

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2018. Т.16, №1

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

Издается с марта 2003 года

Редакционная коллегия:

Председатель редакционной коллегии: В.М. Колокольцев (Россия)

Главный редактор: М.В. Чукин (Россия)

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун (Россия)

Зам. главного редактора:

С.Е. Гавришев (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),

О.С. Логунова (Россия), В.Р. Храмшин (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), В.Е. Громов (Россия),
М. Дабала (Италия), Х. Дыя (Польша),
Р. Дюссан (Индия), Р. Кавалла (Германия),
В.Н. Калмыков (Россия), Д.Р. Каплунов (Россия),
Д. Милованович (Сербия), К. Мори (Япония),
И.Б. Мусирин (Малайзия), А.Б. Найзабеков (Казахстан),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),
Г. Роджерсон (Великобритания), В.М. Счастливец (Россия),
Ю Фенг (КНР), Р. Цин (Великобритания)

Редакция:

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун

Ответственные секретари: М.А. Полякова, М.В. Шубина

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Елесина В.И.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018

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

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

код html:

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

Тел.: (3519) 22-14-93.

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

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

Журнал подготовлен к печати издательским центром

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

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 26.03.2018. Заказ 102. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2018. Vol. 16, no. 1

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board

Head of the Editorial Board: V.M. Kolokoltsev (Russia)

Editor-in-Chief: M.V. Chukin (Russia)

First Deputy Editor-in-Chief: G.S. Gun (Russia)

Deputy Editor-in-Chief:

S.E. Gavrishev (Russia), V.R. Khrumshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia)

V.E. Gromov (Russia),
M. Dabala (Italy), H. Dyja (Poland),
R.O. Dusane (India), Feng Ye (P.R.China),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), D. Milovanovic (Serbia),
K. Mori (Japan), I.B. Musirin (Malaysia),
A.B. Naizabekov (Republic of Kazakhstan),
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (Great Britain),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (Great Britain),
V.M. Schastlivtsev (Russia), J.-B. Vogt (France)

Editorial Staff:

First Deputy Editor-in-Chief: G.S. Gun
Executive Editors: M.A. Polyakova, M.V. Shubina
Editor: N.V. Kutekina
Technical Editor: K.V. Gavrusheva
Translated into English: V.I. Elesina

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018

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

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

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

Editorial office:

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Phone: +7 (3519) 221 493.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.
Publication date: 26.03.2018. Order 102. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	4
<i>Голик В.И., Дмитрак Ю.В.</i>	
Перспективы комбинирования горных технологий при производстве цветных металлов	4
<i>Хазин М.Л., Штыков С.О.</i>	
Карьерный электрифицированный транспорт	11
Литейное производство.....	19
<i>Чайкин А.В., Чайкин В.А., Лозов В.С., Касимгазинов А.Д., Карман Ю.В., Быков П.О.</i>	
Сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленной с применением различных модификаторов и раскислительных смесей	19
Материаловедение и термическая обработка металлов.....	26
<i>Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Булдашев И.В., Мирзоев А.А.</i>	
Термодинамические, структурные и концентрационные особенности образования бескарбидного бейнита в марганец-кремнистых сталях	26
<i>Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф.</i>	
Влияние лития на теплоёмкость и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ2.18	37
Моделирование металлургических процессов	45
<i>Сушко Т.И., Турищев В.В., Пашнева Т.В., Попов С.В.</i>	
Компьютерное моделирование физического питания отливок СВС в литье по выплавляемым моделям	45
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	54
<i>Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.</i>	
Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения	54
<i>Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А.</i>	
Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций Хатай и Адана Турецкой республики.....	61
Сведения об авторах.....	71

CONTENTS

Mineral Mining	4
<i>Golik V.I., Dmitrak Yu.V.</i>	
Prospects of using a combination of mining techniques in the production of non-ferrous metals.....	4
<i>Khazin M.L., Shtykov S.O.</i>	
Electric mining trucks	11
Metal Casting	19
<i>Chaykin A.V., Chaykin V.A., Lozov V.S., Kasimgazinov A.D., Karman Yu.V., Bykov P.O.</i>	
Comparative analysis of the quality indices of the 110G13L steel produced with various inoculants and deoxidizing agents	19
Materials Science and Heat Treatment of Metals	26
<i>Mirzayev D.A., Yakovleva I.L., Tereshchenko N.A., Buldashev I.V., Mirzoev A.A.</i>	
Thermodynamics, structure and concentration of carbide-free bainite in manganese-silicon steels during its formation	26
<i>Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ibrohimov N.F.</i>	
Effect produced by lithium on the heat capacity and the changing thermodynamic functions of the AZh2.18 aluminium alloy	37
Simulation of Metallurgical Processes.....	45
<i>Sushko T.I., Turishev V.V., Pashneva T.V., Popov S.V.</i>	
Computer simulation of the SHS casting feed in investment casting.....	45
Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems	54
<i>Min Thu Aung, Suzdorf V.I.</i>	
Dynamic correction of electric drives with series motors	54
<i>Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A.</i>	
Analysis of voltage fall in 380 kV regional electrical power networks of Hatay and Adana provinces, Turkey	61
Information About Authors	71

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 504.55.054:622(470.6)

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-4-10>

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМБИНИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Голик В.И., Дмитрак Ю.В.

Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия

Аннотация

Актуальность и цель исследования. Статья посвящена актуальной проблеме упрочнения ослабленной пост – реформационными явлениями минерально-сырьевой базы цветной металлургии путем вовлечения в производство недоступных для традиционной технологии переработки запасов технологически вскрываемых руд преимущественно цветных металлов. **Методы.** Методика исследования включает оценку возможности использования неактивных ресурсов при подземной разработке месторождений металлических руд комбинированной технологией с использованием комплекса принятых методов, в том числе ретроспективное осмысление передового опыта урановой отрасли и интерпретацию полученных результатов. **Результаты.** Сформулированы принципы комбинирования технологий разработки природных и техногенных месторождений руд цветных металлов по эколого-экономическому критерию. Дана историческая справка и результаты анализа практики подземного выщелачивания урановых и полиметаллических руд с балансовым содержанием металлов. Приведены сведения о механизме и способах комбинирования технологий добычи и первичной переработки на основе использования прогрессивных элементов традиционных и новых технологий, в том числе управление состоянием дискретных пород скальных массивов закладкой пустот твердеющими смесями дифференцированной прочности, способов подземного и кучного выщелачивания технологически вскрываемых металлов и выщелачивания в дезинтеграторах с комбинированной механо-химической активацией компонентов твердеющих смесей. Сформулированы условия эффективности применения технологии выщелачивания. **Выводы.** Освоение комбинированных технологий переработки некондиционных для традиционной технологии запасов открывает новые перспективы для горно-обогачительных предприятий цветной металлургии. Комбинирование традиционных технологий разработки с инновационными технологиями выщелачивания металлов является реальным резервом оздоровления экономики горных предприятий, обеспечивая извлечение металлов до безопасного уровня и возможность погашения образованных горными работами пустот закладкой твердеющими смесями на основе утилизируемых хвостов добычи и переработки руд.

Ключевые слова: строительная механика, подземная разработка, порода, массив, геомеханика, металл, выщелачивание.

Введение

При в целом удовлетворительной обеспеченности отраслей экономики запасами металлических полезных ископаемых состояние минерально-сырьевой базы цветной металлургии формирует национальную проблему [1–3].

Не обеспечен собственным сырьем ряд заводов Урала, на Кольском полуострове с выбыванием основного поставщика медно-никелевых руд осложняется положение металлургических комбинатов Печенганикель и Североникель. Без достаточной сырьевой базы работают свинцово-цинковые рудники Читинской области, Приморья и Северного Кавказа, оловянные – в Хабаровском и Приморском краях, вольфрамовые – в Приморском крае.

Результаты и обсуждение

По мере исчерпания запасов разрабатываемых месторождений приоритетным, а в некоторых случаях и единственным источником минерального сырья, могут стать техногенные объекты.

В хвостах обогащения руд цветных металлов доля не извлеченных компонентов от их количества в исходной руде достигает соответственно, %: олова –58; вольфрама –50; цинка –47; свинца –39; молибдена –53; меди –36; никеля –25. Показатель извлечения основных полезных ископаемых не превышает 78%, а попутных элементов составляет от 10 до 30%.

Техногенные отходы медной подотрасли Урала объединяют 220 млн т хвостов обогащения с содержанием меди 0,34–0,37%, которое близко к кондиционному значению 0,35–0,5%. Хвосты

обогащения медно-никелевых руд Норильского рудного узла содержат промышленные концентрации платиноидов, золота и серебра.

При обогащении вольфрамово-молибденовых руд не извлекаются до 60% меди, до 81% висмута, до 62% тантала, золота, серебро и другие элементы. На Тырныаузском комбинате кондиционными считаются руды с содержанием $>0,1\%$ триоксида вольфрама, а в хвостах его содержание превышает 0,04%. На долю кондиционных руд приходится всего 13,5% горной массы, содержащей лишь 34,6% полезного компонента. Некондиционные руды уносят в отвал 65,4% извлеченного из недр металла.

В вольфрамово-молибденовой подотрасли накоплены хвосты флотационного и флотационно-гравитационного обогащения, которые содержат около 400 тыс. т молибдена и более 100 тыс. т вольфрама. Более половины составляют хвосты с промышленным содержанием молибдена 0,012–0,02%, в остальной массе содержание молибдена до 0,005%.

В отходах медной, свинцово-цинковой, никель-кобальтовой, вольфрамово-молибденовой, оловянной и алюминиевой подотраслей содержится более 8,0 млн т меди, 9,0 млн т цинка, 1,0 млн т свинца, 2,5 млн т никеля, 33,5 млн т алюминиевого сырья, 600 тыс. т олова, 200 тыс. т молибдена, около 1 тыс. т золота и 12 тыс. т серебра.

Резервы полезных компонентов в накопленных отходах равноценны запасам многих новых месторождений. Наиболее крупными техногенными месторождениями являются хвосты обогащения Гайского, Норильского, Салаирского, Учалинского и Солнечного ГОК; шлаки металлургических заводов – Среднеуральского, Электроцинка, Печенганикеля, Североникеля; некондиционные руды Гайского, Сибайского и других ГОК. Суммарная ценность накопленных извлекаемых металлов в отходах сопоставима с ценностью запасов минерального сырья в недрах.

В качестве сырья для стройиндустрии используется не более 10% годового объема образования отходов, при том что в технологически развитых странах из отходов получают более 40% годового объема меди, 35% золота и значительную долю других металлов [4–6].

При вовлечении в переработку отходов горнорудного производства наряду с пополнением минерально – сырьевой базы решаются экологические проблемы. Отходы занимают площадь более 1300 км² с ежегодным увеличением на 85–90 км². Негативное воздействие на окружающую среду проявляется на территории, в 10 раз и бо-

лее превышающей занимаемую отходами площадь. Значительная часть отчуждаемых земель находится в границах населенных пунктов и крупных городов.

Техногенные месторождения компактно расположены на поверхности земли, горная масса в них дезинтегрирована, что снижает затраты на их разработку и делает технологию утилизации металлов рентабельной.

Устойчивое развитие горно-металлургических предприятий и обеспечение минерально-сырьевой безопасности России может быть достигнуто путем упрочнения сырьевой базы за счет вовлечения в производство потерянных и считающихся недоступными запасов.

Со временем промышленные запасы руд многих месторождений уменьшаются, а качество руд снижается, увеличивая себестоимость металлов. Это стимулирует выборочную отработку участков месторождений, что еще больше увеличивает потери руд и металлов.

При добыче руд цветных металлов преобладает валовая отбойка без разделения на сорта. Системы разработки с обрушением характеризуются повышенными потерями и разубоживанием руды, поэтому повышается приоритет систем разработки с закладкой выработанного пространства.

В пределах месторождений появляются участки, где использование традиционных технологий экономически неприемлемо.

Стремление максимально использовать балансовые и забалансовые запасы руды обусловило появление и развитие направления комбинированной разработки месторождений. Инструментом реализации этого направления является подземное выщелачивание руд в блоках.

Металлические руды – комплексные и утилизация хвостов их переработки в собственных или смежных производствах без извлечения из них оставшихся металлов является очевидным паллиативом. Многие металлы (золото, уран, медь, цинк и др.) относятся к легко вскрываемым, что увеличивает возможности их выщелачивания из хвостов традиционного обогащения.

При неоспоримых достоинствах (полнота и высокое качество добываемых руд) технологии с закладкой требуют выдачи на поверхность всей руды и разубоживающих пород. Более того, в образованные пустоты необходимо подать смесь из также добываемых горными работами материалов.

Эти недостатки устраняют технологи с выщелачиванием металлов (рис. 1).

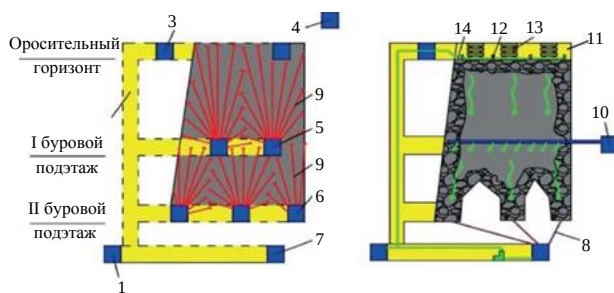


Рис. 1. Подземное блоковое выщелачивание металлов из руд: 1 – штрек; 2 – восстающий; 3 – штрек для орошения; 4 – штрек; 5 – буровые штреки; 6 – дренажно-буровые штреки; 7 – дренажный штрек; 8 – дренажные скважины; 9 – промежуточный горизонт орошения; 10 – промежуточный горизонт орошения; 11 – штрек для орошения; 12 – верхняя подсека; 13 – костровая крепь; 14 – оросительная система

Для регионов горной добычи практический интерес представляют объекты разработки прежних лет, нередко вмещающие отделенную от массива и раздробленную горную массу. Исследования перспектив извлечения металлов из некондиционных руд начались полвека назад как альтернатива традиционным технологиям, использование которых опасно для окружающей среды химическим загрязнением [7–9].

Первое в мировой практике подземное выщелачивание урановых руд с балансовым содержанием металлов осуществлено на Казахском месторождении Восток отработкой рудного тела в трещиноватых породах крепостью 4–6 по М.М. Протодяконову в блоке размерами 30×5×30 м. При коэффициенте разрыхления руд 1,12 коэффициент извлечения металлов в раствор составил 72%.

Примерно в то же время подземное выщелачивание полиметаллических руд с балансовым содержанием металлов было реализовано на Фиагонском месторождении РСО-Алания.

На месторождениях руд цветных металлов получило распространение кучное выщелачивание металлов с извлечением до 50 – 70% металлов от исходного значения в хвостах.

Сложившаяся ситуация с минерально – сырьевой базы благоприятствует развитию комбинированных технологий, суть которых заключается в том, что богатые руды выдают на поверхность и перерабатывают на заводе по традиционной технологии, а бедные – выщелачивают с получением металлов, строительного сырья, обессоленной воды, газов, кислот и щелочей [10–12].

Природоохранная сущность технологий с выщелачиванием заключается в следующем:

- увеличение объемов закладки пустот твердеющими смесями из утилизируемых хвостов снижает разубоживание руд и уменьшает потери в рудных целиках;
- извлечение всех металлических компонентов из руд с селективизацией гидрометаллургической переработкой.

Получило развитие новое направление: извлечения из некондиционного сырья и хвостов обогащения путем воздействия высокой энергии в дезинтеграторах.

Процесс комбинирования технологий включает в себя вопросы управления состоянием массива, приготовление и доставку твердеющих смесей, обеспечение фильтрации и сбора растворов выщелачивания, безотходную утилизацию хвостов обогащения и некоторые другие.

Перспективы комбинирования технологий усиливаются путем использования не только хвостов обогащения после извлечения из них металлов, но и хвостов подземного выщелачивания, которые по окончании извлечения металлов естественными вяжущими веществами скрепляются в массив прочностью до 1 МПа.

Современные методы управления породными конструкциями основаны на учете механизма горного давления и создаваемых им напряжений, а также теории упругости, пластичности, ползучести и др. [13–15].

Методической основой обоснования корректности использования искусственных массивов из отходов производства являются положения разуплотненных и уплотненных пород конструкций с использованием методов механики дефектных сред А.Н. Динника, М.М. Протодяконова, П.М. Цимбаревича, Г.М. Малахова, В.Д. Слесарева и др.

Основу управления состоянием массивов методами строительной механики составляют положения:

- несущая способность конструкций зависит от геомеханической сбалансированности пород;
- несущая способность пород повышается путем регулирования деформаций;
- управление массивами обеспечивается повышением прочности несущих породных конструкций.

Породы кровли выработок разбиты на структурные блоки, которые в кровле очистных выработок могут образовывать трехшарнирную арку, прочность которой определяется физико-механическими свойствами пород, размерами структурных блоков и элементами залегания рудных тел (рис. 2).

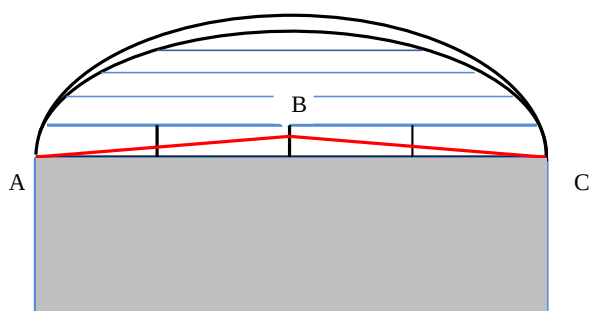


Рис. 2. Схема сохранения плоской кровли при возникновении шарнирной арки: A, B, C – шарниры

Критерием устойчивости является условие

$$L_{\text{факт}} \leq L_{\alpha}^{\circ},$$

где L_{α}° – предельно допустимый эквивалентный пролет обнажения плоской кровли, определенный для данных условий, м; $L_{\text{факт}}$ – эквивалентный пролет кровли фактической выработки, м.

Если условия отработки рудного тела не обеспечивают возможность сплошной отработки, оно делится на участки, размеры каждого из которых удовлетворяют условию.

При расчете безопасного пролета выработки исходят из того, что кровля обрушается, но над выработкой образуется свод естественного равновесия, который на себе несет массу вышележащих пород и препятствует дальнейшему обрушению пород.

Пролет бесконечной длины выработки, высота свода естественного равновесия над ней и инженерно-геологические характеристики массива связаны между собой:

$$\left(\frac{2R_{\text{сж}}k_0d_1h_{\text{св}}}{\gamma g(2H-h_{\text{св}})} \right)^2 = h_{\text{св}}^2 \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^4,$$

где d_1 – размер структурного блока в горизонтальном направлении, м; $R_{\text{сж}}$ – прочность горных пород на сжатие, Па; k_0 – коэффициент структурного ослабления пород; $h_{\text{св}}$ – высота свода естественного равновесия, м; γ – плотность горных пород, кг/м³; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; H – глубина залегания выработки, м; l – пролет выработки бесконечной длины, м.

Связь между максимальным пролетом плоской кровли, высотой соответствующего этой выработке свода естественного равновесия и свойствами пород имеет вид:

$$\left(\frac{3R_{\text{сж}}k_0d_2^2}{2k_3\gamma h_{\text{св}}g} \right) = d_2^2 \left(\frac{L^{\circ}}{2} \right)^2 + \left(\frac{L^{\circ}}{2} \right)^4,$$

где $R_{\text{сж}}$ – прочность горных пород на сжатие, Па; k_0 – коэффициент структурного ослабления пород; d_2^2 – вертикальный размер структурного блока, м; γ – плотность горных пород, кг/м³; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; $h_{\text{св}}$ – высота свода естественного равновесия, м; L° – предельно допустимый пролет плоской кровли выработки бесконечной длины.

Величина предельно допустимого пролета плоской кровли выработки бесконечной длины:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{2R_{\text{сж}}k_0d_1h_{\text{св}}}{\gamma g(2H-h_{\text{св}})} \right)^2 &= h_{\text{св}}^2 \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^4 \\ \left(\frac{3R_{\text{сж}}k_0d_2^2}{2k_3\gamma h_{\text{св}}g} \right) &= d_2^2 \left(\frac{L^{\circ}}{2} \right)^2 + \left(\frac{L^{\circ}}{2} \right)^4 \end{aligned} \right.$$

Комбинирование технологий при одинаковой производительности предприятия по горной массе позволяет повысить производительность по металлу в 2 раза на всех этапах разработки месторождения (рис. 3) [16–18].

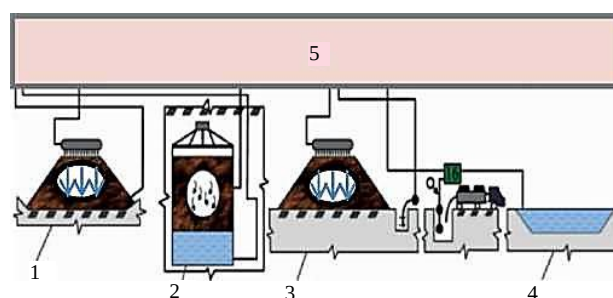


Рис. 3. Комбинированное выщелачивание металлов: 1 – штабель КВ; 2 – блок ПВ; 3 – отвал; 4 – пруд; 5 – цех переработки растворов

Максимальная экономическая эффективность отработки обеспечивается при условии

$$M' \geq \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_T}{\varepsilon_n - \varepsilon_2\varepsilon_3} \cdot M,$$

где M – количество металлов в недрах, ед.; M' – количество выданного из недр металла, ед.; ε_n – извлечение металлов из руд выщелачиванием, доли ед.; ε_T – извлечение металлов из недр при традиционной технологии

$$\varepsilon_T = \frac{M_B}{M} \cdot \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3,$$

где M_B – количество металлов при традиционной технологии, ед.; ε_1 – извлечение металлов из недр при традиционной технологии, доли ед.; ε_2 – извлечение металлов в концентрат при обогащении, доли ед.; ε_3 – извлечение полезного компонента из концентрата на ГМЗ, доли ед.;

Комбинирование процессов механической активации и химического выщелачивания позволяет извлекать металлы на 2 порядка быстрее, чем при агитационном выщелачивании, что способствует снижению эксплуатационных затрат.

Одним из аспектов выщелачивания в дезинтеграторах является повышение активности компонентов твердеющих смесей в барабанных и вибрационных мельницах и активаторах, например в дезинтеграторах (рис. 4).

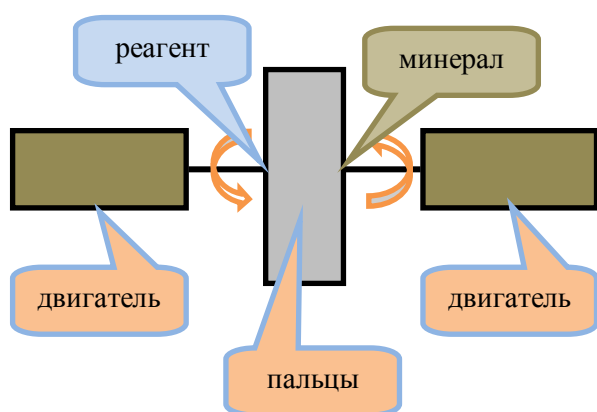


Рис. 4. Схема выщелачивания в дезинтеграторе

Эффективность комбинирования геотехнологий должна оцениваться не по прибыли как разницы между стоимостью металлов на рынке C_d и затратами на его производство $З_d$, а с уменьшением на величину стоимости потерянных в недрах металлов:

$$\Pi = C_d - З_d - C_{\text{п.}}$$

Такой подход поставит применяемые технологии в сравнимые условия и будет способствовать гуманизации отношения к невосполнимым запасам недр. Обозначенная проблема решается с привлечением к научной разработке смежных процессов горного производства, участвующих в формировании его эффективности [19–20].

Заключение

Комбинирование традиционных технологий разработки с технологиями выщелачивания металлов открывает перспективы использования ранее считавшихся некондиционными запасов и является реальным резервом оздоровления экономики горных предприятий, в первую очередь цветной металлургии.

Безотходная утилизация хвостов обогащения на основе технологий выщелачивания обеспечивает не только извлечение металлов до безопасного по санитарным условиям уровня, но и возможность погашения образованных горными работами пустот закладкой твердеющими смесями, в том числе и активированными по дезинтеграторной технологии.

Вовлекаемые в производство некондиционные для традиционных технологий запасы обеспечивают практически неограниченную сырьевую базу и продляют сроки жизни горнообогатительным предприятиям.

Список литературы

1. Голик В.И., Комашенко В.И., Поляков А.В. Современные технологии извлечения металлов из хвостов обогащения и переработки руд с целью их комплексного использования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. №1. С. 100–111.
2. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. 2015. № 1. С. 10–15.
3. Каплунов Д.Р., Мельник В.В., Рильникова М.В. Комплексное освоение недр // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. 333 с.
4. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов // ФТПРМП. 2017. №2. С. 154–160.
5. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference–Mining: Navigating the Global Waters. Denver, United States. 2015. P.529–532.
6. Golik V.I., Dmitrak Yu. V. Parameters of transportation of tailings of metals lixiviating // E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. 2017.
7. Голик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З. Технологии освоения месторождений урановых руд / Российский гос. геологический ун-т им. Серго Орджоникидзе. М., 2007. 131 с.
8. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. 2013. № 5. С. 93–97.
9. Рильникова М.В. Ресурсосбережение и энергоэффективность при комбинированной геотехнологии // Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С. 18–21.
10. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 157. P. 306–324.
11. Franks D.M., Boger D.V., Côte C.M., Mulligan D.R. 2011. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes // Resources Policy. Vol. 36. No. 2. P. 114–122.
12. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping

- operations using a neuro-fuzzy system // *Applied Soft Computing Journal*. 2015. Vol. 32. P. 1–12.
13. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2015. №4. С. 76–88.
 14. Бабкин В.В., Успенский Д.Д. Новая стратегия. Химия-2030. Высокие переделы сырья. Кластеризация. Химизация индустрии РФ. М.: Лика, 2015. 222 с.
 15. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 73–119.
 16. Пучков Л.А. Прогноз минерально-энергетического потребления при бескризисном развитии экономики // *Горный журнал*. 2014. №7. С. 45–48.
 17. Соколов И.В., Антипин Ю.Г. Систематизация и экономико-математическое моделирование вариантов вскрытия подземных запасов при комбинированной разработке месторождений // *Горный журнал*. 2012. № 1. С. 67–71.
 18. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения-2014) / под ред. В.А. Чантурия. Алматы: АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», 2014. 624 с.
 19. Математические модели аэрогазодинамических процессов на очистных участках шахт и рудников / Стась Г.В., Качурин Н.М., Мохначук И.И., Поздеев А.А. // *Изв. ТулГУ. Естественные науки*. Вып. 1. 2013. С. 267–277.

Поступила 04.12.17.

Принята в печать 18.01.18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-4-10>

PROSPECTS OF USING A COMBINATION OF MINING TECHNIQUES IN THE PRODUCTION OF NON-FERROUS METALS

Vladimir I. Golik – D.Sc. (Eng.), Professor

Professor at the Department of Mining, North-Caucasus State Technical University, Vladikavkaz, Russia. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Yury V. Dmitrak – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector

North-Caucasus State Technical University, Vladikavkaz, Russia.

Abstract

Relevance and Objectives. This article looks at the important problem of reinforcing the non-ferrous metallurgy mineral base, which was weakened in the post-reform period, through the introduction in the production process of primarily non-ferrous metal ores that cannot be processed using conventional technology. **Methods Applied.** The methods applied include an analysis of the possibility to make use of non-active resources in the underground mining of metal ores using a combination of processes, which also include some conventional techniques, such as retrospective understanding of advanced practices from the uranium industry and interpretation of the results obtained. **Outcomes.** The authors formulated the principles of combining mining techniques for mining natural and man-made non-ferrous metal ore deposits following an eco-economic criterion. The authors give some historical information and their analysis of the in-situ leaching practices applied to uranium and polymetallic ores with balance metal content. Information is given on ways to use combinations of mining and processing techniques based on the use of improved conventional processes together with state-of-the-art technologies, which include the following: control over discrete rocks within a massif by filling the underground voids with hardening stowing mixtures of differentiated hardness, in-situ and heap leaching of mined metals and leaching in disintegrators with mechanical and chemical activation of the hardening mixture components. The articles also de-

scribes the conditions which can ensure efficiency of the leaching process. **Findings.** Combined mining processes designed for substandard reserves open up new prospects for concentrators dealing with non-ferrous metals. Combining conventional mining processes with innovative metal leaching techniques provides a potential for mining companies to improve their economies through reasonable metal recovery and the possibility to use hardening mixtures made with recoverable mine and concentrator tailings for backfilling.

Keywords: Structural mechanics, underground mining, rock, massif, geomechanics, metal, leaching.

References

1. Golik V.I., Romashchenko V.I., Polyakov A.V. Advanced techniques for the recovery of metals from concentrator tailings for their further multiple applications. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauka o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth science]. 2016, no. 1, pp. 100–111. (In Russ.)
2. Lyashenko V.I. Eco technologies for the development of complex mineral deposits. *Markshedyderskiy vestnik* [Mine surveying bulletin]. 2015, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.)
3. Kaplunov D.R., Melnik V.V., Rylnikova M.V. Comprehensive development of mineral resources. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauka o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth science]. 2016, 333 p. (In Russ.)
4. Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Improved recovery of gold due to processing of ore and waste together.

- FTPRMPI [Journal of Mining Science]. 2017, no. 2, pp. 154-160. (In Russ.)
5. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference Mining Navigating the Global Waters. Denver, United States. 2015, pp. 529-532.
6. Golik V. I., Yu Dmitrak. V. Parameters of transportation of tailings of metals lixiviating. E3S Web of Conferences The Second International Symposium Innovative Mining. 2017.
7. Golik V.I., Bryukhovetskiy O.S., Gabaraev O.Z. Development of uranium ore deposits. Moscow, 2007, 131 p. (In Russ.)
8. Golik V.I. Conceptual approaches to the creation of low- and non-waste mining processes through a combination of physico-technical and physicochemical geotechnologies. *Gornyi zhurnal* [Mining journal]. 2013, no. 5, pp. 93-97. (In Russ.)
9. Rylnikova M.V. Resource conservation and energy efficiency provided by combined geotechnology. *Kombinirovannaya geotekhnologiya: resursosberezhenie i energoeffektivnost'* [Combined geotechnology: Resource conservation and energy efficiency]. Magnitogorsk, NMSTU, 2017, pp. 18-21. (In Russ.)
10. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306-324.
11. Franks, D. M., Boger D. V., Côte, C. M., Mulligan D. R. 2011. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*, vol. 36, no. 2, pp. 114-122.
12. H. Jang, E. Topal, Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. *Applied Soft Computing Journal*. 2015, vol. 32, pp. 1-12.
13. Golik V.I., Romashchenko V.I., Kachurin N.M. The concept of combining ore development techniques. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauka o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth science]. 2015, no. 4, pp. 76-88. (In Russ.)
14. Babkin V.V., Uspensky D.D. New strategy. Chemistry-2030. High value added raw materials. Clustering. Adoption of chemicals by the industry of the Russian Federation. Moscow: Lika, 2015, 222 p. (In Russ.)
15. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73-119.
16. Puchkov L.A. Expected consumption of mineral and energy resources in crisis-free economy. *Gornyi zhurnal* [Mining journal]. 2014, no. 7, pp. 45-48. (In Russ.)
17. Sokolov I.V., Antipin Yu.G. Systematization and economics-focused modeling of techniques for the development of underground reserves when using a combined development technology. *Gornyi zhurnal* [Mining journal]. 2012, no. 1, pp. 67-71. (In Russ.)
18. Progressive methods of concentration and comprehensive processing of natural and man-made mineral resources (Plaksin readings 2014). Ed. by V.A. Chanturia. Almaty: JSC «Center of Sciences about Earth, metallurgy and enrichment», 2014, 624 p. (In Russ.)
19. Stas G.V., Kachurin N.M., Mokhnachuk I.I., Pozdeev A.A. Mathematical models of aerogas dynamics in stopes at mines and quarries. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauka o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth science]. 2013, iss. 1, pp. 267-277. (In Russ.)

Received 04/12/17
Accepted 18/01/18

Образец для цитирования

Голик В.И., Дмитрак Ю.В. Перспективы комбинирования горных технологий при производстве цветных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 4–10. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-4-10>

For citation

Golik V.I. Dmitrak Yu.V. Prospects of using a combination of mining techniques in the production of non-ferrous metals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 4–10. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-4-10>

КАРЬЕРНЫЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ ТРАНСПОРТ

Хазин М.Л., Штыков С.О.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

В горной промышленности имеются определенные проблемы, которые тормозят ее развитие. Проведенные исследования позволили улучшить процессы сгорания и экономии топлива дизельных двигателей карьерных самосвалов. Тем не менее до 30% топлива расходуется на энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве. Экологические требования существенно корректируют область рационального применения автомобильного транспорта и требуют применения более чистых и эффективных транспортных средств с меньшим объемом выбросов отработанных газов. К экологической проблеме карьеров прибавилась новая – непрекращающийся рост цен на моторное топливо. В связи с чем все острее встает проблема значительного сокращения топлива, потребляемого карьерной техникой. Одним из путей повышения энергоэффективности на открытых горных работах может быть перевод автотранспорта на потребление электроэнергии. Электрические приводы используются в горнодобывающей промышленности дольше, чем дизельные двигатели. Возобновление интереса к троллейвозам связано, в первую очередь, с уменьшением потребления дизельного топлива карьерными самосвалами. Помимо очевидного снижения затрат на топливо, на основе современной технологической базы были получены дополнительные преимущества. Основная причина того, что троллейвозы и дизель-троллейвозы не нашли практического применения на открытых горных работах, заключается в решении этой задачи путем простой механической замены карьерного автосамосвала с дизельным двигателем на дизель-троллейвоз. В совокупности все положительные качества троллейвоза понижают эксплуатационные расходы на транспортирование горной массы на 15–20%, а также исключают загазованность карьера и образование дыма. Самым серьезным недостатком троллейвоза является необходимость в питании от контактной сети. В настоящее время, благодаря современным технологиям, устранение большинства недостатков троллейвоза не представляет сложности. Троллейвозы выгодны для горных предприятий, географически расположенных в районах, где имеется большая разница между затратами на дизельное топливо и стоимостью электроэнергии. Карьерные троллейвозы лучше использовать только на долгосрочных разработках, поскольку содержание контактной сети троллейных линий требует ухода и обслуживания. Срок окупаемости затрат может составить 1–2 года.

Ключевые слова: троллейвоз, энергосбережение, карьер, самосвал, экология.

