beta_1)]^2}; \\ R_{\varphi_x} &= \sqrt{2} m_0 r b \omega^2 \cos(\beta_0) \sin(2\beta_1); \\ R_{\varphi_z} &= \sqrt{2} m_0 r b \omega^2 \sin(\beta_0) \sin(2\beta_1); \\ R_{\varphi_y} &= 2m_0 r s \omega^2 [\sin(\beta_1)]^2 - \end{aligned}$$

приведенные возмущающие силы и моменты сил; $\Psi_x = \omega t + \theta_x$; $\Psi_z = \omega t + \theta_z$; $\Psi_{\varphi_x} = \omega t + \theta_{\varphi_x}$; $\Psi_{\varphi_z} = \omega t + \theta_{\varphi_z}$ – фазы колебаний.

В свою очередь $\theta_x = \arctg \left[\frac{\sin(\beta_0) \sin(\beta_1)^2}{\cos(\beta_0) \cos(\beta_1)^2} \right]$, $\theta_z = \arctg \left[\frac{\cos(\beta_0) \sin(\beta_1)^2}{\sin(\beta_0) \cos(\beta_1)^2} \right]$, $\theta_{\varphi_x} = -\pi/4$, $\theta_{\varphi_z} = -\pi/4$ – сдвиг фаз, вызванных особенностью конструкции привода.

Уравнения (2) являются независимыми. Принимая, как указывалось ранее, упругие элементы в виде комплексных чисел [4], где комплексная составляющая учитывает неупругие сопротивления, приведем систему (2) к виду

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + \bar{c}_x x &= R_x \sin(\Psi_x); \quad M\ddot{z} + \bar{c}_z z = R_z \sin(\Psi_z); \\ I_x \ddot{\varphi}_x + \bar{c}_{\varphi_x} \varphi_x &= R_{\varphi_x} \sin \Psi_{\varphi_x}; \quad I_z \ddot{\varphi}_z + \bar{c}_{\varphi_z} \varphi_z = R_{\varphi_z} \cos \Psi_{\varphi_z}; \\ I_y \ddot{\varphi}_y + \bar{c}_{\varphi_y} \varphi_y &= R_{\varphi_y} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

где эквивалентные упругие связи и неупругие сопротивления представлены в виде соотношений

$$\begin{aligned} \bar{c}_x &= c_x (1 + i\psi); \quad \bar{c}_z = c_z (1 + i\psi); \quad \bar{c}_{\varphi_x} = c_{\varphi_x} (1 + i\psi); \\ \bar{c}_{\varphi_z} &= c_{\varphi_z} (1 + i\psi); \quad \bar{c}_{\varphi_y} = c_{\varphi_y} (1 + i\psi). \end{aligned}$$

Параметр ψ определяется как круговой коэффициент поглощения энергии в упругих связях. Грохоты-перегрузатели работают длительное время, поэтому, пренебрегая переходными процессами, решение уравнений принимаем в виде

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{a}_x \sin \Psi_x; \quad \bar{z} = \bar{a}_z \sin \Psi_z; \quad \bar{\varphi}_x = \bar{\varphi}_x \sin \Psi_{\varphi_x}; \\ \bar{\varphi}_z &= \bar{\varphi}_z \cos \Psi_{\varphi_z}; \quad \bar{\varphi}_y = \bar{\varphi}_y \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя решение (4) в уравнения (3), получим значения амплитуд перемещений в комплексном виде

$$\begin{aligned} \bar{a}_x &= \frac{R_x}{\bar{c}_x - M\omega^2}; \quad \bar{a}_z = \frac{R_z}{\bar{c}_z - M\omega^2}; \quad \bar{\varphi}_x = \frac{R_{\varphi x}}{\bar{c}_{\varphi x} - I_x}; \\ \bar{\varphi}_z &= \frac{R_{\varphi z}}{\bar{c}_{\varphi z} - I_z}; \quad \bar{\varphi}_y = \frac{R_{\varphi y}}{\bar{c}_{\varphi y} - I_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая амплитуду перемещений как модуль комплексного числа, а сдвиг фаз как его аргумент, из выражений (5) будем иметь значения амплитуд колебаний

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{R_x}{M\sqrt{(p_x^2 - \omega^2)^2 + (\psi p_x^2)^2}}; \\ a_z &= \frac{R_z}{M\sqrt{(p_z^2 - \omega^2)^2 + (\psi p_z^2)^2}}; \\ \varphi_x &= \frac{R_{\varphi x}}{I_x\sqrt{(p_{\varphi x}^2 - \omega^2)^2 + (\psi p_{\varphi x}^2)^2}}; \\ \varphi_z &= \frac{R_{\varphi z}}{I_z\sqrt{(p_{\varphi z}^2 - \omega^2)^2 + (\psi p_{\varphi z}^2)^2}}; \\ \varphi_y &= \frac{R_{\varphi y}}{I_y\sqrt{(p_{\varphi y}^2 - \omega^2)^2 + (\psi p_{\varphi y}^2)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

и сдвига фаз

$$\begin{aligned} \vartheta_x &= \arctg \frac{-\psi p_x^2}{p_x^2 - \omega^2}; \quad \vartheta_z = \arctg \frac{-\psi p_z^2}{p_z^2 - \omega^2}; \\ \vartheta_{\varphi x} &= \arctg \frac{-\psi p_{\varphi x}^2}{p_{\varphi x}^2 - \omega^2}; \quad \vartheta_{\varphi z} = \arctg \frac{-\psi p_{\varphi z}^2}{p_{\varphi z}^2 - \omega^2}; \\ \vartheta_{\varphi y} &= \arctg \frac{-\psi p_{\varphi y}^2}{p_{\varphi y}^2 - \omega^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Амплитуды линейных и поворотных колебаний при частотах, близких к резонансу системы, резко возрастают (рис. 2).

В рабочем диапазоне частот ($\omega = 100 - 150$ рад/с) амплитуда колебаний по всем координатам стабилизируется, т.е. работа грохота-питателя будет более устойчивой. Зависимость фазы от частоты колебаний изменяется от нуля до $-\pi/2$ в дорезонансном и резонансном режимах, в районе рабочих частот колебаний она составляет $-\pi$. С учетом конструктивных сдвигов фаз, суммарная фаза в рабочем диапазоне частот составляет около нуля для линейных перемещений и порядка 2 рад для поворотных колебаний. Движение грохота-питателя в установившемся режиме описывается следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} x &= a_x \sin(\omega t + \theta_x + \vartheta_x); \quad z = a_z \sin(\omega t + \theta_z + \vartheta_z); \\ \varphi_x &= \varphi_x \sin(\omega t + \theta_{\varphi x} + \vartheta_{\varphi x}); \quad \varphi_z = \varphi_z \sin(\omega t + \theta_{\varphi z} + \vartheta_{\varphi z}); \\ \varphi_y &= \varphi_y \sin(\omega t + \theta_{\varphi y} + \vartheta_{\varphi y}). \end{aligned}$$

В рабочем диапазоне частот колебания имеют сдвиг фаз, показанный на рис. 2, з, по своему назначению их можно отнести на перемещения, влияю-

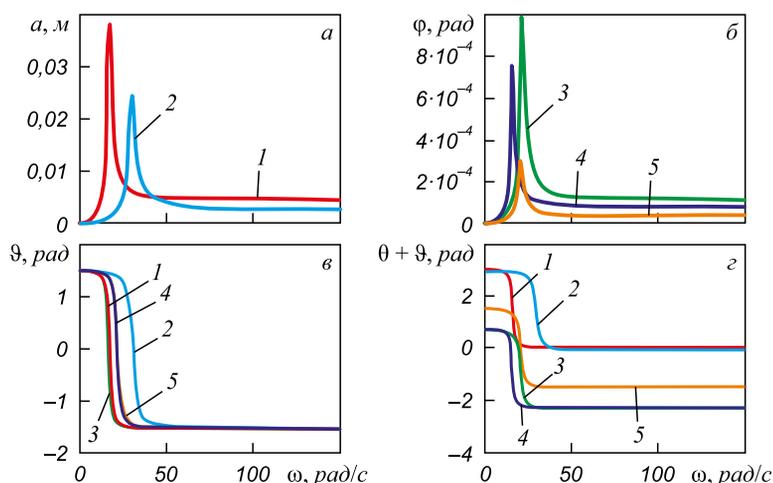


Рис. 2. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики грохота-питателя:

a – линейные перемещения вдоль рабочей поверхности (1) и по нормали к рабочей поверхности (2); *б* – поворотные колебания вокруг оси *x* (3); оси *z* (4); оси *y* (5); *в* – фазо-частотные характеристики грохота-питателя; *г* – суммарный сдвиг фаз, конструктивный и режимный (номера кривых соответствуют указанным перемещениям)

Fig. 2. Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the feeder-screen:

a – linear displacements along the working surface (1) and along the normal to the working surface (2); *б* – rotary oscillations around *x* axis (3); *z* axis (4); *y* axis (5); *в* – phase-frequency characteristics of the feeder-screen; *г* – total phase shift, constructive and regime (curve numbers correspond to the indicated displacements)

щие на вертикальные колебания (рис. 3, а, кривая 2, рис. 3, б, кривые 3, 5), на перемещения продольные (рис. 3, а, кривая 1) и влияющие на поперечные перемещения (рис. 3, б, кривая 4). Коэффициент режима вибротранспортирования зависит от амплитуды нормальных колебаний к рабочей поверхности. Суммарные перемещения любой точки рабочей поверхности в нормальном направлении составят $Z_n = z + X\varphi_y + Y\varphi_x$, где $-l \leq X \leq L - l$; $-B/2 \leq Y \leq B/2$ – координаты точки на рабочей поверхности, отсчитанные от центра тяжести грохота-питателя.

Амплитуда результирующих вертикальных колебаний определится как

$$Z_n = a_z [\sin(\omega t) \cos(\theta_z + \vartheta_z) + \cos(\omega t) \sin(\theta_z + \vartheta_z)] + X\varphi_y [\sin(\omega t) \cos(\vartheta_{\varphi_y}) + \cos(\omega t) \sin(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})] + Y\varphi_x [\sin(\omega t) \cos(\vartheta_{\varphi_x}) + \cos(\omega t) \sin(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})].$$

Складывая гармоники колебаний, получим $Z_n = A_n \times \sin(\omega t + \Theta_n)$, где

$$A_n = \sqrt{[a_z \cos(\theta_z + \vartheta_z) + X\varphi_y \cos(\vartheta_{\varphi_y}) + Y\varphi_x \cos(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})]^2 + [a_z \sin(\theta_z + \vartheta_z) + X\varphi_y \sin(\vartheta_{\varphi_y}) + Y\varphi_x \sin(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})]^2} \quad (8)$$

$$\Theta_n = \arctg \left[\frac{a_z \sin(\theta_z + \vartheta_z) + X\varphi_y \sin(\vartheta_{\varphi_y}) + Y\varphi_x \sin(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})}{a_z \cos(\theta_z + \vartheta_z) + X\varphi_y \cos(\vartheta_{\varphi_y}) + Y\varphi_x \cos(\theta_{\varphi_x} + \vartheta_{\varphi_x})} \right]$$

– результирующая амплитуда нормальных колебаний и сдвиг фаз.

По известной амплитуде и частоте нормальных колебаний коэффициент режима вибротранспортирования определится как [5]

$$\Gamma = \frac{A_n \omega^2}{g \cos \alpha}; \quad (9)$$

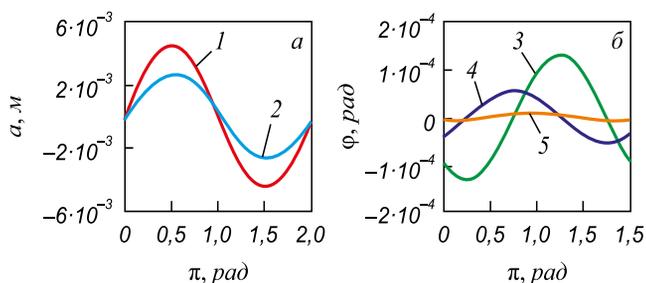


Рис. 3. Осциллограммы движения грохота-питателя: а – линейные перемещения по оси x (1) и по оси z (2); б – поворотные колебания вокруг осей x, z, y

Fig. 3. Oscilloscopes of of the feeder-screen motion: а – linear movements along x (1) axis and along z (2) axis; б – turning oscillations around x, z, y axes

здесь g – ускорение свободного падения, α – угол наклона рабочей поверхности к горизонту.

Амплитуда продольных колебаний по длине грохота-питателя остается постоянной, т.е. скорость движения материала в продольном направлении также будет постоянной. Что же касается поперечных колебаний, то, как следует из выражения $y = X\varphi_z$, они зависят от положения по длине грохота-питателя и даже меняют направление. Благодаря этому нарушается упорядоченное движение материала и улучшаются условия прохождения мелких фракций через колосниковую решетку.

При выборе динамических параметров питателя (расчете и выборе параметров привода) обычно ориентируются на коэффициент вибротранспортирования, который принимают в пределах $\Gamma = (1,5 - 3,5)g$, при тяжелых режимах нагружения принимают $\Gamma = 5g$. Обычно назначается частота колебаний ω (по скорости асинхронного двигателя), и по выбранному коэффициенту виброперемещения находится требуемая величина кинетостатического момента. Работа грохота-перегрузателя в рабочем, далеко зарезонансном режиме, характеризуется высокой стабильностью колебаний и тем, что углы сдвига фаз, зависящие от режима работы грохота-перегрузателя ϑ , очень близки к $-\pi$. Тогда, пренебрегая частотой собственных колебаний по сравнению с вынуждающей частотой и неупругими сопротивлениями в уравнениях (6), преобразуя уравнения (8) и (9), получим приближенное значение кинетостатического момента

$$m_0 r = \frac{Mg\Gamma \cos \alpha}{4r\omega^2 \sqrt{[\sin(\beta_0) \cos(\beta_1)]^2 + [\cos(\beta_0) \sin(\beta_1)]^2}}.$$

По найденному кинетостатическому моменту $m_0 r$ определяются размеры дебалансов [6].

Рассмотрим комплекс грохочения и подачи коксовой мелочи в дробилку питателя-грохота типа ПГВ-3/15.

Основной причиной переизмельчения коксовой мелочи является попадание в дробилку мелкой фракции материала 0 – 3 мм. Для исключения указанного недостатка необходимо отсеивать мелкую фракцию кокса при выпуске его из бункера и подавать в дробилку только крупные куски. Отсеянную коксовую мелочь, минуя дробилку, необходимо подавать на нижний ленточный конвейер, соединив ее с дробленым материалом, полученным после прохождения его через дробилку. Исходя из требований технологического процесса в корпусе дробления кокса (производительность питания дробилки 15 т/ч, крупность дробленого кокса 3 мм, его влажность в бункере до 17 %) разработан новый комплекс механизмов для выпуска материала из бункера, отсева мелкой фракции (0 – 3 мм), сбора ее и подачи на нижний конвейер, а также формирование потока крупной фракции и подачи ее в дробилку.

Комплекс грохочения представляет собой одно-массную колебательную систему зарезонансного типа, которая включает (рис. 4): короб (рабочий орган), вибровозбудитель, упругую систему, элементы подвески, электропривод, эластичные решетки, раму электропривода, опорный кронштейн вибролотка.

Питатель-грохот может компоноваться с одним или двумя вибровозбудителями, соответственно он оснащается таким же количеством электродвигателей. Короб представляет собой сварную металлоконструкцию со сплошным основным днищем в загрузочной и разгрузочной частях и просеивающей поверхностью в средней части. С целью расширения технологических возможностей устройства оно снабжено дополнительной сплошной рабочей поверхностью, расположенной под просеивающей поверхностью. На разгрузочном участке рабочего органа расположена воронка для приема подрешетного продукта, при этом угол наклона дополнительной сплошной рабочей поверхности (α_2) больше, чем наклон площадок каскадов просеивающей поверхности (α_1).

В качестве возбудителя колебаний рабочего органа используются двухвальные вибровозбудители с направленной вынуждающей силой. Упругая система питателя-грохота состоит из четырех цилиндрических амортизаторов переменной жесткостью по высоте. В результате вибрационного воздействия рабочего ор-

гана на находящийся на нем сыпучий материал происходит выпуск материала из бункера, просеивание его мелкой фракции и транспортирование крупных кусков в дробилку. Созданный вибрационный комплекс приготовления коксовой мелочи установлен в корпусе дробления Криворожского металлургического комбината, (ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог») и внедрен с положительными результатами работы. Так, приемное устройство подрешетного продукта с наклонными внутренними площадками и с наклонным днищем доставочного устройства снижает переизмельчение мелкой фракции материала и обеспечивает самотечное движение потока подрешетного продукта в приемный конвейер дробленого материала; вибралоток для подачи крупных кусков кокса в дробилку снижает износ рабочей поверхности лотка за счет движения материала по нему с подбрасыванием и уменьшает металлоемкость конструкции.

Новые научные и практические результаты работ по созданию и внедрению вибрационных питателей-грохотов (ГПВ-350, ГПВ-100, ППВГ-40/400, ППВГ-200/400) внедрены на горных предприятиях Украины, Балаклавского рудоуправления, ОАО «Приаргунское горно-химическое объединение» и ПО «Уралзолото» (Российская Федерация) и др. [7].

Разработчиками технической документации и изготовителями вибрационных питателей-грохотов яв-

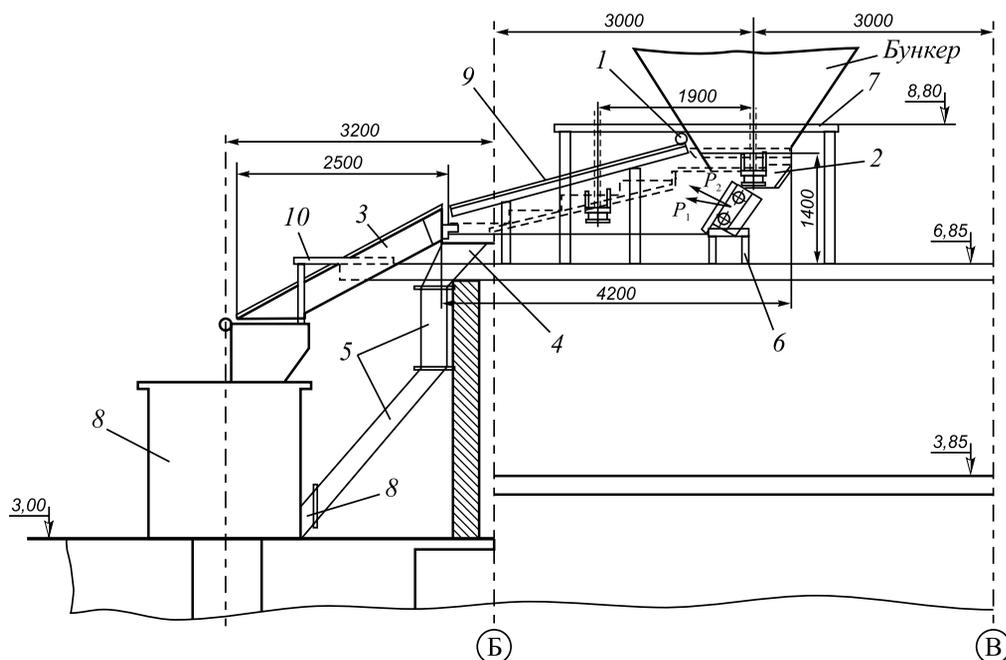


Рис. 4. Комплекс грохочения и подачи коксовой мелочи в дробилку:

1 – механизм регулирования слоя материала; 2 – вибративный питатель-грохот ППВ-3/15; 3 – вибралоток; 4 – приемное устройство; 5 – устройство доставки подрешетного продукта; 6 – опорная рама электродвигателя; 7 – опорная рама питателя-грохота; 8 – дробилка; 9 – укрытие; 10 – кронштейн; Б, Б – обозначение осей корпуса дробления

Fig. 4. Complex of screening and feeding of breeze coke into a crusher:

1 – mechanism of the material layer regulation; 2 – vibrating feeder-screen PPGV-3/15; 3 – vibrating tray; 4 – receiver; 5 – delivery device of the sublattice product; 6 – reference frame of the electric motor; 7 – support frame of the feeder-screen; 8 – crusher; 9 – shelter; 10 – bracket; Б, Б – denote axes of the crushing body

ляются украинские НИИ и промышленные предприятия [8 – 11], а также специализированные организации развитых горнодобывающих стран [12 – 22].

Выводы. В процессе проведения экспериментальных исследований показано, что при изготовлении коксовой мелочи в корпусе дробления из его бункера поступает от 10 до 50 % мелкого материала крупностью 0 – 3 мм, который дополнительно переизмельчается, снижая качество кокса. Вибрационный питатель-грохот с пространственным колебанием рабочего органа позволит повысить эффективность грохочения материала на 15 – 20 %, улучшить самоочищение сита. Установлено, что в зарезонансном режиме при постоянной амплитуде с ростом частоты коэффициент режима виброперемещения возрастает по квадратичной зависимости, при рабочей частоте 100 рад/с он также увеличивается от загрузочного края питателя к разгрузочному и от одного борта к другому, причем значение его изменяется в пределах 2,62 – 2,84. Обосновано, что при выборе динамических параметров питателя (расчете и выборе параметров привода) используют коэффициент вибротранспортирования, который принимают в пределах $\Gamma = (1,5 - 3,5)g$, а при тяжелых режимах нагружения – $\Gamma = 5g$. Частота колебаний назначается по скорости асинхронного двигателя; по выбранному коэффициенту виброперемещения находится требуемая величина кинестатического момента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по горнорудному делу / Под ред. В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. – М.: Недра, 1983. – 816 с.
2. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
3. Вибродоставочные комплексы в технологиях разработки рудных месторождений / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, И.К. Поддубный и др.; под ред. В.И. Белоброва. – Киев: Наукова думка, 1989. – 167 с.
4. Добыча и переработка урановых руд / Под общей ред. А.П. Чернова. – Киев: «Адеф–Украина», 2001. – 238 с.
5. Надутый В.П., Сухарев В.В., Белошин Д.В. Анализ ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями машин и оборудования // Геотехническая механика: Сб. науч. тр. – Днепропетровск : ИГТМ НАН Украины, 2012. Вып. 103. С. 152 – 159.
6. Братухина Н.А., Плотников И.С., Демченко И.И. Выбор оптимальных значений параметров грохота с канатным движущимся полем // Изв. вуз. Горный журнал. 2015. № 3. С. 111 – 118.
7. Юдин А.В. Оценка параметров свободных колебаний просеивающей поверхности грохота с консольно заземленными колебаниями // Изв. вуз. Горный журнал, 2016. № 5. С. 52 – 59.
8. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Совершенствование конструкций вибрационных питателей-грохотов для горной промышленности // Горная промышленность. 2014. № 2. С. 100 – 102.
9. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Создание и внедрение вибрационных питателей-грохотов для горной промышленности // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 5. С. 72 – 80.
10. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Технические средства для добычи и переработки рудных материалов. Сообщение 2 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 33 – 41.
11. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Совершенствование конструкций грохотов для горнорудной и металлургической промышленности // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2017. № 7. С. 22 – 30.
12. Bruderlein O. Siebklassierung mit Gropsiebmaschinen // Aufbereitungstechnik. 1982. Bd. 23. No. 7. S. 353 – 358.
13. Irvin R.A. Large vibrating screen design-manufacturing and maintenance consideration // Mining Engineering. 1984. Vol. 36. No. 9. P. 1341 – 1346.
14. Algelsreiter J. Funktionsanalyse einer Siebmaschineneuer Bauart // TIZ-Fachber. 1985. Bd. 109. No. 11. S. 861 – 863.
15. Singh B.K., Marx G., Dahm W. Hochgeschwindigkeitssiebung zur Heerstellung von mehreren Kornfraktionen auf einer Siebbahn // Aufbereitungstechnik. 1985. No. 7. S. 405 – 409.
16. Crissman H. Vibrating screen selection // Pit and Quarry. 1986. Vol. 78. No. 12. P. 39 – 44.
17. Kerlin H.-P. Hoshleistungssiebung mit einem Vibrations-Stangensizer // Aufbereit. Techn. 1986. Bd. 27. No. 6. S. 330 – 336.
18. Bendzko J. Einsatz von Spezial-Gummisieb belagen bei der Klasiierung unter verschiedener Schuttguter im Mittel- und Feinkorbereich // Aufbereit. Techn. 1986. Bd. 27. No. 6. S. 337 – 345.
19. Thormahlen P. Fine screening of hygroscopic materials with the Mogens Sizer // Aufbereitung-Technic. 1989. No. 11. S. 698 – 704.
20. Banaszewski T., Schollbach A.E. Schwingungsanalyse von Maschinen mit selbstsynchronisierenden Unwuchterregern // Aufbereitungstechnik. 1998. Vol. 39. No. 8. S. 383 – 393.
21. Hassani F.P., Benzaazoua M., Nokken M. Evaluation of the effect of sodium silicate addition to mine Backfill, Gelfill // 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul, 2011. Vol. 1. P. 317 – 324.
22. Szponder D.K., Trybalski K. The determination of physico-chemical and mineralogical properties of fly ash used in mining industry // 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul, 2011. Vol. 2. P. 629 – 639.

Поступила 27 октября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, PP. 470-477.

IMPROVEMENT OF VIBRATING FEEDERS-SCREENS FOR MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

V.I. Lyashenko¹, V.Z. Dyatchin², V.P. Franchuk³

¹State Enterprise “Ukrainian Research and Design and Exploration Institute of Industrial Technology”, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

²Institute of Entrepreneurship “Strategy”, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

³National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, Ukraine

Abstract. The main scientific and practical results of the improvement of vibrating feeders-screens for mining and metallurgical industry are presented on the basis of dynamic calculation of the vibrating feeder-screen with two differently directed self-balancing vibrators. Methods of theoretical generalizations are described using mathematical statis-

tics, physical and mathematical modeling, computation and feasibility studies, laboratory and full-scale experimental studies, industrial tests in the conditions of operating enterprises using standard and new methods. Mathematical modeling and calculation of the parameters of a vibrating feeder of the PVG type are proposed. It is recommended when choosing dynamic parameters of the feeder, to use the vibration transmission coefficient, which is taken within the limits (1.5–3.5)g, and in heavy loading modes, is up to 5g. It is shown that during preparation of breeze coke in the crushing body, from 10 to 50 % of fine material is received from its bunker with a particle size of 0–3 mm, which is additionally re-milled, reducing the quality of coke. A vibrating feeder-screen with a spatial oscillation of the working element will increase the efficiency of screening of the material by 15–20 % and will improve the self-cleaning of the screen. The driving forces of the excitors are directed at different angles of 15 and 45° to the screening surface and are attached from each other at a distance equal to half width of the box, i.e. 600 mm. It is established that in the resonance mode at a constant amplitude with increasing frequency the coefficient of the vibro-displacement regime increases according to a quadratic dependence, at a working frequency of 100 rad/s it also increases from the loading edge of the feeder to the unloading and from one side to another, the value of which varies within 2.62–2.84.