Введение

Горнодобывающая промышленность России специализируется на добыче различных полезных ископаемых и играет важную роль в развитии экономики страны. Поэтому данная отрасль находится в постоянном развитии, что требует применения специализированного оборудования и инновационных технологий. В горной промышленности имеются определенные проблемы, которые тормозят ее развитие. В первую очередь к ним относится загрязнение окружающей среды, которое происходит во время разработки различных шахт и карьеров.

До 80% горной массы, получаемой при добыче полезных ископаемых открытым способом, перевозится карьерными самосвалами с дизельными двигателями, которые имеют следующие достоинства:

- автономность, т. е. независимость от внешних источников питания энергией;
- быстрая и легкая заправка;
- высокая мобильность.

Состояние проблемы

Для современного этапа развития открытых горных работ характерно увеличение глубины карьеров до 300–500 м. С углублением карьеров начинают проявляться недостатки автотранспорта, ограничивающие его эффективное применение и являющиеся в ряде случаев причиной длительной остановки работы предприятий.

Загрязнение атмосферы в наибольшей степени связано с применением на транспорте двигателей внутреннего сгорания. Самосвал грузоподъемностью 120 т, работая в средних условиях, расходует 500–600 т топлива в год и выбрасывает в атмосферу около 2000 условных тонн вредных веществ в отработанных газах [1, 2].

Особенностью выбросов дизельных двигателей является содержание в них канцерогенных полициклических ароматических углеводородов, среди которых наиболее вреден бензапирен. Последний, так же как и свинец, относится к первому классу опасности загрязняющих веществ [3–6]. На глубине карьеров более 200–250 м за-

грязнение воздуха вредными веществами на рабочих местах приводит к постепенному превышению предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных Ростехнадзором России, и не отвечает установленным нормативам по содержанию основных составных частей воздуха и вредных примесей согласно требованиям ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны». Кроме того, дизельные двигатели характеризуются повышенной дымностью.

В последние годы были проведены различные исследования для улучшения процесса сгорания и экономии топлива дизельных двигателей карьерных самосвалов. Усовершенствованная система управления температурным режимом работы двигателя может уменьшить расход топлива, выбросы загрязняющих веществ, время прогрева, а также повысить общую производительность двигателя. Тем не менее до 30% топлива расходуется на энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве [7].

К недостаткам дизельных двигателей относятся:

- относительно низкая энергетическая эффективность (около 30–35%, применение турбонаддува и промежуточного охлаждения повышает это значение до 50%);
- относительно низкая скорость движения на подъеме, что снижает производительность самосвалов;
- техническое обслуживание и высокая квалификация механиков;
- значительные операционные расходы, которые, как правило, растут с ценами на нефть;
- высокий уровень шума и вибрации;
- выбросы отработанных газов и загазованность карьеров;
- значительный расход энергии на выработку тепла, теряющегося в пространстве;
- возможность образования тумана.

Экологические требования существенно корректируют область рационального применения автомобильного транспорта, возникает необходимость использования более чистых и эффективных транспортных средств с меньшим объемом выбросов отработанных газов [5, 8]. К практически трудно устранимой экологической проблеме карьеров прибавилась новая – непрекращающийся рост цен на моторное топливо¹ (рис. 1). В связи с чем все острее встает проблема существенного сокращения потребления дизельного топлива.

¹ <https://news.yandex.ru/quotes/213/20010.html>

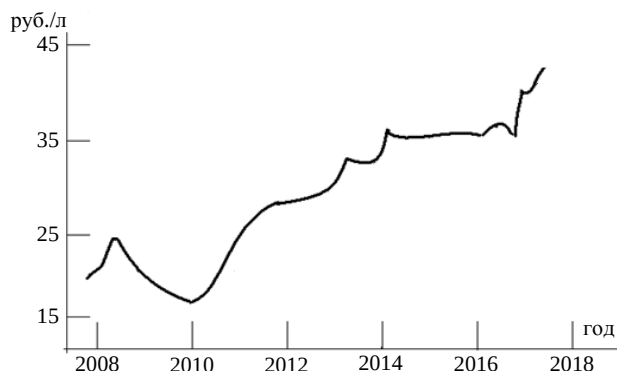


Рис. 1. Динамика розничных цен на дизельное топливо в рублях для России

Возможности применения электрифицированного транспорта

В современных условиях роста стоимости и даже дефицита топливно-энергетических ресурсов особую актуальность приобретает оценка энергетической эффективности промышленных технологий [9]. Энергопотребление автомобильного транспорта определяют продольный уклон автодорог, скорость движения самосвалов и мощность двигателя, которые, в свою очередь, влияют на загазованность карьеров, определяют развитие фронта работ, что в конечном счете влияет на разнос бортов и возможную глубину карьеров. Для сокращения энергопотребления могут быть использованы различные варианты:

- 1) совершенствование техники и технологии открытых горных работ, направленное на экономное расходование дизельного топлива;
- 2) замена нефтяного топлива другими видами экологически более чистого и дешевого топлива, например природного газа или водорода;
- 3) перевод автотранспорта на потребление возобновляемых видов топлива, то есть на потребление электроэнергии.

Недостатки дизельного автотранспорта значительно уменьшаются при использовании в технологическом цикле карьеров электрифицированных самосвалов – дизель-троллейвозного и троллейвозного транспорта. Для электрифицированных видов транспорта загрязнение атмосферы производится только пылением транспортируемого материала при движении.

Электрические приводы используются в горнодобывающей промышленности более 100 лет, на самом деле дольше, чем дизельные двигатели. Возобновление интереса к троллейвозам связано, в первую очередь, с уменьшением потребления дизельного топлива карьерными самосвалами. Помимо очевидного снижения затрат на топливо, на основе современной технологиче-

ской базы были получены дополнительные преимущества:

- увеличение производственной мощности горного предприятия и уменьшение количества машин за счет более высокой скорости самосвалов (более эффективное использование автопарка);
- значительно более высокая энергоэффективность (около 90%);
- постоянный крутящий момент (включая высокий крутящий момент на малых скоростях), быстрое реагирование на нагрузку и лучшую перегрузочную способность;
- почти двухкратное увеличение скорости движения на руководящем уклоне;
- увеличение длительности работы дизельного двигателя между моментами обслуживания;
- двух-трехкратное сокращение расхода топлива и, следовательно, снижение расходов на топливо на 70–80%;
- снижение затрат на техническое обслуживание самосвалов с дизельным двигателем;
- повышение доступности обслуживания и увеличение жизненного цикла дизельного двигателя (меньше рабочих часов);
- низкий уровень шума и вибрации;
- уменьшение объема выхлопа отработанных газов дизеля, загазованности карьера и образования тумана;
- возможность запуска на линии на любой скорости и полезной нагрузки.

Однако проблема создания дизель-троллейбусов, предложенных еще в 50-е годы прошлого века профессором А.С. Фиделевым, в нашей стране муссируется десятилетиями. Разные причины технического, организационного, финансового и даже политического характера не позволили реализовать эту достаточно прогрессивную идею. Это было связано с повышенными капитальными затратами на строительство инфраструктуры и приобретение оборудования, относительно малой «мобильностью» электрифицированного транспорта, относительно невысокой разницы в стоимости дизельного топлива и электроэнергии.

Учитывая возрастающую стоимость дизельного топлива, используемого самосвалами на карьерах, можно прогнозировать, что в обозримом будущем доля затрат на горючее в себестоимости транспортирования горной массы увеличится в среднем в 1,5–2 раза. При максимальной скорости двигателя расход дизельного топлива составляет 450 л/ч, но в режиме троллейбуса двигатель работает на холостом ходу и расход

топлива снижается до 40 л/ч [10]. Это сокращение приводит к значительной экономии топлива и является важным шагом на пути повышения энергоэффективности горного предприятия.

Общее количество внедренных проектов троллейзации карьерного транспорта относительно невелико и, к сожалению, большинство из них – за рубежом [11].

В странах Африки, в Бразилии, а теперь и США успешно эксплуатируется система транспорта с применением дизель-троллейбусов. Особенно показателен пример золоторудного карьера «Бетце» (США, шт. Невада), где для транспортирования 410 тыс. т горной массы в сутки используется парк из 73 дизель-троллейбусов грузоподъемностью 170 т.

В Африке грузовые троллейбусные предприятия начали работать с 1981 г., когда в карьерах Sishen (ЮАР) на участке 2 км начали работать 55 троллейбусов. С октября 1981 г. в ЮАР было открыто движение троллейбусов Unit Rig Lectra Haul M200eT в Пхалаборве (Phalaborwa), обслуживающих участок 8 км. С 1986 г. троллейбусы на шахтах и карьерах используют в Конго (карьер Lubembashi), Намибии (бассейн Россинга – Rossing – в пустыне Намиб) на медных рудниках Гега вблизи Лубумбаши в Заире.

В начале 2012 года компания NHL-North Haul Industries Group получила первый заказ на поставку на Намибийский горный урановый карьер Кояма тягача-троллейбуса с полуприцепом полной массой 330 т с донной загрузкой. Исследованные запасы разреза составляют 170 млн т, а срок разработки может превышать 20 лет. По масштабам это второй в мире урановый рудник.

Электроэнергию можно получать от электрогенератора дизельного двигателя на самосвале или получать из выделенной подстанции и передавать через подвесную контактную сеть непосредственно на двигатель карьерного самосвала.

При добыче полезных ископаемых к подвесной контактной сети предъявляются требования, аналогичные для тяговых приводов на легкой железнодорожной инфраструктуре: механическая стабильность, надежность в эксплуатации и низкие эксплуатационные расходы. Инфраструктура троллейбусного комплекса включает в себя систему контактных сетей, тяговые подстанции, мачты линий высокого напряжения, освещение системы провеса и токоприемник карьерного самосвала [6]. Техника безопасности при эксплуатации и обслуживании электрифицированного колесного карьерного автотранспорта и железнодорожного карьерного автотранспорта аналогична.

Самосвалы работают как в рабочем, так и тормозном режимах. Основным энергетическим преимуществом троллейвоза по сравнению с самосвалом, имеющим традиционную электромеханическую трансмиссию, является возможность рекуперации в сеть кинетической энергии, выделяющейся при торможении и потенциальной энергии при движении под уклон. В этом случае используется одна троллейная линия в грузовом направлении, а для привода троллейвоза в порожнем направлении применяется накопитель-аккумулятор энергии, который накапливает энергию за счет рекуперации энергии торможения в порожнем направлении и дополнительно может подзаряжаться от троллейной линии.

Рекуперация энергии торможения является одним из наиболее перспективных источников экономии энергии. Принципиальным условием реализуемости рекуперации энергии является возможность изменения направления потока энергии между питающей сетью и тяговыми двигателями. Это может быть достигнуто только при определенных конструктивных особенностях преобразовательного агрегата, питающего тяговые двигатели. Основными преимуществами, ожидаемыми от обратимых подстанций, являются [10–14]:

- рекуперация энергии торможения в любое время, сохраняя при этом приоритет естественного обмена энергией между самосвалами;
- уменьшение (устранение) тормозных резисторов и, таким образом, снижение массы самосвала и выделения тепла;
- регулирование выходного напряжения постоянного тока;
- снижение уровня гармоник и повышение коэффициента мощности на стороне переменного тока.

На основе анализа, выполненного в Южной Африке, было отмечено [10], что нагруженный самосвал на пути в 1 км, спускаясь по уклону, восстанавливает около 7900 кВтч энергии в сутки (работа 20 ч, 5 мин загрузки). При стоимости электроэнергии \$0,077 за киловатт-час стоимость энергии рекуперации в день на грузовике составит \$608. При движении порожнего самосвала по аналогичному профилю стоимость рекуперации энергии в день на самосвал составит \$262. Экономия будет тем значительнее, чем длиннее уклон и больше размер автопарка.

В то же время троллейвозам присущи определенные недостатки. К основным недостаткам дизель-троллейвозов можно отнести:

- повышенные требования к конструкции и качеству дорожного покрытия;
- необходимость дополнительных затрат на

создание и поддержание разветвленной контактной сети;

- увеличение стоимости дизель-троллейвоза на 5–10% по сравнению с серийными самосвалами с электроприводом;
- увеличение массы дизель-троллейвоза в сравнении с дизель-электрическим самосвалом за счет установки троллейного оборудования

Первоначально задача создания электрифицированного транспорта решалась путем установки дополнительного электродвигателя на карьерный самосвал, т. е. экспериментальные образцы были построены на базе машин, спроектированных с расчётом использования в качестве силового агрегата дизельного двигателя, например БЕЛАЗ-75195 и другие, более поздние модели [15]. Поэтому электродвигатель не был способен продемонстрировать в полной мере все преимущества перед дизелем. Для того чтобы максимально использовать все преимущества электродвигателя, необходимо сразу проектировать машину из расчёта использования выбранного электрического силового агрегата.

Троллейвоз или троллейно-аккумуляторный самосвал имеет дополнительные преимущества:

- значительно более высокий КПД электродвигателя по сравнению с дизельным;
- тепловые потери энергии в 3 раза меньше, чем у дизельного двигателя такой же мощности;
- уменьшение массы самосвала на 10–15%, за счет отсутствия у троллейвозов второго силового агрегата (дизельного двигателя), а также топливного и масляного баков, масляного и водяного радиаторов, систем отвода отработавших газов и ряда других, при сохранении той же грузоподъемности;
- исключение дизельного выхлопа и, следовательно, отсутствие загазованности карьера и образования тумана, т. е. значительное улучшение экологической ситуации;
- исключение затрат на закупку, хранение и транспортировку дизельного топлива;
- уменьшение стоимости самосвала за счет исключения дизельного двигателя;
- уменьшение затрат на шины из-за меньшей собственной массы троллейвоза, особенно в случаях, когда троллейвозы используются практически на горизонтальной дороге;
- лёгкость в обслуживании силового агрегата;
- невосприимчивость электродвигателя к морозам, что особенно выгодно отличает его в северных регионах от дизеля (сильные отрицательные температуры оказывают негативное влияние в основном на аккумуляторы).

У троллейвоза или троллейно-аккумуляторного самосвала имеются недостатки, как общие с дизель-троллейвозами, так и собственные:

- необходимость дополнительных затрат на создание и поддержание разветвленной контактной сети;
- повышенные требования к конструкции и качеству дорожного покрытия;
- малая маневренность;
- затрудненность процессов погрузки и разгрузки.

Уменьшение массы самосвала имеет важное значение, так как каждая тонна снижения массы самосвала является дополнительной тонной горной массы, которая может быть перевезена. Длинные перегоны и более крутые склоны дают возможность для проявления всех достоинств троллейвоза при перевозе грузов.

Эти особенности делают электроприводы привлекательной альтернативой дизельным самосвалам, но их фактические преимущества и недостатки в значительной степени зависят от того, как электроэнергия подается на двигатель самосвала. По этой причине отдельно рассматриваются различные категории оборудования для электропогрузчиков и транспортных средств.

Существует пять основных категорий электрических грузовиков в зависимости от того, как электроэнергия предоставляется двигателям:

- встроенный аккумулятор,
- через дополнительный силовой кабель,
- от воздушной контактной сети,
- использование гибридного электропривода,
- из топливных элементов.

За последние годы значительно улучшились конструкции и параметры карьерных самосвалов, повысилась их производительность. Карьерные самосвалы с электроприводом, оснащенные токоприемниками, могут получать энергию от воздушной контактной сети. Электропривод обеспечивает подачу питания и приводит к увеличению скорости самосвала, позволяет увеличить межремонтные интервалы двигателя и снижает затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть. На сегодняшний день фирма Siemens является ведущим поставщиком троллейвозов (рис. 2) и их инфраструктуры [16].

Необходимость в питании от контактной сети является самым серьезным недостатком троллейвоза. Для обеспечения его работы требуется проложить троллейную трассу, к тому же, ввиду «фроста» карьера по мере выработки полезного ископаемого, трассу необходимо будет время от времени перемещать и дополнять новыми участками. Трасса должна быть обеспечена необходимым количеством тяговых подстанций и основным источником питания сети, а также быть удалена от места

производства взрывов на 300–600 м. Кроме того, высоковольтные провода во время загрузки и разгрузки троллейвоза находятся достаточно близко, и создается опасность их задеть.

Для повышения маневренности самосвала можно использовать дополнительный силовой агрегат. Установка дополнительного силового агрегата, например дизельного двигателя, чревато увеличением массы машины, стоимости обслуживания, выбросов продуктов горения топлива в атмосферу. Аккумуляторы незначительно, по сравнению с ДВС, увеличивают массу самосвала. К недостаткам аккумуляторов можно отнести непродолжительный срок эксплуатации, небольшой запас хода в сравнении с ДВС и высокую стоимость самих аккумуляторных блоков.

Однако следует учитывать возможность переработки аккумуляторов после окончания срока эксплуатации. Для повышения маневренности транспортного средства рационально использовать самосвалы с шарнирно-сочлененной рамой. Это позволит избежать потерь и разубоживания полезного ископаемого, а также вести разработку с минимальным текущим коэффициентом вскрыши. Самосвалы с шарнирно-сочлененной рамой требуют гораздо меньше свободного пространства для маневрирования, чем эквивалентные по грузоподъемности самосвалы на базе цельной несущей рамы.



Рис. 2. Карьерный самосвал Siemens – троллейвоз

Преимуществом конструкций со вторым источником энергии является возможность отказаться от строительства контактной сети в направлении движения на спуск. Для глубоких карьеров это позволяет сократить капитальные затраты и эксплуатационные расходы на содержание сети. Для нагорных же карьеров строительство контактной сети в грузовом направлении движения сверху вниз вполне оправдано, поскольку рекуперированная в

сеть электроэнергия может существенно компенсировать расход энергии [13, 14].

В настоящее время, благодаря современным технологиям, устранение большинства недостатков троллейвоза не представляет сложности. Например, преобразователи энергии, электродвигатели, проводники изготавливаются по технологии, выгодно отличающейся от применявшихся в годы проведения испытаний троллейвозов в СССР. Кроме того, стоимость подобных устройств со времени проведения последних испытаний троллейвозов отечественной разработки, в пересчете на современную стоимость, значительно снизилась, особенно за последние годы. Таким образом, благодаря современным технологиям стоимость и масса троллейвоза могут быть еще уменьшены.

При оценке эффективности применения дизель-троллейвозов и троллейвозов решающую роль играет соотношение цен на дизельное топливо и электроэнергию. Существенное значение имеет сам факт экономии топлива, который по расчетам составляет 0,9–1,1 кг на 1 м³ транспортируемой горной массы, т. е. в среднем 1 тыс. т топлива на 1 млн м³ перевозок. Благоприятным следствием этого является соответствующее сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу [10, 14].

Вместе с тем возрастает расход электроэнергии, поскольку суммарные затраты энергии остаются примерно одинаковыми. Если учесть соотношение стоимости дизельного топлива и электроэнергии, то общая стоимость энергии на транспортирование сокращается на 10–20% (см. таблицу, рис. 3). В конечном счете экономия от применения троллейвозов возможна за счет перевозки такого же количества материала, используя меньшее число самосвалов, или перевоза большего количества горной массы с использованием такого же количества карьерных самосвалов.

Цены на бензин марки АИ 92 в регионах России (данные Федеральной службы государственной статистики)²

Регион	Март 2015, руб./л	Март 2016, руб./л	Рост	
			руб.	%
Ярославская область	30,45	31,66	1,21	3,97
Республика Саха (Якутия)	43,83	46,55	2,72	6,21
Псковская область	31,47	32,94	1,47	4,67
Приморский край	35,10	37,79	2,69	7,66
Ленинградская область	32,08	33,59	1,51	4,71

²<http://agro2b.ru/ru/news/27691-Rejting-regionov-Skolko-stoit-benzin.html>

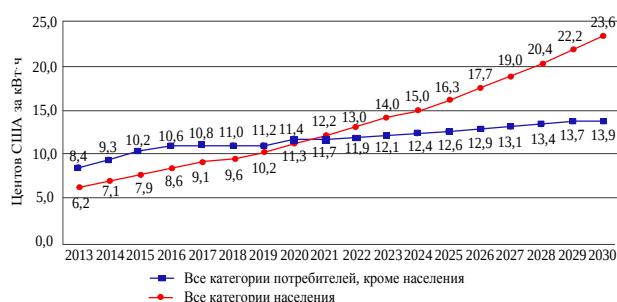


Рис. 3. Динамика цен (тарифов) на электроэнергию для разных категорий потребителей в среднем за год

При этом можно отметить, что с 1 января 2017 года в Республике Саха (Якутия) произошло снижение тарифов на электроэнергию³ на 58%.

Кроме того, электростанция может иметь свою собственное горное предприятие или горное предприятие может иметь свою собственную электростанцию.

Согласно проведенным расчетам [15], с учетом повышения производительности карьерных самосвалов в троллейном режиме, срок окупаемости затрат на топливо и обслуживание двигателя может составить 1–2 года.

Заключение

Таким образом, условия обеспечения рационального и эффективного применения троллейвозов на открытых горных работах заключаются в следующем [14]:

Источник: Минэкономразвития; расчеты и графика: «Финмаркет»

- удаленность троллейных линий от места производства взрывов – на 300–600 м;
- расстояние транспортирования горной массы – 3–30 км;
- наличие устойчивого снабжения электроэнергией;
- значительная удаленность горнодобывающего предприятия от мест добычи нефти и нефтеперерабатывающих заводов, особенно в Якутии и районах Крайнего Севера;
- доля стационарного участка трассы с ровным покрытием, оборудованного контактной сетью, должна составлять не менее 40–50% общей протяженности транспортирования;
- срок эксплуатации контактной сети – не менее 5–8 лет;
- участки бестроллейного движения должны быть минимальны и определяться необходимостью свободного маневрирования и погрузки в забое и на отвале.

³ <https://gkcp.sakha.gov.ru/news/front/view/id/2791423>

Карьерные троллейбусы лучше использовать на долгосрочных разработках, поскольку содержание контактной сети троллейбусных линий требует ухода и обслуживания. Троллейбусы также выгодны для горных предприятий, географически расположенных в районах, где имеется большая разница между затратами на дизельное топливо и стоимостью электроэнергии.

Список литературы

1. Потапов М. Г. Направления развития карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1996. №1.
2. Потапов М. Г. Направления развития карьерного транспорта // Горная промышленность. 2002. №6.
3. Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №2. С. 241–252.
4. Шешко О. Е. Эколого-экономическая оценка карьерных транспортных машин нового поколения // Горные науки и технологии. 2013. №12. С. 281–288.
5. Pronk A., Coble J., Stewart P. A. Occupational exposure to diesel engine exhaust: a literature review // Journal of exposure science and environmental epidemiology. 2009. Vol. 19. No. 5. P. 443–457.
6. Attfield M. D. Schleif PL, Lubin JH., et al. The diesel exhaust in miners study: a cohort mortality study with emphasis on lung cancer // Journal of the National Cancer Institute. 2012. Vol. 104. No. 11. P. 869–883.
7. Nessim W., Zhang F. J, Zhao C. L. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013. Vol. 813. P. 273–277.
8. Feng Y., Dong Z., Yang J. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks // Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2016 12th IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2016. P. 1–6.
9. Минакова Т.Е. Энергосбережение как системный процесс // Nauka-rastudent.ru. 2015. No. 08 (20) [Электронный ресурс]. URL: <http://nauka-rastudent.ru/20/2858/>.
10. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks // Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. IEEE, 2013. P. 1–5.
11. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №1. С. 485–507.
12. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment // 15th North American Mine Ventilation Symposium. 2015.
13. Nurić S., Nurić A., Brčanić M. Haulage solutions with trolley assist diesel-electric ac trucks on the pit mine RMU Banovici // Journal of Mining and Metallurgy A: Mining. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 78–87.
14. Тарасов П. И., Тарасов А. П. Технологические особенности и перспективы применения троллейбусов на горных предприятиях // Горная промышленность. 2008. №1. С. 54–62.
15. Степук О. Г., Зуёнок А. С. Дизель-троллейбусный транспорт БЕЛАЗ: перспективы использования в горном производстве // Горный журнал. 2013. №1. С. 52–55.
16. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification // Hitachi Review. 2013. V. 62. №2. P. 99–106.

Поступила 02.11.17.

Принята в печать 28.12.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>

ELECTRIC MINING TRUCKS

Mark L. Khazin – D.Sc. (Eng.), Professor
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Sergey O. Shtykov – Bachelor's Student
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Abstract

The mining industry is facing certain problems that hamper its development. Thanks to the research efforts taken, certain improvements were implemented to the fuel combustion processes and the fuel efficiency of diesel engines used in mine dump trucks. Nevertheless, up to 30% of the fuel is wasted because the resultant energy gets dissipated in the surrounding space. The environmental requirements substantially confine the scope of sustainable use of trucks and demand that cleaner and more efficient vehicles were adopted. Another issue evinced itself to add

to the environmental issues faced by mining companies, and that is continuously rising fuel prices. Therefore, achieving a significant reduction in fuel consumption by mine dump trucks appears to pose an increasingly pressing problem. One way to increase energy efficiency of open mining operations can be the adoption of electricity driven vehicles. Compared with diesel engines, electric drives have a longer record in the history of mining industry. The renewed interest to trolley trucks can be explained, first and foremost, by the reduced consumption of diesel fuel by mine dump trucks. Apart from the obvi-

ous reduction of fuel costs, additional advantages were obtained thanks to advanced technology. The main reason why trolley trucks and diesel-trolley trucks failed to find practical application in open pit mining is that it was basically an attempt to replace the regular diesel dump trucks with diesel-trolley trucks. All benefits delivered by trolley trucks combined help reduce the ore transportation costs by 15% to 20% and eliminate pollution and fumes. The biggest drawback of a trolley truck is its dependence on the power from the trolley line. Thanks to advanced technology of today, most of the disadvantages of a trolley truck can be eliminated without much effort. Trolley trucks could be a good option for the mining sites located in the areas with a considerable gap between the cost of diesel fuel and the cost of electricity. As the trolley lines require proper care and maintenance, it is recommended that trolley trucks are only used on mining site with an extended life. The payback period may be one to two years.

Keywords: Electric mining truck, energy saving, quarry, dump truck, ecology.

References

1. Potapov M.G. Areas of development for truck haulage. *Gornyi informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)]. 1996, no. 1. (In Russ.)
2. Potapov M.G. Areas of development for truck haulage. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry]. 2002, no. 6. (In Russ.)
3. Sheshko O.E. Feasibility study looking at ecological and economic benefits of reduced environmental impact of haulage trucks. *Gornyi informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)]. 2017, no. 2, pp. 241-252. (In Russ.)
4. Sheshko O.E. Ecological and Economic Analysis of New Generation Haulage Trucks. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining sciences and technologies]. 2013, no. 12, pp. 281-288. (In Russ.)
5. Pronk A., Coble J., Stewart P.A. Occupational exposure to diesel engine exhaust: a literature review. *Journal of exposure science and environmental epidemiology*. 2009, vol. 19, no. 5, pp. 443-457.
6. Attfield M.D., Schleif P.L., Lubin J.H., et al. The diesel exhaust in miners study: a cohort mortality study with emphasis on lung cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 2012, vol. 104, no. 11, pp. 869-883.
7. Nessim W., Zhang F.J., Zhao C.L. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2013, vol. 813, pp. 273-277.
8. Feng Y., Dong Z., Yang J. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. *Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2016 12th IEEE/ASME International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1-6.
9. Minakova T.E. Energy saving as a system process. *Naukarastudent.ru*. 2015, no. 08(20). Available at: <http://naukarastudent.ru/20/2858/>
10. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks. Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. IEEE, 2013, pp. 1-5.
11. Galkin V.I., Sheshko E.E. The problems of improving transport systems in the mining industry of Russia. *Gornyi informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)]. 2011, no. 1, pp. 485-507. (In Russ.)
12. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment. 15th North American Mine Ventilation Symposium, 2015.
13. Nurić S., Nurić A., Brčanić M. Haulage solutions with trolley assist diesel-electric ac trucks on the pit mine RMU Banovici. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. 2009, vol. 45, no. 1, pp. 78-87.
14. Tarasov P.I., Tarasov A.P. Technical features and prospects of using trolley trucks on mining sites. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry]. 2008, no. 1, pp. 54-62. (In Russ.)
15. Stepuk O.G., Zuyenok A.S. BELAZ diesel-trolley transport: The prospects of use in mining. *Gornyy zhurnal* [Journal of Mining]. 2013, no. 1, pp. 52-55. (In Russ.)
16. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. *Hitachi Review*. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99-106.

Received 02/11/17
Accepted 28/12/17

Образец для цитирования

Хазин М. Л., Штыков С. О. Карьерный электрифицированный транспорт // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 11–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>

For citation

Khazin M.L., Shtykov S.O. Electric mining trucks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 11–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.94

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАЛИ 110Г13Л, ВЫПЛАВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАТОРОВ И РАСКИСЛИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Чайкин А.В.¹, Чайкин В.А.¹, Лозов В.С.², Касимгазинов А.Д.³, Карман Ю.В.³, Быков П.О.⁴¹ ООО «Металлург», Смоленское региональное отделение Российской ассоциации литейщиков, Сафоново, Россия² ПАО «Михайловский ГОК», Железнодорожск, Россия³ ПФ ТОО «Кастинг», Павлодар, Республика Казахстан⁴ Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, Павлодар, Республика Казахстан

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы). В статье описаны особенности и потенциальные преимущества разработанного диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА, применение которого позволяет достигнуть широкого дополнительного комплекса эксплуатационных характеристик отливок, а также уменьшить время восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. На примере внедрения разработанной смеси в ПАО «Михайловский ГОК» с экономическим эффектом свыше 3 млн руб. показана актуальность работы. **Цель работы.** Совершенствование технологического процесса восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. **Используемые методы.** В работе широко применяли статистическую обработку результатов с использованием компьютерной программы STATIS-TICS & ANALYSIS. Уровень значимости для расчетов принимали равным 0,05. Определяли средние арифметические значения химического состава металла и шлаков, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность. Чем меньше вариации колеблются вокруг средней, тем она более надежна. О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака. Последний рассчитывается как отношение среднего квадратичного отклонения к средней арифметической. **Новизна.** Особенность разработанной смеси заключается в том, что компоненты в ней находятся в высокодисперсном состоянии. Резкое увеличение удельной поверхности частиц смеси предполагает существенную интенсификацию процесса восстановления оксидов. Это позволяет резко снизить время восстановительного периода плавки при одновременном повышении эффективности процесса. Применен еще один путь интенсификации раскисления – быстрое покрытие поверхности шлака раскислительной смесью. Эту задачу решают соединения натрия и калия, которые делают смесь жидкоподвижной и способствуют ее быстрому растеканию по поверхности шлака. **Результат:** в статье приведено сравнение результатов рафинирования металла модификатором L-Cast® 5,3 и высокодисперсным диффузионным раскислителем алюмосодержащим РДА, разработанным производителем ООО «Металлург» СРО РАЛ. Статистическая обработка результатов исследования показала высокую эффективность РДА по сравнению с модификатором L-Cast® 5,3. Намечалась тенденция к снижению содержания MnO и FeO в шлаках, выплавленных с применением диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА. Среднее содержание MnO при раскислении РДА снизилось на 5%: до 3,54 против 3,72% при применении L-Cast® 5,3. Средняя концентрация FeO понизилась более резко, на 18%: до 0,66 против 0,78% при раскислении металла L-Cast® 5,3, что очень важно, так как концентрации FeO в шлаке имеет решающее значение. Это связано с тем, что оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые при термообработке трудно растворяются и уходят с границ зерен. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства стали. Таким образом РДА обладает более высокой эффективностью как раскислитель шлака по сравнению с L-Cast® 5,3. О более высокой раскисленности шлака, которая привела к снижению содержания кислород в металле, свидетельствует увеличение концентрации остаточного алюминия в металле 0,04752 против 0,0044%. В результате заливки отметили более высокую жидкотекучесть расплава и лучшую заполняемость форм. **Практическая значимость.** Результаты исследований дали возможность внедрить технологический процесс диффузионного раскисления стали 110Г13Л диффузионным раскислителем РДА в сталелитейном цехе ПАО «Михайловский ГОК» с экономическим эффектом свыше 3 млн руб.

Ключевые слова: сталь, шлак, статистическая обработка, модифицирование, диффузионное раскисление.

© Чайкин А.В., Чайкин В.А., Лозов В.С., Касимгазинов А.Д., Карман Ю.В., Быков П.О., 2018

Введение

В сталелитейном цехе ПАО «Михайловский ГОК» изготавливают отливки конусов дробилок, футеровочных плит мельниц, зубьев ковшей экскаваторов и другие отливки из стали 110Г13Л. Анализ качественных показателей сталей, выплавленных с применением различных технологий восстановительного периода, проводился в условиях вышеуказанного цеха. В ПАО выплавливают стали 110Г13Л для отливок, химические составы которых приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Химический состав стали 110Г13Л
1-й группы отливок

Массовая доля элементов, %			Массовая доля элементов, %, не более			
Углерод	Марганец	Кремний	Сера	Фосфор	Хром	Никель
0,9–1,1	11,5–13	0,3–0,7	0,05	0,07	0,7	1,0

Таблица 2

Химический состав стали 110Г13Л
для 2-й группы отливок

Массовая доля элементов, %			Массовая доля элементов, %, не более			
Углерод	Марганец	Кремний	Сера	Фосфор	Хром	Никель
0,9–1,4	11,5–15	0,3–1,0	0,05	0,12	1,0	1,0

До внедрения новых раскислительных смесей окончательное рафинирование металла производили модификатором L-Cast® 5,3, который отдавали на шлак за 10–15 мин до выпуска плавки в количестве 4 кг на 1 т жидкой стали. L-Cast® 5,3 подавали после достижения удовлетворительной раскисленности металла. Массовая доля закиси железа в шлаке перед отдачей модификатора должна быть не более 1,5%, а закиси марганца – не более 9,0%.

Механизм действия L-Cast® 5,3 заключается в следующем [1]. Введение в расплав барий-стронций-кальциевых карбонатов, содержащихся в L-Cast, сопровождается интенсивным перемешиванием металла и шлака вследствие выделения пузырьков CO₂. Это усиливает эффект рафинирования сталей от газов и неметаллических включений, особенно сульфидов. L-Cast® 5,3 по информации производителей обладает и модифицирующим действием, за счет чего должны достигаться улучшения структуры и свойств стали.

Постановка задачи

Работа посвящена совершенствованию технологического процесса восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. С целью повышения эффективности рафинирования металла и

снижения себестоимости стали взамен модификатора L-Cast® 5,3 применили диффузионный раскислитель алюмосодержащий (РДА) в таком же количестве: 4 кг на 1 т жидкой стали. РДА разработан и производится ООО «Металлург» СРО РАЛ по ТУ 0826 – 003 – 47647304 – 2001.