Keywords: mining and metallurgical industry, vibrating feeders-screens, dynamic calculation, work efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470-477

REFERENCES

1. *Shravochnik po gornorudnomu delu* [Handbook of mining]. Grebenik V.A., Pyzh'yanov Ya.S., Erofeev I.E. eds. Moscow: Nedra, 1983, 816 p. (In Russ.).
2. Vaisberg L.A. *Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov* [Design and calculation of vibrating screens]. Moscow: Nedra, 1986, 144 p. (In Russ.).
3. Poturaev V.N., Dyrda V.I., Poddubnyi I.K. etc. *Vibrodostavochnye komplekсы v tekhnologiyakh rasrabotki rudnykh mestorozhdenii* [Vibrodelivery complexes in ore mining technologies]. Belobrov V.I. ed. Kiev: Naukova dumka, 1989, 167 p. (In Ukr.).
4. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud* [Mining and processing of uranium ores]. Chernov A.P. ed. Kiev: Adef-Ukraina, 2001, 238 p. (In Ukr.).
5. Nadutyi V.P., Sukharev V.V., Belyushin D.V. Analysis of the impact interaction of lump rock mass with the working surfaces of machines and equipment. *Geotekhnicheskaya mekhanika: sb. nauchnykh tr.* Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy, 2012, vol. 103, pp.152–159(In Ukr.).
6. Bratukhina N.A., Plotnikov I.S., Demchenko I.I. Selection of optimal values of the parameters of screen with a rope moving field. *Izv. VUZov. Gornyi zhurnal.* 2015, no.3, pp.111–118. (In Russ.).
7. Yudin A.V. Estimation of the parameters of free oscillations of screening surface of the screen with console-pinned oscillations *Izv. VUZov. Gornyi zhurnal.* 2016, no. 5, pp. 52–59.(In Russ.).
8. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Improvement of vibration feeders-screens for the mining industry. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no. 2, pp.100–102. (In Russ.).
9. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Creation and introduction of vibration feeders-screens for the mining industry. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 5, pp. 72–80. (In Russ.).
10. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Technical means for extraction and processing of ore materials. Report 2. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no. 4, pp. 33–41. (In Russ.).
11. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Improvement of screens for mining and metallurgical industry. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, no. 7, pp. 22–30. (In Russ.).
12. Bruderlein O. Siebklassierung mit Gropsiebmaschinen. *Aufbereitung Technik.* 1982, bd. 23, no. 7, S. 353–358. (In Germ.).
13. Irvin R.A. Large vibrating screen design-manufacturing and maintenance consideration. *Mining Engineering.* 1984, vol. 36, no. 9, pp. 1341–1346.
14. Algelsreiter J. Funktionsanalyse einer Seibmaschinen neuer Bauart. *TIZ-Fachber.* 1985, bd. 109, no. 11, S. 861–863. (In Germ.).
15. Singh B.K., Marx G., Dahm W. Hochgeschwindigkeitssiebung zur Heerstellung von mehreren Kornfraktionen auf einer Siebbahn. *Aufbereitung Technik.* 1985, no. 7, S. 405–409. (In Germ.).
16. Crissman H. Vibrating screen selection. *Pit and Quarry.* 1986, vol. 78, no. 12, pp. 39–44.
17. Kerlin H.-P. Hoshleistungssiebung mit einem Vibrations-Stangensizer. *Aufbereit. Techn.* 1986, bd. 27, no. 6, S. 330–336. (In Germ.).
18. Bendzko J. Einsatz von Spezial-Gummisieb belagen bei der Klasierung unter verschiedener Schuttguter im Mittel – und Feinkorbereich. *Aufbereit. Techn.* 1986, bd. 27, no. 6, S. 337–345. (In Germ.).
19. Thormahlen P. Fine screening of hygroscopic materials with the Mogensen Sizer. *Aufbereit. Techn.* 1989, no. 11, pp. 698–704.
20. Banaszewski T., Schollbach A.E. Schwingungsanalyse von Maschinen mit selbstsynchronisierenden Unwuchterregern. *Aufbereit. Techn.* 1998, vol. 39, no. 8, S. 383–393. (In Germ.).
21. Hassani F.P., Benzaazoua M., Nokken M. Evaluation of the effect of sodium silicate addition to mine Backfill, Gelfill. *22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul,* 2011, vol. 1, pp. 317–324.
22. Szponder D.K., Trybalski K. The determination of physico-chemical and mineralogical properties of fly ash used in mining industry. *22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul,* 2011, vol. 2, pp. 629–639.

Acknowledgement. I.K. Poddubnyi, V.N. Platonov, A.H. Dudchenko, A.G. Skotareno, etc. participated in the work.

Information about the authors:

V.I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Division, Senior Researcher (vilyashenko2017@gmail.com)

V.Z. Dyatchin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Management and social work" (dsveta49@mail.ru)

V.P. Franchuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Mining machines and engineering" (franchuk@nmu.org.ua)

Received October 27, 2017

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ПИЛОТНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ERP-СИСТЕМЫ

Зимин В.В.¹, д.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем (zimin.1945@mail.ru)

Буркова И.В.², д.т.н., ведущий научный сотрудник (irbur27@mail.ru)

Митьков В.В.¹, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем (vita-m@ngs.ru)

Зимин А.В.³, к.т.н., директор (iva70221@rambler.ru)

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

² Институт проблем управления РАН
(117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65)

³ ООО «Аудит ЭнергоНовосибирск»
(630005, Россия, Новосибирск, ул. Татарская, 83)

Аннотация. К числу важных задач создания ERP-системы относится планирование пилотного тестирования. Пилотные (их также называют экспериментальными) проекты имеют целью тестирование основных функций создаваемой системы ограниченным количеством «продвинутых» пользователей. Ключевой задачей при планировании пилотного тестирования является определение его объема. Если объем пилотного проекта мал, тогда принципиально важные функции системы могут быть не проверены, и вероятность обнаружения существенных ошибок при полном внедрении будет высокой. Если же объем велик, то значительно увеличивается объем работ по реализации пилотного проекта, и не будет необходимой скорости и гибкости тестирования основных функций, из-за которых и организуется пилотное тестирование, и его эффективность будет близка к эффективности полного внедрения. Приводится математическая постановка задачи определения объема пилотного тестирования, которая опирается на результаты решения задач формирования портфеля ИТ-сервисов и календарного планирования создания ERP-системы крупной металлургической компании. Решением рассматриваемой задачи являются множества подлежащих проверке сервисов и связей между ними, удовлетворяющие заданному ограничению на объем ресурсов, выделенных на реализацию тестирования, и доставляющие оптимум заданному критерию. Процедура решения задачи базируется на методе сетевого программирования, который опирается на структурно-подобное сетевое представление критерия и ограничений. Приведены процедура и пример решения исследуемой задачи, в котором отдельные оценочные задачи решены методом дихотомического программирования. Полученные приближенные решения поставленной задачи могут быть улучшены посредством решения двойственной задачи сетевого программирования. С целью нахождения глобального оптимума исходной задачи может быть использован метод ветвей и границ, в котором в качестве границ применяются значения целевой функции найденных приближенных решений. Рассмотренная задача может быть обобщена посредством учета предпочтений потребителей ИТ-сервисов относительно качества проверки различных связей сервисов. Эти предпочтения могут быть учтены с помощью введения «весов» соответствующих связей. Общая схема решения задачи при этом не меняется.

Ключевые слова: пилотное тестирование, портфель ИТ-сервисов, ERP-система, задача оптимизации, метод сетевого программирования, структурно-подобные функции, оценочная задача, обобщенная задача сетевого программирования, метод ветвей и границ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-478-484

Пилотные (экспериментальные) проекты предназначены для тестирования ограниченным количеством пользователей неполного множества сервисов создаваемой системы (основных функциональных возможностей системы). То есть содержание пилотного проекта задается множеством ИТ-сервисов (функциональный объем тестирования), подлежащих проверке, и множеством пользователей, которые будут проверять функционирование этих сервисов [1 – 4]. Если объем пилотного проекта слишком мал, тогда принципиально важные функции системы будут недостаточно протестированы, а вероятность обнаружения существенных ошибок при полном внедрении будет высока. Если предметная об-

ласть слишком велика, то значительно увеличивается объем работ по реализации пилотного проекта, то есть не будет необходимой скорости и гибкости, из-за которых и организуется пилотное проектирование, и его эффективность будет близка к эффективности полного внедрения.

Пусть $S = \{S_j | j = \overline{1, m}\} = \{\{s_{ji} | i = \overline{1, n_j}\} | j = \overline{1, m}\}$ – портфель сервисов создаваемой ERP-системы (j – номер бизнес-процесса; i – номер сервиса в бизнес-процессе); расписание разработки сервисов портфеля, являющееся результатом формирования и календарного планирования проектирования сервисов, представлено на рис. 1 [5].

Обозначим через $t_{ji} = t(s_{ji})$ длительность времени разработки сервиса s_{ji} , а через T^p – момент времени начала пилотного тестирования. Момент времени T_{ji} окончания проектирования сервиса s_{ji} определяется соотношением

$$T_{ij} = \sum_{k=1}^i t_{jk}. \quad (1)$$

Тогда множество $S(T^p)$ сервисов, разработанных к моменту времени T^p начала пилотного тестирования, из которых может быть сформирован пилотный проект, определяется соотношением

$$S(T^p) = \{S_j(T^p) \mid j = \overline{1, m}\} = \{\{s_{ji} \mid T_{ji} \leq T^p\} \mid j = \overline{1, m}\} \subset S. \quad (2)$$

Для упрощения обозначений перенумеруем сервисы множества $S(T^p)$ так, что

$$S(T^p) = \{S_j(T^p) \mid j = \overline{1, m}\} = \left\{ \left\{ s_{ji} \mid i = \overline{1, n_j^p} \right\} \mid j = \overline{1, n_j^p} \right\}. \quad (3)$$

Обозначим через $q_{ji}^{rk} = q(s_{ji}, s_{rk})$ количество связей между активами сервисов s_{ji}, s_{rk} .

В соответствии с определением пилотное тестирование предполагает проверку ограниченным числом «продвинутых» пользователей корректного функционирования «базовых» функций создаваемой системы. Это означает, что задача формирования объема пилотного проекта состоит в определении тех сервисов из $S(T^p)$ и тех связей этих сервисов, которые должны быть подвергнуты тестированию [6 – 17].

Формализация задачи. Введем следующие переменные:

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если сервис } s_{ji} \text{ подлежит тестированию;} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

и

$$x_{ji}^{rk} = \begin{cases} 1, & \text{если связи сервиса } s_{ji} \text{ с } s_{rk} \text{ подлежат} \\ & \text{тестированию;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Общее количество связей между сервисами, подлежащее проверке при пилотном тестировании, описывается функцией

$$q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} \left(\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} q_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \right) x_{ji}. \quad (6)$$

Функциональный объем пилотного тестирования зависит от величины затрат, выделяемых на его проведение. Под затратами можно, в частности, понимать

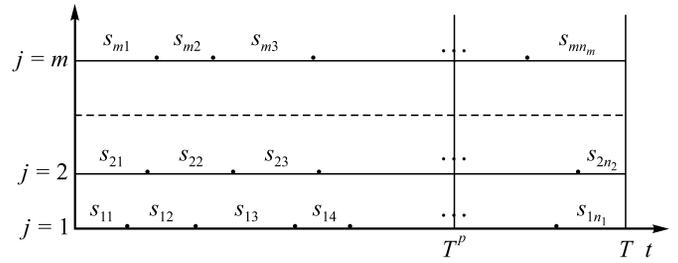


Рис. 1. Календарный план разработки ИТ-сервисов

Fig. 1. Schedule for the development of IT services

количество рабочих человеко-дней компетентных пользователей, которое руководство предприятия может позволить себе изъять из текущей основной деятельности. Пусть c^* – предельный объем допустимых затрат. Обозначим через $c_{ji}^{rk} = c(s_{ji}, s_{rk})$ затраты, требуемые для проверки связей между сервисами s_{ji} и s_{rk} . Общие затраты на проверку связей, подлежащих тестированию, будут выражены как

$$c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} \left(\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} c_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \right) x_{ji}. \quad (7)$$

Фрагмент матрицы связей между активами множества сервисов $S(T^p)$ и значений соответствующих затрат на тестирование этих связей приведены в табл. 1. Далее, как в табл. 1, значения q (количество связей) приведены в первой строке, значения c (затрат) – во второй.

Положим также, что руководство каждого бизнес-процесса накладывает ограничения на общее количество n_j^* подлежащих тестированию сервисов бизнес-процесса и на количество \bar{n}_j^* сервисов смежных бизнес-процессов, с которыми должны быть проверены связи тестируемых сервисов. Рассмотрим далее следующий вариант формализации рассматриваемой задачи:

$$q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} \left(\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} q_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \right) x_{ji} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} q_{ji} x_{ji} = \sum_{j=1}^m q_j \rightarrow \max; \quad (8)$$

$$c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} \left(\sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} c_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \right) x_{ji} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} c_{ji} x_{ji} = \sum_{j=1}^m c_j \leq c^*; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j^p} x_{ji} \geq n_j^*, \quad j = \overline{1, m}; \quad (10)$$

$$\sum_{r \neq j} \sum_{r=1}^{n_r^p} x_{ri} \geq \bar{n}_j^*, \quad j = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Задача состоит в нахождении таких $x_{ji}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n_j^p}$, и $x_{ji}^{rk}, j, r = \overline{1, m}, i, k = \overline{1, n_j^p}$, которые максимизируют количество q проверяемых связей между тестируемыми сервисами при заданных допустимых затратах c^* и ограничениях (10) и (11).

Фрагмент матрицы связей между активами сервисов множества $S(T^p)$

Table 1. Fragment of matrix of links between the assets of the $S(T^p)$ set services

	s_{11}	s_{12}	...	$s_{1n_1^p}$	s_{21}	s_{22}	...	$s_{2n_2^p}$	...	s_{m1}	s_{m2}	...	$s_{mn_m^p}$
s_{11}	q_{11}^{11} c_{11}^{11}	q_{11}^{12} c_{11}^{12}	...	$q_{11}^{1n_1^p}$ $c_{11}^{1n_1^p}$	q_{11}^{21} c_{11}^{21}	q_{11}^{22} c_{11}^{22}	...	$q_{11}^{2n_2^p}$ $c_{11}^{2n_2^p}$	...	q_{11}^{m1} c_{11}^{m1}	q_{11}^{m2} c_{11}^{m2}	...	$q_{11}^{mn_m^p}$ $c_{11}^{mn_m^p}$
s_{12}	q_{12}^{11} c_{12}^{11}	q_{12}^{12} c_{12}^{12}	...	$q_{12}^{1n_1^p}$ $c_{12}^{1n_1^p}$	q_{12}^{21} c_{12}^{21}	q_{12}^{22} c_{12}^{22}	...	$q_{12}^{2n_2^p}$ $c_{12}^{2n_2^p}$	...	q_{12}^{m1} c_{12}^{m1}	q_{12}^{m2} c_{12}^{m2}	...	$q_{12}^{mn_m^p}$ $c_{12}^{mn_m^p}$
...
$s_{1n_1^p}$	$q_{1n_1^p}^{11}$ $c_{1n_1^p}^{11}$	$q_{1n_1^p}^{12}$ $c_{1n_1^p}^{12}$	...	$q_{1n_1^p}^{1n_1^p}$ $c_{1n_1^p}^{1n_1^p}$	$q_{1n_1^p}^{21}$ $c_{1n_1^p}^{21}$	$q_{1n_1^p}^{22}$ $c_{1n_1^p}^{22}$	...	$q_{1n_1^p}^{2n_2^p}$ $c_{1n_1^p}^{2n_2^p}$	...	$q_{1n_1^p}^{m1}$ $c_{1n_1^p}^{m1}$	$q_{1n_1^p}^{m2}$ $c_{1n_1^p}^{m2}$	...	$q_{1n_1^p}^{mn_m^p}$ $c_{1n_1^p}^{mn_m^p}$
s_{21}	q_{21}^{11} c_{21}^{11}	q_{21}^{12} c_{21}^{12}	...	$q_{21}^{1n_1^p}$ $c_{21}^{1n_1^p}$	q_{21}^{21} c_{21}^{21}	q_{21}^{22} c_{21}^{22}	...	$q_{21}^{2n_2^p}$ $c_{21}^{2n_2^p}$	...	q_{21}^{m1} c_{21}^{m1}	q_{21}^{m2} c_{21}^{m2}	...	$q_{21}^{mn_m^p}$ $c_{21}^{mn_m^p}$
s_{22}	q_{22}^{11} c_{22}^{11}	q_{22}^{12} c_{22}^{12}	...	$q_{22}^{1n_1^p}$ $c_{22}^{1n_1^p}$	q_{22}^{21} c_{22}^{21}	q_{22}^{22} c_{22}^{22}	...	$q_{22}^{2n_2^p}$ $c_{22}^{2n_2^p}$	...	q_{22}^{m1} c_{22}^{m1}	q_{22}^{m2} c_{22}^{m2}	...	$q_{22}^{mn_m^p}$ $c_{22}^{mn_m^p}$

Схема решения задачи. Для решения задачи (8) – (11) применим метод сетевого программирования, который предполагает последовательное решение цепочки оценочных задач, формируемой на основе структурно подобного сетевого представления целевой функции и ограничений [18, 19]. Для упрощения последующих вычислений положим, что затраты c_j^* на тестирование связей сервисов j -го процесса определяются пропорционально числу этих связей:

$$c_j^* = \frac{c^* \sum_{i=1}^{n_j^p} \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} c_{ji}^{rk}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} c_{ji}^{rk}}. \quad (12)$$

Теперь для задачи (8) – (11) цепочки оценочных задач можно реализовать в три этапа.

1. Последовательное решение для каждого сервиса каждого процесса задачи определения подлежащих проверке связей:

$$q_{ji} = \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} q_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \rightarrow \max; \quad (13)$$

$$c_{ji} = \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^{n_r^p} c_{ji}^{rk} x_{ji}^{rk} \leq c_j^*, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n_j^p}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j^p} x_{ji} \geq n_j^*, \quad j = \overline{1, m}; \quad (15)$$

$$\sum_{r \neq j} \sum_{i=1}^{n_j^p} x_{ri} \geq \overline{n_j^*}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Структурно-подобное сетевое представление функций q_{ji} и c_{ji} дано на рис. 2.

2. Последовательное решение m ($j = \overline{1, m}$) задач:

$$q_j = \sum_{i=1}^{n_j^p} q_{ji} x_{ji} \rightarrow \max; \quad (17)$$

$$c_j = \sum_{i=1}^{n_j^p} c_{ji} x_{ji} \leq c_j^*, \quad j = \overline{1, m}; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j^p} x_{ji} \geq n_j^*, \quad j = \overline{1, m}; \quad (19)$$

$$\sum_{r \neq j} \sum_{i=1}^{n_j^p} x_{ri} \geq \overline{n_j^*}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (20)$$

Структурно-подобное сетевое представление функций q_j и c_j дано на рис. 3.

3. Последовательное решение $(m - 1)$ оценочной задачи для определения решения задачи:

$$q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} q_{ji} x_{ji} \rightarrow \max; \quad (21)$$

$$c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j^p} c_{ji} x_{ji} \leq c^*. \quad (22)$$

Структурно-подобное сетевое представление функций q и c дано на рис. 4.

Чтобы улучшить полученное на основе предложенной цепочки оценочных задач приближенное решение, можно воспользоваться методом ветвей и границ, в котором в качестве границ использовать значения q найденного приближенного решения [20].

Пример. Рассмотрим случай двух процессов ($m = 2$), соответственно, с тремя и четырьмя сервисами ($n_1^p = 3, n_2^p = 4$). Матрица связей между сервисами и соответствующие этим связям затраты на тестирование приведены в табл. 2.

Положим $c^* = 260$, тогда

$$c_1^* = \frac{260 \cdot 55}{130} = 110, \quad (23)$$

а $c_2^* = 260 - 110 = 150$.

В соответствии со схемой решения на первом этапе решаем семь задач (13) – (16) для каждого сервиса согласно сетевому представлению рис. 2. Положим $n_1^* = 2, \bar{n}_1^* = 1$ для первого процесса и $n_2^* = 3, \bar{n}_2^* = 2$.

Решение для сервиса s_{11} :

1	2	10
	8	27
0	0	8
	19	
x_{11}^{12}	0	1
x_{11}^{11}		

Оценка функций $q_{11}^{(11)(12)(13)}$ и $c_{11}^{(11)(12)(13)}$:

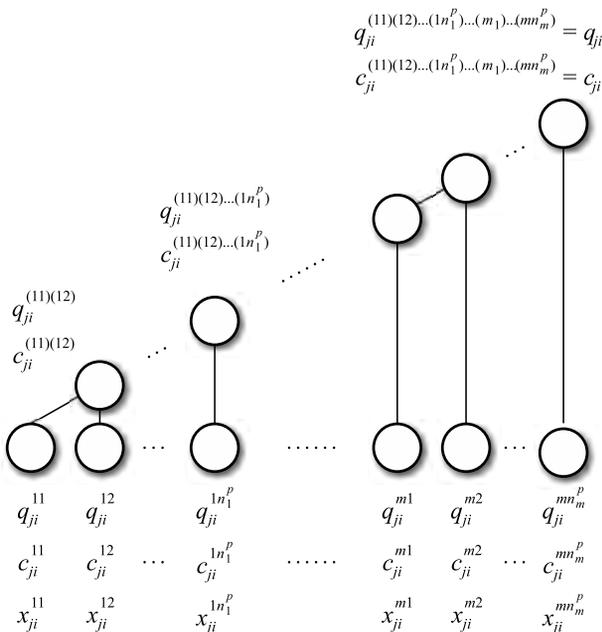


Рис. 2. Сетевое представление функций q_{ji} и c_{ji}

Fig. 2. Network representation of q_{ji} and c_{ji} functions

1	4	12	6	14
	15	34	23	42
0	0	8	2	10
	0	19	8	27
x_{11}^{13}	00	10	01	11
x_{11}^{11}, x_{11}^{12}				

Решение с оценками (8, 19) доминирует решение (6, 23).

Оценка функций $q_{11}^{(11)(12)(13)(21)(22)}$ и $c_{11}^{(11)(12)(13)(21)(22)}$:

1	3	11	15	13	7	15	17
	12	31	20	39	27	46	54
0	0	8	2	10	4	12	14
	0	19	8	29	15	34	42
x_{11}^{22}	000	100	010	110	001	101	111
$x_{11}^{11}, x_{11}^{12}, x_{11}^{13}, x_{11}^{21}$	0	0	0	0	0	0	0

Выделенные курсивом решения недопустимы по ограничениям (15).

Оценка функций $q_{11} = q_{11}^{(11)(12)(13)(21)(22)(23)(24)}$ и $c_{11} = c_{11}^{(11)(12)(13)(21)(22)(23)(24)}$:

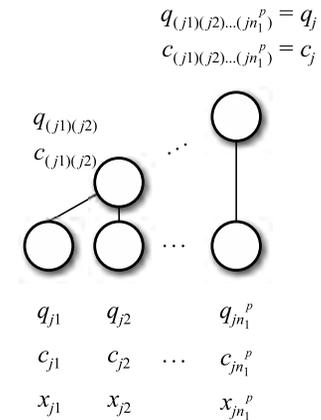


Рис. 3. Сетевое представление функций q_j и c_j

Fig. 3. Network representation of q_j and c_j functions

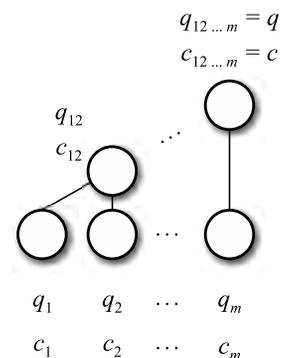


Рис. 4. Сетевое представление функций q и c

Fig. 4. Network representation of q and c functions

Таблица 2

Количества связей между сервисами и затраты на их тестирование

Table 2. The number of links between services and the costs of their testing

	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{21}	s_{22}	s_{23}	s_{24}	$\sum_{r=1}^2 \sum_{k=1}^{n_r^p}$	$\sum_{t=1}^{n_j^p} \sum_{r=1}^2 \sum_{k=1}^{n_r^p}$	$\sum_{j=1}^2 \sum_{t=1}^{n_j^p} \sum_{r=1}^2 \sum_{k=1}^{n_r^p}$
s_{11}	8 19	2 8	4 15	0 0	3 12	0 0	3 7	20 61		
s_{12}	3 11	7 18	4 9	1 5	0 0	2 7	0 0	17 50		
s_{13}	3 7	2 6	9 30	0 0	2 4	0 0	2 6	18 53	55 164	
s_{21}	2 4	0 0	3 6	6 21	1 4	2 5	1 4	15 44		
s_{22}	2 6	0 0	1 4	1 4	10 23	3 7	2 4	19 48		
s_{23}	0 0	2 7	2 8	2 6	3 12	8 27	4 10	21 70		
s_{24}	1 4	0 0	2 9	0 0	4 12	2 4	11 34	20 63	75 225	130 389

0	13	15	17	16	18	20
	34	41	49	46	53	61
1	10	12	14	13	15	17
	27	34	42	39	46	54

$x_{11}^{11} x_{11}^{12} x_{11}^{13} x_{11}^{21} x_{11}^{22} x_{11}^{23}$	110	101	111	110	101	111
$x_{11}^{21} x_{11}^{22} x_{11}^{23} x_{11}^{24}$	000	000	000	010	010	010

Выделенные курсивом решения недопустимы по ограничениям (16). Решение (13, 34) доминирует ре-

Таблица 3

Оценочные решения для сервиса s_{11}

Table 3. Assessment solutions for the s_{11} service

q_{11}^{11}	13	15	17	16	18	20
c_{11}^{11}	34	41	49	46	53	61
$x_{11}^{11} x_{11}^{12} x_{11}^{13}$	$x_{11}^1 =$ 110	$x_{11}^2 =$ 101	$x_{11}^3 =$ 111	$x_{11}^4 =$ 110	$x_{11}^5 =$ 101	$x_{11}^6 =$ 111
$x_{11}^{21} x_{11}^{22} x_{11}^{23} x_{11}^{24}$	0001	0001	0001	0101	0101	0101

шение (13, 39), решение (18, 53) – (17, 54), решение (16, 46) – (15, 46). Шесть итоговых оценочных решений для сервиса s_{11} представлены в табл. 3.

Аналогичным образом находим решения для других сервисов. В табл. 4 представлены решения для сервисов s_{12} и s_{13} .

На втором этапе решаем для каждого процесса задачи (17) – (20) в соответствии с сетевым представлением рис. 3. Решение для первого процесса ($j = 1$): выполнив вычисления, исключая недопустимые по ограничению $c_{(11)(12)} > c_1^* = 110$ и $c_{(11)(12)(13)} > c_1^* = 110$, а также те, которые доминируются другими, получим три следующих лучших решения:

Оценка функций $q_1 = q_{(11)(12)(13)}$ и $c_1 = c_{(11)(12)(13)}$:

$x_{11}^1 x_{12}^2 x_{13}^7$	$x_{11}^1 x_{12}^5 x_{13}^7$	$x_{11}^2 x_{12}^6 x_{13}^5$
40	40	40
110	109	109

Выполнив аналогичные вычисления для второго процесса, исключая недопустимые по ограничению $c_{(21)(22)} > c_2^* = 150$, $c_{(21)(22)(23)} > c_2^* = 150$, $c_{(21)(22)(23)(24)} > c_2^* = 150$, а также те, которые доминируются другими, получим два следующих лучших решения:

Таблица 4

Оценочные решения для сервиса s_{12} и s_{13}

Table 4. Assessment solutions for the s_{12} and s_{13} service

Оценочные решения для сервиса s_{12}								
q_{12}	8	12	15	9	13	16	14	17
c_{12}	25	32	43	27	34	45	39	50
$x_{12}^{11} x_{12}^{12} x_{12}^{13}$	$x_{12}^1 =$ 101	$x_{12}^2 =$ 011	$x_{12}^3 =$ 111	$x_{12}^4 =$ 101	$x_{12}^5 =$ 011	$x_{12}^6 =$ 111	$x_{12}^7 =$ 011	$x_{12}^8 =$ 111
$x_{12}^{21} x_{12}^{22} x_{12}^{23} x_{12}^{24}$	1000	1000	1000	0010	0010	0010	1010	1010
Оценочные решения для сервиса s_{13}								
q_{13}	7	14	13	16	9	16	15	18
c_{13}	17	41	40	47	23	47	46	53
$x_{13}^{11} x_{13}^{12} x_{13}^{13}$	$x_{13}^1 =$ 110	$x_{13}^2 =$ 101	$x_{13}^3 =$ 011	$x_{13}^4 =$ 111	$x_{13}^5 =$ 110	$x_{13}^6 =$ 101	$x_{13}^7 =$ 011	$x_{13}^8 =$ 111
$x_{13}^{21} x_{13}^{22} x_{13}^{23} x_{13}^{24}$	0100	0100	0100	0101	0101	0101	0101	0101

Оценка функций $q_1 = q_{(11)(12)(13)}$ и $c_1 = c_{(11)(12)(13)}$:

$x_{21}^2 x_{22}^1 x_{23}^2 x_{24}^4$	$x_{21}^3 x_{22}^1 x_{23}^3 x_{24}^3$
54	53
150	148

На третьем этапе решаем задачи (21) – (22) в соответствии с сетевым представлением рис. 4.