Описание процесса

Известно, что диффузионное раскисление обеспечивает получение чистого металла за счет снижения содержания кислорода в стали без образования в расплаве неметаллической фазы [2]. Кроме того, этот метод препятствует поступлению кислорода из атмосферы печи в металл. Эффективность диффузионного раскисления тем выше, чем меньше концентрация и активность оксида железа в шлаке [3]. Эту задачу эффективно решает РДА, представляющий собой пакетированные смеси, состоящие в основном из порошков активированного высокотемпературной обработкой углерода и полученного физико-химическим путем металлического кремния. Кроме того, в составе РДА находятся алюминий и соединения натрия и калия. Очень важно, что количественный и фракционный состав компонентов в РДА оптимизирован [4], что способствует вспениванию шлака, повышению его температуры [5], разжижению и увеличению реакционной способности шлака [6]. Основная особенность разработанной смеси заключается в том, что компоненты в ней находятся в высокодисперсном состоянии. Резкое увеличение удельной поверхности частиц смеси предполагает существенную интенсификацию процесса восстановления окислов. Это позволяет резко снизить время восстановительного периода при одновременном повышении эффективности процесса. Применен еще один путь интенсификации раскисления – быстрое покрытие поверхности шлака раскислительной смесью. Эту задачу решают соединения натрия и калия, которые делают смесь жидкоподвижной и способствуют ее быстрому растеканию по поверхности шлака [7, 8].

В результате обработки шлака РДА и выдержки в течение 15 минут в шлаке, а соответственно и в металле, резко снижается содержание оксидов железа, марганца и хрома.

Методика исследований

Материалом для исследований служили стали 110Г13Л, выплавленные в электродуговых печах ДСП 6 с применением модификатора L-Cast® 5,3 и раскислительной смеси РДА. В работе широко применялась статистическая обработка результатов исследова-

Таблица 3

Результаты статистической обработки сталей до внедрения

Описательные статистики (Статистика I-cast.sta)							
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вар. V, %
C, %	251	1,15000	0,92000	1,55000	0,0131	0,11436	9,94472
Si, %	251	0,56801	0,34000	0,84000	0,0070	0,08387	14,76589
Mn, %	251	12,63124	11,20000	13,75000	0,1831	0,42789	3,38759
Cr, %	251	0,30936	0,06000	0,96000	0,0298	0,17265	55,80715
Ni, %	251	0,11143	0,05000	0,36000	0,0018	0,04281	38,41848
P, %	251	0,04284	0,02600	0,06800	0,0001	0,01073	25,05955
S, %	251	0,00561	0,00100	0,01500	0,0000	0,00356	63,34907
Ti, %	251	0,02714	0,00300	0,23000	0,0002	0,01551	57,14554
Cu, %	251	0,12105	0,03700	0,29000	0,0008	0,02903	23,98461
Al, %	251	0,04437	0,01400	0,08400	0,0002	0,01264	28,47959
SiO ₂ , %	251	35,20414	22,00000	48,60000	20,2567	4,50075	12,78471
CaO, %	251	32,54199	0,67000	58,50000	158,2432	12,57947	38,65613
MnO, %	251	3,72805	1,20000	9,06000	1,7040	1,30536	35,01459
FeO, %	251	0,78195	0,16000	2,60000	0,1541	0,39259	50,20640
основность	251	0,97810	0,01727	2,57965	0,2543	0,50432	51,56084

Таблица 4

Результаты статистической обработки сталей после внедрения

Описательные статистики (Статистика РДА)							
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вар. V, %
C, %	109	1,15578	0,96000	1,40000	0,0144	0,11986	10,37010
Si, %	109	0,59835	0,42000	0,93000	0,0070	0,08347	13,95044
Mn, %	109	12,69367	11,66000	14,40000	0,1726	0,41544	3,27281
Cr, %	109	0,35434	0,09000	1,70000	0,0492	0,22191	62,62580
Ni, %	109	0,11202	0,07000	0,30000	0,0011	0,03319	29,62730
P, %	109	0,04037	0,02600	0,06000	0,0001	0,00944	23,38187
S, %	109	0,00641	0,00200	0,02300	0,0000	0,00449	70,03392
Ti, %	109	0,02609	0,01200	0,04500	0,0000	0,00707	27,09347
Cu, %	109	0,11862	0,07000	0,17000	0,0003	0,01766	14,88983
Al, %	109	0,04752	0,01300	0,09300	0,0002	0,01518	31,94664
SiO ₂ , %	106	34,76604	22,00000	45,20000	21,4278	4,62902	13,31476
CaO, %	106	33,30943	3,70000	59,00000	199,5085	14,12475	42,40464
MnO, %	106	3,54887	1,45000	7,10000	1,3822	1,17565	33,12758
FeO, %	106	0,66085	0,16000	1,50000	0,0899	0,29987	45,37650
основность	106	1,02489	0,10482	2,67273	0,3341	0,57799	56,39576

Исследователи рекомендуют выдерживать концентрации марганца в расплаве 12–12,5% для обеспечения требуемого комплекса физико-механических свойств стали [12, 13]. Сталевары выдерживают концентрации этого элемента близко к этим требованиям, равными 12,63 и 12,69%, о чем свидетельствуют данные **табл. 3, 4**. Следует отметить, что концентрации марганца, основного определяющего элемента стали, особенно однородны ($V = 3,27–3,38$). Наглядно это хорошо видно на гистограмме для 251 плавки, представленной на **рис. 1**.

ний, которую производили с использованием компьютерной программы STATISTICS & ANALYSIS. Уровень значимости для расчетов принимали равным 0,05 [9]. Определяли средние арифметические значения химического состава металла и шлаков, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность. Чем меньше вариации колеблются вокруг средней, тем она более надежна. О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака [10]. Последний рассчитывается как отношение среднего квадратичного отклонения к средней арифметической. Образцы для определения физико-механических свойств сталей получали непосредственно из отливок. На прессе ломали отливки, металл которых раскислялся L-Cast® 5,3 и РДА. Затем из отливок вырезали заготовки для изготовления образцов на ударную вязкость, износостойкость, изучения микроструктуры в литом и термообработанном состоянии. Термообработка проводилась по серийному режиму: нагрев до 1050–1070°C, выдержка 2–2,5 ч и охлаждение в проточной воде с температурой 20°C.

Результаты исследований

Произвели статистическую обработку химического состава сталей 110Г13Л для отливок 1 и 2 групп, а также шлаков. Исследовали 251 плавку сталей, проведенных с использованием L-Cast® 5,3 и 109 плавку сталей с использованием диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА. Результаты статистической обработки сталей до и после внедрения представлены в **табл. 3 и 4**.

Как видно из данных **табл. 3 и 4**, среднее содержание углерода в сталях достаточно стабильно ($V_C = 9,94–10,37$), и концентрации его, равные 1,15 и 1,155, находятся в пределах, рекомендуемых исследователями (1,5–1,25) [11]. Превышение концентраций против указанных влечет за собой появление в микроструктуре избыточного количества карбидной фазы и ее укрупнения, что негативно сказывается на механических и эксплуатационных свойствах. Средние концентрации кремния в сталях составляют 0,56–0,59%.

Что касается содержания кремния, то можно рекомендовать выплавлять сталь с содержанием этого элемента ближе к нижнему пределу, так как этот элемент существенно снижает предельную растворимость углерода в марганцевом аустените, создавая тем самым условия для выпадения значительного количества карбидной фазы при первичной кристаллизации металла. $V_{Si} = 13,95–14,76\%$ [11].

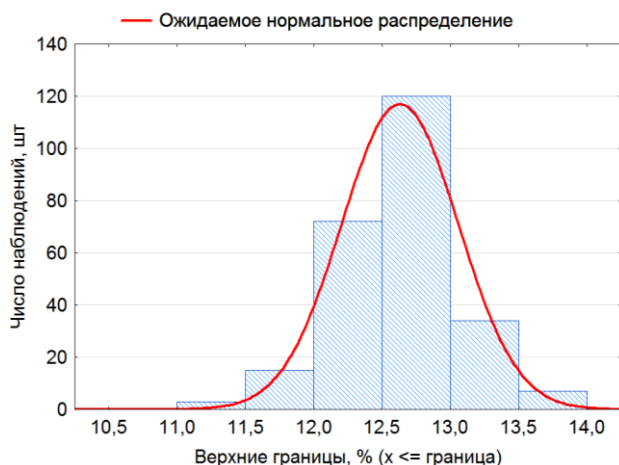


Рис.1. Гистограмма концентраций марганца

Как видно, распределение марганца стремится к нормальному, что свидетельствует о высокой однородности содержаний марганца в сталях. Таким образом, вышесказанное свидетельствует о высокой профессиональной подготовке сталеваров и удовлетворительной технологической дисциплине на участке плавки.

Концентрации элементов, не рассмотренных выше, менее стабильны, однако это определяется качеством шихтовых материалов. В целом шихта обеспечивает возможность выполнения требований нормативно-технической документации (НТД).

Восстановительный период плавки оказывает решающее значение на качество металла [14]. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки [15]. Они должны быть высокоосновными и рассыпающимися в белый порошок с содержанием $MnO \leq 5\%$ и $FeO \leq 1\%$. Чем меньше оксидов марганца и железа в шлаке, тем меньше их будет и в металле [14].

Как видно из сравнения данных **табл. 3** и **4**, наметилась тенденция к снижению содержания MnO и FeO в шлаках, выплавленных с применением диффузионного раскислителя алюмо-содержащего РДА. Среднее содержание MnO при раскислении РДА снизилось на 5%: до 3,54 против 3,72% при применении L-Cast® 5,3. Средняя концентрация FeO понизилась более резко на 18%: до 0,66% против 0,78% при раскислении металла L-Cast® 5,3, — что очень важно, так как концентрация FeO в шлаке имеет решающее значение. Это связано с тем, что оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые при термообработке трудно растворяются и уходят с

границ зерен. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства стали. Таким образом, РДА обладает более высокой эффективностью как раскислитель шлака по сравнению с L-Cast® 5,3. О более высокой раскисленности шлака, которая привела к снижению содержания кислорода в металле, свидетельствует увеличение концентрации остаточного алюминия в металле: 0,04752 против 0,0044%. Кроме того, заливщики отметили более высокую жидкотекучесть расплава и лучшую заполняемость форм.

В дальнейшем проверяли эффективность раскисления стали на конкретной отливке 08.35505.29.00005У «Зуб ковша», изготавливаемой из стали 110Г13Л. Это массивная отливка, что позволило провести широкий спектр испытаний.

Результаты испытаний механических свойств, микроструктур, а также испытания на износостойкость приведены в **табл. 5** и на **рис. 2**.

Таблица 5

Результаты испытаний отливок «Зуб ковша»

Состояние отливки	Балл зерна аустенита ГОСТ 5639		Распределение карбидов ОСТ 23.1.165		KCU, TO МДж/м ²	Износ, % TO	
	Без TO	TO	Без TO	TO		110Г13Л	38ХС
Обработанная L-Cast® 5,3	2	2	7–9	1–2	2,01	0,61	1,02
Раскисленная РДА	3	3–4	6–8	1–2	2,80	0,40	0,84

После обработки стали РДА микроструктура отливки стала более благоприятной. Распределение карбидов не изменилось. Однако в микроструктуре измельчилось зерно (**рис. 2, б**), устранена разнотернистость, присущая отливке, обработанной L-Cast® 5,3 (**рис. 2, а**). Как следствие, выросла ударная вязкость стали на 39,3% (см. **табл. 3**). Кроме того, как видно из данных **табл. 3**, триботехнические испытания образцов показали повышение износостойкости стали, обработанной РДА, по сравнению с металлом, обработанным L-Cast® 5,3, на 34,4% и 17,6% на стали 38ХС. На образцах из стали 110Г13Л поверхность износа была ровная и гладкая, с серо-синими цветами побежалости. Поверхность износа контртела имела неровный рельеф, сине-фиолетовые цвета побежалости. Таким образом, прослеживается устойчивая тенденция увеличения износостойкости образцов из стали, обработанных РДА. Несмотря на то, что эти данные получены для условий абразивного износа, можно прогнозировать увеличение износостойкости стали и в условиях ударно-абразивного износа.

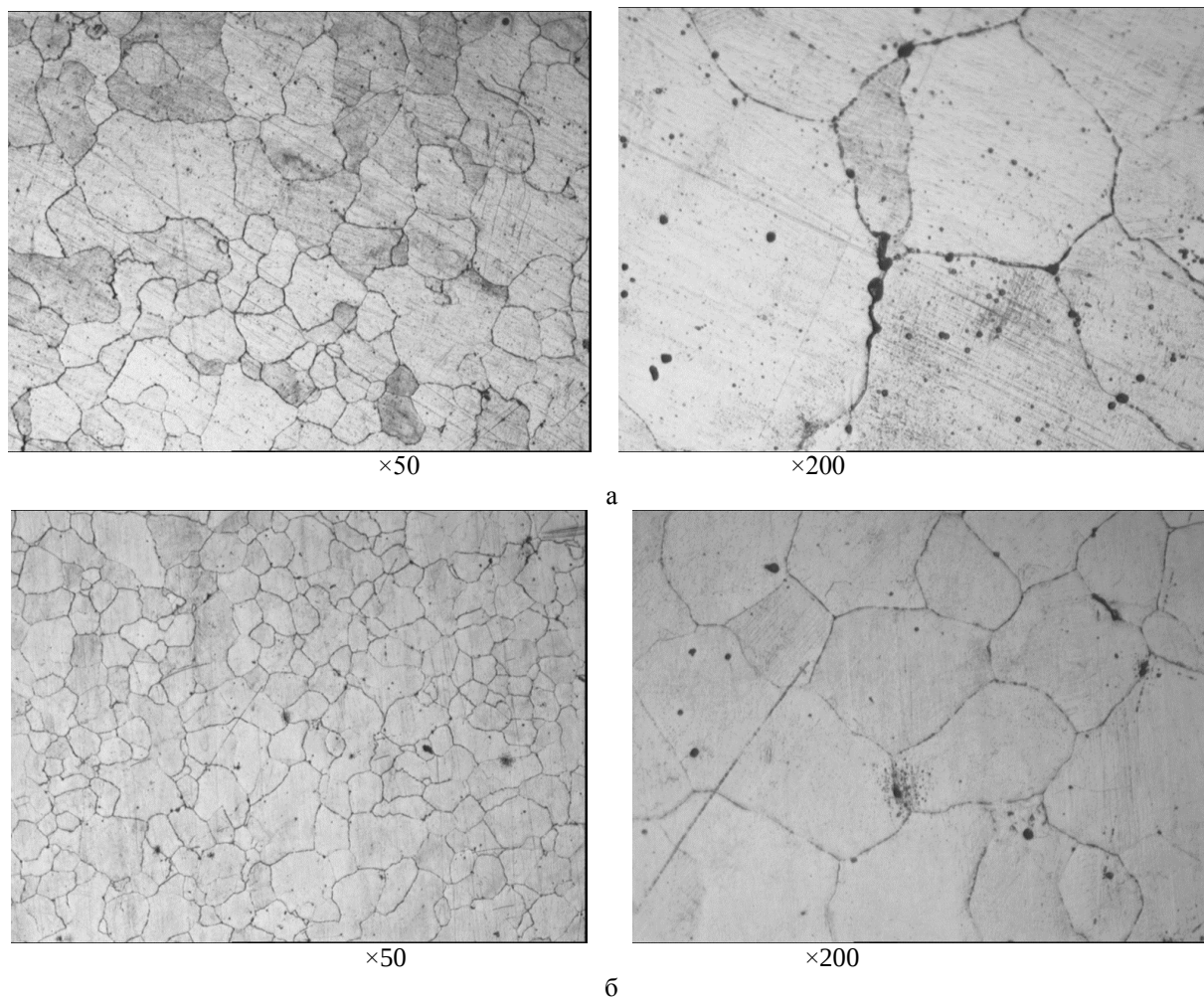


Рис. 2. Микроструктура отливок зуб ковша после термической обработки:
а – отливка из стали, обработанной L-Cast® 5,3; б – отливка из стали, раскисленной РДА

Выводы

1. Разработанный диффузионный раскислитель алюмосодержащий РДА, отличающийся высокой дисперсностью частиц, эффективнее раскисляет металл по сравнению с модификатором L-Cast® 5,3.

2. Микроструктура отливок стала более благоприятной, повысились механические свойства и износостойкость стали.

3. Достигнута более высокая жидкотекучесть расплава и лучшая заполняемость форм.

4. Это дало возможность внедрить технологический процесс диффузионного раскисления стали 110Г13Л диффузионным раскислителем РДА с экономическим эффектом свыше 3 млн руб.

Список литературы

1. Пат. 2364649 РФ. Способ внепечной обработки стали / Рашников В.Ф., Та-хаутдинов Р.С., Колокольцев В.М. и др. Оpubл. 2003.10.27.

2. 2. Производство стальных отливок: учебник для вузов / Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Вдовин К.Н. и др.; под ред. Л.Я. Козлова. М.: МИСиС, 2003. 351 с.
3. J. Guo, S. Cheng, Zi-jian. Characteristics of Deoxidation and Desulfurization during LF Refining Al-killed Steel by Highly Basic and Low Oxidizing Slag. Journal of Iron and Steel Research International. 2014, February. Vol. 21, iss. 2. P. 166–173
4. Совершенствование технологии выплавки сталей в ООО «Самарский завод технического литья» с применением дисперсных материалов / Чайкин В.А., Чайкин А.В., Колколова А.В. и др.// Труды XI съезда литейщиков России, Екатеринбург, 16–20 сентября 2013. Екатеринбург, 2013. С. 78–83.
5. Кожухов А.А. Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП // Электromеталлургия. 2015. №6. С. 3–9.
6. Чайкин В.А., Чайкин А.В. Применение диффузионных раскислительных и рафинирующих смесей при выплавке сталей и чугунов в электродуговых печах // Литейное производство сегодня и завтра: тр. международной научно-практической конференции / под

- ред. Косникова Г.А. СПб.: Культ-информ.-пресс, 2014. С. 161–164.
7. Флюсы для электрошлакового переплава конструкционных сталей / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г. и др. // Электрометаллургия. 2017. №4. С. 13–19.
 8. Neput T., Ardelean E., Socalici A., Osaci M., Ardelean M. Steel deoxidation with synthetic slag. *Metalurgia International*. 2010. Vol. 15. Iss. 7. P. 22–28.
 9. Сидняев, Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для бакалавров. М.: Юрайт, 2015. 219 с. Серия: Бакалавр.
 10. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2014. 495 с.
 11. Давыдов Н.Г. Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия, 1979. 175 с.
 12. Власов В.И., Комолова Е.Ф. Литая высомарганцовистая сталь. М.: Машгиз, 1987. 195 с.
 13. G.C. Attila. Refining steel in an induction ladle furnace. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2015, Aug. Vol. 13. Iss. 3. P. 197–200.
 14. V. Putan, A. Putan, E. Ardelean. Influence of the addition of a reducing mixture slag and duration of treatment on the desulphurization and deoxidation efficiency. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 144–148.
 15. Чайкин В.А., Чайкин А.В. Рафинирование сталей и чугунов дисперсными модификаторами при выплавке в дуговых и индукционных электропечах // Тр. двенадцатого съезда литейщиков России. Н. Новгород, 2015. С. 155–159.

Поступила 19.12.17.

Принята в печать 18.01.18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY INDICES OF THE 110G13L STEEL PRODUCED WITH VARIOUS INOCULANTS AND DEOXIDIZING AGENTS

Andrey V. Chaykin – Ph.D. (Eng.)

Technical Director at the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association, Safonovo, Russia. E-mail: chaika1983@inbox.ru

Vladimir A. Chaykin – D.Sc. (Eng.), Professor

General Director at the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association, Safonovo, Russia. E-mail: sro_ral@mail.ru

Vitaly S. Lozov – Chief Metallurgist

Mikhailovsky GOK PJSC, Zheleznogorsk, Russia. E-mail: V_Lozov@mgok.ru

Aset D. Kasimgazinov – Chief Process Engineer

Casting LLC, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: kasimgazinov@pf.casting.kz

Yury V. Karman – Director

Casting LLC, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: office@pf.casting.kz

Petr O. Bykov – Ph.D. (Eng.), Vice Pector for Academic Affairs

Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: bykov_petr@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance). This paper describes special characteristics and potential benefits of the aluminum-containing diffusion deoxidizer RDA, which was developed to deliver a broad range of additional performance properties in castings and help shorten the reduction time in the case of the 110G13L steel. The relevance of this research is demonstrated in the case study of Mikhailovsky GOK, for which the adoption of the diffusion deoxidizer resulted in the economic benefit of 3 million rubles. **Objectives.** The aim of this research was to find ways to optimize the reduction process of the 110G13L steel. **Methods Applied.** The research heavily relied on statistical analysis method. Thus, all the results were analysed with the help of the STATISTICS & ANALYSIS computer programme. The tests were run with an alpha level of 0.5. There were determined arithmetic averages for the chemical composition of metal and slags, as well as their variation indices that characterize their stability. The less the variations fluctuate around an average, the more stable the average is. The range of variations defined the stability of the

property. The variation coefficient best describes the homogeneity of characteristics because it indicates the relative measure of fluctuations. It can be defined as a ratio of the standard deviation to the arithmetic average. **Originality.** A special feature of the new deoxidizer is that all of its components are present in a finely dispersed state. A drastic increase in the specific surface of the particles contained in the deoxidizer would lead to a significantly more intense reduction process, which enables a dramatically shorter and more efficient reduction process. Another method was applied to intensify deoxidation, and namely – rapid application of the deoxidizer over the slag surface. This effect is achieved due to the sodium and potassium compounds, which make the mixture flowable and help it spread rapidly across the slag surface. **Findings:** The article contains a comparison between the L-Cast ® 5.3 inoculant and the aluminum-containing high-dispersion diffusion deoxidizer RDA (the latter was developed by Metallurg LLC, the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association) and their refining efficiencies. The statistical analysis of experimental data showed a higher efficiency of RDA compared with L-

Cast® 5.3. Lower concentrations of MnO and FeO were observed in the slags produced with the aluminum-containing high-dispersion diffusion deoxidizer RDA. The average MnO content decreased by 5% - to 3.54 when the RDA deoxidizer was applied versus a 3.72% concentration resulting from the application of L-Cast® 5.3. There was a more drastic decrease in the average concentration of FeO - by 18% to 0.66% versus a 0.78% concentration resulting from the use of L-Cast® 5.3 as a deoxidizer, which is extremely important as the FeO concentration is critical for slags. It refers to the fact that MnO dissolves FeO creating very strong conglomerates, which, when heat is applied, are hard to dissolve and tend to stay at the grain boundaries. The less FeO concentration there is in the slag the thinner the grain boundaries are and the better the performance of steel is. Consequently, RDA is a more efficient deoxidizer for slag than L-Cast® 5.3. The increase of the residual aluminium in steel from 0.0044% to 0.04752% indicates a higher deoxidation degree of the slag, which led to a decrease in the oxygen content. As a result, pourers pointed out a better fluidity and moldability of molten steel. **Practical Relevance.** Due to the results of this research, the Mikhailovsky GOK foundry was able to adopt the RDA diffusion deoxidizer for application with the 110G13L steel seeing the economic benefit of 3 million rubles.

Keywords: Steel, slag, statistical analysis, inoculation, diffusion deoxidation.

References

1. Rashnikov V.F., Takhautdinov R.S., Kolokoltsev V.M. et al. *Sposob vnepechnoy obrabotki stali* [Method of steel ladle treatment]. Patent RF, no. 2002104454/02, 2003.
2. Kozlov L.Ya., Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N. et al. *Proizvodstvo stalnykh otlivok* [Steel castings]. Textbook for university students. Ed. by L.Ya. Kozlov. Moscow: MISIS, 2003, 351 p. (In Russ.)
3. J. Guo, S. Cheng, Zi-jian. Characteristics of Deoxidation and Desulfurization during LF Refining Al-killed Steel by Highly Basic and Low Oxidizing Slag. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014, February, vol. 21, iss. 2, pp. 166-173
4. Chaykin V.A., Chaykin A.V., Kolokolova A.V. et al. Steel melting technology improvement in OOO «Samrskiy zavod tekhnicheskogo litya» with the help of disperse materials. *Trudi iodiinadtsogo zyezda liteishikov Rossii*, [Proceedings of the 11th Russian Foundry conference]. Ecaterenburg, 2013, pp.78-83. (In Russ.)
5. Koghukhov A.A. Estimation of the heat coefficient of the electric arcs during the melting pprocess under foam slag in an electirc arc furnace. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2015, no. 6, pp. 3-9. (In Russ.)
6. Chaykin V.A., Chaykin A.V. Diffusive, deoxidizing and refining mixtures explotation during steel and iron melting processes in elctric arc furnace. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra: tr. Megdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Casting Technologies today nd tomorrow: proceedings of the interentional scientific and technical conference]. Ed. by Kosnikov G.A. S.Peterburg: Kult-Inform.-press, 2014, pp. 161-164. (In Russ.)
7. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Pivovarova K.G et al. Fluxes for electroslog remelting of construction steels. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2017, no. 4, pp. 13-19. (In Russ.)
8. Hepuț T., Ardelean E., Socalici A., Osaci M., Ardelean M. Steel deoxidation with synthetic slag. *Metalurgia International*. 2010, vol. 15, iss. 7, pp. 22-28.
9. Sidnaye N.I. *Probability Theory and mathematical statistics: textbook for bachelors'* [Teoriya veeroyatnosti and matematicheskaya statistica: uchebnik dlya bakalavrov]. Moscow: Yurajit, 2015. 219 p. Serious: Bachelor. (In Russ.)
10. Sidnaye N.I. *Theory of planning an experiment and analysis of statistical data* [Teoriya planirovaniya experimenta i analisis statisticheskikh dannikh]. Moscow: Yurajit, 2014. 495 p. (In Russ.)
11. Davidov N.G. *Visokomargontstevaya steel* [High-manganese steel]. Moscow, Metallurgiya, 1979, 175 p. (In Russ.)
12. Vlasov V.I., Komolova E.F. *Litaya visokomargantstevaya stal* [Molten high-manganese steel]. Moscow: Mashgiz, 1987, 195 p. (In Russ.)
13. G.C. Attila. Refining steel in an induction ladle furnfce. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2015, Aug, vol. 13, iss. 3, pp. 197-200.
14. V. Putan, A. Putan, E. Ardelean. Influence of the addition of a reducing mixture slag and duration of treatment on the desulphurization and deoxidation efficiency. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 254, pp. 144-148.
15. Chaykin V.A., Chaykin A.V. The use of dispersive inoculants to refine steel and cast produced in arc induction electric furnaces. *Trudy dvenadzatogo syezda liteyshyikov Rossii* [Proceedings of the 12th Russian Foundry Conference]. N.Novgorod, 2015, pp. 155-159 (In Russ.)

Received 19/12/17

Accepted 18/01/18

Образец для цитирования

Сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленной с применением различных модификаторов и раскислительных смесей / Чайкин А.В., Чайкин В.А., Лозов В.С., Касимгазинов А.Д., Карман Ю.В., Быков П.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 19–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

For citation

Chaykin A.V., Chaykin V.A., Lozov V.S., Kasimgazinov A.D., Karman Yu.V., Bykov P.O. Comparative analisys of the quality indices of the 110G13L steel produced with various inoculants and deoxidizing agents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 19–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 544.313:669.14

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-26-36>

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ, СТРУКТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ БЕСКАРБИДНОГО БЕЙНИТА В МАРГАНЕЦ-КРЕМНИСТЫХ СТАЛЯХ

Мирзаев Д.А.¹, Яковлева И.Л.², Терещенко Н.А.², Булдашев И.В.¹, Мирзоев А.А.¹¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия² Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Задачей исследования являлась проверка гипотезы Бхадешиа о тетрагональности кристаллической решетки α' -фазы, т.е. феррита в бескарбидном бейните, а также сравнение результатов термодинамического расчета концентрации углерода в α' -фазе и остаточном аустените с экспериментальными результатами. Цель работы: выявить закономерности формирования, структуру, кинетику образования и поведение углерода при образовании бескарбидного бейнита в стали, содержащей мас. %: 0,98 C, 1,52 Si, 1,91 Mn, 1,44 Cr, 0,11% V. Новизна работы помимо установления ряда закономерностей, в том числе слабой тетрагональности α' -фазы, заключается в установлении причины резкого различия между рассчитанными для тетрагонального феррита и наблюдаемыми концентрациями углерода. Авторы делают предположение о существовании внутри кристаллов α' -фазы тонких пластин Fe_{16}C_2 , образовавшихся в ходе спинодального распада α -фазы и потерявших когерентную связь с низкоуглеродистыми образованиями, а потом ставшими «невидимыми» при дифракции рентгеновских лучей вследствие малой толщины этих пластин, поскольку дифракционный максимум оказывается размытым и фактически сливается с фоном. Результаты. В ходе бейнитного превращения, которое начинается как бездиффузионное, содержание углерода в α' -фазе снижается, по-видимому, вследствие диффузионного перехода углерода из α' -фазы в γ -фазу. После 10 ч распада при 300°C, когда количество α' -фазы достигает 41%, содержание углерода в α' -фазе снижается до 0,26%. После двадцатичасовой выдержки содержание углерода в феррите падает до 0,16%, а количество α' -феррита увеличивается до 54%. Наконец, после выдержки 30 ч содержание углерода уменьшается до 0,1%, а количество α' -фазы возрастает до 83%. Практическая значимость заключается в получении новой теоретической и экспериментальной информации, необходимой для понимания особенностей и невыясненных процессов в сталях с бескарбидным бейнитом, важных для разработки новых сталей этого класса и режимов термической обработки их.

Ключевые слова: высокоуглеродистая марганец-кремнистая сталь, низкотемпературное бейнитное превращение, структура, бескарбидный бейнит, тетрагональность кристаллической решетки.

Введение

Возможность образования бескарбидного бейнита известна давно [1]. Но в последние десятилетия эта проблема стала актуальной благодаря пионерским исследованиям Бхадешиа [2] образования наноструктурного, бескарбидного бейнита (α' -фаза) в марганец-кремнистых заэвтектоидных сталях. При рентгенографическом исследовании выяснилось, что этот бейнит обладает слабой тетрагональностью. По мнению авторов [3], именно тетрагональность обуславливает повышенное содержание углерода в бейни-

те, возникающее, когда добавки кремния затрудняют образование ϵ -карбида и Fe_3C , а введение марганца и хрома непосредственно или благодаря снижению температуры уменьшает скорость диффузии углерода. Образованию бейнита такого типа посвящено много исследований. Однако их недостаток заключается в том, что за исключением оценочных расчетов Бхадешиа отсутствуют данные о равновесных концентрациях углерода в тетрагональном феррите на границе с аустенитом. Для обычного кубического феррита она составляет 0,023% мас. при 727 С и около $0,13 \cdot 10^{-3}\%$ мас. при 300 К [4]. Строгий расчет диаграммы равновесия $\alpha' = \gamma$ был сделан в работах [5,6]. Здесь он будет расширен использованием еще двух независимых термодинамических

систем данных для сплавов Fe-C, чтобы представлять интервал рассеивания граничных концентраций углерода, связанный с возможными неточностями описания. В статье представлены также результаты структурного дилатометрического и рентгеноструктурного исследования образования бескарбидного бейнита в опытной стали 100Г2ХС2Ф.

Термодинамика равновесия тетрагонального феррита и аустенита

В работах [5, 6] была развита термодинамика тетрагонального бейнита на примере сплавов железо-углерод. При этом было принято, что при образовании бейнита наложен запрет на выделение карбидной фазы. Подобный эффект был обнаружен [1, 2] в сплавах железо-кремний-углерод, что, по-видимому, связано со специфическим влиянием кремния на энергию образования ϵ – карбида и Fe_3C в сталях. Экспериментально факт отсутствия карбидов в бейните кремнистых и содержащих алюминий сталей был показан в работах [2, 3]. При термодинамическом исследовании рассчитаны химические потенциалы углерода $\mu_C^{\alpha'}$ и железа $\mu_{Fe}^{\alpha'}$ в тетрагональном α' -феррите, которые отличались от потенциалов для обычного, кубического α -феррита учетом тетрагональности кристаллической решетки, обусловленной преимущественным заполнением одной из трех, z-подрешетки ОЦК железа, вызванным деформационным взаимодействием атомов углерода:

$$\mu_C^{\alpha'} = \tilde{\mu}_C^{\alpha} + \Delta\mu_C^{\alpha'}; \quad (1a)$$

$$\mu_{Fe}^{\alpha'} = \tilde{\mu}_{Fe}^{\alpha} + \Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}, \quad (1б)$$

где $\tilde{\mu}_C^{\alpha}$ и $\tilde{\mu}_{Fe}^{\alpha}$ – представляют химические потенциалы углерода и железа в неупорядоченном растворе углерода на основе α -железа, имеющем кубическую решетку, а $\Delta\mu_C^{\alpha'}$ и $\Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$ – дополнительные слагаемые, учитывающие эффект упорядочения углерода в порах z-подрешетки феррита вследствие возникновения тетрагональности.

Эти функции были вычислены нами в работе [5]:

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

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

где $x_C^{\alpha'}$ и $x_{Fe}^{\alpha'}$ – атомные доли углерода и железа в тетрагональном феррите. При переходе к α -раствору с кубической решеткой индекс (α') следует снять.

Уравнения равновесия тетрагонального феррита и аустенита имеют вид:

$$\mu_{Fe}^{\gamma}(x_C^{\gamma}, T) = \mu_{Fe}^{\alpha'}(x_C^{\alpha'}, T); \quad (3a)$$

$$\mu_C^{\gamma}(x_C^{\gamma}, T) = \mu_C^{\alpha'}(x_C^{\alpha'}, T). \quad (3б)$$

Поскольку химические потенциалы компонентов в термодинамике растворов однозначно выражаются через молярную свободную энергию раствора, то для расчетов $\mu_C^{\alpha'}$, $\mu_{Fe}^{\alpha'}$, μ_C^{γ} и μ_{Fe}^{γ} нужны термодинамические функции неупорядоченных по углероду α - и γ -растворов. Мы использовали термодинамические функции трех наиболее авторитетных исследований: Густафсона [7], Агрена [4] и Могутнова-Томилина-Шварцмана [8]. Однако в последнем случае система уравнений (3 а, б) не имела действительных корней. Это было связано с появлением в выражении для μ_C^{γ} слагаемого вида $\ln(1 - 5x_C^{\gamma})$, которое при $x_C^{\gamma} > 0,2$ оказывается мнимым числом. Поэтому были сохранены для α -фазы данные работы Могутнова-Темкина-Шварцмана [8], но для γ -фазы использовали термодинамические функции Чипмана [9]. Выражения для химических потенциалов углерода и железа в α' - и γ -фазах даны в табл. 1.