Решение для первых двух процессов ($j = 1$ и $j = 2$): выполнив вычисления, исключая решения, которые доминируются другими, получим три следующих лучших решения:

$x_{11}^1 x_{12}^2 x_{13}^7$	$x_{11}^1 x_{12}^5 x_{13}^7$	$x_{11}^2 x_{12}^6 x_{13}^5$
$x_{21}^2 x_{22}^1 x_{23}^2 x_{24}^4$	$x_{21}^2 x_{22}^1 x_{23}^2 x_{24}^4$	$x_{21}^2 x_{22}^1 x_{23}^2 x_{24}^4$
94	94	94
260	259	259

Выводы. Рассмотренная задача может быть обобщена посредством учета предпочтений потребителей ИТ-сервисов относительно качества проверки различных связей сервисов. Эти предпочтения могут быть учтены с помощью введения «весов» соответствующих связей. Общая схема решения задачи при этом не меняется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. OGC-ITIL V3- 6 Service Lifecycle, Introduction ITIL: TSO, 2007. – 173 p.
2. Беликов Д.В. Применение сервисной модели для удовлетворения ИТ-потребностей предприятий // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2011. № 84. С. 9 – 14.
3. Зимин В.В., Буркова И.В., Зимин А.В. Модели и механизмы управления жизненным циклом ИТ-сервисов. LAP LAMBERT, 2017. – 336 с.
4. Зимин В.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Формирование функционального объема и рабочих групп ERP-проекта предприятия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. № 12. С. 998 – 1004.
5. Зимин В.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Календарное планирование ИТ-сервисов ERP-проекта предприятия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 4. С. 319 – 325.
6. Модели и методы оптимизации региональных программ развития / Н.Г. Андронникова, С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, А.М. Котенко. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 60 с.
7. Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В. Комплексное оценивание в задачах регионального управления. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 54 с.
8. Механизмы управления организационными проектами / В.Г. Балашов, А.Ю. Заложнев, А.А. Ивашенко, Д.А. Новиков. – М.: ИПУ РАН. 2003. – 84 с.
9. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. Методы агрегирования в управлении проектами. – М.: ИПУ РАН, 1999. – 55 с.
10. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами / П.С. Баркалов, И.В. Буркова, А.В. Глаголев, В.Н. Колпачев. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 65 с.
11. Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Н.Н. Образцов. – М.: ИПУ РАН, 2000. – 58 с.
12. Баркалов С.А., Бурков В.Н. Минимизация упущенной выгоды в задачах управления проектами. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 56 с.
13. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide), 2000. – 215 p.
14. Christensen D.S. An analysis of costs overruns on defense acquisition contracts // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. № 3. P. 43 – 48.
15. Czamecki M.T. Managing by measuring: How to improve your organization's performance through effective benchmarking. – N.Y.: American management association, 1999. – 268 p.
16. Dinsmore P.C. Winning in business with enterprise project management. – N.Y.: American management association, 1999. – 271 p.
17. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Earned value Project Management. PMI, 1996. – 141 p.
18. Буркова И.В. Метод сетевого программирования в задачах управления проектами: Автореф. дисс. д.т.н. – М., 2012. – 40 с.
19. Буркова И.В. Метод сетевого программирования в задачах нелинейной оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 15 – 21.
20. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

Поступила 28 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, PP. 478–484.

SCOPING OF PILOT TESTING OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING

V.V. Zimin¹, I.V. Burkova², V.V. Mit'kov¹, A.V. Zimin³

¹ Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, Russia, Moscow

³ LLC “Audit EnergoNovosibirsk”, Russia, Novosibirsk

Abstract. Planning of pilot testing is among important problems of creation of Enterprise resource planning. Pilot (experimental) projects are intended for testing of the main functions of the created system by limited number of “advanced” users. A key task when planning pilot testing is determination of its volume. If the volume of the pilot project is small, then essentially important functions of system can be not checked, and the probability of detection of essential mistakes at full introduction will be high. If the volume is big, then amount of works on implementation of the pilot project considerably increases,

and there will be no necessary speed and flexibility of testing of the main functions, because of which pilot testing is organized, and its efficiency will be close to efficiency of full introduction. The article describes mathematical problem definition of pilot testing scoping which relies on results of the solution of formation problems of a portfolio of IT services and creation scheduling of Enterprise resource planning of the large metallurgical company. The solutions for the considered task are sets of the services and communications which are subject to check between them satisfying to the set restriction for volume of the resources allocated for testing realization, and delivering an optimum to the set criterion. The procedure of the task solution is based on network programming method which relies on structural and similar network representation of criterion and restrictions. The procedure and an example of the solution of the studied task in which separate estimated tasks are solved by method of dichotomizing programming are shown. The received approximate solutions of an objective can be improved

by means of the solution of a dual problem of network programming. For the purpose of finding of initial task global optimum, the method of branches and borders can be used in which the criterions of function of the found approximate solutions are applied as border values. The considered task can be generalized for preferences of the consumers of IT service concerning need of check of services various communications. These preferences can be considered by introduction of “scales” of the corresponding communications. The general scheme of the solution of a task at the same time doesn’t change.

Keywords: pilot testing, IT services portfolio, ERP system, optimization problem, network programming method, structurally similar functions, evaluation task, generalized network programming problem, branch and boundary method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-478-484

REFERENCES

1. *OGC-ITIL V3- 6 Service Lifecycle, Introduction ITIL*: TSO, 2007, 173 p.
2. Belikov D.V. Application of service model to meet the IT needs of enterprises. *Vestnik Samarского государственного экономического университета*. 2011, no. 84, pp. 9–14. (In Russ.).
3. Zimin V.V., Burkova I.V., Zimin A.V. *Modeli i mekhanizmy upravleniya zhiznennym tsiklom IT-servisov* [Models and mechanisms for life cycle management of IT services]. LAP LAMBERT, 2017, 336 p.
4. Zimin V.V., Mit’kov V.V., Zimin A.V. Formation of functional volume and working groups of ERP-project of the enterprise. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 12, pp. 998–1004. (In Russ.).
5. Zimin V.V., Mit’kov V.V., Zimin A.V. Calendar planning of IT-services of the enterprise’s ERP-project. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, no. 4, pp. 319–325. (In Russ.).
6. Andronnikova N.G., Barkalov S.A., Burkov V.N., Kotenko A.M. *Modeli i metody optimizatsii regional’nykh programm razvitiya* [Models and methods for regional development programs optimization]. Moscow: IPU RAN, 2001, 60 p. (In Russ.).
7. Andronnikova N.G., Burkov V.N., Leont’ev S.V. *Kompleksnoe otsenivanie v zadachakh regional’nogo upravleniya* [Comprehensive assessment in regional administration tasks]. Moscow: IPU RAN, 2002, 54 p. (In Russ.).
8. Balashov V.G., Zalozhnev A.Yu., Ivashenko A.A., Novikov D.A. *Mekhanizmy upravleniya organizatsionnymi proektami* [Management mechanisms of organizational projects]. Moscow: IPU RAN, 2003, 84 p. (In Russ.).
9. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gilyazov N.M. *Metody agregirovaniya v upravlenii proektami* [Methods of aggregation in project management]. Moscow: IPU RAN, 1999, 55 p. (In Russ.).
10. Barkalov P.S., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.N. *Zadachi raspredeleniya resursov v upravlenii proektami* [Methods of aggregation in project management]. Moscow: IPU RAN, 2002, 65 p. (In Russ.).
11. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Obratsov N.N. *Zadachi upravleniya material’no-tekhnicheskim snabzheniem v rynochnoi ekonomike* [Tasks of procurement management in market economy]. Moscow: IPU RAN, 2000, 58 p. (In Russ.).
12. Barkalov S.A., Burkov V.N. *Minimizatsiya upushchennoi vygody v zadachakh upravleniya proektami* [Minimization of lost profits in project management tasks]. Moscow: IPU RAN, 2001, 56 p. (In Russ.).
13. *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)*, 2000, 215 p.
14. Christensen D.S. An analysis of costs overruns on defense acquisition contracts. *International Journal of Project Management*. 1993, vol. 24, no. 3, pp. 43–48.
15. Czamecki M.T. *Managing by measuring: How to improve your organization’s performance through effective benchmarking*. N.Y.: American management association, 1999, 268 p.
16. Dinsmore P.C. *Winning in business with enterprise project management*. N.Y.: American management association, 1999, 271 p.
17. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. *Earned value Project Management*. PMI, 1996. 141 p.
18. Burkova I.V. *Metod setevogo programmirovaniya v zadachakh upravleniya proektami: avtoref. dis... doktora tekh. nauk* [Method of network programming in project management tasks: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Moscow, 2012, 40 p. (In Russ.).
19. Burkova I.V. A method of network programming in problems of nonlinear optimization. *Automation and Remote Control*. 2009, vol. 70, no. 10, pp. 1606–1612.
20. Korbut A.A., Finkel’shtein Yu.Yu. *Diskretnoe programmirovaniye* [Discrete programming]. Moscow: Nauka, 1969, 368 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (zimin.1945@mail.ru)

I.V. Burkova, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher (irbur27@mail.ru)

V.V. Mit’kov, Senior Lecturer of the Chair “Automation and Information Systems” (vita-m@ngs.ru)

A.V. Zimin, Cand. Sci. (Eng.), Director (iva70221@rambler.ru)

Received December 28, 2017

УДК 624.7.001.5

СИТУАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ)

Кулаков С.М., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация и информационные системы» (kulakov-ais@mail.ru)

Мусатова А.И., ст. преподаватель кафедры «Менеджмент и отраслевая экономика» (musatova-ai@yandex.ru)

Кадыков В.Н., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (kadikov_vn@mail.ru)

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

Аннотация. Разработана методика формирования комплексных ситуационных моделей производительности волочильных станков как активной человеко-машинной системы. Определена структура моделей, включающая машинное время волочения и время выполнения ручных операций, коэффициенты использования оборудования и трудовых операций; теоретические, технически возможные и нормативные такты и производительности человеко-машинных систем. Приведены фрагменты табличной реализации предлагаемой комплексной нормативной модели человеко-машинной системы.

Ключевые слова: станы, рабочий, нормативы, операции, такт, простои, производительность, человеко-машинная система.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-485-489

Информационную основу планирования производства в волочильных отделениях составляют нормативы производительности станков, необходимые для формирования программы выпуска продукции и норм труда (норм времени, выработки, численности, обслуживания) [1, 2]. Многообразие производственных ситуаций, обусловленное влиянием многочисленных изменяющихся факторов, требует разработки ситуационных моделей производительности человеко-машинной системы [3, 4].

Волочильный стан метизного производства, предназначенный для холодной деформации проволоки, представляет собой человеко-машинную (активную) систему, состоящую из механизмов, приспособлений и оборудования, связанных единым производственным процессом, в котором непосредственно участвуют рабочие [5]. Эффективное функционирование такой системы зависит от степени соответствия и уровня согласованности действий всех ее элементов (технических, технологических, трудовых) [6 – 8].

Предлагаемая комплексная ситуационная модель производительности волочильных станков как человеко-машинной системы включает следующие составляющие:

- операционные схемы производственных процессов волочильного отделения, их классификация и декомпозиция на операции и элементы;
- классификация, структура и нормы времени ручных циклических операций с декомпозицией их на

элементы и микроэлементы (приемы, действия, движения);

- машинное время волочения проволоки для разных скоростных режимов;
- классификация и нормативы длительности простоев (скрытых и текущих);
- нормативные коэффициенты использования оборудования (волочильных станков) и нестабильности выполнения ручных операций;
- технически возможные и нормативные модели тактов работы каждого типа волочильных станков с учетом сортамента и ГОСТа проволоки, скорости волочения и вида единицы готовой продукции;
- нормативный фонд времени работы станков (смена, сутки, месяц, год);
- теоретическая, технически возможная и нормативная модели часовой производительности волочильного стана каждого типа с учетом сортамента и ГОСТа проволоки, скорости волочения, вида единицы готовой продукции; технически возможная и нормативная модели сменной производительности волочильных станков с учетом вышеперечисленных факторов;
- средневзвешенная производительность волочильного отделения, учитывающая количество функционирующих однотипных и разнотипных станков, которая зависит от поступивших или прогнозируемых заказов на определенные диаметры проволоки и виды продукции.

Укрупненный алгоритм ситуационного формирования нормативной модели производительности системы волочильный стан – волочильщик представлен на рисунке. Ниже приведен пояснительный текст к алгоритму.

Теоретическая модель производительности собственно волочильного стана отражает только его машинные возможности при условии непрерывно работающего оборудования (см. рисунок, блоки 5, 6 алгоритма):

$$P_{MN}^T(i) = \frac{G(i)}{t_{MN}(i)}, \text{ т/ч; } G(i) = \frac{G^*(i)}{k_p(i)}, \quad (1)$$

где $G(i)$ – масса единицы готовой продукции для i -го диаметра проволоки, т; $t_{MN}(i)$ – расчетная длительность основной технологической (машинной) операции волочения со скоростью N , ч; $G^*(i)$ – масса единицы заготовочной проволоки (бунт катанки), т; $k_p(i)$ – расходный коэффициент заготовочной проволоки, т/т.

Машинное время $t_{MN}(i)$ волочения зависит от скорости (V) прохождения проволоки через волоку, номера скорости (N), диаметра проволоки и вида готового изделия (катушка, моток):

$$t_{MN}(i) = \frac{L(i)}{V_N(i)}; \quad L(i) = \frac{G(i)}{q(i)}; \quad (2)$$

здесь $L(i)$ – длина проволоки i -го диаметра; $q(i)$ – масса одного погонного метра проволоки, кг/м.

Технически возможная модель производительности человеко-машинной системы волочильный стан – волочильщик определяется по следующим формулам (блоки 7, 8, 12 алгоритма):

$$P_{ч-м, N}^{TB}(i) = \frac{G(i)}{T_{ч-м, N}^{TB}(i)}, \text{ т/ч; } \quad (3)$$

$$T_{ч-м, N}^{TB}(i) = t_{MN}(i) + \sum_{n=1}^n \tau_{ч}^{MB}(i);$$

$$\sum_{n=1}^n \tau_{ч}^{MB}(i) = \tau_{ч,1}^{MB}(i) + \dots + \tau_{ч,n}^{MB}(i); \quad (4)$$

$$\tau_{ч,1}^{MB}(i) = \sum_{w=1}^w [\tau_{ч,1}^{MB}(i) + \dots + \tau_{ч,n}^{MB}(i)],$$

где $T_{ч-м, N}^{TB}(i)$ – модель технически возможного такта работы человеко-машинной системы для i -го диаметра проволоки, N -й скорости волочения, ч; $\tau_{ч}^{MB}(i)$ – минимально возможное (необходимое) время выполнения циклических операций рабочим-волочильщиком при изготовлении единицы продукции, неперекрываемое машинным временем $t_{MN}(i)$, ч; $\tau_{ч,n}^{MB}(i)$ – минимально возможное время выполнения w -ых микроэлементов n -го элемента ручной операции; n^* и w^* – количество элементов и микроэлементов операции, шт.

Под тактом работы системы понимается отрезок времени между окончаниями выдачи данной единицы

готовой продукции (мотка или катушки) до выдачи следующей единицы. В теоретическом аспекте такты подробно рассмотрены в работе [9].

Нормативная модель производительности человеко-машинной системы определяется с учетом нормативного такта $T_{ч-м, N}^H(i)$ ее работы (блоки 9 – 12 алгоритма):

$$P_{ч-м, N}^H(i) = \frac{G(i)}{T_{ч-м, N}^H(i)}, \text{ т/ч; } T_{ч-м, N}^H(i) = t_{MN}^H(i) + \sum_{n=1}^n \tau_{ч}^H(i), \quad (5)$$

$$t_{MN}^H(i) = \frac{t_{MN}(i)}{k_o^H(i)}; \quad \sum_{n=1}^n \tau_{ч}^H(i) = \frac{\tau_{ч,1}^{MB}(i)}{k_{ч,1}^H(i)} + \dots + \frac{\tau_{ч,n}^{MB}(i)}{k_{ч,n}^H(i)}, \quad (6)$$

где $k_o^H(i)$ и $k_{ч}^H(i)$ – нормативные коэффициенты использования оборудования (собственно волочильного стана) и нестабильности выполнения рабочим ручных операций соответственно [3].

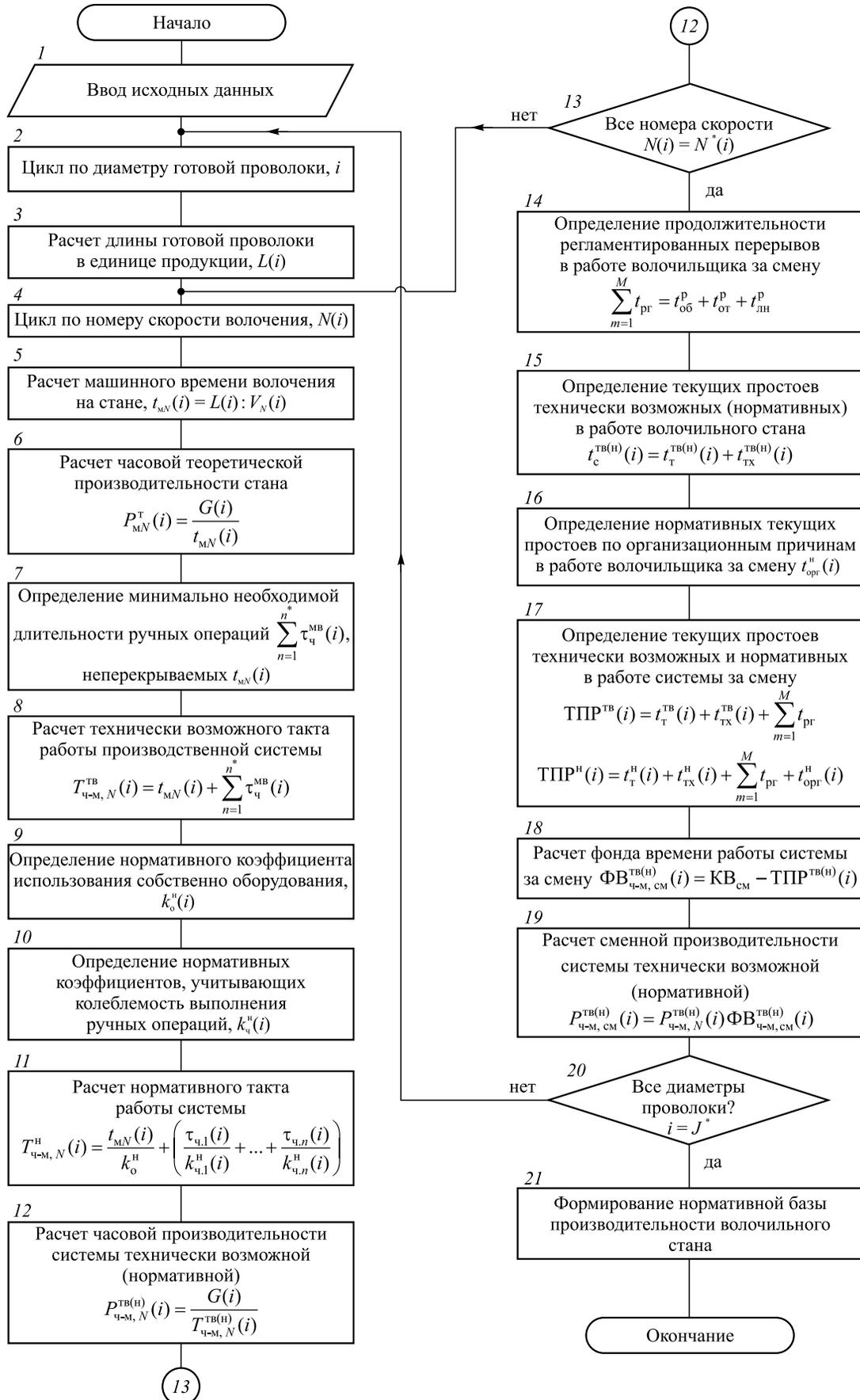
Особую сложность при построении нормативной модели производительности человеко-машинной системы составляет решение задач определения норм времени на выполнение трудовых операций и нормирования простоев для установления нормативных коэффициентов использования человеко-машинной системы, а также для формирования нормативного фонда времени на смену, сутки, месяц. Для решения этих задач были проведены многочисленные комплексные исследования производственных процессов в волочильных отделениях сталепроволочных цехов ряда предприятий.

В связи с тем, что каждая единица готовой продукции волочильного стана производится с участием оператора (рабочего-волочильщика), обоснованы последовательность, рациональный состав элементов и длительность ручных операций.

Анализ наблюдений показал, что количество ручных операций, их элементов и микроэлементов значительно колеблется в зависимости от типа стана, вида заготовочной проволоки на размоточном устройстве (бунт или катушка), от вида и массы готовой проволоки на намоточном устройстве (моток малый или большой, катушка). Так, например, для волочильных станов типа 3/550, 4/550, 6/550, которые производят готовую проволоку с бунта на большегрузный моток массой 1 т, трудовые процессы были сгруппированы на пять операций, при массе 1,5 т – на шесть операций (включая промежуточную обвязку мотка).

Определены нормативные значения текущих простоев ТПР (блоки 14 – 17 алгоритма) с учетом регламентированных перерывов в течение смены рабочих на обед ($t_{об}^p$), отдых ($t_{от}^p$), личные надобности ($t_{лн}^p$), а также по организационным причинам ($t_{орг}^p$). Кроме этого, нормировались текущие простои технического ($t_{т}$) и технологического ($t_{тх}$) характера с целью обоснования сменной производительности человеко-машинной системы.

Обоснование нормативных значений длительности ручных операций, нормативных коэффициентов исполь-



13

Алгоритм формирования нормативной производительности системы

Development algorithm of standard performance of the system

Комплексная модель производительности человеко-машинной системы

Multifunctional model of man-machine system performance

<i>N</i>	t_M^H , мин	k_0^H	k_4^H	$T_{ч-м}^{ТВ}$, мин	$T_{ч-м}^H$, мин	P_M^T , т/ч	$P_{ч-м}^{ТВ}$, т/ч	$P_{ч-м}^H$, т/ч	$\Phi B_{ч-м}^H$, см	$P_{ч-м}^H$, см, Т
Стан 2/550 работает с бунта на катушку (1 т); $d = 5,0$ мм										
2	30,46	0,90	0,78	33,04	37,68	2,189	1,816	1,592	6,85	10,905
3	22,16	0,90	0,78	25,57	29,38	3,009	2,346	2,042	6,85	13,988
4	16,42	0,90	0,78	20,41	23,64	4,059	2,940	2,538	6,85	17,385
Стан 3/550 работает с бунта на моток (1,5 т); $d = 4,0$ мм										
2	68,91	0,88	0,70	70,72	83,22	1,484	1,273	1,081	6,65	7,189
3	49,50	0,88	0,70	53,64	63,81	2,066	1,678	1,410	6,65	9,377
4	35,50	0,88	0,70	41,32	49,81	2,881	2,178	1,807	6,65	12,016
Стан 6/550 работает с бунта на моток (0,5 т); $d = 2,5$ мм										
2	32,17	0,87	0,73	35,57	42,55	1,072	0,840	0,705	6,67	4,702
3	23,18	0,87	0,73	27,75	33,56	1,487	1,081	0,894	6,67	5,963
4	16,68	0,87	0,73	22,09	27,06	2,067	1,358	1,109	6,67	7,397
Стан 7/350 работает с катушки на моток (0,06 т); $d = 1,1$ мм										
2	19,12	0,89	0,75	18,87	21,59	0,211	0,191	0,167	7,0	1,169
3	13,83	0,89	0,75	14,16	16,30	0,292	0,254	0,221	7,0	1,547
4	11,10	0,89	0,75	11,73	13,57	0,364	0,307	0,265	7,0	1,855

зования оборудования и нестабильности выполняемых ручных операций, а также нормативных значений текущих простоев осуществлялось комбинированием методов технического поэлементного нормирования, экспертных оценок, ретроспективной оптимизации с использованием эвристического и эргономического подходов.

В связи с этим была разработана комплексная нормативная модель производительности волочильных станков, фрагментарно представленная в таблице.

Выводы. Учитывая известные методики определения нормативной производительности оборудования, недостатки одних и достоинства других, уточнена и конкретизирована процедура нормирования часовой и сменной производительности волочильных станков, представляющих собой человеко-машинные системы, которые требуют формирования нормативной базы производительностей, посредством моделирования технологических, трудовых процессов и работы оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мачулин В.М., Сидорчук В.Е., Астратов С.Н., Ким Ю.Б., Лобанова Н.Г. Контроллинг в метизном производстве РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2011. № 2. С. 115 – 123.

2. Singh S.K., Singh M.K. Evaluation of productivity, quality and flexibility of an advanced manufacturing system // Journal of the institution of engineers. 2012. January – March. P. 93 – 101.

3. Geraskin M.I., Egorova V.V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry // Information Technology and Nanotechnology. 2016. P. 552 – 568.

4. Högman U., Johannesson H. Technology development and normative process models. International design conference. 2010. May. P. 17 – 20.

5. Вайсман Д.И., Герасимова З.А., Рубин Г.Ш. Расчет и анализ использования производственных мощностей метизной промышленности. – М.: Металлургия, 1985. – 48 с.

6. Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Дья Х. Применение модели и принципов технологической адаптации показателей качества в процессах производства метизной продукции // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2016. № 1. С. 101 – 108.

7. Медиков В.Я. Производственные мощности и их использование. – М.: МГУП, 2002. – 264 с.

8. Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Полякова М.А. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 10-2. С. 28 – 33.

9. Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N., Baranov P.P. Timing Models in the Reengineering of Metallurgical Production Systems // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 5. P. 367 – 375.

Поступила 4 декабря 2017 г.

**DIGITAL PROTOTYPES OF MAN-MACHINE SYSTEM PERFORMANCE
(IN THE CASE OF DRAWING MILLS)**

S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

Abstract. A design method of multifunctional digital prototypes of drawing mills performance as an active man-machine system is developed. The structure of models is determined, including machine drawing

time and time of manual operations, equipment coefficients and labor operations, theoretical, feasible and normative cycles and performance of man-machine systems. Fragments of tabular implementation of the proposed integrated normative model of the man-machine system are given.

Keywords: mill, worker, standard, operation, timing period, downtime, performance, man-machine system.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-485-489

REFERENCES

1. Machulin V.M., Sidorchuk V.E., Astratov S.N., Kim Yu.B., Lobanova N.G. Controlling in the hardware production of RUE "BMZ". *Lit'e i metallurgiya*. 2011, no. 2, pp. 115–123. (In Russ.).
2. Singh S.K., Singh M.K. Evaluation of productivity, quality and flexibility of an advanced manufacturing system. *Journal of the institution of engineers*. 2012, January – March, pp. 93–101.
3. Geraskin M.I., Egorova V.V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry. *Information Technology and Nanotechnology*. 2016, pp. 552–568.
4. Högman U., Johannesson H. Technology development and normative process models. *International design conference*. 2010, May, pp. 17–20.
5. Vaisman D.I., Gerasimova Z.A., Rubin G.Sh. *Raschet i analiz ispol'zovaniya proizvodstvennykh moshchnostei metiznoi promyshlennosti* [Design and analysis of production facilities use of hardware industry]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 48 p. (In Russ.).
6. Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rubin G.Sh., Gun G.S., Dyja H. Application of the model and principles of technological adaptation of quality indicators in the processes of production of hardware products. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2016, no. 1, pp. 101–108. (In Russ.).
7. Medikov V.Ya. *Proizvodstvennye moshchnosti i ikh ispol'zovanie* [Production capacities and their use]. Moscow: MGUP, 2002, 264 p. (In Russ.).
8. Rubin G.Sh., Gun G.S., Polyakova M.A. Standardization of hardware products: features, problems, development prospects. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2014, no. 10-2, pp. 28–33. (In Russ.).
9. Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N., Baranov P.P. Timing models in the reengineering of metallurgical production systems. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 5, pp. 367–375.

Information about the authors:

S.M. Kulakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of "Automation and Information Systems" (kulakov-ais@mail.ru)

A.I. Musatova, Senior lecturer of the Chair "Management and Branch Economy" (musatova-ai@yandex.ru)

V.N. Kadykov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK" (kadykov_vn@mail.ru)

Received December 4, 2017

УДК 66.021.97

ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ni–Cr, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ*

*Дашевский В.Я.^{1,2}, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих
промышленных технологий, зав. лабораторией (vdashev@imet.ac.ru)*

Александров А.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (a.a.aleksandrov@gmail.com)

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Проведен термодинамический анализ влияния алюминия на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Cr. Алюминий при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве, которая определяется содержанием хрома. При содержании алюминия выше 0,01 % для всех сплавов уже именно он определяет растворимость кислорода в расплаве. Минимальные значения концентрации кислорода достигаются при содержании алюминия приблизительно 0,2 %. С ростом содержания хрома в расплаве возрастает минимальная концентрация кислорода. Для сплавов Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr она составляет $2 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} соответственно.

Ключевые слова: никель, хром, расплавы, кислород, алюминий, раскисление.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-490-493

Сплавы системы Ni–Cr используют в современной технике. Широкое применение нашли жаростойкие сплавы, содержащие алюминий. Алюминий – это не только легирующий элемент, но одновременно и элемент-раскислитель. Кислород, содержащийся в сплавах, снижает служебные свойства. Получение готового металла с минимальной концентрацией кислорода является основной задачей процесса раскисления. В легированных хромом никелевых сплавах содержание хрома может составлять 10 – 30 %. При содержании в жидком никеле хрома приблизительно 2 % наблюдается минимум на кривой растворимости кислорода, дальнейшее повышение содержания хрома приводит к повышению растворимости кислорода [1]. При раскислении жидкого никеля хромом продуктом реакции при содержании хрома выше 0,01 % является оксид хрома Cr₂O₃ [2]:

$$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{тв}) = 2[\text{Cr}] + 3[\text{O}],$$

$$K_{\text{Cr}} = \frac{([\% \text{Cr}] f_{\text{Cr}})^2 ([\% \text{O}] f_{\text{O}})^3}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}. \quad (1)$$

Концентрация кислорода в расплаве, равновесная с заданным содержанием хрома, может быть рассчитана по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Cr}} + \lg a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - 2 \lg[\% \text{Cr}] - \right.$$

$$\left. - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}][\% \text{Cr}] - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Cr}}^{\text{O}}][\% \text{O}] - \right.$$

$$\left. - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}}[\% \text{Cr}]^2 \right\}, \quad (2)$$

где e_i^j – параметр взаимодействия первого порядка; r_i^j – параметр взаимодействия второго порядка при выражении концентрации компонентов в массовых процентах.