Когда проводится решение полных уравнений (3), следует учесть дополнительно условие устойчивости решения [5], для чего величина η должна находиться в пределах $0,5 < \eta \leq 1$. При расчете равновесных концентраций углерода (или железа) в кубических α - и γ -фазах в уравнениях (1 а, б) следует $\Delta\mu_C^{\alpha'}$ и $\Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$ обратить в ноль.

Результаты расчета в значительной степени определяются термодинамическими функциями системы железо-углерод.

Таблица 1

Окончание табл. 1

Формулы химических потенциалов углерода и железа для тетрагонального феррита (α') и аустенита с использованием термодинамических функций системы Fe-C

Густафсон [7]		
$\mu_{Fe}^{\alpha'}$	$1224,83 + 124,134T - 23,5143T \ln T - 0,00439752T^2 - 5,89269 \cdot 10^{-8}T^3 + 77358,5T^{-1} + G_{mag} + H_{ref} - 190T \frac{x_C^a}{3(1-x_C^a)} + 3RT \ln \left(\frac{3-4x_C^a}{3(1-x_C^a)} \right) + \Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$	(4а)
μ_{Fe}^{γ}	$-237,57 + 132,416T - 24,6643T \ln T - 0,0375752T^2 - 5,89269 \cdot 10^{-8}T^3 + 77358,5T^{-1} + H_{ref} - 34671 \frac{x_C^{\gamma}}{(1-x_C^{\gamma})^2} + RT \ln \left(\frac{1-2x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right)$	(4б)
$\mu_C^{\alpha'}$	$G_{Fe}^0 + 107350 + 25,222T - 190T \frac{3-5x_C^a}{9(1-x_C^a)} + RT \ln \frac{x_C^a}{3-4x_C^a} + \Delta\mu_C^{\alpha'}$	(4в)
μ_C^{γ}	$G_{Fe}^0 + 77207 - 15,877T - 34671 \left(\frac{1-3x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right) + RT \ln \frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}}$	(4д)
Агрен [4]		
$\mu_{Fe}^{\alpha'}$	${}^0G_{Fe}^a + 3RT \ln \left(\frac{3-4x_C^a}{3(1-x_C^a)} \right) + \Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$	(5а)
μ_{Fe}^{γ}	${}^0G_{Fe}^{\gamma} + RT \ln \frac{1-2x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} - \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right)^2 (21079 + 11,555 \cdot T)$	(5б)
$\mu_C^{\alpha'}$	${}^0G_C^{\alpha'} + {}^0\varphi_C^a + RT \ln \left(\frac{x_C^a}{3-4x_C^a} \right) + \Delta\mu_C^{\alpha'}$	(5в)
μ_C^{γ}	${}^0G_C^{\gamma} + 46115 - 19,178 \cdot T + RT \cdot \ln \frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} + 2 \frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} (21079 + 11,555 \cdot T)$	(5д)

Могутнов, Томилин, Шварцман [8] и Чипман [9]		
$\mu_{Fe}^{\alpha'}$	${}^0G_{Fe}^a + \frac{3}{4} RT \ln \frac{1-\frac{7}{3}x_C^a}{1-x_C^a} + \Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$	(6а)
μ_{Fe}^{γ}	${}^0G_{Fe}^{\gamma} - 8830 \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right)^2 + RT \left(\frac{1-2x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right)$	(6б)
$\mu_C^{\alpha'}$	${}^0G_C^{\alpha'} + 95818 - 41,92T + RT \ln \frac{x_C^a}{1-\frac{7}{3}x_C^a} + \Delta\mu_C^{\alpha'}$	(6в)
μ_C^{γ}	${}^0G_C^{\gamma} + 72118,6 + 2,72RT \ln T - 201,35T + 8885,72 \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-x_C^{\gamma}} \right) + RT \ln \left(\frac{x_C^{\gamma}}{1-2x_C^{\gamma}} \right)$	(6д)

В таблице G_{mag} – магнитная компонента свободной энергии α' -фазы, H_{ref} – , G_0^{sp} – свободная энергия графита.

Представленные в табл. 2 результаты расчета граничных концентраций углерода с использованием трех наиболее достоверных систем термодинамических функций сплавов Fe-C отчетливо иллюстрируют факт чрезвычайно сильного расширения онцентрационной области однофазного существования тетрагонального α' -феррита (бейнита) по сравнению с α -фазой, обладающей кубической решеткой и хаотическим распределением атомов углерода между подрешетками внедрения и внутри их. Например, при 500 К растворимость углерода в α' -фазе составляет 1,185%С, тогда как в обычном феррите – 0,0035%С, то есть в 330 раз выше. При условии запрета на выделение карбидной фазы стали, содержащие менее 1–1,3%С, должны быть однофазными. В них изотермический распад $\gamma \rightarrow \alpha'$ переохлажденного аустенита должен завершаться полностью. У сталей, содержащих углерод с концентрацией, превышающей граничную, остаточный аустенит обязан сохраняться, но он может превратиться в мартенсит, если затем будет проведено охлаждение γ -фазы ниже температуры M_s . В уравнения для $\Delta\mu_C^{\alpha'}$ и $\Delta\mu_{Fe}^{\alpha'}$ входит константа деформационного взаимодействия λ_0 атомов углерода, величина которой в литературе является дискуссионной. Мы придавали для λ_0 те значения, которые упоминались в статьях разных авторов: от 2,73 до 10,5 эВ/атом [5]. Установлено очень сильное влияние величины параметра деформационного взаимодействия на равновесные концентрации углерода. Если при

значении $\lambda_0 = 10,5$ и температуре 600 К пограничная концентрация в тетрагональном феррите составляет 0,78 масс.%, то для значения $\lambda_0 = 6,5$ она увеличивается до 1,31 масс.%, а при маловероятном значении $\lambda_0 = 2,73$ эВ/атом концентрация становится нереально большой: 3,1 масс.%.

Равновесная концентрация углерода в аустените составляет 18–19 масс.%, и она слабо увеличивается при повышении λ_0 . На основе проведенного расчета можно сделать вывод, что содержание углерода в тетрагональном феррите может в 300 и более раз превышать равновесную концентрацию в кубическом феррите. Это подтверждает мнение Бхадешиа о более высоком содержании углерода в тетрагональном феррите, находящемся при той же температуре в равновесии с γ -фазой. Этот вывод очень важен, поскольку добавка углерода создает упрочняющий эффект для железа. Поэтому несомненно, что получение тетрагонального феррита (бейнита) может стать основой для разработки новых высокопрочных сталей [1, 2].

Таблица 2

Равновесные концентрации углерода (масс.%) в кубическом и тетрагональном феррите, граничащим с γ -фазой, полученные решением системы уравнений (3) в условиях, когда выделение Fe_3C подавлено ($\lambda_0 = 8,5$ эВ/атом)

Температура, К	Кубический феррит		Тетрагональный феррит					
	Агрэн		Густафсон		Агрэн		Чипман	
	C_α масс. %	C_γ масс. %	C_α масс. %	C_γ масс. %	C_α масс. %	C_γ масс. %	C_α масс. %	C_γ масс. %
300	0,00013	7,507	1,021	7,525	1,241	7,444	0,959	8,694
400	0,00054	6,957	0,993	6,745	1,196	6,376	1,015	6,947
500	0,00353	5,845	0,979	5,957	1,185	5,279	1,105	4,904
600	0,01063	4,773	0,983	5,165	1,227	4,108	1,328	2,276
700	0,02005	3,684	1,006	4,392	1,390	2,682		

Наименьшая концентрация углерода в α -фазе из трех рассматриваемых тетрагональных моделей наблюдается по Густафсону, здесь же должна проявляться наибольшая концентрация в γ -фазе. У Агрэна оказалась наибольшая концентрация углерода в α -фазе. Отдельно отметим, что у Чипмана решение системы уравнений (3) существует лишь в диапазоне до 600 К.

Экспериментальное исследование закономерностей образования бескарбидного бейнита и содержания углерода в нем и в γ -фазе

Материал и методика исследования

Материалом для исследования служила сталь, химический состав которой включает мас. %: 0,98 С, 1,52 Si, 1,91 Mn, 1,44 Cr, 0,11 V. Выплавленный в индукционной печи слиток массой 10 кг был под-

вергнут гомогенизации и прокован на заготовки в виде прутков. Последующая термическая обработка образцов исследуемой стали осуществлялась в автоматизированном цифровом дилатометре «Linsels L78 R.I.T.A.», а также в лабораторных печах с окислительной атмосферой. Дилатометрические образцы имели форму цилиндров длиной 10 и диаметром 3 мм, печная обработка проводилась на заготовках сечением 14×14 мм.

Рентгенографическое исследование образцов ставило целью изучить наличие тетрагональности кристаллической решетки бейнитного феррита (α' -фаза), концентрации углерода в нем и соотношения количеств α' - и γ -фаз в зависимости от длительности выдержки на изотерме. Рентгеноструктурный анализ образцов стали проводили на дифрактометре ДРОН-УМ1 в излучении $\text{K}\alpha$ -железа с применением монохроматора при напряжении 30 кВ и величине тока 20 мА. Съемку на отражение осуществляли в шаговом режиме через угол $2\theta = 0,02$ град с набором импульсов на каждом шаге в течение 10 с. Для оценки структурного состояния сплава получали дифракционный спектр в интервале двойных углов Вульфа-Брэгга $2\theta = 54,0\text{--}58,5$ град и фиксировали на дифрактограммах отражения (111) ГЦК Fe (аустенита) и (110)+(101) ОЦК Fe (феррит).

Количественный фазовый анализ проводили по обычной методике [10], использующей связь объемной доли аустенита V^γ и отношения интегральных интенсивностей, т.е. площадей под кривыми, интенсивности отражения (111) переохлажденного, превращающегося в бейнит аустенита и сливающихся в общий пик отражений (101) $_{\alpha'}$ и (110) $_{\alpha'}$ тетрагонального бейнитного феррита или мартенсита:

$$\frac{J_{111}^\gamma}{J_{101}^{\alpha'} + J_{110}^{\alpha'}} = \kappa \frac{V^\gamma}{1 - V^\gamma}, \quad (7)$$

где коэффициент $\kappa = 0,72$.

Очевидно, что $V^{\alpha'} = 1 - V^\gamma$. Отметим, что каждый из дифракционных максимумов формируется в случае поликристаллического образца как наложение отражений от целого семейства плоскостей. В случае тетрагональной решетки, как у мартенсита сталей, некоторые максимумы дифракции чистого α -железа раздваиваются. В частности, вместо максимума (110) возникает дублет отражений (101)+(110). Однако для бейнитного феррита оба максимума сливаются в один несимметрично уширенный пик. Интегральную интенсивность этого максимума использовали при фазовом анализе.

Содержание углерода в бейнитном феррите определяли по методике, развитой Каминским под руководством академика Курдюмова для мартенсита низкоуглеродистых или отпущенных

сталей [11]. В ее основе лежит установленная ими линейная зависимость интегральной ширины дифракционных максимумов от содержания углерода в нём. Ширина максимума складывается из инструментального уширения, уширения, обусловленного высокой плотностью дислокаций, и уширения, обусловленного тетрагональностью. Две первые компоненты можно исключить, если вычесть ширину дифракционного пика эталона. В качестве эталонного образца использовали тонкую пластинку железа, закаленного в струе воды, подаваемой на нагретый образец под давлением 17,3 атм. После такой обработки эталон имеет мартенситную структуру с высокой плотностью дислокаций $\rho = 8,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [12], близкую к тому уровню, которым обладает бескарбидный бейнит нашей стали [2]. Ширина дифракционного максимума 110 эталона в излучении $K_{\alpha}\text{-Fe}$ по шкале θ составляла 0,13 град.

Содержание углерода в аустените оценивали по углу θ , соответствующему максимальной интенсивности отражения $(111)_{\gamma}$, который определяется уравнением Вульфа-Бреггов:

$$a_{\gamma} = \frac{\lambda \sqrt{3}}{2 \sin \theta},$$

где для железного анода $\lambda = 1,93597 \text{ \AA}$, a_{γ} – параметр решетки аустенита, который зависит от содержания углерода p_C^{γ} , мас.%. По данным [13] для остаточного аустенита углеродистых сталей

$$a_{\gamma} = a_{\gamma}^0 + 0,044 p_C^{\gamma}, \text{ \AA}, \quad (8)$$

где a_{γ}^0 – параметр решетки чистого γ -железа ($3,555 \text{ \AA}$). Далее учтено, что легирующие элементы стали Mn, Si и другие влияют на параметр решетки. Чтобы учесть это, на образце, закаленном в воду, для которого $p_C^{\gamma} = 0,98\%$, был измерен параметр решетки a_{γ} и с учетом поправ-

ки в (8) установлено $a_{\gamma}^0 = 3,5654 \text{ \AA}$. Это значение использовано при расчетах концентрации углерода в аустените по (8) различным образом обработанных образцов.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Дилатометрия

Термическое воздействие в дилатометре включало единые для всех образцов условия аустенитизации – нагрев до 900°C и выдержку в течение 600 с. Перегибы на восходящих ветвях дилатометрических кривых (рис. 1) позволяют определить, что точка A_{C1} достигается при 771°C , а интервал $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при скорости нагрева $0,5 \text{ K/s}$

составляет менее 35 K. Температура 900°C соответствует области существования стабильного аустенита, поэтому выдержка при этой температуре способствует выравниванию его химического состава по всем легирующим элементам. Охлаждение образцов осуществлялось различным образом. В процессе непрерывного охлаждения от 900°C до комнатной (вариант первый – закалка) γ -фаза сохраняется до $M_s = 90^{\circ}\text{C}$, где начинается мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение (кривая 1 на рис. 1). Варианты 2, 3, 4 включали охлаждение от 900 до $400, 300, 200^{\circ}\text{C}$ соответственно и выдержку при каждой из этих температур в течение 5 ч, что условно отмечено на соответствующих дилатометрических кривых символом ●, далее все образцы также охлаждались до 20°C .

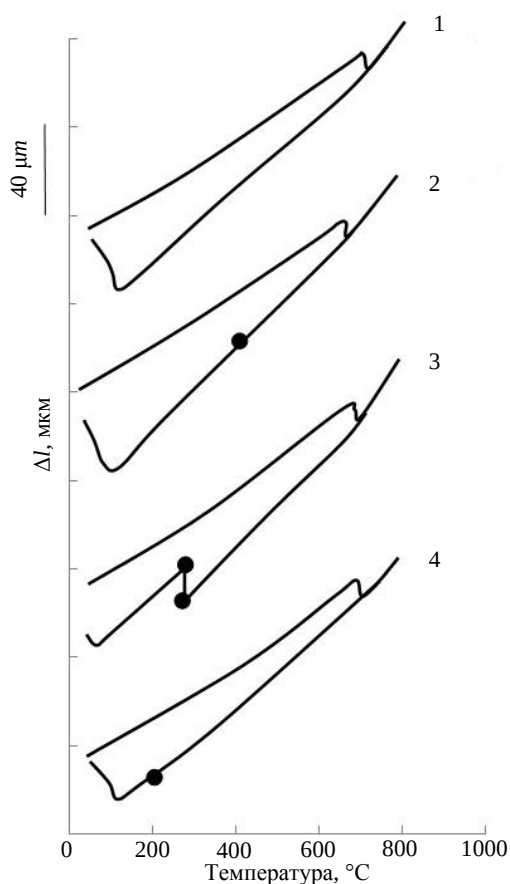


Рис. 1. Дилатометрические кривые стали, подвергнутой термической обработке по различным схемам: 1 – закалка; 2 – изотермическая выдержка при 400°C ; 3 – изотермическая выдержка при 300°C ; 4 – изотермическая выдержка при 200°C

При охлаждении по варианту 2 длина образца в процессе выдержки при 400°C сокращается на 0,02% (рис. 2.1). Эффект слабый и противоположный тому, который бы наблюдался в ходе $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Но точка M_s повышается с 90 до

101 град, т. е. произошла слабая дестабилизация аустенита, обусловленная, скорее всего, выходом атомов углерода из раствора на дислокации. При охлаждении по варианту 4, включающему изотермическую выдержку при температуре 200°C, форма дилатометрической кривой, в том числе положение точки M_s , идентичны с дилатограммой закаленной стали (кривые 4 и 1 на **рис. 1**). Можно заключить, что диффузионная активность углерода при 200°C снижена, и в аустените сохраняется исходная концентрация углерода.

Охлаждение по варианту 3 качественно меняет вид дилатограммы (кривая 3 на **рис. 1**). В процессе выдержки при 300°C после инкубационного периода продолжительностью 3 мин длина дилатометрического образца возрастает пропорционально времени выдержки (**рис. 2.2**). По истечении 5 ч на дилатометрической кривой (см. **рис. 1**) появляется вертикальный участок протяженностью примерно 10 мкм. При последующем охлаждении температура начала мартенситного превращения смещается вниз ($M_s = 37^\circ\text{C}$ против $M_s = 90^\circ\text{C}$ после закалки). Если использовать отмеченный в [14] темп снижения M_s (300 К на 1 мас.%C для стали близкого состава), то содержание углерода в остаточном аустените за 5 ч его распада повысилось до 1,16%.

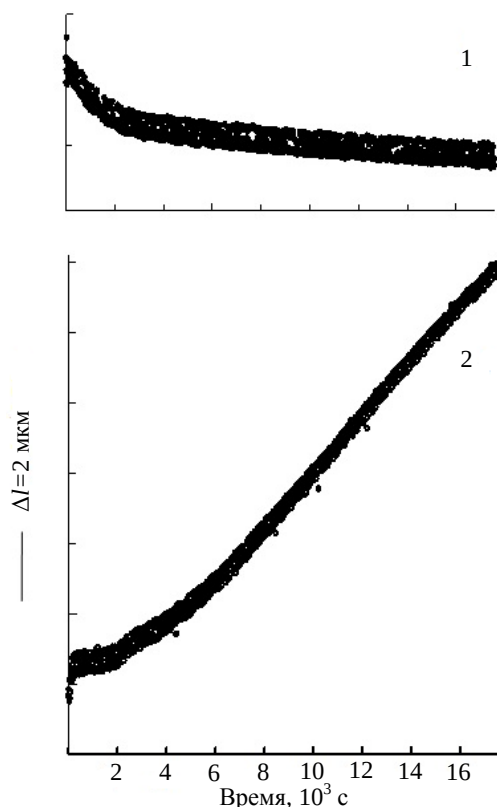


Рис. 2. Изменение длины дилатометрического образца стали, предварительно нагретого до 900°C, в процессе изотермической выдержки при температуре: 1 – 400°C; 2 – 300°C

Структура стали

На ПЭМ-изображениях структуры бейнит представляет собой вытянутые иглы с тонкими прослойками остаточного аустенита: картины электронной дифракции представляют собой суперпозицию рефлексов, принадлежащих ОЦК и ГЦК решетке железа. По взаимному расположению сетки рефлексов, принадлежащих различным типам кристаллической решетки, были определены ориентационные соотношения между α -фазой бейнита и γ -фазой остаточного аустенита и установлено, что они соответствуют ориентационным соотношениям Курдюмова-Закса и Нишиямы. Темнопольный анализ изображений, полученных в рефлексах ГЦК-фазы, показывает расположение кристаллов остаточного аустенита между рейками α -фазы, а последние имеют толщину 20–50 нм и сгруппированы в пакеты.

Тонкая структура стали исследована методами сканирующей и просвечивающей дифракционной микроскопии с применением темнопольного и электронографического анализа. После 10-часовой выдержки при 300°C на СЭМ-изображениях наблюдаются отдельно расположенные кристаллы бейнита, протяженность которых сопоставима с размером бывшего аустенитного зерна, непревращенный аустенит занимает примерно половину объема. После 20-часовой выдержки количество кристаллов бейнита увеличивается, а после 30-часовой выдержки бейнит составляет основу структуры, но остаточный аустенит распределен неоднородно. На **рис. 3** и **4** приведен участок структуры с повышенным содержанием γ -фазы. Выделений карбидной фазы в структуре исследуемого сплава не обнаружено.

Рентгеноструктурный анализ

Дифрактограммы образцов после различных обработок представлены на **рис. 5**. Кривая 1 относится к закаленному состоянию. На этом фрагменте видны сильный пик отражения (111) аустенита и мартенситный дублет, состоящий из двух размытых максимумов $(011)_\alpha$ и $(110)_\alpha$. Однако на дифрактограммах бейнитного феррита обе компоненты дублета сливаются в общий уширенный максимум (**рис. 5, 2, 3, 4**). Рассмотрим пример определения содержания углерода в бейнитном феррите. На дифрактограмме образца, охлажденного от 900 до 300°C и выдержанного 10 ч, ширина дифракционного максимума $(101+110)$ составляла $B = 0,30$ град, следовательно, уширение, обусловленное тетрагональностью: $b = B - b_0 = 0,30 - 0,13 = 0,17$ град. По графику [11] находим, что содержание углерода $p_C = 0,26$ мас.% и, используя далее уравнение Курдюмова $c/a = 1 + 0,046p_C$, определяем степень тетрагональности $c/a = 1,012$. Аналогичным образом было установлено, что после вы-

держки 20 ч. содержание углерода понизилось до 0,16%, при этом $c/a=1,007$ и наконец 30-часовая выдержка приводит к понижению содержания углерода до 0,10 мас.%, при этом степень тетрагональности снижается до 1,0043.

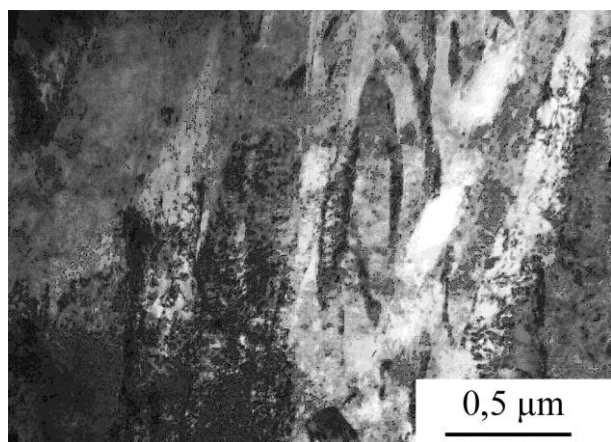


Рис. 3. Структура C-Si-Mn-Cr-V стали после термической обработки по схеме: нагрев до 900°C, подстуживание до 300°C, изотермическая выдержка 300°C в течение 30 ч. Светлопольное изображение

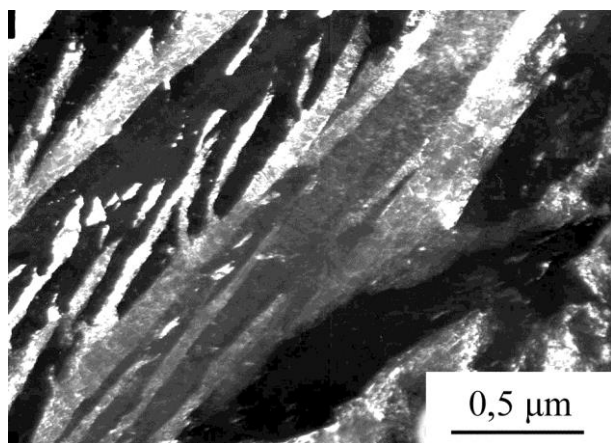


Рис. 4. Структура C-Si-Mn-Cr-V стали после термической обработки по схеме: нагрев до 900°C, подстуживание до 300°C, изотермическая выдержка 300°C в течение 30 ч. Темнопольное изображение в рефлексе 020 γ

Анализ содержания углерода в аустените свидетельствует о том, что непревращенный аустенит значительно обогащен по углероду в сравнении со средним содержанием этого элемента в химическом составе исследуемого сплава. После выдержки при 300°C в течение 10 ч содержание углерода в аустените составляет 1,51 мас.%. По мере увеличения продолжительности изотермической обработки до 20 и 30 ч концен-

трация углерода в аустените возрастает до 1,54 и 1,60 мас.% соответственно. К этому следует добавить оценку $p_C^\gamma = 1,16$ мас.%C после 5 ч выдержки при 300°C, сделанную на основании смещения M_s .

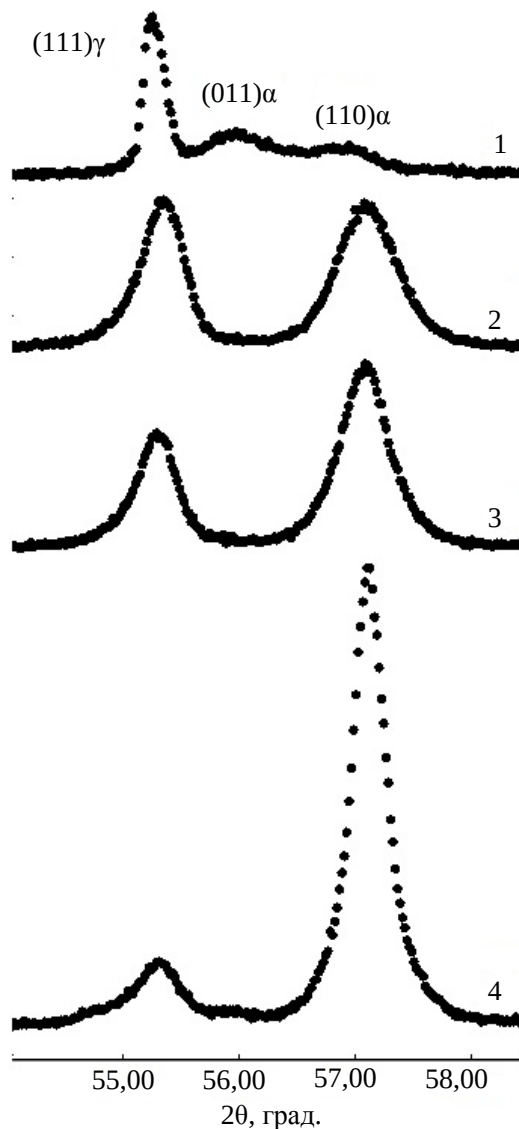


Рис. 5. Фрагменты дифрактограмм C-Si-Mn-Cr-V стали после термической обработки в печи по различным режимам: 1 – закалка от 900°C с охлаждением в воде; 2, 3, 4 – нагрев до 900°C, подстуживание до 300°C, изотермическая выдержка 300°C в течение: 2 – 10 ч; 3 – 20 ч; 4 – 30 ч

Фазовый анализ позволил установить, что количество α-фазы непрерывно возрастает по мере увеличения длительности выдержки. После выдержки 10, 20 и 30 ч объемная доля α-фазы составляет 41, 54 и 83% при уже отмеченных концентрациях углерода в γ-фазе: 1,51; 1,54 и

1,60 мас.% и в α -фазе: 0,26; 0,16 и 0,1 %С. Эти данные позволяют определить величину $P_C^\alpha V^\alpha + P_C^\gamma V^\gamma$, которая в отсутствии выделения карбидов и осаждения углерода на дислокациях должна быть константой (~1%). Численный расчет дает значения 0,99; 0,79 и 0,355%. Убывание этой величины мы можем трактовать как появление «скрытого» углерода.

Термодинамический анализ равновесия углерода между γ - и тетрагональной α -фазами, учитывающий деформационное взаимодействие между атомами углерода по Зинеру-Хачатуряну, показывает повышение равновесной растворимости углерода в α -фазе при комнатной температуре до 1,0 мас. % и выше [5, 6]. Эти теоретические оценки получены при условии подавления карбидообразования и характеризуют, по-видимому, состояние свежееобразованного бейнита.

Проблему тетрагональности бескарбидного бейнита в современной литературе поднял Бхадешиа; он, по-видимому, полагал, что бейнитный феррит должен иметь кубическую решетку [2]. Между тем еще в 1951 г. Г.В. Курдюмов и М.Д. Перкас опубликовали статью о тетрагональности бейнитного феррита различных сталей, в том числе не содержащих кремний, и мартенсита этих сталей, отпущенного на температуру образования бейнита [15]. Исследование было проведено на монокристаллах, поэтому степень разрешения дублета была максимальной. Оказалось, что бейнитный феррит всех сталей слабо тетрагональный ($c/a \approx 1,01$), причем степень тетрагональности бейнита при $T = 250\text{--}300^\circ\text{C}$ оказалась для всех сталей почти одинаковой и близкой (или равной) тетрагональности отпущенного на ту же температуру мартенсита. Авторы предположили, что в ходе развития бейнитного превращения происходят такие же процессы, что и при образовании и последующем отпуске мартенсита.

В нашем случае наличие кремния и марганца подавляет или смещает к более высоким температурам стадию двухфазного распада мартенсита или бейнита, на которой проходит выделение карбидных частиц. Отсюда следует вывод, что образование бейнитного феррита также сопровождается стадией кластеризации [16], для которой типично образование сверхтонких пластин α'' -Fe₁₆C₂ или γ'' -Fe₄C [17], разделенных когерентно связанными пластинками низкоуглеродистой α' -фазы, которые растягиваются высокотетрагональными пластинками Fe₁₆C₂. По мере развития этого спинодального распада происходит постепенное заполнение атомами углерода z-позиций в пластинках Fe₁₆C₂, а также утолщение и увеличение их диаметра. В пределе этот процесс приводит к разделению отражению рентгеновских лучей от низкоуглеродистой α -фазы и Fe₁₆C₂, причем эти отражения чрез-

вычайно размытые из-за малой толщины её пластинок и практически не должны проявляться. Добавим к этому возможность разрыва когерентности из-за появления системы круговых дислокаций Франка вокруг пластинок Fe₁₆C₂. Конечно, нужно учитывать, что углерод из α -фазы диффундирует в аустенит через межфазную α/γ границу. Эта межфазная поверхность в случае бейнита, в структуре которого произошел спинодальный распад $\alpha' \rightarrow \alpha + \alpha''$, где α' – исходный бейнит с неупорядоченным расположением атомов углерода в z-подрешетке, α – низкоуглеродистая фаза с кубической или слаботетрагональной решетками, α'' – высокоуглеродистая фаза с упорядоченным расположением атомов углерода (типа Fe₁₆C₂), должна содержать участки контакта фаз α/γ и α''/γ . Мы предполагаем, что в первом случае реализуется обычно равновесие $\alpha \rightleftharpoons \gamma$, где α -фаза согласно равновесной диаграмме Fe-C должна иметь очень низкое содержание углерода, тогда как граничная концентрация углерода высокоуглеродистой α'' -фазы определяется термодинамикой равновесия γ -фазы с тетрагональной α'' -фазой [5] и может составлять до 1 мас.% углерода и более. Соответственно граничные концентрации углерода в γ -фазе на этих участках также будут разными, поэтому возникнет поток атомов углерода от α'' к α -фазе через аустенит, что может приводить к выделению углерода в виде карбидов на участке α -фазы.

Отметим, например, исследование [18], в котором на стали близкого химического состава, но без марганца было показано, что изотермический распад аустенита при 300°C сопровождается выделением частиц цементита и ϵ -карбида. Но можно предположить, что после разрыва когерентности кристаллов α'' - и α -фаз тетрагональность решетки определяет один α -феррит, а сверхтонкопластинчатая α'' -фаза дает невидимые размытые максимумы дифракции. Возможно, что «скрытый» углерод сосредоточен в этих пластинах и проявляется при более высоких температурах в выделении карбидов.

Отметим, что данные настоящей работы отражают среднее содержание углерода в α -фазе на определенном этапе развития бейнитного превращения, а оно может отличаться от фактических значений в локальных участках структуры особенно вблизи межфазных границ. Во вновь образованных кристаллах бейнита концентрация углерода намного выше верхней границы интервала (0,26 мас. %) и, вероятно, близка к теоретическим оценкам [5, 6]. Значение на нижней границе интервала, равное 0,10 мас.%, согласуется с результатами исследования бейнита в стали близкого химического состава методом атомной зондовой томографии [19].

Выводы

1. В результате термодинамических расчетов равновесия тетрагональной α' -фазы и аустенита установлено, что граничная концентрация углерода в α' -фазе оказывается равной примерно 1 масс.%, что в сотни раз превосходит аналогичное значение при равновесии кубического феррита с аустенитом.

2. В исследованной стали образуется бескарбидный бейнит. Минимальная устойчивость аустенита по отношению к бейнитному превращению наблюдается для 300°C.

3. Решетка бейнитного феррита оказалась слабо тетрагональной, причем отношение c/a непрерывно уменьшается в ходе изотермической выдержки, что связано, предположительно, с переходом углерода из α в γ -фазу.

4. Образование бейнита при этой температуре продолжается более 30 ч. В течение которых количество α' -фазы за 10 часов возрастает до 41%, а затем за 30 часов – до 83%. При этом содержание углерода снижается от исходного (0,93%) до 0,26% за 10 ч и до 0,1% через 30 ч. Напротив, концентрация углерода в γ -фазе возрастает соответственно от 0,93 до 1,51% и далее до 1,6% соответственно.

5. Суммарное содержание углерода в обеих фазах ($\gamma + \alpha$) при выдержке более 10 ч непрерывно уменьшается, что свидетельствует о существовании «скрытого» углерода. Сделано предположение, что скрытый углерод сосредоточен в очень тонких пластинках Fe_{16}C_2 , возникших в ходе спинодального распада раствора углерода в бейнитном феррите и утеравших когерентную связь с пластинками α' -фазы. При этом небольшая тетрагональность бейнита обусловлена только тетрагональностью низкоуглеродистых пластинок α' -фазы.

Данная работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 16-19-10252.

Список литературы

1. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. М.: Металлургия, 1994. 228 с.
2. Bhadeshia H.K.D.H., 2001, Bainite in steels. London: The Institute of Materials, UK. 2001. 460.
3. Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., et al., Nanostructured steel industrialisation: plausible reality, Materials Science and Technology. 30, (9). 2014. 1071–1078.
4. Agren J.A., 1979, Thermodynamic Analysis of the Fe-C and Fe-N Phase Diagrams. Metal. Trans. 10A, 1979. 1847–1852.
5. Термодинамический анализ возникновения тетрагонального бейнита в сталях / Мирзаев Д.А., Мирзоев Д.А., Булдашев И.В и др. // ФММ. 2017. Т.118. №6. С. 547–553.
6. Метастабильное равновесие тетрагонального бейнитного феррита и аустенита сталей с бескарбидным бейнитом / Мирзаев Д.А., Мирзоев А.А., Булдашев И.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 27–36.
7. Gustafson P., 1985, Thermodynamic evaluation of the Fe-C system. Scandinavian Journal of Metallurgy. 14(5), 1985, 259–267.
8. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железо-углеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 328 с.
9. Chipman J., 1972, Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system // Metall. Trans. 1972. V. 3. № 1. P. 55–64.
10. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-микроскопический анализ. М.: МИСиС, 1994. 328 с.
11. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. М.: ООО «Наука и технологии», 2002. 519 с.
12. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 976 с.
13. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
14. Окишев К.Ю., Мирзаев Д.А. Специальные стали. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. С. 7.
15. Курдюмов Г.В., Перкас М.Д. О механизме распада аустенита в промежуточной области температур // Сб. трудов ЦНИИЧерМет «Проблемы металловедения и физики металлов». М., 1951. С. 169–175.
16. Бернштейн М.Л., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Отпуск стали. М.: МИСиС, 1997. 335 с.
17. Sinclair C.W., Perez M., Veiga G.A., et al., Molecular dynamics study of the ordering of carbon in highly supersaturated α -Fe, Physical Review B, 81, (22), 2010, 224204.
18. Eduard Donazil, Tómas Podravsky, Jiri Svejca, 1982, Untersuchung der Bainitumwandlung in Siliciumstahl // Arch. Eisenhüttenwesen, B52, (7), 1982, 289–293.
19. Caballero F.G., Miller M.K., Garcia-Mateo C., et al Temperature dependence of carbon supersaturation of ferrite in bainitic steels. Scripta Materialia, 67, 2012. 846–849.