Оксид хрома Cr₂O₃ при 1873 К находится в твердом состоянии ($T_{\text{пл}} = 2603 \text{ К}$ [3]), $a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 1$. Величину [% O] в правой части уравнения (2) можно выразить через отношение

$\left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \right)^{1/3}$. При [% O] → 0 справедливо $f_{\text{O}} \rightarrow 1$. В связи с малостью величины [% O] можно

принять $\left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 f_{\text{O}}^3} \right) \approx \left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)$. Такая замена не вносит заметной погрешности в расчеты [4]. В этом случае уравнение (2) примет вид

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Cr}} - 2 \lg[\% \text{Cr}] - \right.$$

$$\left. - [2e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}][\% \text{Cr}] - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Cr}}^{\text{O}}] \times \right.$$

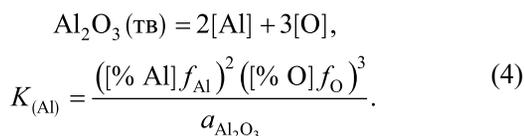
$$\left. \times \left(\frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)^{1/3} - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}}[\% \text{Cr}]^2 \right\}. \quad (2a)$$

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00641 А.

В сплавах Ni–Cr–Al при низких содержаниях алюминия в расплаве хром может быть более сильным раскислителем. В этом случае уравнение (2a) примет следующий вид:

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = \lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} - \left[\frac{2}{3} e_{\text{Cr}}^{\text{Al}} + e_{\text{O}}^{\text{Al}} \right] [\% \text{Al}]. \quad (3)$$

Взаимодействие алюминия с кислородом при более высоких его содержаниях в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, описывается реакцией



Концентрация кислорода, равновесная с заданным содержанием алюминия, может быть рассчитана по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = \frac{1}{3} \left\{ \lg K_{\text{Al}} + \lg a_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 2 \lg[\% \text{Al}] - \right.$$

$$\left. - [2e_{\text{Al}}^{\text{Al}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Al}}] [\% \text{Al}] - [2e_{\text{Al}}^{\text{Cr}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Cr}}] [\% \text{Cr}] - \right.$$

$$\left. - [3e_{\text{O}}^{\text{O}} + 2e_{\text{Al}}^{\text{O}}] \left(\frac{K_{\text{Al}}}{([\% \text{Al}]^2 f_{\text{Al}}^2)} \right)^{1/3} - \right.$$

$$\left. - 3r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2 - 3r_{\text{O}}^{\text{Al}} [\% \text{Al}]^2 \right\}. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (3) и (5) позволяет определить содержание алюминия, при котором происходит смена механизма процесса раскисления. Значения констант равновесия реакции раскисления жидкого никеля алюминием, а также значения коэффициентов активности и параметров взаимодействия, характеризующие растворы кислорода, приведены в таблице.

Для расплавов системы Ni–Cr можно выделить три наиболее часто встречающихся состава основы сплавов: Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr [10]. В жидком никеле при 1873 К растворимость кислорода составляет 0,6 % [11]. Равновесная концентрация кислорода в расплавах Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr, рассчитанная по уравнению (2a) с учетом значений величины константы равновесия реакции (1) и параметров взаимодействия (см. таблицу),

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = -2,605 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] + 0,144[\% \text{Cr}] +$$

$$+ \frac{8,277 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Cr}]^{2/3}} - 2,415 \cdot 10^{-3} [\% \text{Cr}]^2, \quad (2б)$$

составляет для сплава Ni – 10 % Cr $[\text{O}] = 0,854 \cdot 10^{-2} \%$, для сплава Ni – 20 % Cr $[\text{O}] = 2,825 \cdot 10^{-2} \%$, для сплава Ni – 30 % Cr $[\text{O}] = 3,723 \cdot 10^{-2} \%$.

При раскислении расплавов Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr алюминием при весьма низких его содержаниях, когда хром является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода, равновесную с заданными содержаниями хрома и алюминия, можно рассчитать по уравнению (3). С учетом значений параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (3) примет вид:

– для сплава Ni – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -2,068 + 1,440[\% \text{Al}];$$

– для сплава Ni – 20 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -1,549 + 1,440[\% \text{Al}];$$

– для сплава Ni – 30 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -1,429 + 1,440[\% \text{Al}].$$

При более высоких содержаниях алюминия в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием алюминия и хрома, в зависимости от продукта реакции раскисления можно рассчитать по уравнению (5). Оксид Al_2O_3 при 1873 К твердый ($T_{\text{пл}} = 2327 \text{ K}$ [12]), поэтому $a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$. С учетом величины константы равновесия реакции раскисления алюминием и параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (5) примет следующий вид:

– для сплава Ni – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -3,49 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,413[\% \text{Al}] +$$

$$+ \frac{4,365 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}} - 0,27[\% \text{Al}]^2;$$

Константы равновесия реакций раскисления расплавов никеля и параметры взаимодействия при 1873 К

Equilibrium constants for deoxidation reactions of nickel melts and interaction parameters at 1873 K

Параметр (оксид)	$\lg K_{\text{Cr}} (\text{Cr}_2\text{O}_3)$	$\lg K_{\text{Al}} (\text{Al}_2\text{O}_3)$	e_{O}^{O}	$e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}}$	e_{O}^{Cr}	e_{Cr}^{O}	$e_{\text{Al}}^{\text{Al}}$	$e_{\text{Cr}}^{\text{Al}}$	$e_{\text{Al}}^{\text{Cr}}$	e_{O}^{Al}	e_{Al}^{O}	r_{O}^{Cr}	r_{O}^{Al}
Значение	–7,815	–13,739	0	$8,3 \cdot 10^{-3}$	–0,15	–0,50	0,085	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	–1,47	–2,488	$2,415 \cdot 10^{-3}$	0,27
Источник	[2]	[5]	[6]	[6]	[1]	[1]	[7]	[8]	[8]	[7]	[7]	[1]	[9]

– для сплава Ni – 20 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -2,883 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,413[\% \text{Al}] + \frac{4,365 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}} - 0,27[\% \text{Al}]^2;$$

– для сплава Ni – 30 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -2,759 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,413[\% \text{Al}] + \frac{4,365 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}} - 0,27[\% \text{Al}]^2;$$

Решая совместно уравнения (3) и (5), можно определить содержание алюминия $[\% \text{Al}]^*$, при котором происходит смена механизма реакции раскисления. При решении уравнений в первом приближении пренебрегаем членами, содержащими параметры взаимодействия, в связи с их малостью. Тогда для сплава Ni – 10 % Cr $[\text{Al}]^* = 7,375 \cdot 10^{-3} \%$, для сплава Ni – 20 % Cr $[\text{Al}]^* = 0,997 \cdot 10^{-2} \%$, для сплава Ni – 30 % Cr $[\text{Al}]^* = 1,012 \cdot 10^{-2} \%$.

Расчитанные по уравнениям (3) и (5) равновесные концентрации кислорода в расплавах Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr при 1873 К приведены на рисунке в сравнении с данными о растворимости кислорода в расплавах системы Ni–Al. Зависимость концентрации кислорода от содержания алюминия в жидком никеле при 1873 К может быть описана уравнением [4]:

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al}} = -4,58 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,413[\% \text{Al}] + \frac{4,365 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}} - 0,27[\% \text{Al}]^2. \quad (6)$$

С ростом содержания хрома в сплавах растворимость кислорода растет. Как было отмечено выше, при повышении содержания хрома в расплаве выше 2 % растворимость кислорода повышается [1], поэтому при содержании хрома в расплаве 30 % растворимость кислорода выше, чем при содержании 10 %. Алюминий при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве, которая определяется содержанием хрома. При содержании алюминия выше приблизительно 0,01 % для всех сплавов уже он определяет растворимость кислорода в расплаве. Раскислительная способность алюминия для сплавов Ni–Cr существенно ниже, чем для чистого никеля. Это связано с тем, что хром, как отмечено выше, повышает растворимость кислорода в расплаве. Минимальные значения концентрации кислорода достигаются при содержании алюминия приблизительно 0,2 % как для чистого никеля, так и для сплавов. С ростом содержания хрома в расплаве возрастает минимальная концентрация кислорода. Для сплавов Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr

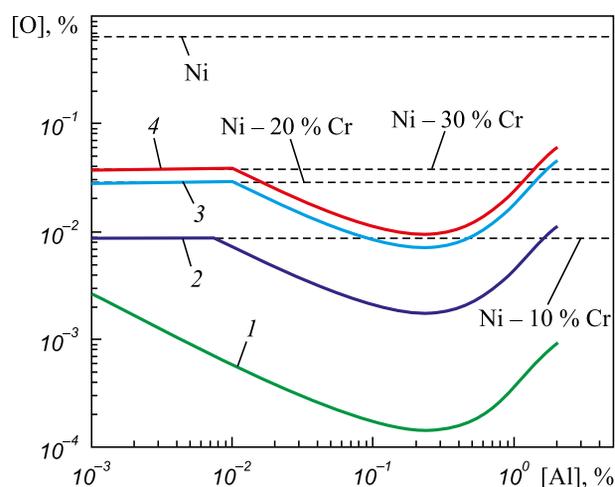


Рис. 1. Зависимость концентрации кислорода от содержания алюминия в никеле и расплавах системы Ni – Cr при 1873 К при содержании хрома 0 (1), 10 % (2), 20 % (3), 30 % (4)

Fig. 1. Dependence of oxygen concentration on aluminum content in nickel and Ni – Cr melts at 1873 K: Cr, %: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

и Ni – 30 % Cr она составляет $2 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} соответственно. С ростом содержания алюминия выше 0,2 % растворимость кислорода в расплаве возрастает.

Выводы. Термодинамический анализ растворимости кислорода в расплавах системы Ni–Cr показал, что в расплавах системы Ni–Cr растворимость кислорода выше, чем в чистом никеле. Она тем выше, чем выше содержание хрома. Алюминий при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве, которая определяется содержанием хрома. При содержании алюминия выше приблизительно 0,01 % для всех сплавов уже он определяет растворимость кислорода в расплаве. Минимальные значения концентрации кислорода достигаются при содержании алюминия приблизительно 0,2 %. Минимальная концентрация кислорода для сплавов Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr и Ni – 30 % Cr составляет $2 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дашевский В.Я., Григорович К.В., Красовский П.В., Макарова Н.Н., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах Ni – Cr // ДАН. 1998. Т. 359. № 2. С. 212 – 213.
2. Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N., Grigorovitch K.V., Kashin V.I. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys // ISIJ International, 2005. Vol. 45. No. 12. P. 1783 – 1788.
3. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Металлургия хрома. – М.: ЭЛИЗ, 1999. – 582 с.
4. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
5. Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах никеля, содержащих алюминий и титан // Изв. вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 7. С. 485 – 490.

6. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The Thermodynamics of Dilute Liquid Nickel Alloys // *Metallurgical Soc. CIM*. 1977. Vol. 16. No. 1. P. 104 – 110.
7. Ishii F., Ban-ya S. Equilibrium between Aluminum and Oxygen in Liquid Nickel and Nickel-Iron Alloy // *Tetsu to Hagane*. 1995. Vol. 81. No. 1. P. 22 – 27.
8. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Часть II. Оценка параметров взаимодействия элементов в никелевых сплавах // *Электрометаллургия*. 2009. № 2. С. 29 – 39.
9. Janke D., Fischer W.A. Das Lösungsverhalten des Sauerstoffs in Nickelbasisschmelzen // *Arch. Eisenhüttenw.* 1975. B. 46. H. 5. S. 297 – 302.
10. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные сплавы. – М.: Metallurgy, 1969. – 752 с.
11. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Metallurgy, 1987. – 272 с.
12. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов. – М.: Элиз, 2005. – 448 с.

Поступила 26 марта 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, pp. 490–493.

THERMODYNAMICS OF OXYGEN SOLUTIONS IN ALUMINUM-CONTAINING Ni–Cr MELTS

V.Ya. Dashevskii^{1,2}, A.A. Aleksandrov¹¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. Thermodynamic analysis of the effect of aluminum on the solubility of oxygen in Ni–Cr melts has been carried out. Aluminum at very low levels practically does not affect the concentration of oxygen in the melt, which is determined by the chromium content. When the aluminum content is above ~0.01 % for all alloys, it already determines the solubility of oxygen in the melt. The minimum values of the oxygen concentration are achieved with an aluminum content of ~0.2 %. With the increase of chromium content in the melt, the minimum oxygen concentration increases. For Ni – 10 % Cr, Ni – 20 % Cr and Ni – 30 % Cr alloys, it is $2 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$ and 10^{-2} , respectively.

Keywords: nickel, chromium, melts, oxygen, aluminum, deoxidation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-490-493

REFERENCES

1. Dashevskii V.Ya., Grigorovich K.V., Krasovskii P.V., Makarova N.N., Kashin V.I. Thermodynamics of oxygen solution in Ni–Cr melts. *Doklady Akademii Nauk*. 1998, vol. 359, no. 2, pp. 212–213. (In Russ.).
2. Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N., Grigorovitch K.V., Kashin V.I. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1783–1788.
3. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Metallurgiya khroma* [Metallurgy of chrome]. Moscow: ELIZ, 1999, 582 p. (In Russ.).
4. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Deoxidation of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 504 p. (In Russ.).
5. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in the nickel melts containing aluminum

and titanium. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 7, pp. 485–490. (In Russ.).

6. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The thermodynamics of dilute liquid nickel alloys. *Metallurgical Soc. CIM*. 1977, vol. 16, no. 1, pp. 104–110.
7. Ishii F., Ban-ya S. Equilibrium between aluminum and oxygen in liquid nickel and nickel-iron alloy. *Tetsu to Hagane*. 1995, vol. 81, no. 1, pp. 22–27.
8. Belyanchikov L.N. A universal method of converting the values of the interaction parameters of elements from one base of the alloy to another on basis of the theory of quasi-regular solutions. Part II. Evaluation of interaction parameters of elements in Nickel alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 2, pp. 29–39. (In Russ.).
9. Janke D., Fischer W.A. Das Lösungsverhalten des Sauerstoffs in Nickelbasisschmelzen. *Arch. Eisenhüttenw.* 1975, B. 46, H. 5, S. 297–302. (In Germ.).
10. Khimushin F.F. *Zharoprochnye splavy* [Heat-resistant alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 752 p. (In Russ.).
11. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical basis of EAF processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).
12. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov* [Physicochemistry and technology of electric ferroalloys]. Moscow: Eliz, 2005, 448 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The reported study was supported by RFBR, research project no. 16-03-00641 A.