Поступила 02.11.17.

Принята в печать 18.01.18.

THERMODYNAMICS, STRUCTURE AND CONCENTRATION OF CARBIDE-FREE BAINITE IN MANGANESE-SILICON STEELS DURING ITS FORMATION

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: mirzaevda@susu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4696-8258>

Irina L. Yakovleva – D.Sc. (Eng.), Chief Researcher

Laboratory of Physical Metallurgy, Institute of Metal Physics, Yekaterinburg, Russia. E-mail: labmet@imp.uran.ru

Natalia A. Tereshchenko – Ph.D. (Eng.), Senior Researcher

Laboratory of Physical Metallurgy, Institute of Metal Physics, Ekaterinburg, Russia. E-mail: labmet@imp.uran.ru

Ivan V. Buldashev – Postgraduate Student

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: buldashev.ivan@mail.ru

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: mirzoevaa@susu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1527-371X>

Absrtact

The aim of this research was to confirm the Bhadeshia hypothesis about the tetragonal lattice of the α' -phase, i.e. ferrite in the carbide-free bainite, as well as to compare the results of the thermodynamic calculation of the carbon concentration in the α' -phase and in the residual austenite with the results of the experiments. The objective of the study was to understand how carbon forms and what structure, formation kinetics and behavior it has at the moment when carbide-free bainite is forming in the steel of the following composition: 0.98 C, 1.52 Si, 1.91 Mn, 1.44 Cr, 0.11% V. The originality of this research is in establishing a number of regularities (including the weak tetragonality of the α' -phase) and a marked difference between the calculated (for tetragonal ferrite) and observed carbon concentrations. The authors suggest there may be thin Fe_{16}C_2 crystals inside the α' -phase crystals that formed during the spinodal decomposition of the α -phase, then lost a coherent connection with low-carbon formations and eventually became "invisible" in the X-ray diffraction analysis due to their small thicknesses, as it results in a diffuse diffraction maximum which basically blends into the background. During the bainite transformation (which starts as a diffusionless transformation) the carbon content in the α' -phase decreases, apparently as a result of the diffusion transition of carbon from the α' -phase to the γ -phase. After 10 hours of decomposition at 300 °C, when the α' -phase accounts for 41%, the carbon content in the α' -phase drops to 0.26%. After 20-hour long soaking the carbon content in the ferrite drops to 0.16% whereas the amount of α' -ferrite rises to 54%. In the long run, following 30 hours of soaking the carbon content drops to 0.1% with the α' -phase increasing to 83%. The practical relevance of this study lies in obtaining new theoretical and experimental data necessary for understanding the processes that take place in carbide-free bainitic steels, which is important for creating new steels of this class and defining the applicable heat treatment modes.

Keywords: Manganese-silicon high-carbon steel, low-temperature bainite transformation, structure, carbide-free bainite, tetragonal lattice.

References

1. Shchastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. *Struktura termicheskoi obrabotannoy stali* [The structure of heat-treated steel]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 228 p.
2. Bhadeshia H.K.D.H., 2001, Bainite in steels. London: The Institute of Materials, UK. 2001. 460.
3. Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., et al., Nanostructured steel industrialisation: plausible reality, Materials Science and Technology. 30, (9). 2014. 1071-1078.
4. Agren J.A., 1979, Thermodynamic Analysis of the Fe-C and Fe-N Phase Diagrams. Metal. Trans. 10A, 1979. 1847-1852.
5. Mirzaev D.A., Mirzoev D.A., Buldashev I.V et al. *Termodinamicheskiy analiz vozniknoveniya tetragonalnogo beinita v stalyakh* [Thermodynamic analysis of the formation of tetragonal bainite in steels]. Physics of Metals and Metallography. 2017, vol. 118, no. 6, pp. 547-553.
6. Mirzaev D.A., Mirzoev A.A., Buldashev I.V. et al. Metastable equilibrium of tetragonal bainitic ferrite and austenite in steels with carbide-free bainite. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 27-36.
7. Gustafson P., 1985, Thermodynamic evaluation of the Fe-C system. Scandinavian Journal of Metallurgy. 14(5), 1985, 259-267.
8. Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. *Termodinamika zhelezo-uglerodistykh splavov* [Thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 328 p.
9. Chipman J., 1972, Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system. *Metall. Trans.* 1972, vol. 3, no. 1, pp. 55-64.

10. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgeno-graficheskiy i elektronno-mikroskopicheskiy analiz* [X-ray and electron-microscopic analysis]. Moscow: MISiS, 1994, 328 p.
11. Smirnov M.A., Shchastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoy obrabotki stali* [Basics of heat treatment of steels]. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2002, 519 p.
12. Shtremel M.A. *Razrushenie. V 2 kn. Kn. 2. Razrushenie struktur* [Fracture. In 2 books. Book 2. Structural fracture]. Moscow: Publishing House of MISiS, 2015, 976 p.
13. Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 236 p.
14. Okishev K.Yu., Mirzaev D.A. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Chelyabinsk, Publishing House of SUSU, 2013, p. 7.
15. Kurdyumov G.V., Perkas M.D. On the mechanism of austenite decomposition in the intermediate temperature range. *Sb. trudov TsNIICher Met "Problemy metallovedeniya i fiziki metallov"* [Problems of Metallurgy and Metal Physics: Proceedings of the Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy]. Moscow, 1951, pp. 169-175.
16. Bernstein M.L., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. *Otpusk stali* [Tempering]. Moscow: MISiS, 1997, 335 p.
17. Sinclair C.W., Perez M., Veiga G.A., et al. Molecular dynamics study of the ordering of carbon in highly supersaturated α -Fe, *Physical Review B*, 81, (22), 2010, 224204.
18. Eduard Donazil, Tömas Podravsky, Jiri Svejca, 1982, Untersuchung der Bainitumwandlung in Siliciumstahl. *Arch. Eisenhüttenwesen*, B52, (7), 1982, 289-293.
19. Caballero F.G., Miller M.K., Garsia-Mateo C., et al Temperature dependence of carbon supersaturation of ferrite in bainitic steels. *Scripta Materialia*, 67, 2012. 846-849.

Received 02/11/17

Accepted 18/01/18

Образец для цитирования

Термодинамические, структурные и концентрационные особенности образования бескарбидного бейнита в марганец-кремнистых сталях / Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Булдашев И.В., Мирзоев А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 26–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-26-36>

For citation

Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Tereshchenko N.A., Buldashev I.V., Mirzoev A.A. Thermodynamics, structure and concentration of carbide-free bainite in manganese-silicon steels during its formation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 26–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-26-36>

УДК 669.2: 669.715

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-37-44>

ВЛИЯНИЕ ЛИТИЯ НА ТЕПЛОЁМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ2.18

Азимов Х.Х.², Ганиев И.Н.¹, Амонов И.Т.³, Иброхимов Н.Ф.²¹ Институт химии им. В. И. Никитина АН Республики Таджикистан² Таджикский технический университет им. М.С. Осими³ Технологический университет Таджикистана

Аннотация

Известно, что технический алюминий с повышенным содержанием железа, кремния и других примесей из-за низких эксплуатационных характеристик не может найти применение в промышленности. Отсюда разработка новых составов сплавов на основе такого металла является весьма актуальной задачей. Одним из перспективных составов на диаграмме алюминий-железо является эвтектика (α -Al+Al₃Fe), которая, имея минимальный интервал кристаллизации, соответствует содержанию железа 2.18%(мас.). Данный состав был принят нами в качестве модельного сплава и подвергнулся модифицированию литием. Теплоёмкость является важнейшей характеристикой веществ и по её изменению от температуры можно определить тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоёмкости и другие свойства. В настоящей работе теплоёмкость сплава АЖ2.18 с литием определялась в режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди. Для чего обработкой кривых скорости охлаждения образцов из сплава АЖ2.18 с литием и эталона получены полиномы, описывающие их скорости охлаждения. Далее по экспериментально найденным величинам скоростей охлаждения эталона и образцов из сплавов, зная их массы, были установлены полиномы температурной зависимости теплоёмкости сплавов и эталона, которые описываются четырёхчленным уравнением. Используя интегралы от удельной теплоёмкости, были установлены модели температурной зависимости изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса. Полученные зависимости показывают, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. При этом добавки лития незначительно увеличивают теплоёмкость, энтальпию и энтропию исходного сплава АЖ2.18 и не влияют на величину энергии Гиббса.

Ключевые слова: сплав АЖ2.18, литий, теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Введение

Теплоёмкость представляет собой одно из важнейших физических свойств твердых тел, характеризующее изменение состояния вещества с температурой. Изучение теплоёмкости является одним из основных методов исследования структурных и фазовых превращений в сплавах. Из температурной зависимости теплоёмкости можно определить другие физические характеристики твердого тела: температуру и тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоёмкости и др.

Непрерывный технический прогресс в автомобилестроении, тракторостроении и других

отраслях народного хозяйства требует значительного увеличения объема производства различных сплавов цветных металлов и повышения их качества. Алюминию и сплавам на его основе принадлежит особое место в выполнении этой задачи. Сравнительно небольшая плотность в сочетании с высокими механическими характеристиками, а также значительные сырьевые ресурсы способствуют широкому внедрению алюминия и алюминиевых сплавов в различные отрасли промышленности. Алюминиевые сплавы применяют в машиностроении вместо стали, чугуна и других материалов с целью обеспечения снижения удельной металлоёмкости конструкций, т.е. отношения массы машины к ее мощности. Как следует из литературных данных, такое развитие сохранится и в будущем [1–9].

Основное преимущество сплава АЖ2.18

© Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф., 2018

(Al+2,18%Fe) по сравнению с другими сплавами – это малый интервал кристаллизации, поэтому в отливках не образуется усадочная пористость. Сплав рекомендуется для изготовления герметичных деталей. Как известно, щелочные и щелочноземельные металлы, являясь поверхностно-активными элементами, широко используются в качестве модификатора структуры алюминиевых сплавов. В этом плане добавка лития к алюминиевым сплавам также является перспективным. Однако в литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по теплоемкости этого сплава. Исследования температурной зависимости теплоемкости и термодинамических функций сплава марки АЖ2.18, модифицированного литием, провели по методикам, описанным в работах [10–17].

Теория метода и описание установки

Для измерения удельной теплоемкости сплавов в широкой области температур использовался закон охлаждения Ньютона-Рихмана. Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела.

Если взять два одинаковой формы металлических образца и охлаждать их от одной температуры, то по зависимости температуры образцов от времени (кривым охлаждения) можно найти теплоемкость одного образца, зная теплоемкость другого (эталона).

Количества тепла, теряемого объемом dV металла за время $d\tau$, равно

$$\delta Q = C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV \cdot d\tau, \quad (1)$$

где C_p^0 – удельная теплоемкость металла; ρ – плотность металла; T – температура образца (принимается одинаковым во всех точках образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика).

Величину δQ можно подсчитать, кроме того, по закону

$$\delta Q = \alpha(T - T_0) \cdot dS \cdot d\tau, \quad (2)$$

где dS – элемент поверхности; T_0 – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи.

Приравняв выражения (1) и (2), получим

$$C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV = \alpha(T - T_0) dS. \quad (3)$$

Количество тепла, которое теряет весь объем образца, равна

$$Q = \int_V C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV = \int_S \alpha(T - T_0) dS. \quad (4)$$

Полагая, что C_p^0 , ρ и $\frac{dT}{d\tau}$ не зависят от координат точек объема, а α , T и T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать

$$C_p^0 \cdot \rho \cdot V \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0) S, \quad (5)$$

или

$$C_p^0 \cdot m \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0) S, \quad (6)$$

где V – объем всего образца, а $\rho \cdot V = m$ – масса; S – площадь поверхности всего образца.

Соотношение (6) для двух образцов одинакового размера при допущении, что $S_1 = S_2$, $T_1 = T_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$, пишется так:

$$C_{p_1}^0 = C_{p_2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1} = C_{p_2}^0 \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1}. \quad (7)$$

Следовательно, зная массы образцов m_1 и m_2 , скорости их охлаждения и удельную теплоемкость $C_{p_1}^0$, можно вычислить скорость охлаждения и удельную теплоемкость $C_{p_2}^0$, из уравнения

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (8)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса первого образца; $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса второго образца; $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ – скорости охлаждения образцов при данной температуре.

Целью данной работы является определение

удельной теплоёмкости сплава АЖ2.18 с литьем по известной удельной теплоёмкости эталонного образца из меди.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения данных образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому – процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе, состоящей из огромного числа частиц, то есть это релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде (т.е. телу с бесконечно большой теплоёмкостью). Поэтому температуру окружающей среды можно считать постоянной (T_0). Тогда закон изменения температуры тела от времени τ можно записать в виде $\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1}$, где ΔT – разность температур нагретого тела и окружающей среды; ΔT_1 – разность температур нагретого тела и окружающей среды при $\tau=0$, τ_1 – постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между нагретым телом и окружающей средой уменьшается в e раз.

Измерение теплоемкости проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары 4 и 5. Концы термопар подведены к цифровым термометром «Digital Multimeter DI9208L» 7, 8 и 9. Электропечь 3 запускается через лабораторный автотрансформатор 1 (ЛАТР), установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» 7, 8 и 9, фиксируется значение начальной температуры. Вдвигаем образец 4 и эталон 5 в электропечь 3, нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» на компьютере 10. Образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаем из электропечи 3 и с этого момента фиксируем температуру. Записываем показания цифрового термометра «Digital Multimeter DI9208L» 7, 8 и 9 на компьютер 10 через каждые 5, 10, 20 с, до охлаждения температуры образца и эталона.

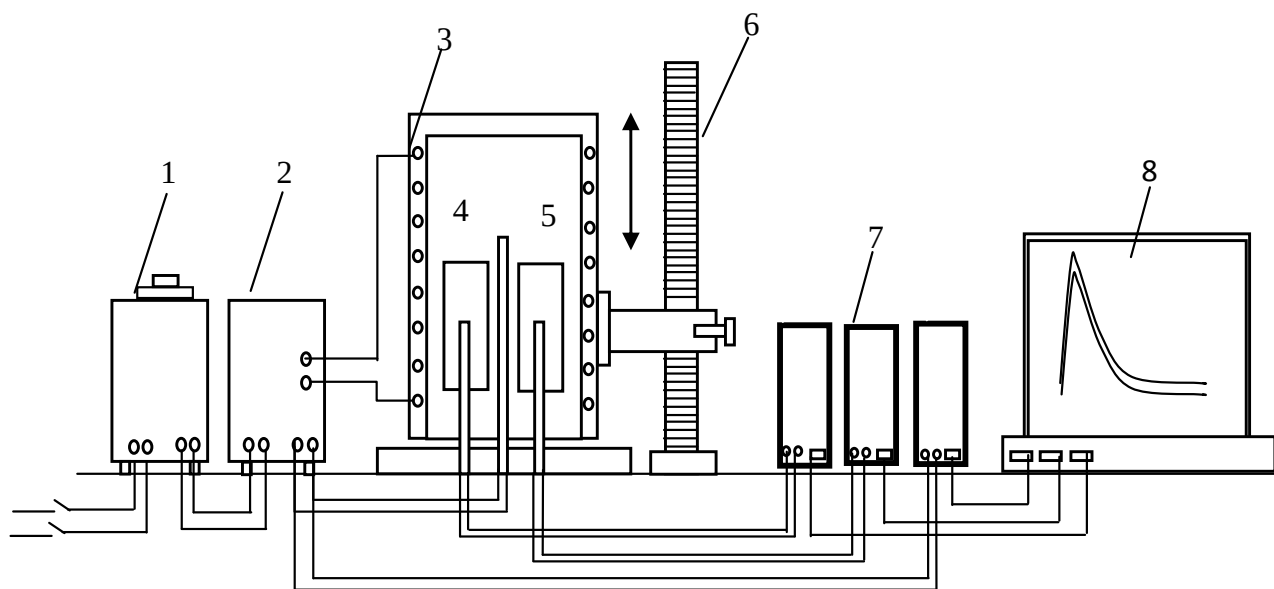


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»:

1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец измеряемый;

5 – эталон; 6 – стойка электропечи; 7 – многоканальный цифровой термометр;

8 – регистрирующий прибор (компьютер)

Результаты и их обсуждение

Таблица 1

Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (9) для сплава АЖ2.18 с литием

Образцы	a , К	$b \cdot 10^{-4}$, $с^{-1}$	p , К	$k \cdot 10^{-5}$, $с^{-1}$	ab , $Кс^{-1}$	pk , $Кс^{-1}$
Эталон (Cu марки М00)	359,984	7,22	370,2279	2,48	0,26	0,01
Сплав АЖ2.18	298,2839	1,11	445,5995	6,84	0,33	0,03
+0,01 Li	347,4929	8,92	407,4659	5,46	0,31	0,02
+0,1 Li	345,7766	9,53	411,1845	5,89	0,33	0,02
+0,5 Li	379,6813	8,57	3,7700	3,81	0,33	0,01

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов сплава АЖ2.18 с литием представлены на **рис. 2**. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 с. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400°C составляла $\pm 1\%$, а в интервале более 400°C $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%.

Полученные зависимости температуры от времени охлаждения для образцов из сплавов (см. **рис. 2**) описываются уравнением вида

$$T = -a \exp(-b\tau) - p \exp(-k\tau), \quad (9)$$

где a , b , p , k – постоянные для данного образца; τ – время охлаждения.

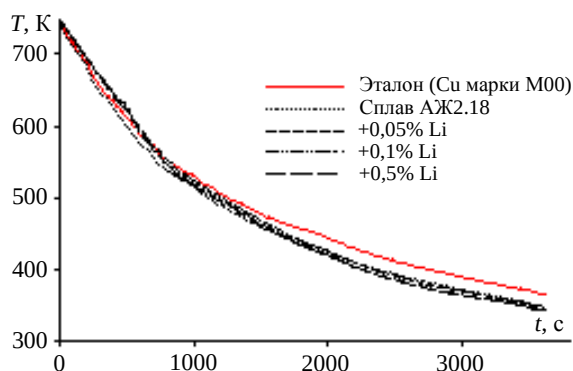


Рис. 2. График зависимости температуры образцов из сплава АЖ2.18 с литием от времени охлаждения

Дифференцируя уравнение (9) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения сплавов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (10)$$

Из экспериментально полученных зависимостей температуры образцов от времени (см. **рис. 2**) и скорости охлаждения образцов сплавов (**рис. 3**), которые описываются полиномами (9) и (10), определяли коэффициенты, проводя их компьютерную обработку.

Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнениях (9) и (10) для исследованных сплавов приведены в **табл. 1**.

Кривые скорости охлаждения эталона и образцов из сплавов представлены на **рис. 3**.

Вся обработка результатов производилась по программе MS Excel, и графики строились с помощью программы Sigma Plot. Коэффициент корреляции составил не менее 0,998.

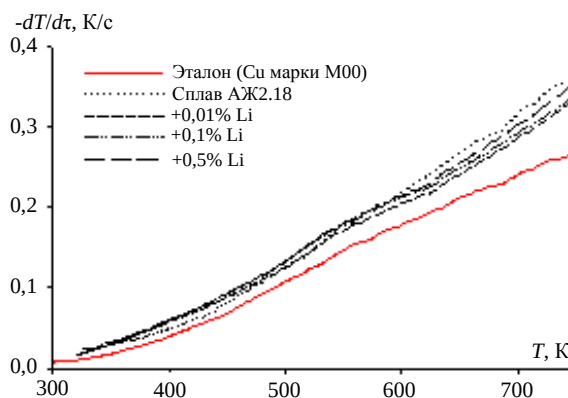


Рис. 3. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АЖ2.18 с литием

Далее по рассчитанным значениям величин скорости охлаждения сплавов по уравнению (8) была вычислена удельная теплоемкость сплавов с литием. Результаты расчёта показывают, что температурная зависимость удельной теплоемкости эталона (меди марки М0) и сплава АЖ2.18 с литием описывается уравнением вида

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (11)$$

Значения коэффициентов (**табл. 2**) в полиноме (11) получены обработкой результатов их расчёта по программе Sigma Plot.

Результаты расчёта температурной зависимости теплоемкости по формулам (8) и (11) через 100 К представлены в **табл. 2, 3** и на **рис. 4**.

Таблица 2

Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (10) для эталона и сплава АЖ2.18, легированного литием

Содержание лития в сплаве АЖ2.18, мас. %	a	b	c	d	Коэффициент корреляции R , %
Эталон (Cu марки М00)	0,3245	2,75	$-2,87 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$	1,00
Сплав АЖ2.18	2,7757	$-1,14 \cdot 10^{-2}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$-1,32 \cdot 10^{-8}$	0,9987
+0,01Li	1,6753	$-3,19 \cdot 10^{-3}$	$6,31 \cdot 10^{-6}$	$-3,3910^{-9}$	0,9983
+0,1 Li	1,2241	$-1,48 \cdot 10^{-3}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$	$-2,4010^{-9}$	0,9987
+0,5 Li	1,2241	$-1,48 \cdot 10^{-3}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$	$-2,4010^{-9}$	0,9987

Таблица 3

Температурная зависимость удельной теплоёмкости (кДж/кг·К) сплава АЖ2.18 с литием

Содержание лития в сплаве АЖ2.18, мас. %	Масса образцов до измерения, г	Т, К					
		300	400	500	600	700	800
Эталон (Cu марки М00)	44,23	(0,38*)	(0,39)	(0,41)	(0,42)	(0,43)	(0,43)
Сплав АЖ2.18	16,75	1,06	1,03	1,15	1,33	1,49	1,55
+0,01 Li	16,75	1,19	1,19	1,23	1,30	1,37	1,43
+0,1 Li	16,5	1,12	1,19	1,26	1,34	1,41	1,44
+0,5 Li	16,75	1,12	1,19	1,26	1,34	1,41	1,44

* В скобках приведены данные теплоемкости меди согласно справочнику [18, с. 70].

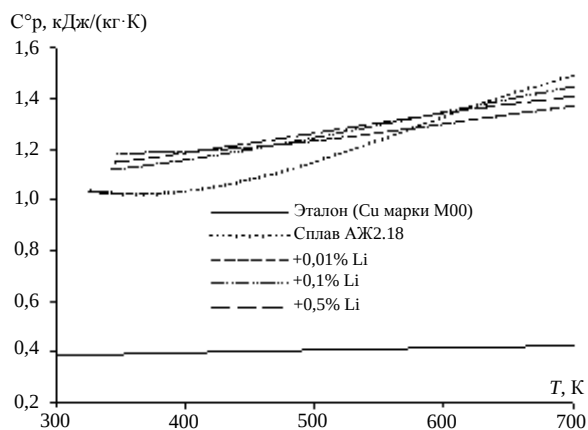


Рис. 4. Температурная зависимость удельной теплоёмкости сплава АЖ2.18 с литием

Для расчета температурной зависимости изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (11):

$$H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0) = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (12)$$

$$S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (13)$$

$$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)] = [H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] - T[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)], \quad (14)$$

где $T_0 = 298,15$.

Результаты расчета изменения температурных зависимостей энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (12)–(14) через 100 К представлены в табл. 4.

Таблица 4

Температурная зависимость изменения термодинамических функций сплава АЖ2.18 с литием и эталона (медь марки М00).

Содержание лития в сплаве АЖ2.18, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
$H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0^{\circ})$, кДж/кг, для сплавов						
Эталон (Cu марки М00)	0,71	39,87	80,17	121,42	163,52	206,45
Сплав АЖ2.18	1,96	105,22	213,65	337,42	478,78	632,03
+0,01 Li	2,21	121,08	242,09	368,71	502,36	642,46
+0,1 Li	2,03	114,56	234,64	364,31	504,14	653,26
+0,5 Li	2,08	117,39	239,82	370,24	507,99	650,93
$S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)$, кДж/кг·К, для сплавов						
Эталон (Cu марки М00)	0,0024	0,12	0,21	0,28	0,35	0,40
Сплав АЖ2.18	0,0066	0,3038	0,5453	0,7704	0,9880	1,1926
+0,01 Li	0,0074	0,3494	0,6192	0,8499	1,0558	1,2428
+0,1 Li	0,0068	0,3301	0,5977	0,8338	1,0492	1,2482
+0,5 Li	0,0069	0,3382	0,6111	0,8487	1,0609	1,2517
$G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)$, кДж/кг, для сплавов						
Эталон (Cu марки М00)	-0,002	-6,11	-22,24	-46,58	-77,90	-115,31
Сплав АЖ2.18	-0,006	-16,30	-58,98	-124,84	-212,83	-322,01
+0,01 Li	-0,187	-25,20	-74,98	-145,63	-234,92	-340,96
+0,1 Li	-0,006	-17,48	-64,20	-135,98	-230,28	-345,27
+0,5 Li	-0,006	-17,91	-65,74	-138,97	-234,64	-350,44

* $T_0 = 298,15$ К.

Заключение

В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди установлена теплоёмкость сплава АЖ2.18 с литием. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) сплавов в интервале температур 300 – 900 К. С помощью полиномов зависимостей показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки лития в изученном концентрационном интервале (0,05–0,5 мас.%) практически не влияют на значения теплоёмкости и изменение термодинамических функций исходного сплава АЖ2.18. Незначительное изменение теплоёмкости эвтектического сплава АЖ2.18 при его модифицировании литием объясняется слабым модифицирующим эффектом последнего, т.е. добавка не изменяет форму и характер кристаллизаций включений в эвтектике $\alpha - \text{Al} + \text{Al}_3\text{Fe}$. Как известно, структурные изменения приводят к значительным изменениям физических и механических свойств материалов [19, 20].

Список литературы

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): справочник / под ред. И.Н. Фридляндера. К.: КОМИТЕХ, 2005. 365 с.
3. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
4. Красноярский В.В., Сайдалиев Н.Р. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах // Защита от коррозии и окружающей среды. 1991. Вып. 3. С. 14–19.
5. Влияние технологических факторов на образование дефектов структуры в крупнотоннажных слитках из алюминиевых сплавов серии 1XXX / Фролов В.Ф., Беляев С.В., Губанов И.Ю., Безруких А.И., Костин ИВ. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 25–31.
6. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Салганик В.М., Полецков П.П., Кузнецова А.С., Бережная Г.А., Гущина М.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №4. С. 41–44.
7. Chen X.G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys // Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013. P. 460–465.
8. Grange D.A. Microstructure control in ingots of aluminium alloys with an emphasis on grain refinement // Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013. P. 354–365.
9. Geoffrey K. Sigworth Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings // International Journal of Metalcasting. 2014. Vol. 8. Iss. 1. P. 7–20.
10. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Махмадуллоев Х.А. Теплофизические и термодинамические свойства сплавов свинца с щелочноземельными металлами. Германия, Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 152 с.
11. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ca system // High temperature. 2014. Vol. 52. Iss. 1. P. 138–140.
12. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb-Sr / Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Махмадуллоев Х.А., Низомов З. // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 6. №6. С. 38–42.
13. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава AMg4 / Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф. // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16. №4. С. 256–260.
14. Температурная зависимость теплоёмкости и термодинамических функций сплавов системы Pb-Ca / Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Низомов З., Обидов Ф.У., Иброхимов Н.Ф. // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. №1. С. 147–150.
15. Влияние церия на теплофизические свойства сплава AMg4 / Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Низомов З., Ганиева Н.И., Иброхимов С.Ж. // Физика металлов и металлоуправления. 2016. Т. 117. №1. С. 53–57.
16. Исследование температурной зависимости удельной теплоёмкости алюминия марок ОСЧ и А7 / Низомов З., Гулов Б.Н., Ганиев И.Н., Саидов Р.Х., Обидов Ф.У., Эшов Б.Б. // Доклады АН Республики Таджикистан. 2011. Т. 54. №1. С. 53–59.
17. Температурная зависимость теплоёмкости и термодинамических функций сплава АКМ2, легированного празеодимом и неодимом / Ганиев И. Н., Ниёзов Х.Х., Гулов Б.Н., Низомов З., Бердиев А.Э. // Вестник СибГИУ. 2017. №3. С. 32–39.
18. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
19. Мальцев М.В. Модификаторы структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 238 с.
20. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутин П.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.

Поступила 16.12.17.

Принята в печать 18.01.18.

EFFECT PRODUCED BY LITHIUM ON THE HEAT CAPACITY AND THE CHANGING THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF THE AZH2.18 ALUMINIUM ALLOY

Kholiknazar Kh. Azimov – Postgraduate Student

Nikitin Institute of Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, E-mail: kholikazim@mail.ru

Izatullo N. Ganiev – D.Sc. (Chemistry), Professor, Academician

Academy of Science of the Republic of Tajikistan, Head of Laboratory at the Nikitin Institute of Chemistry, E-mail: ganiev48@mail.ru

Ilkhom T. Amonov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Rector

Technological University of Tajikistan, E-mail: ilhomamonov@mail.ru

Nasim F. Ibrohimov – Research fellow

Nikitin Institute of Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, E-mail: nasimqon@mail.ru.

Abstract

It is known that unalloyed aluminium with a high content of iron, silicon and other impurities cannot be used in industry because of its low performance characteristics. Hence, the development of new aluminium alloys sets an important task. One of the promising compositions in the aluminium-iron diagram is the eutectic (α -Al + Al₃Fe), which, having a minimum crystallization interval, corresponds to the iron content of 2.18 wt%. This composition was taken as a model alloy and was inoculated with lithium. Heat capacity is the most important characteristic of substances. By analysing how heat capacity changes as the temperature changes one can determine the type of phase transformation, the Debye temperature, the energy of vacancy formation, the electronic specific heat and other properties. For the purposes of this research, the heat capacity of the AZh2.18 alloy with lithium was determined in the "cooling" mode against the known heat capacity of the reference copper sample. For this purpose, the cooling rate curves for the AZh2.18 alloy with lithium sample and the reference sample were analysed and polynomials were yielded that describe the cooling rates of the samples. After that, using the experimentally determined values of the cooling rates of the reference sample and the samples made from the alloys and knowing their weights, polynomials were established for the temperature dependence of the specific heat of the alloys and the reference sample, which are described with a four-term equation. With the help of integrals and based on the specific heat, temperature dependence models were established for changing enthalpy, entropy, and Gibbs energy. The obtained dependences show that as the temperature rises, the heat capacity, enthalpy and entropy of the alloys tend to increase. At the same time, Gibbs energy tends to decrease. The addition of lithium does not cause any significant increase in the heat capacity, enthalpy and entropy of the initial AZh2.18 alloy and does not change the Gibbs energy value.

Keywords: AZh2.18, lithium, heat capacity, heat transfer factor, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

References

1. Luts A.R., Suslina A.A. *Alyuminiy i ego splavy* [Aluminium and its alloys]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 81 p. (In Russ.)
2. Beletskiy V.M., Krivov G.A. *Alyuminiyevye splavy (Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye)* [Aluminium alloys (Composition, properties, production, application)]. Ed. by I.N. Fridlyander. Kiev: KOMITEKh, 2005, 365 p.
3. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 640 p. (In Russ.)
4. Krasnoyarskiy V.V., Saydaliev N.R. The corrosion behaviour and the electrochemical properties of aluminium-iron alloys in neutral solutions. *Zashchita ot korrozii i okruzhayushchey sredy* [Protection against corrosion and environmental effects]. 1991, iss. 3, pp. 14-19. (In Russ.)
5. Frolov V.F., Belyaev S.V., Gubanov I.Yu., Bezrukh A.I., Kostin I.V. How technological factors impact the formation of structural defects in large ingots of the 1XXX series aluminium alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 25-31. (In Russ.)
6. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S. The main types and applications of nanostructured high-strength sheet steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4, pp. 41-44. (In Russ.)
7. Chen X.G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys. *Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production*. 2013, pp. 460-465.
8. Grange D.A. Microstructure control in ingots of aluminium alloys with an emphasis on grain refinement. *Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production*. 2013, pp. 354-365.
9. Geoffrey K. Sigworth *Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings*. International Journal of Metalcasting. 2014, vol. 8, iss. 1, pp. 7-20.

10. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Makhmadulloev Kh.A. *Teplofizicheskie i termodinamicheskie svoystva splavov svintsya s shchelochnozemelnymi metallami* [Thermophysical and thermodynamic properties of lead-alkaline-earth metal alloys]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 152 p.
11. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ca system. *High temperature*, 2014, vol. 52, iss. 1, pp. 138-140.
12. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Eshov B.B., Makhmadulloev Kh.A., Nizomov Z. Thermophysical properties and thermodynamic functions of Pb-Sr alloys. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk* [Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 6, no. 6, pp. 38-42. (In Russ.)
13. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N., Ibrokhimov N.F. Effect produced by scandium on the physicochemical properties of the AMg4 alloy. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk* [Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 16, no. 4, pp. 256-260. (In Russ.)
14. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U., Ibrokhimov N.F. How the heat capacity and the thermodynamic functions of the Pb-Ca alloys depend on the temperature. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermophysics of high temperatures]. 2014, vol. 52, no. 1, pp. 147-150. (In Russ.)
15. Ibrokhimov N.F., Ganiev I.N., Nizomov Z., Ganieva N.I., Ibrokhimov S.Zh. Effect produced by cerium on the thermophysical properties of the AMg4 alloy. *Fizika metallov i metallovedeniya* [The physics of metals and metallography]. 2016, vol. 117, no. 1, pp. 53-57. (In Russ.)
16. Nizomov Z., Gulov B.N., Ganiev I.N., Saidov R.Kh., Obidov F.U., Eshov B.B. Understanding the relationship between the specific heat of the OSCh and A7 aluminium grades and the temperature. *Doklady AN Respubliki Tadjikistan* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan]. 2011, vol. 54, no. 1, pp. 53-59.
17. Ganiev I.N., Niyozov Kh.Kh., Gulov B.N., Nizomov Z., Berdiev A.E. Temperature dependence of the heat capacity and the thermodynamic functions of the AK1M2 alloy doped with praseodymium and neodymium. *Vestnik Sib-GIU* [Bulletin of Siberian State Industrial University]. 2017, no. 3, pp. 32-39. (In Russ.)
18. Zinoviev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Reference book, Moscow: Metallurgiya, 1989, 384 p. (In Russ.)
19. Maltsev M.V. *Modifikatory struktury metallov i splavov* [Structural modifiers of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 238 p. (In Russ.)
20. Ganiev I.N., Parkhutik P.A., Vakhobov A.V., Kupriyanova I.Yu. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem* [Doping of silumins with strontium]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1985, 143 p.