Information about the authors:

V.Ya. Dashevskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, Head of the Laboratory (vdashev@imet.ac.ru)

A.A. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (a.a.aleksandrov@gmail.com)

Received March 26, 2018

УДК 621.774.3

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗНОСТЕННОСТИ ТРУБ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Орлов Г.А.¹, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (gorol@mail.ru)

Котов В.В.^{1,2}, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

Орлов А.Г.¹, магистрант кафедры «Обработка металлов давлением»

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² Представительство компании ESI Group в РФ

(620014, Россия, Екатеринбург, ул. Вайнера, 51Б)

Аннотация. Проведено компьютерное моделирование раздачи внутренним давлением разностенных труб из стали, алюминиевого и титанового сплавов. Для моделирования использовался пакет прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующий метод конечных элементов. Оценена сходимость и точность полученного решения путем сравнения с известными решениями. Проведен полный факторный вычислительный эксперимент с варьированием факторов: исходной разностенности, тонкостенности и упрочняемости труб. Получены уравнения регрессии внутреннего давления в момент разрушения и конечной разностенности от перечисленных факторов. Установлено, что при раздаче разностенных труб разрыв происходит в области тонкой стенки. Минимальная стенка продолжает утоняться при почти неизменной максимальной толщине стенки, что приводит к росту поперечной разностенности. Сделан вывод о том, что увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс разрушения в области тонкой стенки. Рекомендовано в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

Ключевые слова: раздача труб внутренним давлением, разностенность, метод конечных элементов, разрыв труб при раздаче, напряжения разрыва.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-494-495

Изучение условий эксплуатации трубопроводов, работающих под внутренним давлением [1], является актуальным. В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса раздачи разностенных труб внутренним давлением с помощью пакета прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующего метод конечных элементов.

Моделирование провели в соответствии с планом полного факторного вычислительного эксперимента 2³ (см. таблицу). Упрочняемость рассмотренных сплавов

(алюминиевого АМг2, стали 40ХГН, титанового ОТ4-1) оценили по величине истинного напряжения при степени деформации $\varepsilon = 0,5$, которое для рассмотренных сплавов изменяется в соотношении 1:2:1,6 [2]. В качестве функций отклика выбрали конечную относительную разностенность [3] и внутреннее давление в момент разрушения.

В результате обработки данных таблицы получили следующие уравнения регрессии [4] с учетом оценки значимости коэффициентов:

План и результаты вычислительного эксперимента

Plan and results of the computing experiment

Номер опыта	Исходная разностенность (X_1), %	Упрочняемость материала (X_2)	D/S (X_3)	Конечная разностенность, %	Внутреннее давление, МПа
1	15	2	22	17,05	17,8
2	15	2	11	16,95	34,07
3	15	1	22	16,49	11,62
4	15	1	11	16,97	22,42
5	5	2	22	6,16	19,60
6	5	2	11	6,07	37,24
7	5	1	22	7,30	13,13
8	5	1	11	7,02	25,06

Примечание. D – диаметр трубы; S – толщина стенки трубы.

$$Y_1 = 22,62 - 1,14x_1 + 4,56x_2 - 7,08x_3 - 0,10x_1x_2 - 1,40x_2x_3 + 0,31x_1x_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 11,75 + 5,12x_1 - 0,19x_2 + 0,33x_1x_2 - 0,093x_1x_3 + 0,095x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где Y_1 – внутреннее давление в момент разрушения, МПа; Y_2 – конечная разностенность, %; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения, соответственно, исходной разностенности, упрочняемости материала и относи-

тельной тонкостенности D/S ; $x_i = \frac{2(X_i - X_i^{cp})}{X_i^{max} - X_i^{min}}$.

Уравнение (1) показывает, что внутреннее давление, требуемое для разрушения трубы, растет с увеличением упрочняемости материала и падает с ростом исходной разностенности и относительной тонкостенности D/S . Второе уравнение демонстрирует, что в процессе нагружения относительная разностенность всегда увеличивается за счет утонения более тонкой стенки, но менее интенсивно для более упрочняющегося материала. Например, получили, что разрушение труб с исходной разностенностью 15 % из рассмотренных сплавов АМг2, 40ХГН и 0Т4-1 происходит при внутренних дав-

лениях 22,4, 34,2 и 24,0 МПа соответственно. В процессе раздачи разностенность увеличилась с 15 до 17 %, рост наружного диаметра не превысил 5 %. Разрыв трубы происходит всегда в области тонкой стенки [5].

Выводы. Увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс их разрушения в области тонкой стенки, поэтому в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, рекомендуется применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. – М.: Недра, 2001. – 231 с.
2. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1976. – 488 с.
3. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. – М.: Metallurgy, 1975. – 240 с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 276 с.
5. Orlov G.A., Kotov V.V., Orlov A.G. Simulation of the Behavior of Pipes with Variable Wall Thickness Under Internal Pressure // Metallurgist. 2017. Vol. 61. No. 1-2. P. 106 – 110.

Поступила 10 ноября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 6, pp. 494–495.

ANALYSIS OF THE WALL THICKNESS VARIATION OF PIPES UNDER INTERNAL PRESSURE

G.A. Orlov¹, V.V. Kotov^{1,2}, A.G. Orlov¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² ESI Group Representative Office in the Russian Federation, Ekaterinburg, Russia

Abstract. A computer simulation of the internal pressure expanding was performed for pipes with uneven wall thickness made of steel, aluminum and titanium alloys. For this simulation software tool ESI Virtual-Performance 2016.0 was used that implements the finite element method. The convergence and accuracy of the solution was estimated by comparison with known solutions. A full factorial computational experiment was performed by varying factors: the initial wall thickness variation of pipes, D/S and parameter of alloys hardening. The regression equations were obtained by the internal pressure at the time of destruction and final wall thickness variation from these factors. It was found that the variation in wall thickness in the distribution pipe rupture occurs in the thin wall. A wall with minimum thickness continues thinning with an almost constant maximum wall thickness, which leads to an increase in the transverse variation in wall thickness. It was concluded that the increase of the initial variation in wall thickness pipe speeds up the process of rupture in the area of thin wall. It is recommended in conduits conducting high-pressure fluid to apply pipes with minimal variation in wall thickness.

Keywords: pipe expanding with internal pressure, wall thickness variation, finite element method, expanding pipe fracture, fracture stresses.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-494-495

REFERENCES

1. Gumerov A.G., Yamaleev K.M. *Treshchinostoykost' metalla trub nefteprovodov* [Fracture resistance of metal pipes of oil pipelines]. Moscow: Nedra, 2001, 231 p. (In Russ.).
2. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [Resistance to plastic deformation]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 488 p. (In Russ.).
3. Stoletnii M.F., Klempert E.D. *Tochnost' trub* [Precision of pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 240 p. (In Russ.).
4. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning of experiment when searching optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 276 p. (In Russ.).
5. Orlov G.A., Kotov V.V., Orlov A.G. Simulation of the behavior of pipes with variable wall thickness under internal pressure. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 1-2, pp. 106–110.

Information about the authors:

G.A. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (grorl@mail.ru)

V.V. Kotov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming”

A.G. Orlov, MA Student of the Chair “Metal Forming”

Received November 10, 2017

К 90-ЛЕТИЮ БОРИСА ВАДИМОВИЧА ЛИНЧЕВСКОГО



Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Линчевский Борис Вадимович относится к числу выдающихся ученых-металлургов, творивших в конце прошлого – начале нынешнего столетия.

Б.В. Линчевский родился 27 июня 1928 года в Москве в семье известного ученого, профессора Вадима Павловича Линчевского. Отец Бориса Вадимовича окончил Московскую горную академию, дипломный проект он выполнял под руководством академика М.А. Павлова. В свою очередь Борис Вадимович как студент Московского института стали выполнил дипломную работу под руководством академика А.М. Самарина. Таким образом, состоялась неразрывная цепь российских ученых-металлургов на протяжении более века.

После окончания школы Б.В. Линчевский поступил в Институт стали, который успешно закончил по двум факультетам: металлургическому и физико-химическому и был принят в аспирантуру по кафедре электрометаллургии стали и ферросплавов, по окончании которой успешно защитил кандидатскую диссертацию. Последующие шесть лет, до 1962 года, Борис Вадимович работал в Институте металлургии имени А.А. Байкова АН СССР в лаборатории, возглавляемой академиком А.М. Самариним. В 1962 году он принял приглашение профессора Ф.П. Еднерала и перешел на преподавательскую работу в Московский вечерний металлургический институт (МВМИ). Профессор Ф.П. Еднерал поручил молодому преподавателю создание лаборатории вакуумной металлургии, которая в кратчайшие сроки была создана и включала вакуумную индукционную печь,

две вакуумных печи сопротивления, участок газового анализа. Борис Вадимович продолжал вести активную научную работу в области физико-химических основ металлургии и вакуумной металлургии, привлекая к исследованиям аспирантов-выпускников Института стали и МВМИ, а также специалистов других организаций. Итогом большой научной деятельности стала защита в 1970 году в диссертационном совете МИСиС диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. На протяжении многих лет Борис Вадимович поддерживал тесную связь с ИМЕТ АН СССР имени А.А. Байкова, с Институтом стали и сплавов, был членом диссертационного совета и входил в состав редакционной коллегии журнала «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия».

В самом начале своей научной деятельности Б.В. Линчевским было открыто, на примере раскисления металла хромом и марганцем, явление предельной раскислительной способности элементов в расплавах на основе железа и никеля: начиная с определенной концентрации дальнейшее повышение содержания элемента-раскислителя не приводит не только к снижению концентрации кислорода в расплаве, но даже обуславливает ее рост. В последующем это явление было подтверждено другими исследователями для всех элементов-раскислителей. Большую значимость представляют исследования Б.В. Линчевского в области диффузии газов в металлах, выплавки стали и сплавов в вакууме, разработки методов электрохимического контроля содержания азота в расплавах. Б.В. Линчевским в издательстве «Металлургия» опубликованы монографии «Вакуумная индукционная плавка», «Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами», «Вакуумная металлургия стали и сплавов».

За время работы в Московском государственном вечернем металлургическом институте Б.В. Линчевским подготовлено большое число инженеров-металлургов и физико-химиков, 26 кандидатов технических наук. Им написаны получившие широкую известность учебники и учебные пособия: «Техника металлургического эксперимента», «Теория металлургических процессов», «Физическая химия», «Основы производства и обработки металлов» и другие, некоторые из них переведены на иностранные языки. Он неоднократно выступал с научными докладами на конференциях разного уровня в СССР, РФ, Германии, Польше, США. Профессор Б.В. Линчевский всегда поддерживал дружеские отношения с коллегами из Магнитогорска, Челябинска, Екатеринбургa и других городов.

Деятельность Б.В. Линчевского отмечена государством орденом «Дружбы народов», медалями, званием «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР». В пе-

риод клеветнических нападок недобросовестных журналистов на работу МВМИ Б.В. Линчевский совместно с другими преподавателями активно выступил в защиту честного имени института. Труд преподавателей и сотрудников МВМИ, в том числе и Б.В. Линчевского, был высоко оценен Правительством: за подготовку квалифицированных кадров и развитие научных исследований МВМИ в 1981 году был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Помимо научной и преподавательской деятельности, Б.В. Линчевский увлекался водным и пешим туризмом. Как он говорит, прошел и проплыл на байдарке всю Россию от Бреста до Камчатки, побывал во многих странах Европы и в США. Как истинный русский интеллигент он всю жизнь интересовался искусством –

живописью, литературой, музыкой, театром, не пропустил ни одной заметной выставки. Горячий поклонник поэзии, он на своих лекциях читал студентам поэмы «Евгений Онегин», «Демон», стихи К. Симонова, стихи поэтов «серебряного века», воспитывая у слушателей любовь к отечественной поэзии и русскому языку.

Друзья и коллеги поздравляют Б.В. Линчевского с 90-летием, искренне желают ему многих лет активной и интересной жизни, крепкого здоровья, неостывающих увлечений! Оставайтесь для нас примером ученого, профессора, патриота нашей Родины!

*Г.Н. Еланский, доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки
Российской Федерации*

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., главный редактор

Протопопов Е.В., заместитель главного редактора

Ивани Е.А., заместитель главного редактора

Бащенко Л.П., заместитель ответственного секретаря

Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию

Олендаренко Н.П., ведущий редактор

Неунывахина Д.Т., ведущий редактор

Расенец В.В., верстка, иллюстрации

Кузнецов А.А., системный администратор

Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 28.06.2018. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,5. Заказ 8121. Цена свободная.

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

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

APPLICATION OF WATER-AIR COOLING TECHNOLOGIES FOR HEAT TREATMENT OF BEARING RINGS

LOAD AND STRAIN STATUS OF CCM BACKUPS AND STRIPE DEFORMATION AT PRODUCTION OF STEEL SHEETS FOR WELDED PIPES. REPORT 2

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE OF TPP (THERMAL POWER PLANT). PART 1

FRACTURE RESISTANCE OF "TRANSITION" AREA IN THREE-LAYER STEEL/VANADIUM ALLOY/STEEL COMPOSITE AFTER THERMOMECHANICAL TREATMENT

REDISTRIBUTION OF CARBON ATOMS IN DIFFERENTIALLY CHARGED RAILS FOR LONG-TERM OPERATION

THERMODYNAMICS OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF LIQUID METAL COMPONENTS IN Fe-Mg-AL-LA-O SYSTEM

MATHEMATICAL MODEL OF CRANK-TYPE JOINT CLEARANCE OVERTRAVEL ASSESSMENT IN OSCILLATING CRANK DRIVE OF JAW CRUSHER

IMPROVEMENT OF VIBRATING FEEDERS-SCREENS FOR MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

SCOPING OF PILOT TESTING OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING

DIGITAL PROTOTYPES OF MAN-MACHINE SYSTEM PERFORMANCE (IN THE CASE OF DRAWING MILLS)

THERMODYNAMICS OF OXYGEN SOLUTIONS IN ALUMINUM-CONTAINING Ni-Cr MELTS

ANALYSIS OF THE WALL THICKNESS VARIATION OF PIPES UNDER INTERNAL PRESSURE