Received 16/12/17

Accepted 18/01/18

Образец для цитирования

Влияние лития на теплоёмкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ2.18 / Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-37-44>

For citation

Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ibrokhimov N.F. Effect produced by lithium on the heat capacity and the changing thermodynamic functions of the AZh2.18 aluminium alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-37-44>

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.0744

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-45-53>

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ ОТЛИВОК СВС В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Сушко Т.И.¹, Турищев В.В.², Пашнева Т.В.¹, Попов С.В.¹¹ ВУНЦ ВВА им. проф. Жуковского и Ю.Н. Гагарина, Воронеж, Россия² Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье представлены результаты исследования с применением системы компьютерного моделирования (СКМ LVM FLOW) затвердевания металла в отливке корпусного типа массой 42 кг, предназначенной для установки в оборудование магистральных нефтегазопроводов, с учетом одного из направлений ресурсосбережения в литейном производстве, позволяющего повысить технологический выход годного (ТВГ) экзотермического обогрева. Деталь ответственная, к ней предъявляется ряд требований по эксплуатации. Корпус такой массы получают способами литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) и песчано-глинистые формы (ПГФ), при этом затраты на литниково-питающую систему (ЛПС) составляют соответственно ~200 и 100% от массы отливки. Показатели эффективности расхода жидкого металла определяются ТВГ, который для стальных отливок составляет 40–70%, а это значит, что до 55% жидкого металла расходуется на прибыли и элементы литниковой системы, что является экономически невыгодно. Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) (экзотермический обогрев (толщина слоя 0,5–3,5 мм) и экзотермические прибыли) позволяет увеличить ТВГ до 90% и уменьшает расход жидкого металла. После построения 3D моделей конструкций отливок с ЛПС, уже применяемых на заводах, были проведены исследования процессов затвердевания по средствам СКМ ЛП LVM Flow. При моделировании процессов затвердевания отливки задавались разные теплофизические параметры с учетом технологии ее изготовления. Цель работы: подтверждение возможности применения СВС для ЛВМ в рамках использования технологии ВМЗ путем компьютерного моделирования. Исследование влияния технологических факторов (количество слоев оболочковой формы, температура прокали оболочки) на качество стальной корпусной отливки в условиях ЛВМ и экзотермического обогрева. Используемые методы: применяется метод компьютерного моделирования LVM FLOW. Для проведения расчетов в СКМ ЛП LVMFlow построены 3D модели различных конструкций отливок с ЛПС, конвертированные в необходимый формат LVM Flow. При построении 3D моделей использовалась программа 3D моделирования SolidWorks 2010. Новизна: проведенный расчет показал, что предлагаемая ЛПС и технология изготовления отливки методом ЛВМ позволяет получать отливку без усадочных дефектов. Так как физика процесса питания отливки при помощи экзотермических прибылей сложна и требует построения дополнительной математической модели, компьютерное моделирование для СВС проводилось только для экзотермического обогрева прибылей, в СКМ ЛП LVM Flow это возможно, и апробировано в литье ПГФ. Предварительно был произведен расчет геометрических параметров экзотермических оболочек («колпачков») в зависимости от геометрической формы отливки. Их конструкции аналогичны, толщина стенки «колпачков» для ЛВМ 3,5 мм. Особенностью выбранных для ЛВМ «колпачков» явилось применение внутри на крышке колпачка треугольного выступа высотой 10 мм и шириной основания 30 мм, выступ расположен вдоль «колпачка» и играет роль экзотермического стержня, что способствует созданию дополнительного давления в прибыли и обогреву ее верхней части. Данное суждение подтвердилось в ходе компьютерного апробирования. Определены наиболее вероятные места образования дефектов и зависимость количества дефектов от технологических параметров. Основным технологическим параметром, оказывающим наибольшее влияние на качество отливки, является температура прокали оболочковой формы. Предложена наиболее оптимальная технология, позволяющая получить практически бездефектную отливку, уменьшить количество слоев оболочковой формы, что в свою очередь ведет к экономии времени затраченного на ее изготовление и ресурсов, а ТВГ на 18% ниже, в сравнении с базовым вариантом ЛПС. Впервые, посредством СКМ LVM FLOW, для ЛВМ подтверждена возможность получения качественных (по усадке) отливок с экзотермическим обогревом, что является, несомненно, важным фактом в литейной практике и достоинством данной работы. Практическая значимость: полученные данные позволяют продолжить экспериментальную работу и получить плотные отливки с экзотермическим обогревом для данного способа литья.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, отливка «корпус», усадочные дефекты, экзотермический обогрев, экзотермические прибыли.

© Сушко Т.И., Турищев В.В., Пашнева Т.В., Попов С.В., 2018

Введение

При производстве фасонного стального литья около 30% жидкой стали расходуется на прибыли, предназначенные для питания стальных отливок в процессе затвердевания, которые впоследствии отрезают от отливок и направляют на переплавку. Это, несомненно, является дополнительным расходом металла. Как следствие, происходит снижение технологического выхода годного (ТВГ), понижение коэффициента использования металла, снижение плотности отливок. Температура жидкого металла отливки и прибыли в начальный момент времени практически одинакова, т.е. начальный температурный градиент металла в системе прибыль – отливка равен нулю. В этом случае более позднее затвердевание металла прибыли по сравнению с металлом питаемого узла достигается за счет большей массы прибыли. Для обогрева прибылей и снижения расхода металла в настоящее время на зарубежных и отечественных литейных заводах применяют способы питания отливок самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС): экзотермическим обогревом – вставками, ригели (толщина слоя 0,5–3,5 мм) и экзотермическими прибылями. СВС – это разновидность горения. После поджога СВС – смеси самопроизвольно горят. Данный вид горения является бескислородным [1]. Для стальных отливок в качестве экзотермических применяют смеси, содержащие железоалюминиевый термит. Основными компонентами термита являются: алюминиевый порошок (15–40%) и железная окалина (30–60%). В современном литейном производстве экзотермический обогрев – это достаточно распространенный элемент технологического процесса, он активно внедряется на отечественных литейных предприятиях, в частности г. Воронежа.

Широко известны производители экзотермической продукции (Турция, Китай, Великобритания, Финляндия, Чехии и др.), соответствующей экологическим требованиям и нормам Евросоюза. Средняя температура горения экзотермической смеси составляет 2100 К, при этом ее теплотворная способность может достигать 2900 кДж/кг и более. Это позволяет на 50–100 К повысить температурный градиент в системе прибыль – отливка и на 10–40%, а в некоторых случаях и на 50%, снизить расход металла на прибыли при литье в песчаные формы, что позволяет увеличить их ТВГ до 90%. СВС применяются для отливок из всех видов сплавов самого различного назначения: машиностроительной, металлургической и горнодобывающей отраслей (изложниц, кузнечных слитков, корпусов, муфт, зубьев, конусов, плит дробящих и др.), подвижного железнодорожного транспорта (упоров, хо-

мутов, автосцепок и др.) [2]. Существенным недостатком применяемых в настоящее время прибылей является низкое качество металла подприбыльной зоны отливок, а главное – область применения СВС в большинстве случаев остается литье в песчаные формы (ПГФ) [3–10].

Экспериментальное изготовление отливок с использованием экзотермических прибылей методом литья по выплавляемым моделям, компьютерное моделирование процесса

С целью изучения эффективности работы экзотермических прибылей фирмы «BIMAX» (Финляндия) при изготовлении отливок и возможности использования технологии на ВМЗ проведены следующие работы. Объект исследования – отливка «корпус» массой 42,0 кг. Она относится к запорным и регулирующим устройствам, предназначена для управления работой нефтяных и газовых скважин или служит для выполнения необходимых технологических операций. Материал – сталь GR-4 ASTM487. Деталь ответственная, к ней предъявляется ряд требований по эксплуатации. Отливки такого типа являются востребованными, и снижение их себестоимости позволит при сохранении эксплуатационных свойств повысить конкурентоспособность.

Работы проводились по ТУК №048-04Н-05, в соответствии с которым залиты две детали из стали A487 GR4 с использованием экзотермических прибылей. При заливке деталей использовались экзотермические прибыли размером 105×120 мм. На детали 1 использовались три экзотермические прибыли (над боковыми фланцами и центральной части отливки), детали 2 – две экзотермические прибыли (на боковых фланцах). Проведено взвешивание залитых блоков деталей. Вес залитого блока детали 1, изготовленной с использованием трех экзотермических прибылей, составляет 68 кг (детали 2 – 65 кг), что ~ в 1,5 раза меньше веса залитого блока данной детали, изготавливаемой по серийной технологии (101,0 кг). Отливки с экзотермическими прибылями представлены на **рис. 1**.

Обе отливки после отрезки ЛПС прошли визуальный контроль и контроль методом рентгенопросвечивания. Визуальным контролем на отливках выявлены засоры и пригар по фланцам, стенке корпуса. Макротравлением на темплетях – рыхлота и засор. Анализ полученных результатов показал, что рыхлота выявлена по стенке патрубков доньшку отливки. Таким образом, обе схемы расположения экзотермических прибылей дали приблизительно одинаковые результаты. Однако с точки зрения простоты сборки модельного блока и отрезки ЛПС предпочтителен второй вариант.



Рис. 1. Внешний вид отливок с экзотермическими прибылями

Выводы:

- отливки, изготовленные с использованием экзотермических прибылей, по качеству хуже отливок, изготавливаемых по серийной технологии;
- изготовление отливок с использованием экзотермических приводит к снижению нормы расхода основных и вспомогательных материалов. На основании этих исследований авторами проведено компьютерное моделирование процесса затвердевания отливки с целью выявления возможности использования данного метода, анализа влияния технологических факторов на качество отливок.

Для анализа полученных результатов и достижения цели данной работы поставлены следующие задачи:

1. Компьютерным моделированием определить наиболее характерные места расположения дефектов по базовому и рассматриваемому вариантам, провести анализ их образования.

2. Исследовать влияние технологических параметров на образование дефектов при использовании экзотермического обогрева.

3. Дать рекомендации по выбору возможности применения экзотермического обогрева в условиях ЛВМ с наименьшим количеством дефектов.

Для проведения расчетов в СКМ ЛП LVMFlow построены 3D модели конструкции отливки с ЛПС, конвертированные в необходимый формат LVM Flow. Для построения 3D моделей использовалась программа 3D моделирования SolidWorks 2013. 3D модель представлена на **рис. 2**.

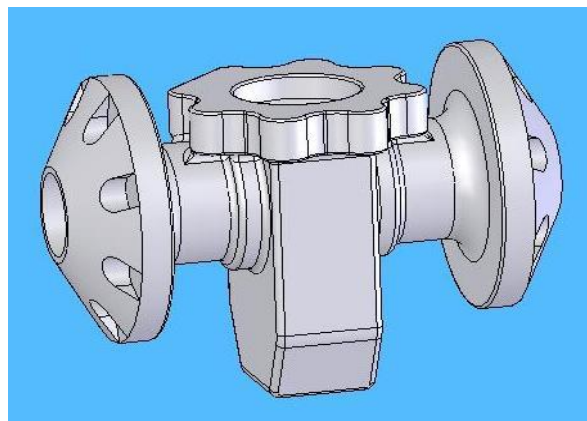


Рис. 2. 3D модель отливки «Корпус»

На **рис. 3** показан эскиз модельного блока с VIII типом ЛПС для базового варианта и с экзотермическим обогревом.

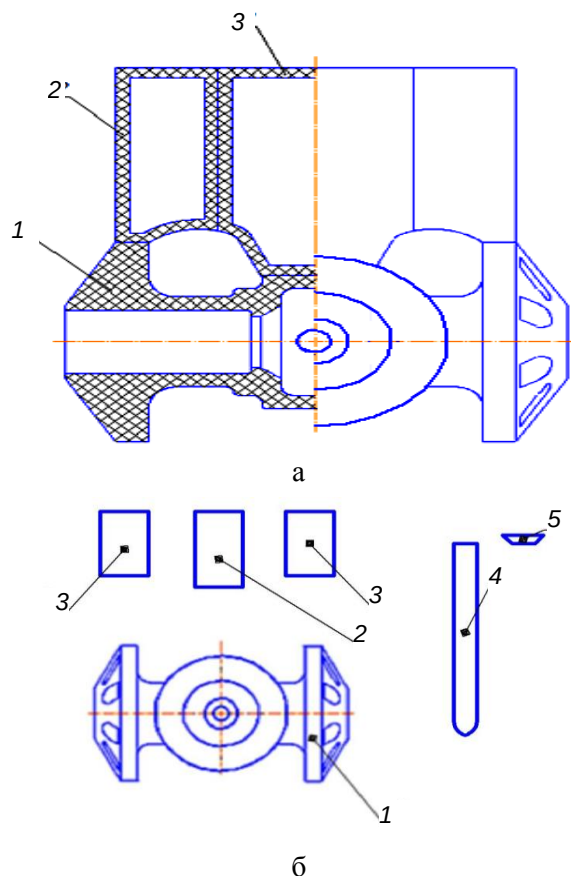


Рис. 3. Эскиз модельного блока базового варианта и с экзотермическим обогревом

Начальные условия для моделирования по заводской технологии:

- способ формовки – с наполнителем;
- количество слоев – 15;
- температура металла перед заливкой – 1580°C;

– температура формы перед заливкой – 900°C;

– температура оболочки – 900°C.

Перед заливкой в оболочку (базовый вариант) были установлены термодатчики (рис. 4)

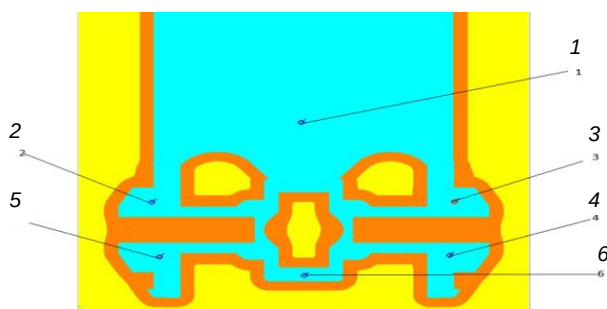


Рис. 4. Места размещения термодатчиков

Результаты моделирования показаны на рис. 5, на рис. 6 – график зависимости температуры от времени.

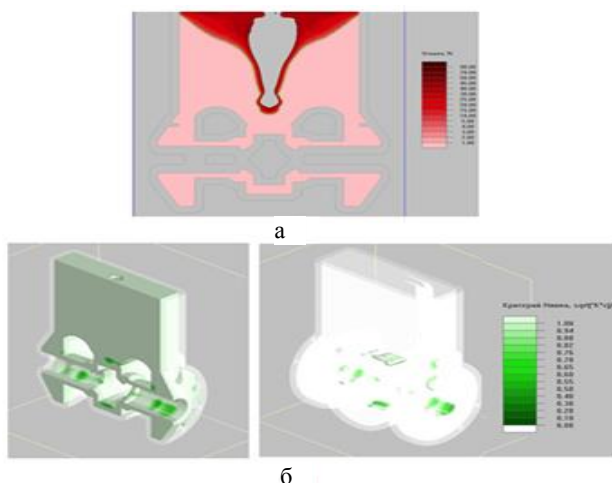


Рис. 5. Дефекты в отливке:
а – усадка; б – критерий Нияма

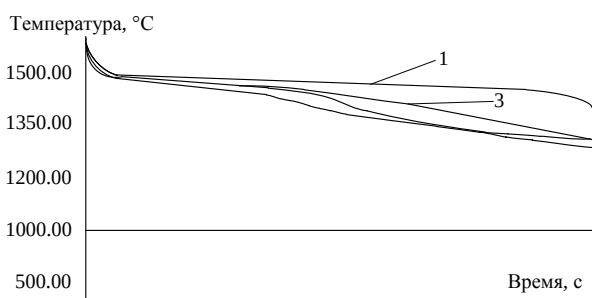


Рис. 6. График зависимости температуры от времени охлаждения

Основное влияние на образование дефектов оказывает изменение температуры формы. При моделировании базового варианта изготовления

отливки 15 слоев оболочковой формы и при повышении температуры формы до 950°C наблюдается незначительное уменьшение микропористости. Критерий Нияма при этом составляет 0,53 К·с/мм против 0,51 при 900°C. Однако при повышении температуры до 1000°C заметно резкое увеличение микропористости в подприбыльной зоне боковых фланцев, критерий Нияма составляет 0,12 К·с/мм. Подобная зависимость наблюдается и при меньшем количестве слоев оболочковой формы;

– с изменением количества слоев оболочковой формы не происходит явных изменений количества микропористости в отливке;

Наименьшее образование дефектов наблюдается при следующих технологических параметрах:

– формовка с опорным наполнителем;

– количество слоев оболочки – 13;

– температура прокали формы 950°C;

– температура металла перед заливкой 1580°C.

На рис. 7 приведена гистограмма, отражающая зависимость критерия Нияма от количества слоев при разных температурах прокали.

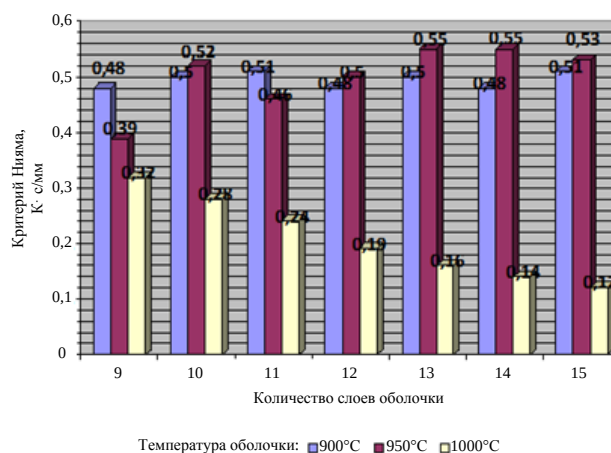


Рис. 7. Гистограмма зависимости критерия Нияма от количества слоев при разных температурах оболочки по заводской технологии

Для проведения расчетов в СКМ ЛП LVMFlow построены 3D модели различных конструкций отливок с ЛПС, конвертированные в необходимый формат LVM Flow. В LVM Flow возможно применение экзотермической смеси с температурой горения 1000°C, теплотой горения 2000 кДж/кг и временем горения 600 с. Выбор данной смеси обусловлен высокой температурой оболочки перед заливкой металла в ЛВМ. Апробировались два «колпачка» на боковые фланцы с габаритными размерами 78×68×116 мм и один в центральной части отливки 115×86×116 мм. Их

конструкции аналогичны, толщина стенки «колпачков» для ПГФ составляет 3 мм, а в ЛВМ – 3,5 мм. Различаются они и теплофизическими параметрами. На **рис. 8** изображена 3D модель экзотермической оболочки для прибыли центральной части отливки.

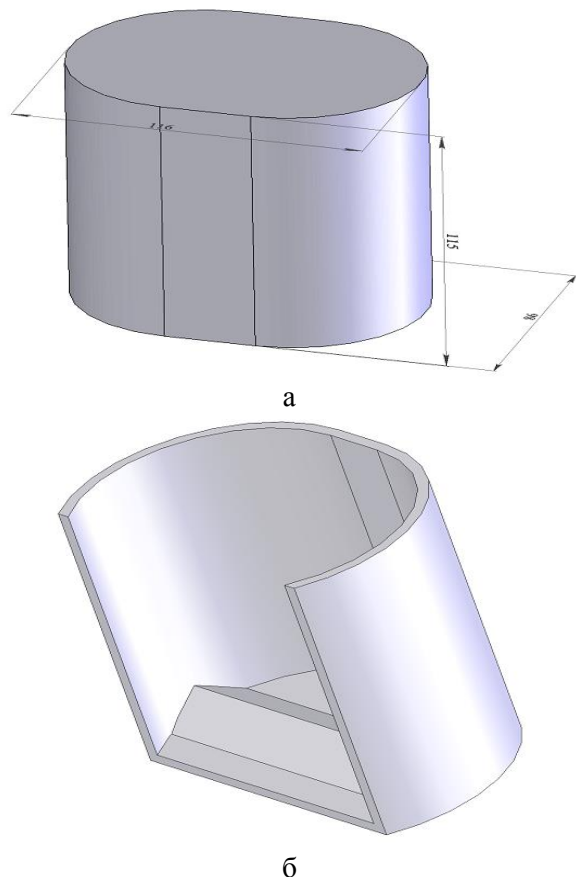


Рис. 8. 3D модели экзотермических колпачков

В эксперименте использовалась новая модель отливки с ЛПС, масса которой, по нашим расчетам, составила 69,1 кг, а габаритные размеры прибыли: 113×90×110 и 135×83×138 мм. Еще одной особенностью выбранных для ЛВМ «колпачков» явилось применение внутри на крышке колпачка треугольного выступа высотой 10 мм и шириной основания 30 мм (**рис. 5, б**). Выступ расположен вдоль «колпачка» и играет роль экзотермического стержня, что способствует созданию дополнительного давления в прибыли и обогреву ее верхней части. Данное суждение подтвердилось в ходе компьютерного апробирования. Выступ расположен вдоль «колпачка» и играет роль экзотермического стержня, что способствует созданию дополнительного давления в прибыли и обогреву ее верхней части. Данное суждение подтвердилось в ходе компьютерного апробирования.

Результаты и выводы

Моделирование проводилось при начальных температурах оболочки и экзотермической вставки 900°C. На прибыли, обогреваемой экзотермическими вставками, создают высокий температурный градиент и позволяют дольше питать отливку. При температуре прибыли с экзотермическими «колпачками» около 1300°C температура большей части отливки приближается к 1150°C, в то время как при стандартной технологии ЛВМ при температуре прибыли около 1300°C средняя температура отливки 1000°C.

Расчеты проведены с использованием экзотермических оболочек при разных технологических параметрах. На **рис. 9** показаны места расположения термодатчиков в теле отливки и ЛПС с экзотермическим обогревом.

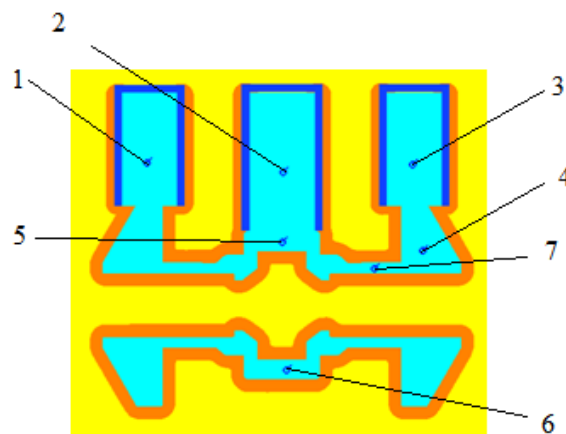


Рис. 9. Места установки датчиков в отливке с экзотермиком

На **рис. 10** и **11** показаны зависимости усадки от количества слоев при разных температурных условиях и зависимость критерия Нияма от тех же показателей. Установлено, что при температуре формы 900°C и разном количестве слоев усадочной раковины в отливке не образуется, при повышении температуры прокалики формы до 950°C и при использовании с 9 до 12 слоев оболочки процент усадки также не меняется, но при использовании от 13 до 15 слоев наблюдается образование усадочных дефектов в подприбыльной зоне боковых фланцев. При повышении температуры формы до 1000°C во всех случаях наблюдается образование усадочной раковины в отливке, при использовании от 9 до 12 слоев усадка остается примерно на одинаковом уровне и составляет 8%, но при увеличении количества слоев от 13 до 15 наблюдается увеличение усадочных дефектов в боковых фланцах и образование усадки в центральной подприбыльной зоне, глубина проникновения усадочных дефектов

в глубь отливки увеличивается с увеличением слоев огнеупорного покрытия; – изменение количества слоев оболочковой формы не оказывает особого влияния на количество микропористости.

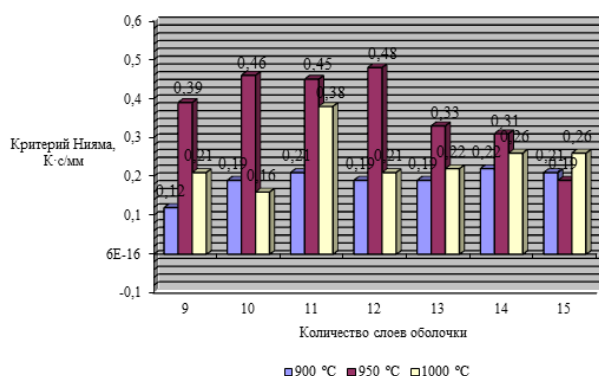


Рис. 10. Гистограмма зависимости критерия Нияма от количества слоев оболочковой формы при разных температурах оболочки

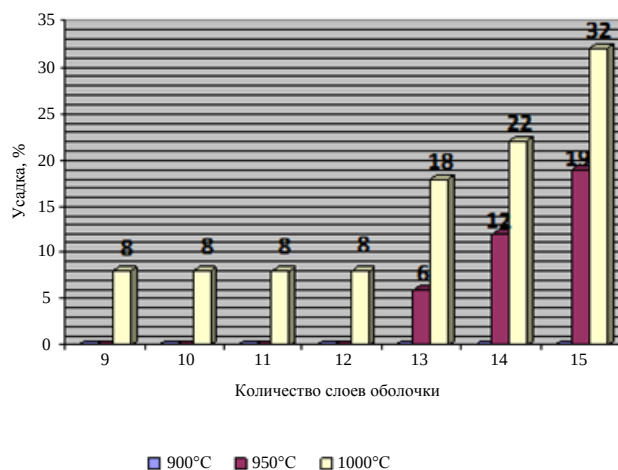


Рис. 11. Гистограмма зависимости усадки от количества слоев оболочковой формы при разных температурах оболочки

Таким образом, данный тип ЛПС не позволяет в полной мере избавиться от микропористости в отливке, но при использовании экзотермического обогрева возможно получение отливки без усадочных дефектов. Наиболее предпочтительными являются следующие технологические параметры:

- формовка с опорным наполнителем;
- количество слоев оболочковой формы – 12;
- температура металла при заливке 1580°C;
- температура проковки формы 950°C.

Заключение

Эффективность питания отливки прибылями с экзотермическим обогревом подтверждают и результаты исследования по усадке. Как можно су-

дить по рис. 11, усадочные раковины полностью сконцентрированы в прибылях и не доходят до тела отливки значительное расстояние. Важным является тот факт, что раковина локализована в верхней части прибыли, а не углубляется в низ. Причиной такого поведения могут являться экзотермические стержни. Единственной проблемой, выявленной в ходе моделирования, стала небольшая область с усадкой до 6% (в пределах одного узла) у верхнего фланца в части, прилегающей ко дну опоки. Порождением этой усадки может служить неподходящая конструкция и размер питателя, но могут быть и другие причины, что требует дальнейшей доработки. Температурно-временные поля для базового и предложенного варианта показаны на рис. 12.

На начальном этапе затвердевания наблюдается повышение температуры в термическом узле отливки при использовании экзотермических оболочек. Температура в термическом узле отливки при базовом варианте равна 1497°C, в то время как при использовании экзотермического обогрева прибыли температура термического узла равна 1513°C. В то же время в тонкостенном элементе разница температур составляет 3°C в пользу экзотермического обогрева.

Критерий Нияма при базовом и предложенном типе ЛПС показан на рис. 13.

При использовании базовой ЛПС основная часть микропористости сконцентрирована в патрубке, при этом критерий Нияма составляет 0,55 К·с/мм. В случае экзотермического обогрева микропористость проявляется в большем объеме, основные места ее образования – внутренняя поверхность патрубка, верхняя часть стенки патрубка и стенка центральной части отливки. Критерий Нияма для данного типа ЛПС составляет 0,48 К·с/мм.

Усадочные дефекты при использовании базового типа ЛПС и ЛПС с использованием экзотермического обогрева не образуются (рис. 14).

Оба варианта ЛПС позволяют получить отливку без усадочных дефектов, но при этом избавиться от пористости не позволяет ни одна из данных литниково-питающих систем. Экзотермический обогрев системы питания в нашей технологии повышает ТВГ на 18% по сравнению с заводской. При этом уменьшается количество слоев оболочковой формы, дополнительно сокращается высота прибылей на 40 мм. Усадочные раковины находятся в верхней части прибыли с запасом и не заходят в тело отливки. Таким образом, СКМ ЛП LVM Flow подтверждает возможность получения качественных отливок (по усадке) с экзотермическим обогревом.

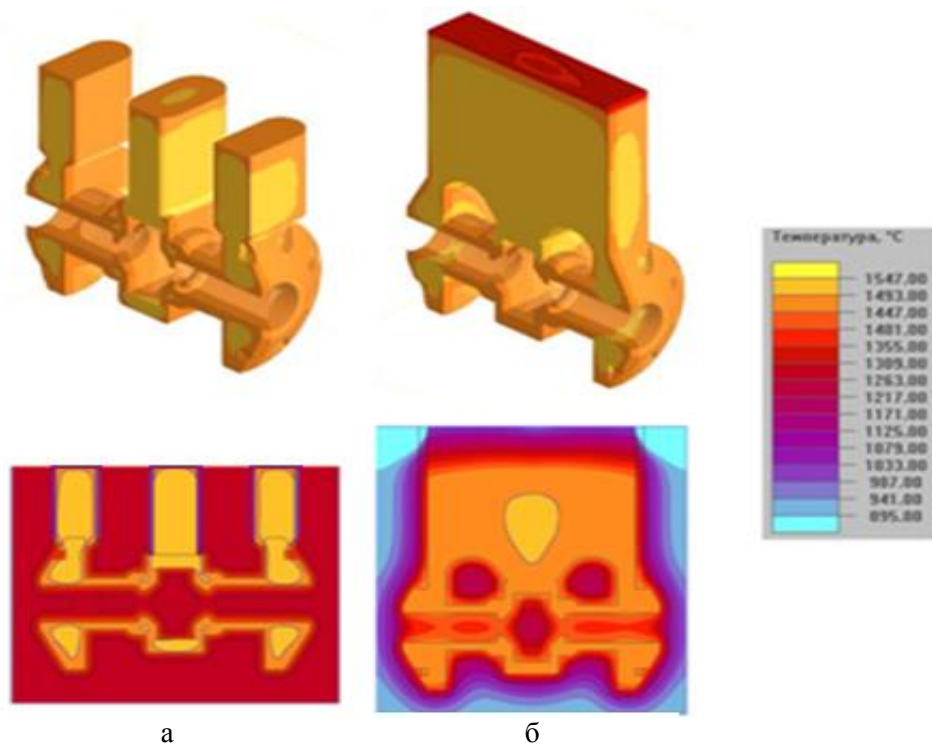


Рис. 12. Температурно-временные поля базового и варианта с экзотермиком: а – базовый вариант ЛПС; б – предложенный вариант ЛПС с использованием экзотермического обогрева

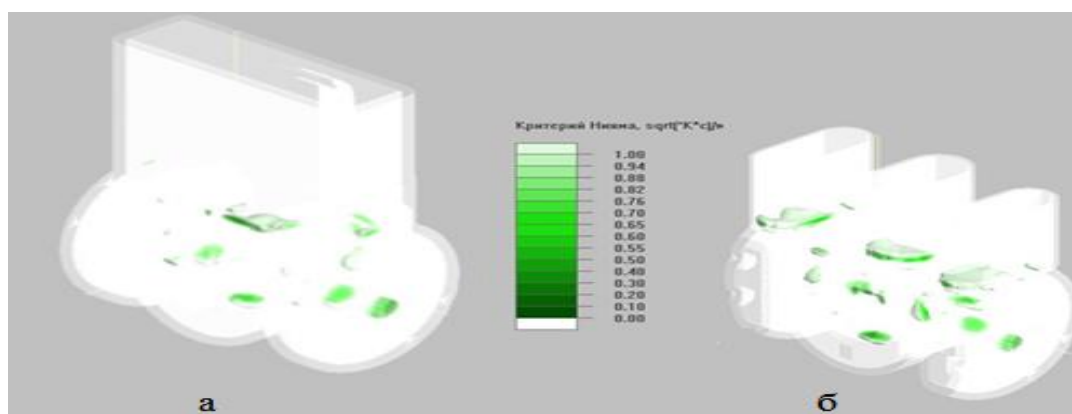


Рис. 13. Критерий Нияма: а – для базового варианта ЛПС; б – для предложенного варианта с использованием экзотермического обогрева

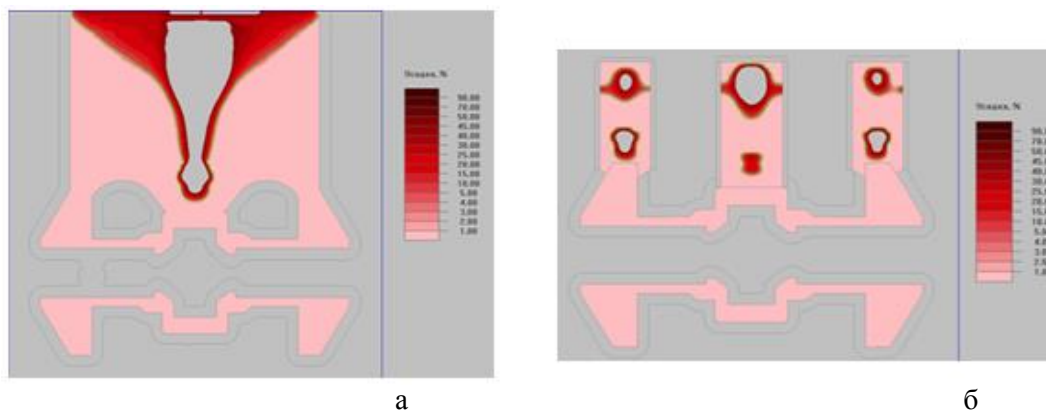


Рис. 14. Образование усадки: а – базовый вариант ЛПС; б – предложенный вариант ЛПС с использованием экзотермического обогрева

Список литературы

1. Оптимизация технологического процесса получения отливки «Корпус» методом ЛВМ / Сушко Т.И., Турищев В.В., Руднева И.Г., Пашнева Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 15–18.
2. Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVM Flow / Сушко Т.И., Леднев А.С., Руднева И.Г., Пашнева Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1 (37). С. 26–29.
3. Моделирование процессов тонкого измельчения сыпучих материалов для литейного производства / Мамина Л.И., Безруких А.И., Баранов В.Н., Чупров И.В., Губанов И.Ю. // Литейщик России. 2010. № 11. С. 41–44.
4. Мартыненко С.В., Огородникова О.М., Грузман В.М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // Литейное производство. 2009. № 11. С. 21–24.
5. Шпак Е.И. Практическое использование систем компьютерного моделирования литейных процессов // Литейщик России. 2002. № 8. С. 56–59.
6. Кукуй Д.М., Фасевич Ю.М., Турок А.И. Влияние вида наполнителя на прочностные и теплофизические свойства экзотермических смесей // Литейное производство. 2010. Т. 3 (57). С. 125–127.
7. Малый А.В., Каргинов В.П., Иванов В.Г. Применение экзотермических вставок для получения качественного литья // Литейщик России. 2013. № 6. С. 13–16.
8. Применение теплоизоляционных оболочек для прибылей фасонных отливок / Чернышев Е.А., Евлампиев А.А., Уваров Б.И., Королев А.Б. // Литейщик России. 2013. № 6. С. 61–67.
9. Сушко Т.И., Турищев В.В., Пашнева Т.В. Опыт применения СКМ LVM Flow в освоении этапов производства отливок // Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах: материалы VI Международного семинара. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. Ч.2. 75–84.
10. Исследование влияния технологических факторов на получение качественных отливок с экзотермическим обогревом посредством СКМ LVM Flow / Сушко Т.И., Петров И.Н., Руднева И.Г., Пашнева Т.В. // Achievement of High School-2013, 17–25 November 2013, т.44 «Технологии», София, «БялГрад-БГ», ООД 2013, 12–17.

Поступила 18.10.17.

Принята в печать 01.11.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-45-53>

COMPUTER SIMULATION OF THE SHS CASTING FEED IN INVESTMENT CASTING

Tatiana I. Sushko – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor

Department of Physics and Chemistry, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia. E-mail: Tat120675@yandex.ru

Vladislav V. Turishev – Postgraduate Student

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Tatiana V. Pashneva – Ph.D. (Physics & Mathematics)

Department of Physics and Chemistry, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia. E-mail: Tat120675@yandex.ru

Sergey V. Popov – Ph.D. (Physics & Mathematics), Associate Professor

Department of Physics and Chemistry, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia. E-mail: spopov@yandex.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes the results of a study into the solidification of metal in a 42kg body casting designed to be used on backbone oil and gas lines. The study was based on the use of the LVM Flow Computer Simulation System and one of the resource saving techniques applied in casting to get a higher yield – i.e. exothermic-insulating sleeves. This is a critical part, so it should satisfy a number of operational requirements. A part body of that weight can be produced by investment casting or by green sand casting, with the cost of the running and gating system being approximately 200% and 100% of the weight of the casting correspondingly. The metal consumption efficiency is determined by the yield, which is 40 to 70% for steel castings. This means that up to 55% of liquid metal is wasted on feeder heads and the gating system, which does

not appear to be cost-effective. Due to the application of the SHS technique (i.e. exothermic heat (0.5 to 3.5 mm thick layer) and exothermic heads) the yield can be increased up to 90% and the consumption of liquid metal reduced. After 3D-models were built of the casting with the running and gating system used by the foundries, a study was conducted by means of LVM Flow that looked at the solidification processes. Various thermophysical parameters were used for solidification modelling purposes depending on the casting process applied. **Objectives:** The aim of this work was to prove the feasibility of using the SHS technique in investment casting, the latter being the least cost-effective casting technology in terms of yield, by studying the efficiency of the exothermic heads by BIMAX from Finland in the casting manufacture in the context of using the Voronezh Mechanical Plant's process for the production of large invest-

ment castings, and by means of computer modelling. **Method Applied:** The LVM Flow computer modeling method was applied. For LVM Flow calculations, 3D models were built of various design castings with the running and gating system, which were then converted into the required format. The 3D models were built with the help of the SolidWorks 2010 programme. **Originality:** The above study shows that the proposed running and gating system and the investment casting process are capable of producing castings with no shrinkage cavities. As the exothermic feeding process involves complicated physics and would require an additional mathematical model to be built, the computer simulation for the SHS technique was only carried out for exothermic feeder heads. LVM Flow has this capability, which was tested in green sand casting. Before that the geometry of the exothermic caps was calculated, which depends on the geometry of the casting. The caps have an identical design; in the case of investment casting the thickness of the wall is 3.5 mm. A special feature of the investment casting caps was a 10 mm high and 30 mm wide V-edge located on the inside of the cap cover. The V-edge goes along the cap and functions as an exothermic core creating additional pressure in the feeder head and heating its top. This proposition was verified as true by computer testing. The computer simulation carried out helped establish the possibility of obtaining flower-shaped body castings by means of investment casting involving SHS. In that case the yield was 70%, provided a sound casting was produced. It was confirmed that exothermic cores produce a significant positive effect on the casting feed and improve the quality of the casting in the riser zone. This paper describes the first LVM Flow study that proves the possibility of obtaining high-quality castings in investment casting with exothermic heat. This is an undoubtedly important development for the casting industry and it distinguishes this work. **Practical Relevance:** With the help of the obtained data further experiments can be carried out and sound castings with exothermic heat can be obtained with the help of the given casting technique.

Keywords: Computer modeling, body casting, shrinkage cavities, exothermic heat, exothermic heads.

References

1. Sushko T.I., Turishchev V.V., Rudneva I.G., Pashneva T.V. Process optimization in the production of body castings by investment casting. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4 (36), pp. 64–69. (In Russ.)
2. Sushko T.I., Lednev. A.S., Rudneva I.G., Pashneva T.V. Analysis of possible causes of casting defects in steel cast bodies by means of the LVM Flow computer simulation software. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (37), pp. 26–29. (In Russ.)
3. Mamina L.I., Bezrukikh A.I., Baranov V.N., Chuprov I.V., Gubanov I.Yu. Simulation of fine grinding of loose materials used in steel casting. *Liteyshchik Rossii* [Foundry worker of Russia]. 2010, no.11, pp. 92-95. (In Russ.)
4. Martynenko S.V., Ogorodnikova O.M., Gruzman V.M. Using computer methods to improve the quality of large thin-walled steel castings. *Liteynoe proizvodstvo* [Casting]. 2009, no. 11, pp. 21-24.
5. Shpac E.I. Practical use of computer modelling systems to simulate foundry processes. *Liteyshchik Rossii* [Foundry worker of Russia]. 2002, no.8, pp. 56-59. (In Russ.)
6. Kukuy D.M., Fasevich Yu.M., Turok A.I. How the type of the filler can change the mechanical and thermophysical properties of exothermic mixes. *Liteynoe proizvodstvo* [Casting]. 2010, no. 3, pp. 125-127. (In Russ.)
7. Malyi A.B., Karginov V.P., Ivanov V.G. Application of exothermic inserts for obtaining high-quality castings. *Liteyshchik Rossii* [Foundry worker of Russia]. 2013, no. 6, pp. 13-16. (In Russ.)
8. Chernyshev E.A., Evlampiev A.A., Uvarov B.I., Korolev A.B. Insulating shells used for shaped casting heads. *Liteyshchik Rossii* [Foundry worker of Russia]. 2013, no. 6, pp. 61-67. (In Russ.)
9. Sushko T.I., Turishchev V.V., Pashneva T.V. The case study of learning about the casting stages using the LVM Flow software. Computer simulation of electromagnetic processes in physical, chemical and technological systems: Proceedings of the 6th International Workshop. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2012, Part 2, pp. 75-84. (In Russ.)
10. Sushko T.I., Petrov I.N., Rudneva I.G., Pashneva T.V. Studying the effect of process factors on the quality of castings with exothermic heat with the help of the LVM Flow software. Achievement of High School-2013. 2013, vol. 44, Tekhnologii, Sofia, ByalGrad-BG, pp. 12-17.

Received 18/10/17

Accepted 01/11/17

Образец для цитирования

Компьютерное моделирование физического питания отливок свс в литье по выплавляемым моделям / Сушко Т.И., Турищев В.В., Пашнева Т.В., Попов С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 45–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-45-53>

For citation

Sushko T.I., Turishchev V.V., Pashneva T.V., Popov S.V. Computer simulation of the shs casting feed in investment casting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 45–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-45-53>

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621. 3. 078

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в статье приводятся результаты исследования электромагнитных процессов в двигателях последовательного возбуждения при питании от статического преобразователя. Приведены полученные функциональные нелинейные зависимости параметров указанных систем от нагрузки на валу и скорости двигателя. Сформулирована актуальность проблемы учета нелинейных параметров при определении устойчивости системы в целом, а также при синтезе оптимальных управлений. **Цель работы:** функциональный и структурно-параметрический синтез управления на основе динамической коррекции движения системы, обеспечивающей как устойчивость, так и возможность оптимизации этого движения. **Используемые методы:** в работе был использован спектральный метод Солодовникова, метод динамического программирования, моделирование в среде Matlab Simulink, а также экспериментальные исследования. **Новизна:** предложена нелинейная динамическая коррекция системы преобразователь-двигатель последовательного возбуждения на основе найденных функциональных зависимостей координат движения, обеспечивающая заданные динамические характеристики. **Результат:** в статье приведены данные о существенном влиянии (изменении параметров в 6–7 раз) текущей скорости двигателя. Приведены аппроксимированные зависимости (с погрешностью до 2%), позволяющие осуществить формирование корректирующего сигнала с помощью типовых линейных звеньев. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть полезны при разработке систем электропривода как электрифицированного инструмента, так и тяговых электроприводов для обеспечения оптимумов по быстродействию и минимуму потерь в динамических режимах.

Ключевые слова: электромагнитный процесс, двигатель последовательного возбуждения, статический преобразователь, моделирование в среде Matlab Simulink.

Введение

Проблематика управления двигателем последовательного возбуждения (ДПВ) с точки зрения оптимизации его энергетики до сегодняшнего дня остается актуальной для исследователей. Несмотря на широкое использование ДПВ от тягового электропривода до электрифицированного ручного инструмента и бытовой техники, теоретические изыскания крайне редки. Можно выделить труды российских ученых, посвященные развитию теоретических и практических аспектов улучшения энергетических показателей электроприводов с двигателем последовательного возбуждения: В.П. Климова, Н.Ф. Ильинского, В.Г. Кагана, Г.В. Лебедева, Л.И. Малинина, С.В. Власьевского, А.С. Мешкова, А.Е. Алехина, Ю.П. Петрова, М.Х. Беллмана, а также Т. Fujimaki, G.K. Dubey и других, которые справедливо замечают, что классические вариационные методы поиска оптимального управления ДПВ с точки зрения минимизации потерь не дают прямого решения.

Синтез нелинейной динамической коррекции электропривода с ДПВ

Анализ динамических процессов в электроприводах с ДПВ показывает, что основной проблемой обеспечения оптимального закона управления, а также устойчивости системы является зависимость параметров системы от тока и, главным образом, от скорости двигателя. Указанные причины приводят к тому, что статические и динамические процессы в замкнутой системе электропривода с ДПВ зависят от режима работы. На эту проблему указывают ряд авторов [1–3]. Общим выводом является то, что для обеспечения устойчивости такой системы необходимо обеспечить нелинейную динамическую коррекцию. В работе [4] предложено ввести гибкую обратную связь в виде параллельного корректирующего звена на входе системы, имеющего передаточную функцию:

$$W_k(p) = \frac{A_k p T_{*k}}{1 + p T_{*k}}, \quad (1)$$

© Мин Ту Аунг, Суздорф В.И., 2018

где T_{*k} , A_k – постоянная времени звена в рабочей точке и статический коэффициент передачи звена соответственно.

Целью введения такой коррекции является стабилизация частоты среза, которая связана с переменными параметрами следующим уравнением:

$$\omega_{*среза} = \frac{\sqrt{2}i_*}{A_k(R + k\omega_*)}, \quad (2)$$

где $\omega_{*среза}$, i_* , $(R + k\omega_*)$ – частота среза, ток двигателя в рабочей точке, эквивалентное сопротивление цепи якоря двигателя, соответственно. Тогда для стабилизации частоты среза необходимо иметь зависимость:

$$A_k = \frac{A_{k0}i_*}{(R + k\omega_*)}, \quad (3)$$

где A_{k0} – параметр, соответствующий величине требуемого быстродействия системы.

Полученное выражение позволяет строить корректирующее звено с параметрами, зависящими от текущего значения тока и скорости двигателя. При питании двигателя от статического преобразователя, особенно однофазного, очевидны проблемы введения регулирующих сигналов по указанным переменным: их пульсирующий характер, возможность режима прерывистого тока, трудности измерения скорости в случае значений больше 4000 = 5000 об/мин (характерно для приводов малой и микромощности с однофазными коллекторными двигателями). Между тем взаимное влияние рабочих характеристик и параметров привода позволяет трансформировать динамические функциональные зависимости системы в управляющие сигналы. В работе [5] показано, что «электромагнитная постоянная времени» функционально зависит от тока и скорости двигателя. Авторам удалось путем исследования электромагнитных процессов в системе электропривода с импульсно-фазовым управлением установить эти зависимости (рис. 1).

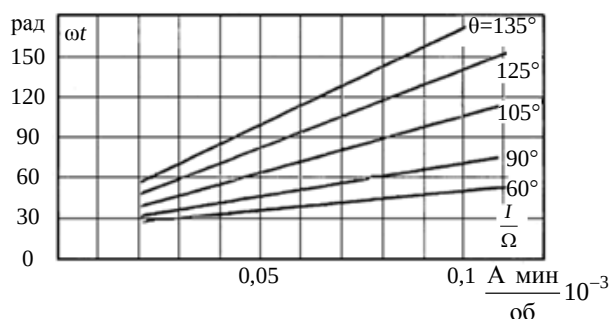


Рис. 1. Зависимость «электромагнитной постоянной времени» от рабочей точки движения

Согласно принципу взаимности изопериметрических задач, актуальным вопросом является синтез оптимального управления на основе метода динамического программирования и критерия быстродействия [6, 7, 9]. Полученные ранее результаты исследования позволили определить закон изменения напряжения на двигателе для предельного быстродействия. Сравнительные потери энергии ДПВ с оптимальным управлением и при прямом пуске показывали, что потребленная электрическая энергия отличается в 36 раз. Дальнейший анализ показал, что на интервале поддержания максимального значения тока (необходимо из условия быстродействия) закон управления может обеспечить ПИ-регулятор, однако длительность интервала нарастания тока при ограничении на напряжение питания нелинейно зависит от скорости двигателя и его нагрузки на валу (рис. 2). Электромагнитная составляющая переходного процесса имеет постоянную времени [11, 12]:

$T^* = T_z / (1 + \kappa \Omega)$, где T_z – электромагнитная постоянная обмоток двигателя (зависит только от индуктивности и активного сопротивления обмоток двигателя), Ω – скорость вращения вала, а κ – коэффициент, учитывающий коэффициент ЭДС якоря и аппроксимирующую кривую намагничивания. Решением уравнения электрического равновесия для ДПВ является выражение

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T^*}} \right),$$

где U – напряжение питания двигателя, а R – сопротивление обмоток двигателя.

Заменяя экспоненту степенным рядом, получим для первых двух членов (учитывая, что ток растет лишь до значения I_{max} , заданного ограничением по алгоритму на рис. 1, который меньше, чем U/R). Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$i(t) = \frac{U_{max}}{R} \left(t - \left(t - \frac{t}{T^*} \right) \right) = \frac{U_{max}}{R} \frac{t}{T^*},$$

откуда, с учетом, что $i(t) = I_{max}$, получим для времени нарастания тока t_p и, следовательно, поддержания максимального значения напряжения U_{max} на двигателе:

$$t_p = \frac{I_{max}}{U_{max}} \frac{R}{T^*}.$$

Рис. 2 демонстрирует зависимость электромагнитных процессов от величины скорости и тока. Найденные зависимости (см. **рис. 1**) позволяют упростить математическое описание движения системы, состоящей из ДПВ и статического преобразователя, и использовать известные пакеты моделирования, например Matlab Simulink.

Исходя из приведенных соображений, электромагнитную постоянную времени можно определить двумя способами: прямым расчетом или измеряя темп спада тока самоиндукции в момент, когда фаза напряжения больше 180 эл. градусов для тиристорного преобразователя. Для выделения сигнала, пропорционального этой постоянной, используется блок обнуляемого дискретного интегратора. На **рис. 3** представлен блок измерения темпа спада ЭДС двигателя последовательного возбуждения.

На **рис. 4** изображена модель однофазного мостового непереворачивающего тиристорного пре-

образователя. Источник питания частотой 50 Гц *AC voltage source* обеспечивает амплитуду напряжения в 220 В. Управление выходным напряжением обеспечивается тиристорным преобразователем *Universal Bridge*, который реализован на основе импульсно-фазового управления SIFU [6].

На **рис. 5** показана разработанная схема модели электропривода. Задающий сигнал *Signal Builder* через блок ограничения *Saturation Dynamic* задает ток двигателя. Максимальное значение тока двигателя задано на уровне 6 А.

На **рис. 6** приведена принципиальная электрическая схема электропривода с каналом динамической коррекции на основе обнуляемого дискретного интегратора для реализации физического эксперимента, а на **рис. 7** – осциллограммы обнуляемого дискретного интегратора.

На **рис. 8** представлены результаты моделирования метода управления двигателем последовательного возбуждения.

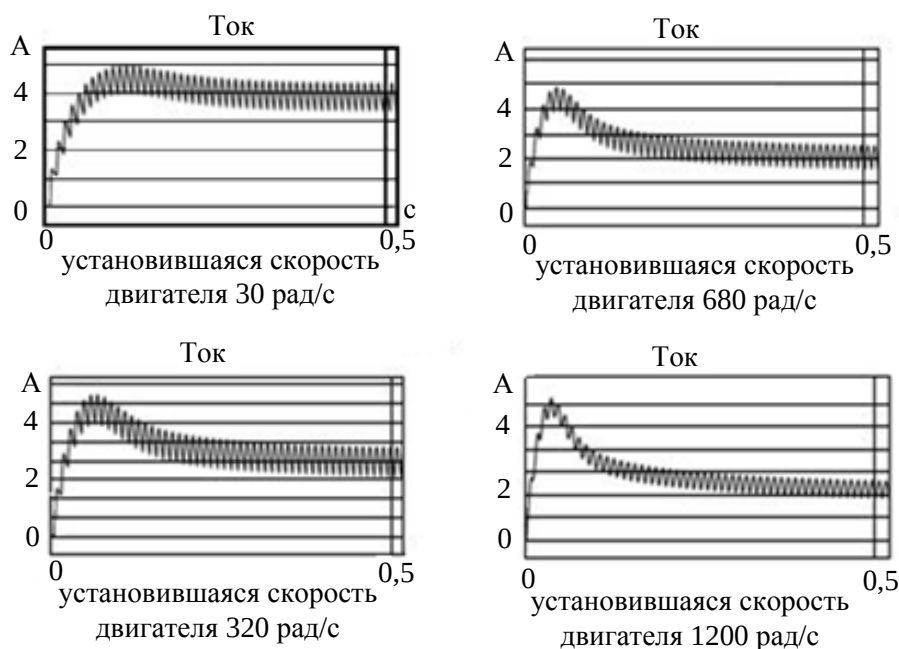


Рис. 2. Кривые переходного процесса по току двигателя при отработке ступеньки управляющего воздействия

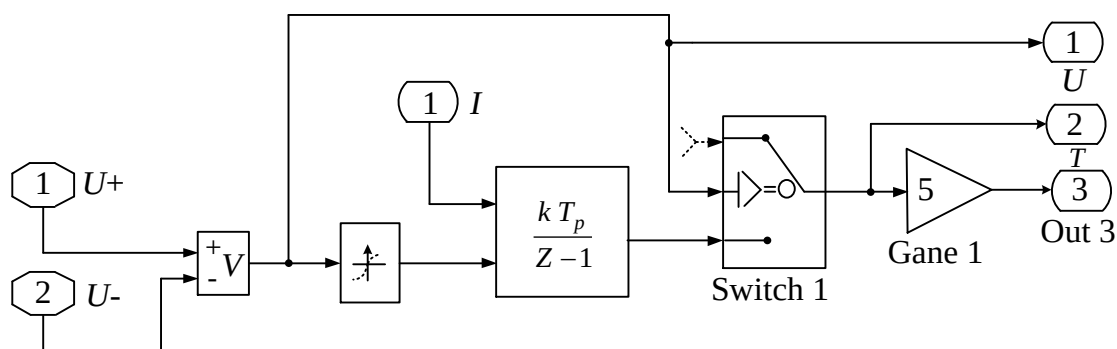


Рис. 3. Блок измерения темпа спада ЭДС самоиндукции ДПВ

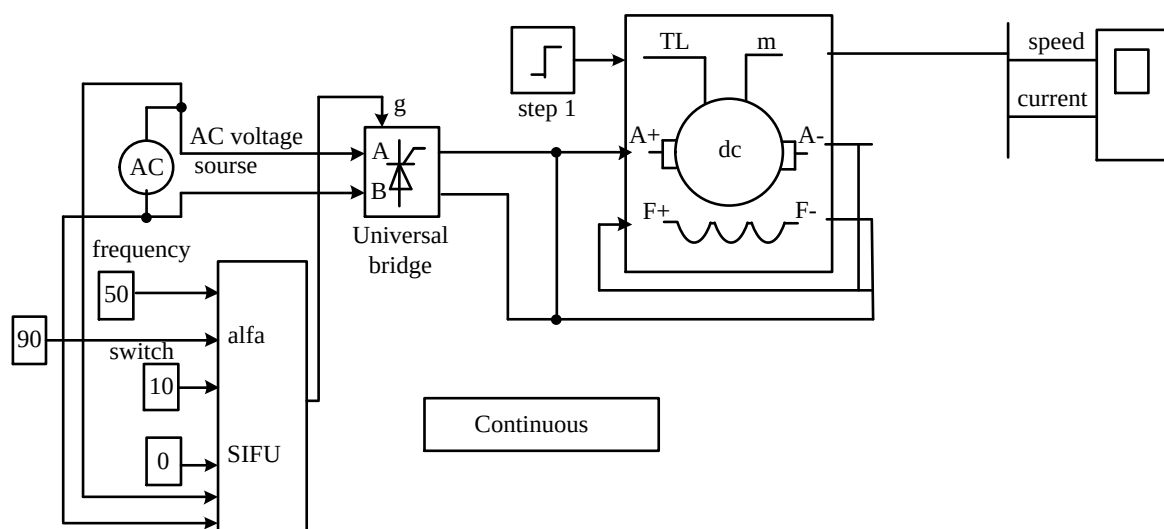


Рис. 4. Нереверсивный однофазный тиристорный преобразователь

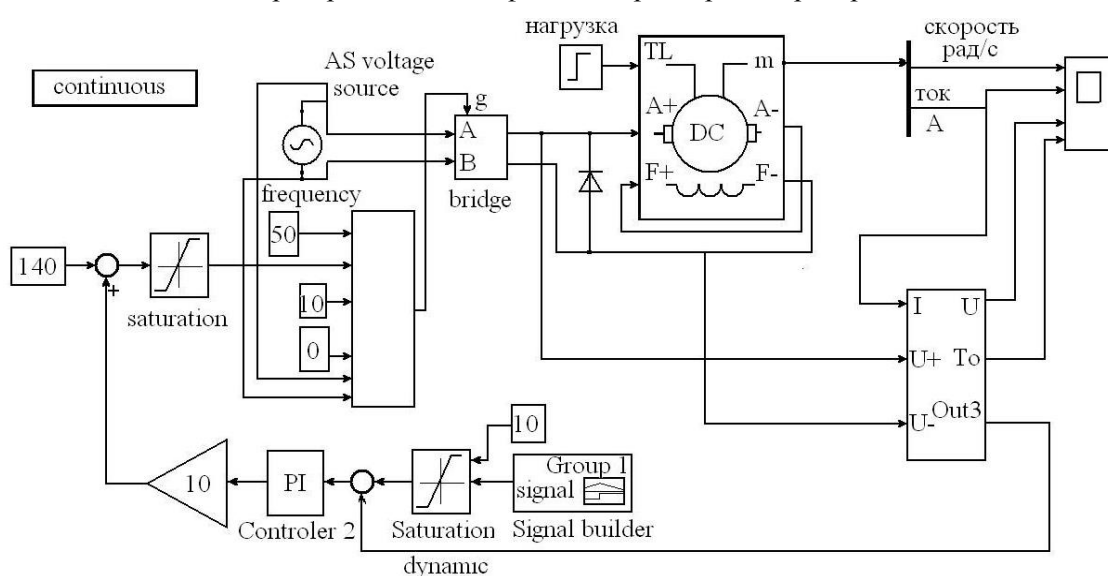


Рис. 5. Схема модели управления двигателем последовательного возбуждения

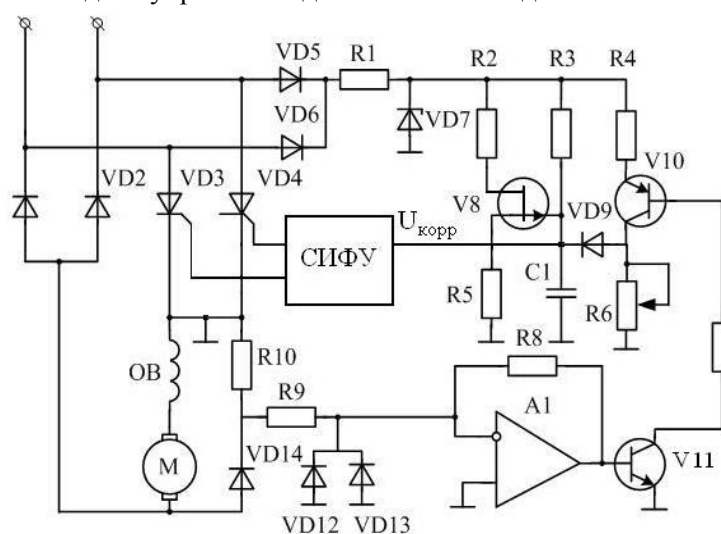


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема обнуляемого дискретного интегратора, выполненная на операционном усилителе A1, транзисторах V10, V11 и конденсаторе C1

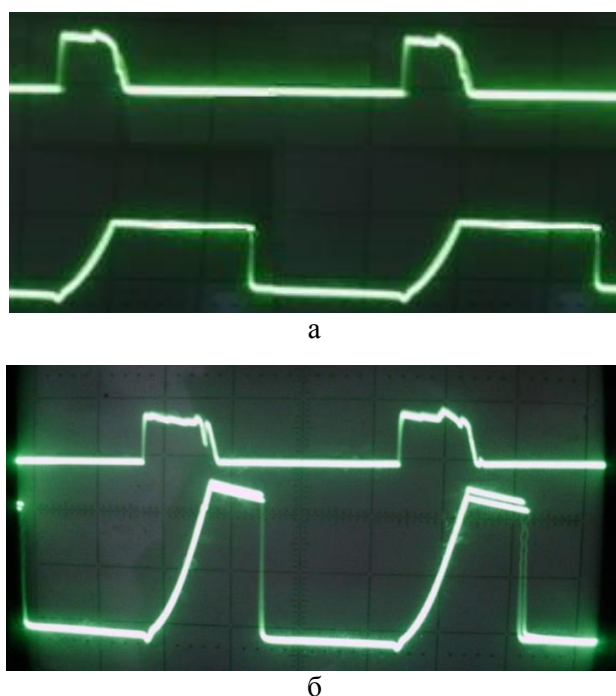


Рис. 7. Осциллограммы обнуляемого дискретного интегратора, снятые для двух значений скорости двигателя: 400 (а) и 800 рад/с (б). Получены для двигателя серии КОО 651. Верхние импульсы на входе компаратора А1, нижние – на конденсаторе С1

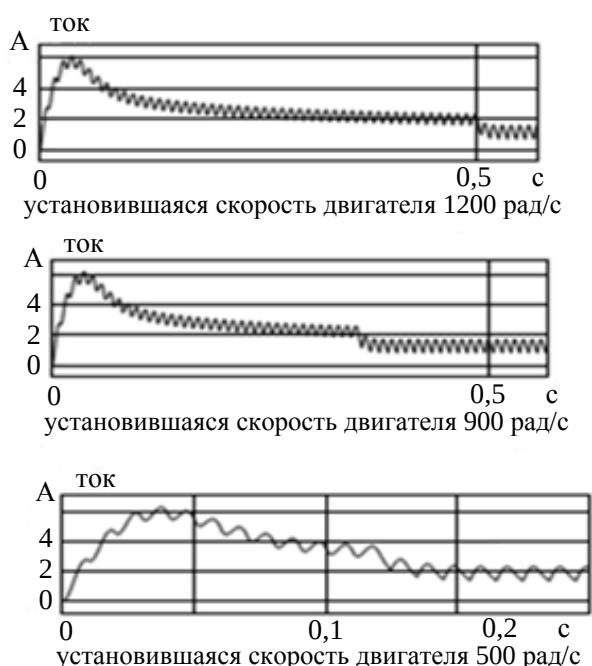


Рис. 8. Результаты моделирования метода управления ДПВ

Легко увидеть, что для всех значений скорости время реакции по току двигателя одинаково (на рис. 8 четко просматривается по 4 пульса

тока на каждой из кривых). Таким образом, введенный в закон управления корректирующий сигнал стабилизирует динамические свойства системы, скорость нарастания тока теперь зависит только от величины токоограничения и допустимого темпа его нарастания исходя из требования коммутации коллекторно-щеточного узла. Полученная коррекция делает возможным обеспечение оптимального управления приводом для всех режимов работы.

Линейность полученных зависимостей позволяет относительно простую реализацию управлений, что демонстрируется схемой, приведенной на рис. 6.

Заключение

В результате исследования электромагнитных процессов выявлено:

- электромагнитная постоянная времени может изменяться до 8 раз в диапазоне регулирования скорости;
- из-за дискретности управления двигателем, при наличии преобразователя, необходима коррекция закона управления и его рациональная аппроксимация.

Получены аппроксимирующие зависимость между скоростью нарастания тока и скоростью вращения вала двигателя, что упрощает синтез корректирующего сигнала для управления динамикой по оптимальным траекториям в различных режимах работы ДПВ.

Предложена нелинейная динамическая коррекция управления с функциональной зависимостью от скорости двигателя, стабилизирующая динамику электропривода.

Список литературы

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. М.: Госэнергоиздат, 1961. 188 с.
2. Повышение энергетической эффективности медицинских инструментов и приборов / Деметьев Ю.Н., Каф- тасьев Д.А., Мешков А.С., Суздорф В.И. // Интеллектуальные энергосистемы: труды II Международного молодежного форума. Томск, 2014. С. 103–110.
3. Мешков А.С., Суздорф В.И. Энергоэффективный электрифицированный инструмент // Сб. научно-исследовательских работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. Новочеркасск: Лик, 2010. С. 49–53.
4. Каган В.Г., Лебедев Г.В., Малинин Л.И. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения. М.: Энергия, 1971. 96 с.
5. Min Tu Aung Energy Saving Control of Series Excitation Motor / V.I. Susdorf, Y.N. Dementyev, K.N. Negodin, Min Tu Aung // MATEC Web Conf. 91 01045 (2017)

6. Алехин А.Е., Дементьев Ю.Н., Суздорф В.И. Электропривод постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения: пат. 1676418 RUS, 06.02.1990.
7. Беллман М.Х. Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании. Л.: Энергия, 1975. 134 с.
8. Susdorf V.I. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices / Meshkov A.S., Susdorf V.I., Dementyev Y. N., D.A. // The 2nd International Youth Forum "Smart Grids", MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014.
9. Мешков А.С., Суздорф В.И., Гринкруг М.С. Формирование характеристик электроприводов малой мощности // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2014. №4(17). С. 61–71
10. Мешков А.С., Суздорф В.И. Электропривод малой мощности с улучшенными энергетическими характеристиками // Вестник ТОГУ. 2013. №1(28). С. 115–124.
11. Мешков А.С., Суздорф В.И. Устройство для стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя: пат. 2444838 Российская Федерация, МПК H02P7/29. Оpubл. 10.03.2012.

Поступила 13.11.17.

Принята в печать 01.02.18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

DYNAMIC CORRECTION OF ELECTRIC DRIVES WITH SERIES MOTORS

Min Thu Aung – Postgraduate Student

Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: minthuaung000370@gmail.com.

Viktor I. Suzdorf – Ph.D. (Eng.), Professor

Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: susdorf@mail.ru.

Abstract

Problem Statement: This article describes the results of a study into the electromagnetic processes that take place in series motors energized from static inverters. The article also describes the nonlinear functional dependences obtained between the parameters of the mentioned systems and the shaft load and the motor speed. The authors point out why it is important to account for the nonlinear parameters when determining the overall stability of the system and when combining optimal controls. **Objectives:** The objectives include a functional and parametric synthesis of controls based on dynamic correction of the system ensuring stability and enabling system optimization. **Methods Applied:** The methods used in this study include a spectral method by Solodovnikov, a dynamic programming method, Matlab Simulink simulation, as well as experimental studies. **Originality:** The authors propose a nonlinear dynamic correction technique for the 'inverter-series motor' system. The technique is based on the functional dependencies of the system coordinates and ensures that the preset dynamic characteristics are reached. **Findings:** The article contains data indicating a significant impact (causing a 6 to 7 times change in the parameters) produced by the current motor speed. There are also given approximated dependences (with an error of up to 2%) which help form a correction signal using standard linear circuits. **Practical Relevance:** The results of the study can be useful in the development of electric drive systems for application in electric tools and traction motors, as they can help ensure optimum performance and minimum losses in dynamic modes.

Keywords: Electromagnetic process, series motor, static inverter, Matlab Simulink simulation.

References

1. Petrov Yu.P. *Optimalnoe upravlenie elektroprivodom* [Optimal actuator]. Moscow: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1961, 188 p. (In Russ.)
2. Dementiev Yu.N., Kaftasiev D.A., Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Improved energy efficiency of medical instruments and devices. *V sbornike: Intellektualnye energosistemy. Trudy II Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma* [Smart grids. Proceedings of the 2nd International Youth Forum]. 2014, pp. 103-110. (In Russ.)
3. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Energy efficiency electric tools. *Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot final'istov konkursa aspirantov i molodykh uchenykh v oblasti energosberezheniya v promyshlennosti* [Proceedings of the final competition among students and young researchers who study energy efficiency in industrial applications]. Novocherkassk: Lik, 2010, pp. 49-53. (In Russ.)
4. Kagan V.G., Lebedev G.V., Malinin L.I. Semiconductor systems with series motors. Moscow: Energiya, 1971, 96 p. (In Russ.)
5. Susdorf V. I., Dementiev Y. N., Negodin K. N., Min Aung Tu. Energy Saving Control of Series Excitation Motor. MATEC Web Conf. 91 01045 (2017)
6. Dementiev Yu.N., Kaftasiev D.A., Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Smart grids. Proceedings of the 2nd International Youth Forum, 2014, pp. 103-110.
7. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Energy efficiency electric tools. *Sb.*

- nauchno-issledovatel'skikh rabot finalistov konkursa aspirantov i molodykh uchenykh v oblasti energosberezheniya v promyshlennosti* [Proceedings of the final competition among students and young researchers who study energy efficiency in industrial applications], Novocherkassk: Lik, 2010, pp. 49-53. (In Russ.)
8. Alekhin A.E., Dementiev Yu.N., Suzdorf V.I. *Elektroprivod postoyannogo toka s dvigatelem posledovatel'nogo vzbuzhdeniya* [DC drive with a series motor]. Patent RF, no. 1676418, 1990.
 9. Bellman M.Kh. *Perekhodnye protsessy v mikroprivodakh postoyannogo toka pri impulsnom pitanii* [Transients in the DC micro motors with pulse power. Leningrad: Energy, 1975. 134 p. (In Russ.)]
 10. Meshkov A.S., Suzdorf V.I., Dementiev N.Y., Kartashev D.A. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices. The 2nd International Youth Forum "Smart Grids", MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014. (In Russ.)
 11. Meshkov A.S., Suzdorf V.I., Grinkrug M.S. Shaping the characteristics of low power drives. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema* [Bulletin of the Sholem Aleichem Amur State University], 2014, no. 4(17), pp. 61-71
 12. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Low power electric drive with improved energy efficiency. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific National University], 2013, no. 1(28), pp. 115 – 124.
 13. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. *Ustroystvo dlya stabilizatsii chastoty vrashcheniya odnofaznogo kollektornogo elektrodvigatelya* [Single-phase commutator motor speed stabiliser]. Patent RF, no. 2444838, 2012.

Received 13/11/17

Accepted 01/02/18

Образец для цитирования

Мин Ту Аунг, Суздорф В.И. Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

For citation

Min Thu Aung, Suzdorf V.I. Dynamic correction of electric drives with series motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

УДК 621.316.13 + 621.311.449

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-61-70>

АНАЛИЗ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 380 КВ ПРОВИНЦИЙ ХАТАЙ И АДАНА ТУРЕЦКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А.

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

Аннотация

Актуальность работы. Качество электроэнергии является важным условием эффективной работы компактных металлургических предприятий, включающих в себя электросталеплавильные комплексы с дугowymi сталеплавильными печами и статическими тиристорными компенсаторами, функционирующих совместно с прокатными комплексами, на базе листовых и сортовых прокатных станов, а также вспомогательные агрегаты непрерывной обработки полосы. В свою очередь, показатели качества электроэнергии представляют собой совокупность характеристик, от которых зависит надежная работа ответственных потребителей на данных предприятиях. Одним из значимых показателей качества является провал напряжения, возникающий во внешней питающей сети и негативно влияющий на работу всего предприятия в целом. На сегодняшний день среди отечественных и зарубежных научных работ мало исследований, в которых рассматриваются причины возникновения провалов напряжения в районных энергосистемах. Также отсутствуют исследования, направленные на разработку комплекса мероприятий, предусматривающих поддержание напряжения на заданном уровне ещё на стадии проектирования внутрицехового электроснабжения. Существующие методики демпфирования провалов напряжения основаны на приобретении и установке нового электрооборудования, которое с определённым быстродействием реагирует на изменение уровня напряжения в распределительной сети предприятия и восстанавливает нормальный режим работы за счет переключения на резервный источник питания. Данное решение представленной проблемы экономически не выгодно, т.к. используемое оборудование является дорогостоящим. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового подхода к проектированию систем внутрицехового электроснабжения, основанного на использовании собственных резервов реактивной мощности имеющихся статических компенсаторов для демпфирования провалов напряжения. **Цель работы** – анализ провалов напряжения в районных электрических сетях, вызванных внешними факторами, а также разработка рекомендаций по построению систем электроснабжения компактных металлургических заводов, не требующих больших капиталовложений на приобретение дополнительного дорогостоящего оборудования. **Используемые методы:** при выполнении исследований в качестве основной исходной информации были использованы экспериментальные данные о провалах напряжения на действующем металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция) и данные о погодных условиях в исследуемом энергорайоне; статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась средствами программного приложения Microsoft Office Excel. **Новизна:** результаты исследований являются новыми, т.к. был проведен анализ зависимости провалов напряжения от возникающих грозовых разрядов, на основании которого был разработан новый подход в проектировании внутрицеховых систем электроснабжения компактных металлургических предприятий, обеспечивающий надежную защиту от провалов напряжения во внешней питающей сети. **Полученные результаты:** на примере ЗАО «ММК Metalurji» установлены закономерности возникновения провалов напряжения в зависимости от погодных условий в разное время года; определено, какая часть провалов зависит от осадков и грозовых разрядов; разработаны мероприятия по усовершенствованию цеховых систем электроснабжения с целью повышения их надежности. **Практическая значимость.** Полученные результаты исследований имеют большую практическую значимость для действующих компактных металлургических предприятий, включающих электросталеплавильное и прокатное производство. Также результаты работы могут найти практическое применение при проектировании систем электроснабжения новых строящихся заводов.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, провал напряжения, грозовые разряды, преобразователь частоты, стан горячей прокатки, электропривод прокатной клетки, дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор.

© Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., 2018

Введение

Надежная работа любых систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий напрямую зависит от обеспечения основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Одним из важнейших показателей является провал напряжения, который определяется как временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения. В трехфазных СЭС за начало провала считается момент времени, когда напряжение в одной из фаз снизилось ниже порогового значения в 10%, а концом – когда это напряжение возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения [1]. Основными характеристиками провалов являются их глубина ΔU , длительность Δt (от 10 мс до 1 мин) и частота возникновения F .

Надежность работы мощных электроприемников, чувствительных к несимметрии и уровню напряжения, напрямую зависит от данного показателя. Даже кратковременное снижение напряжения может привести к остановке электрооборудования, участвующего в непрерывной технологической цепи. Так, в [2] проведен анализ влияния провалов напряжения на работу листового стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji», где главные электроприводы клетей построены на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ). В ходе исследований было выявлено, что провалы напряжения по одной фазе глубиной 30% и длительностью 200 мс могут привести к отключению ПЧ из-за снижения напряжения в звене постоянного тока, а также из-за увеличения токов, потребляемых АВ из питающей сети.

При наличии частых провалов напряжения встает вопрос о мероприятиях, направленных на поддержание напряжения в цеховых сетях на заданном уровне. Для этого необходимо проведение анализа причин возникновения провалов напряжения, а также исследование их статистических и временных характеристик. Учитывая тот факт, что сами провалы напряжения – это события случайные, то предугадать их достаточно сложно. Причинами возникновения провалов могут быть различные факторы. К ним относятся погодные явления (гроза, дождь, снег, ветер), наледь, загрязнение изоляторов, ошибки оперативного персонала и т.д. В отечественной и зарубежной литературе опубликованы результаты исследований по прогнозированию возникновения провалов напряжения в сетях 110–220 кВ и представлены способы борьбы с ними [3–6]. В соответствии с ними наиболее частой причиной возникновения провала являются грозовые разряды [3,4]. При этом основную сложность данных исследований представляет собой сбор статистических данных. Их можно получить из записей в журналах оперативного персонала, либо длительное время проводя прямые измерения уровня

напряжения сети, или же можно применить методу расчета числа отключений линии за год в связи с попаданием в неё молний. В данной статье приведено исследование статистических характеристик провалов напряжения на примере действующего металлургического предприятия ЗАО «ММК Metalurji», получающего питание от районных электрических сетей 380 кВ провинций Хатай и Адана. Также в работе рассмотрены способы демпфирования провалов напряжения и приведены рекомендации по построению систем электроснабжения компактных металлургических заводов.

1. Описание исследуемого энергорайона Турции

Территориально металлургический завод ЗАО «ММК Metalurji» располагается в юго-восточной части Турции, в провинции Хатай, в которой преобладает субтропический климат (рис. 1, а). Воздушные линии электропередач (ЛЭП), расположенные в данном районе, проходят на открытом воздухе и с учетом их географического положения подвержены различного рода атмосферным воздействиям, которые оказывают существенное влияние на надежность электроснабжения района в целом.

Как видно из рис. 1, б, основная часть ЛЭП, составляющих СЭС представленного района, проходит недалеко от побережья Средиземного моря, что играет немаловажную роль в работе ЛЭП и в их состоянии. Данное влияние объясняется тем, что ЛЭП, расположенные вблизи морского побережья с его специфическими ветрами и дождями, подвержены образованию различного рода солевых отложений, что в свою очередь вызывает дополнительные механические нагрузки на все элементы ЛЭП. Помимо этого, возникающие отложения оказывают химическое воздействие непосредственно как на сами проводники, так и на изоляторы, траверсы и опоры, вызывая их разрушение и снижение электрических и механических свойств.

Также характерной особенностью данной местности является то, что в этом районе большая часть времени в году сопровождается дождями, которые обуславливают возникновение грозových разрядов, таким образом участок линий электропередач, питающий предприятие ЗАО «ММК Metalurji», в зимнее и межсезонные времена года находится в зоне влияния данных погодных условий. Только в летние месяцы в этом районе стоит засушливая погода. Поскольку одной из вероятных причин возникновения провалов напряжения являются срабатывания средств защиты и автоматики при отключении грозových перенапряжений [9], то необходимо проанализировать, как связаны между собой провалы напряжения в распределительной сети металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» и возникающие в данные периоды времени гроззовые разряды на территории исследуемых провинций.



Рис. 1. Карта провинции Хатай Турецкой республики (а) и схема районных электрических сетей 380 кВ (б)

2. Особенности районных электрических сетей 380 кВ провинций Хатай и Адана и системы внутризаводского электроснабжения ЗАО «ММК METALURJI»

Как известно, провал напряжения характеризуется резким увеличением тока и снижением напряжения в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети, с последующим его восстановлением. По сути, это кратковременное короткое замыкание в СЭС, что само по себе является аварийным режимом работы. При возникновении коротких замыканий в высоковольтных ЛЭП провалы напряжения передаются во внутризаводскую СЭС и оказывают негативное влияние на работу основных электроприемников. Глубина провала напряжения на шинах главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия зависит от удаленности точки короткого замыкания и конфигурации районных электрических сетей. На рис. 2 приведена схема замещения электрических сетей 380 кВ провинций Хатай и Адана, от которых получает питание исследуемый металлургический завод.

Главная понизительная подстанция предприятия ЗАО «ММК Metalurji» получает питание по воздушной линии электропередач от районной узловой подстанции ERZIN. Данная линия от ГПП уходит на соседний крупный металлургический комбинат IZDEMIR. В открытом распределительном устройстве (ОРУ) подстанции установлены 4 сетевых понизительных трансформатора (Т1-Т4) напряжением 380/34,5 кВ, мощностью 155 МВА, с соединением обмоток

по схеме Y/Δ . От трансформатора Т1 и Т2 получают питание шины 34,5 кВ закрытого распределительного устройства (ЗРУ), к которым подключены электроприемники станов горячей и холодной прокатки, непрерывно-травильного агрегата, агрегатов горячего цинкования и полимерных покрытий, кислородной станции и др.

Включенные на параллельную работу трансформаторы Т3 и Т4 осуществляют питание электросталеплавильного комплекса, включающего в себя дуговую сталеплавильную печь ДСП-250, с печным трансформатором мощностью 300 МВА и агрегат печь-ковш (АПК) с печным трансформатором мощностью 53 МВА. Статический тиристорный компенсатор (СТК) 330 МВАр подключен на одну секцию с ДСП и АПК и в нормальном режиме осуществляет компенсацию реактивной мощности электросталеплавильного комплекса, симметрирование и фильтрацию высших гармоник токов электросталеплавильных агрегатов. Схема электроснабжения завода представлена на рис. 3.

В питающей сети 380 кВ часто возникают однофазные провалы напряжения, которые, трансформируясь через сетевые трансформаторы, оказывают влияние на работу приводов станов горячей прокатки (СГП) и приводят к нарушению технологического процесса, сопровождающегося значительным экономическим ущербом [9].

Для разработки мероприятий по повышению надежности внутрицехового электроснабжения необходимо провести статистический анализ провалов напряжения в районных электрических сетях провинций Хатай и Адана, вызванных грозовыми разрядами.

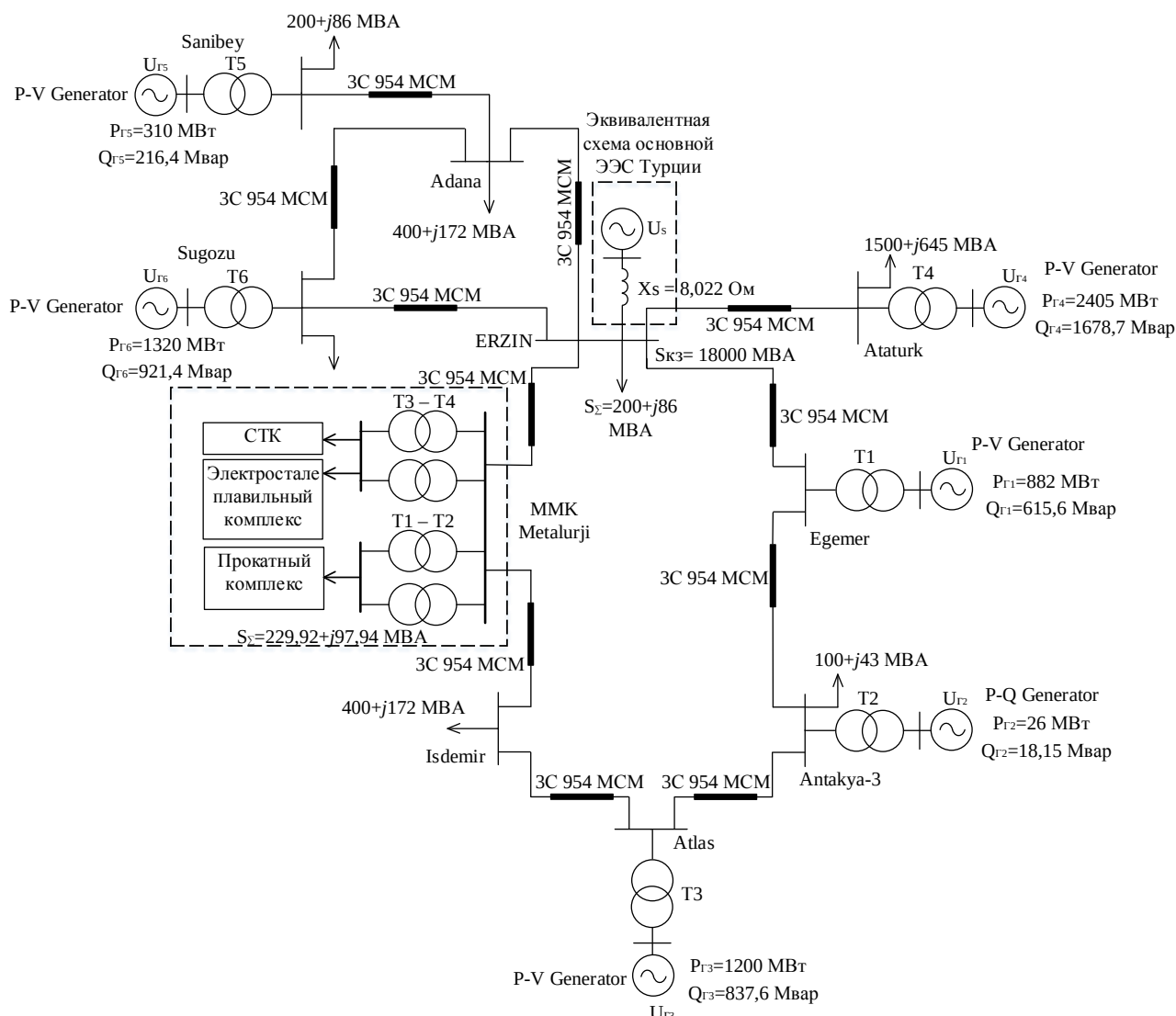


Рис. 2. Схема замещения, исследуемого энергорайона провинций Хатай и Адана

3. Статистический анализ провалов напряжения в исследуемом энергорайоне

Как говорилось ранее, при исследовании надежности систем электроснабжения немаловажным фактором являются климатические особенности данного района. Для оценки влияния погодных условий на работу СЭС был проведен анализ зависимости провалов напряжения от атмосферных осадков, сопровождающихся грозовыми разрядами.

На рис. 4 показано распределение провалов напряжения по глубине и длительности, зафиксированных в 2013 году на шинах ГПП ЗАО «ММК Metalurji». Как видно из диаграммы, наиболее распространенными являются провалы напряжения глубиной от 25 до 65 % и длительностью от 15 до 150 мс.

В качестве исходных массивов для анализа использованы данные о провалах напряжения,

зафиксированные на шинах распределительных устройств ГПП и распределительных пунктах (РП) прокатного стана 1750 предприятия ЗАО «ММК Metalurji» за 2013 год, по которым были восстановлены реальные осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ в момент возникновения однофазного провала напряжения глубиной $\delta U = -30\%$ и длительностью $t_{\text{пров.}} = 140 \text{ мс}$ (рис. 5).

Ввиду того, что обмотки сетевых трансформаторов соединены по схеме Y/Δ , то при трансформации на секцию 34,5 кВ характер провала напряжения меняется: из однофазного провала с глубиной 30% на напряжении 380 кВ в электрической сети 34,5 кВ возникает двухфазное падение напряжения глубиной порядка 10%. Данный факт необходимо учитывать при разработке алгоритмов демпфирования провалов напряжения в распределительной сети завода.

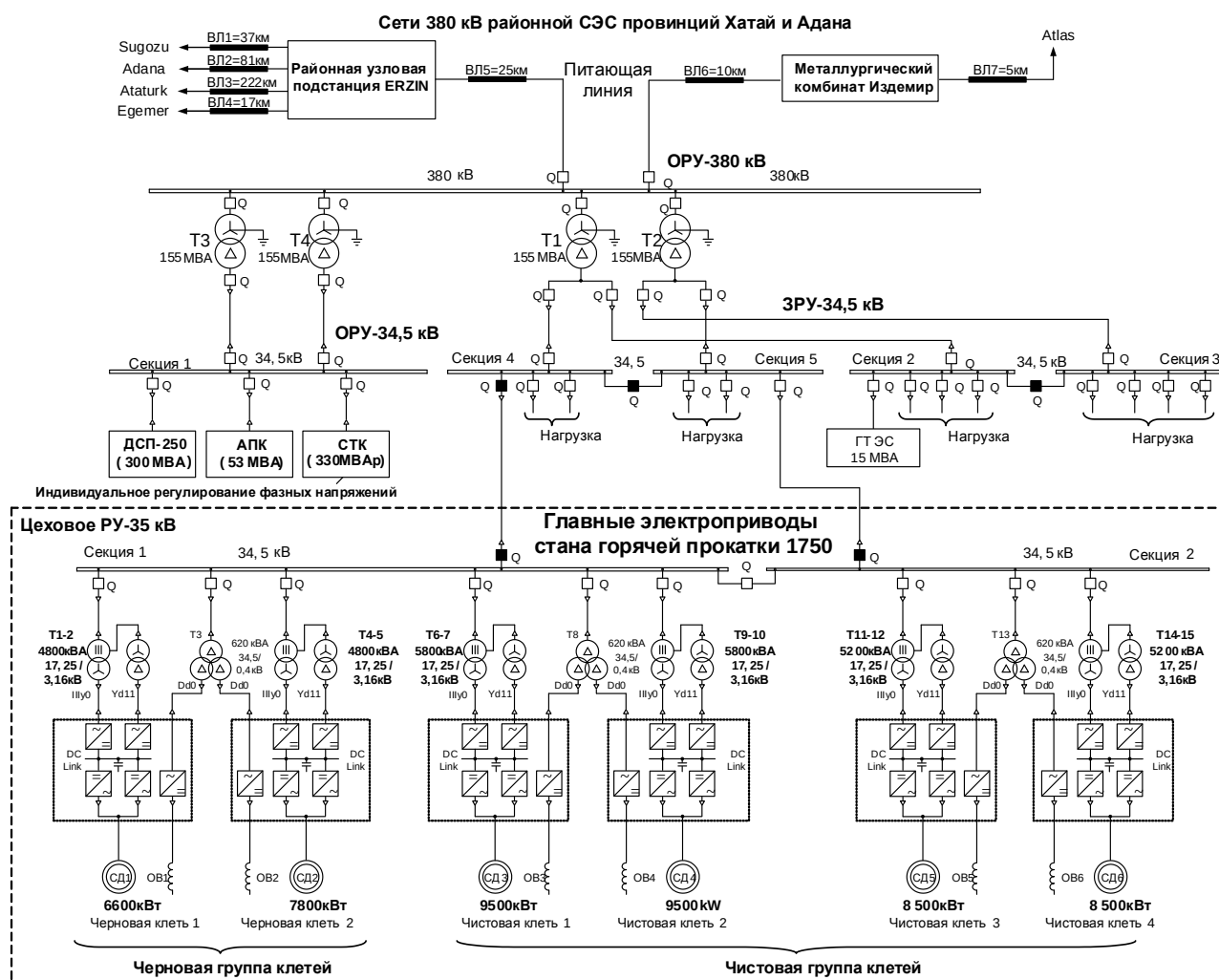
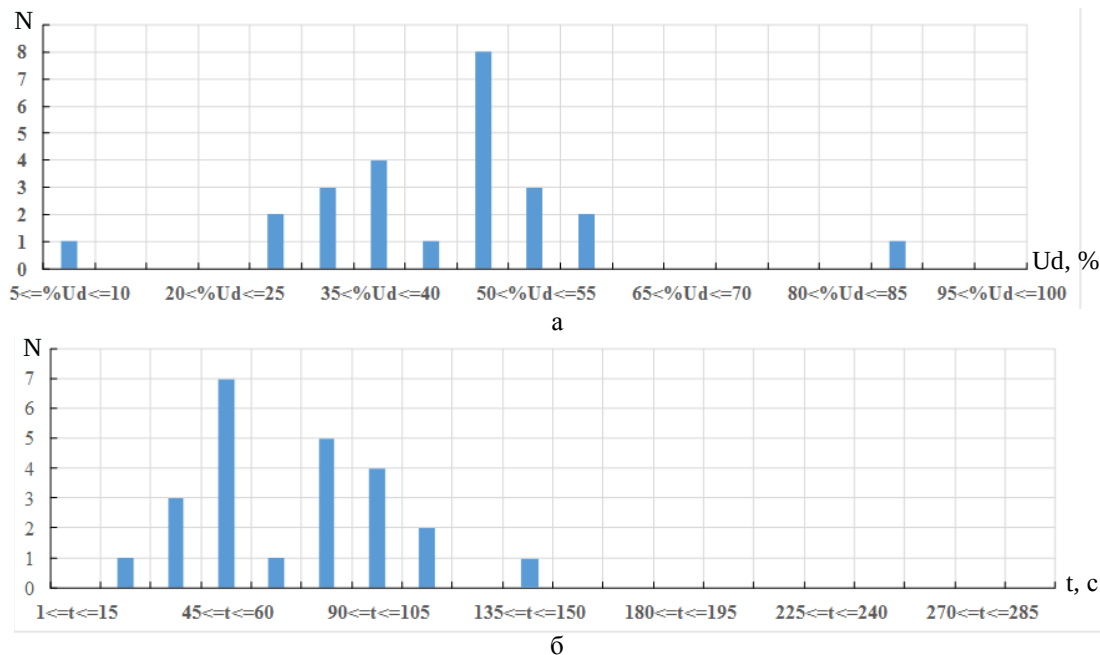


Рис. 3. Однолинейная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Рис. 4. Гистограммы распределения провалов напряжения по глубине (U_d) и длительности (t) в сети 380 кВ (а, б) за 2013 год

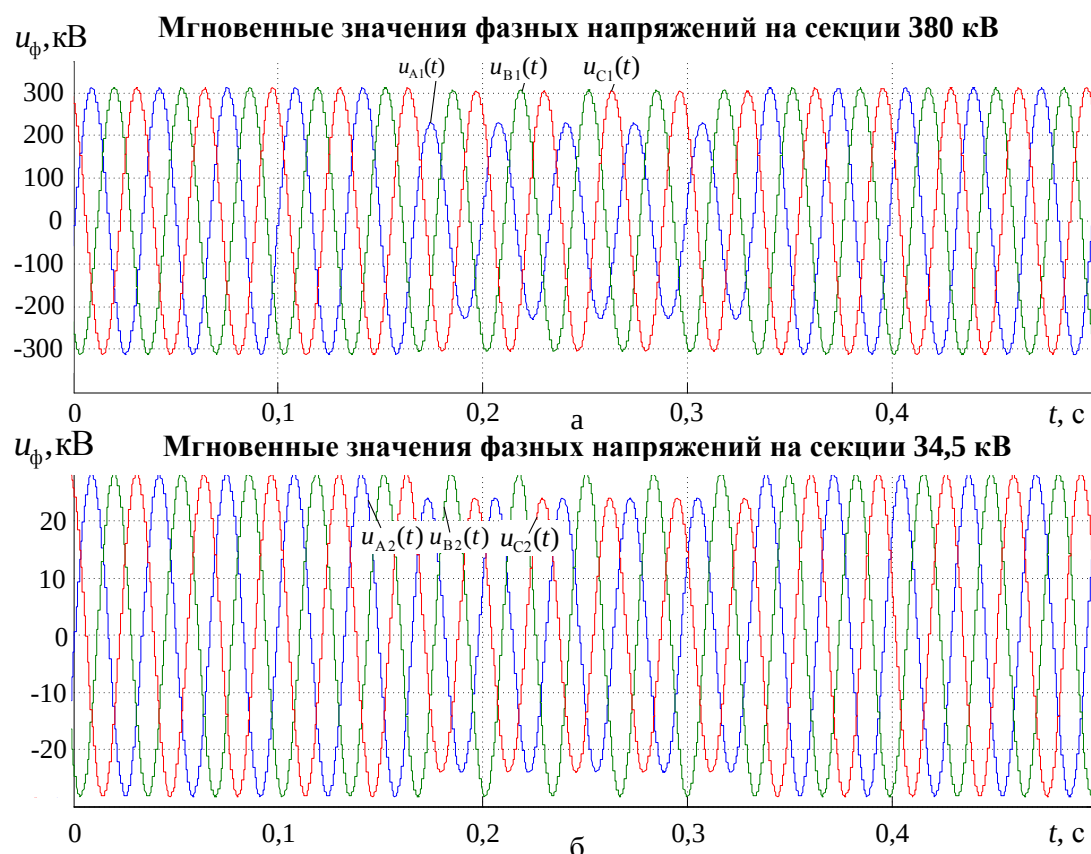


Рис. 5. Осциллограммы мгновенных значений напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ, иллюстрирующие особенности преобразования провала напряжения на сетевом трансформаторе 380/34,5 кВ

Для предварительной оценки статистической взаимосвязи погодных условий и частоты возникновения провалов напряжения был построен график возникновения провалов напряжения в течение 2013 года с указанием количества возникновения провалов в конкретные сутки (рис. 6, а), и аналогичный график возникновения атмосферных осадков (рис. 6, б), включающий в себя количество дождей и гроз.

Как видно из рис. 6, временной интервал возникновения провалов напряжения совпадает с самыми дождливыми периодами в году. Причем в некоторых местах можно наблюдать совпадение пиков обоих графиков. В таблице указано процентное соотношение гроз в общем количестве провалов напряжения за указанные периоды.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что в 50% случаев причинами провалов напряжения являются атмосферные осадки, сопровождающиеся грозовыми разрядами. С учетом того, что возникновение гроз и осадков в исследуемом энергорайоне носит сезонный характер, то при разработке мероприя-

тий по обеспечению устойчивой работы электроприводов прокатных станов необходимо учитывать данный фактор.

Влияние гроз на провалы напряжения в процентном соотношении для разных лет

Показатели	Исследуемый календарный год		
	2012	2013	2014
Количество дней в году, когда имели место провалы напряжения, $N_{1\gamma}$	27	72	41
Количество дней в году, когда имели место грозы и осадки, $N_{2\gamma}$	125	93	115
Количество совпадений гроз и осадков с провалами напряжения N_3	17 (63%)	34 (47,2%)	19 (46,3%)



Рис. 6. Графики возникновения провалов напряжения в течение 2013 года (а);
графики возникновения дождей и гроз в районе провинций Хатай и Адана (б)

4. Разработка рекомендаций по снижению влияния провалов напряжения на работу электроприемников прокатного комплекса

С целью компенсации провалов напряжения на предприятии ЗАО «ММК Metalurji» было предложено использовать заложенные в СТК резервы реактивной мощности [10]. Данный способ потребовал модернизации существующей системы управления СТК, в которой был внедрен контроль фазных напряжений на период протекания провала, а также были приняты меры по исключению бросков напряжения в начальный и конечный моменты провала напряжения. Реализация данного способа возможна за счет прокладки дополнительной кабельной линии, что требует доработки существующей схемы электроснабжения (рис. 7). Было предложено объединить секции шин 34,5 кВ стана горячей прокатки и электросталеплавильного комплекса и рассмотреть возможность разработки графика сезонных переключений, в результате которых электроприемники СГП на время неблагоприятных метеоусловий будут защищены от негативного воздействия провалов напряжения.

Применение данного режима работы внутрицеховой распределительной сети возможно только при наличии одного уровня напряжения на шинах стана горячей прокатки и электросталеплавильного комплекса. Помимо этого, необходимо предусмотреть размещение дополнительных ячеек в РУ 34,5 кВ ГПП и РУ прокатного стана. На основании статистических данных о грозовой активности и связанных с ней провалами напряжения следует предусмотреть графики переключений питающей секции цехового РП на параллельную работу с шинами РУ-35 кВ ЭСПЦ. Также необходимо обеспечить согласованную работу ДСП и электроприводов прокатного стана, исключить работу клетки при компенсации печного трансформатора и фильтрокомпенсирующих цепей СТК. Данные обстоятельства рекомендуется учитывать при проектировании вновь строящихся предприятий, на которых планируется использование ресурсов сверхмощного СТК дуговой печи для демпфирования провалов напряжения.

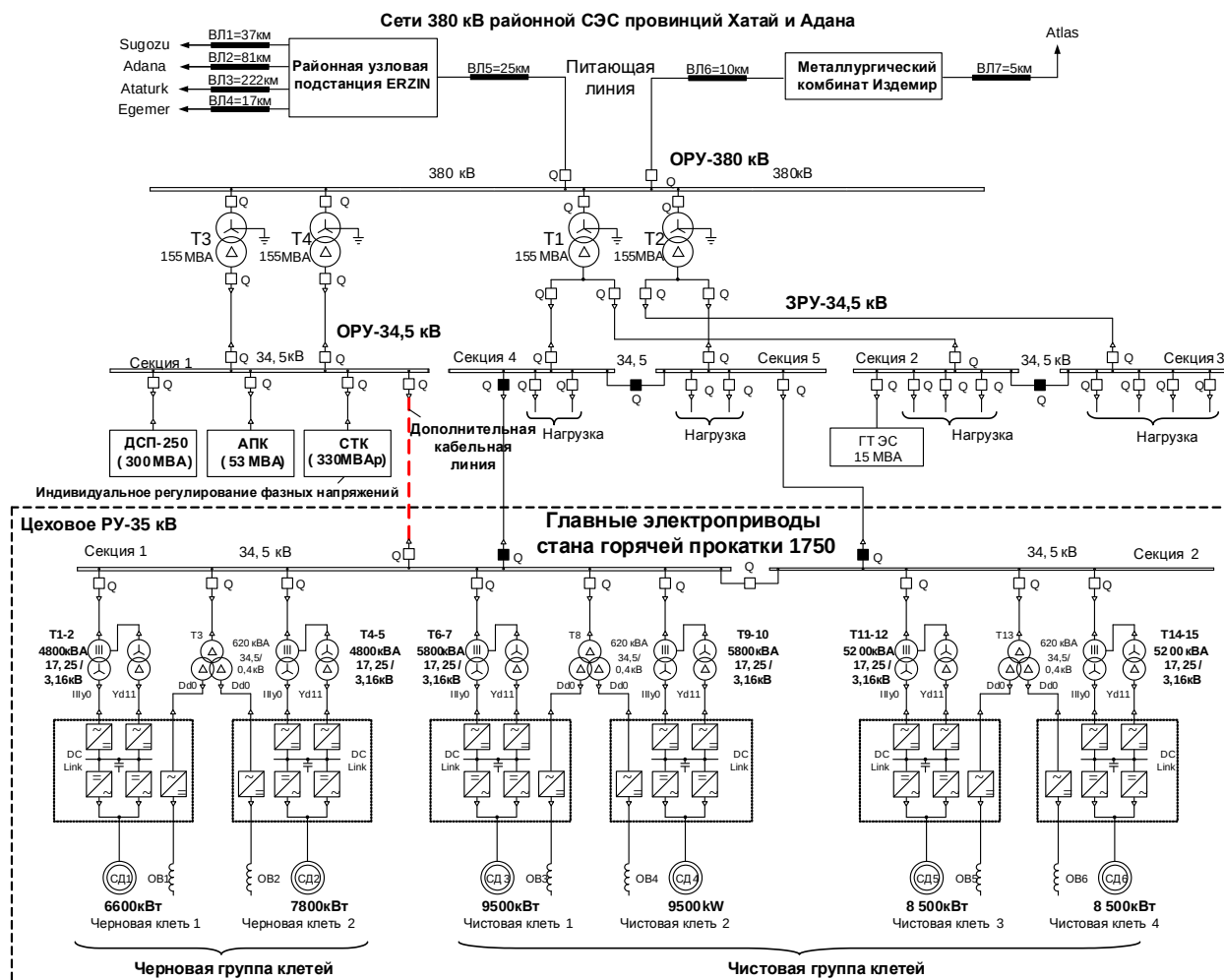


Рис. 7. Усовершенствованная однолинейная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Выводы

1. Провалы напряжения оказывают существенное влияние на надёжную работу ответственных электроприемников и на бесперебойность всего технологического процесса металлургических предприятий.

2. В ходе исследования были проанализированы наиболее вероятные причины возникновения провалов напряжения на шинах 380 кВ завода ЗАО «ММК Metalurji», Турция. Результаты исследований показали, что в среднем 50 % случаев возникающих провалов напряжения причинами являются атмосферные осадки, сопровождающиеся грозовыми разрядами.

3. По результатам работы даны общие рекомендации по построению систем внутрицехового электроснабжения компактных металлургических заводов, имеющих в своем составе электроплавильный комплекс с установленными

сверхмощной ДСП и СТК, а также прокатное производство. Основной идеей является применение в течение года сезонных переключений, при которых обеспечивается параллельная работа стана горячей прокатки и электротехнического комплекса «ДСП-СТК» с измененной системой управления СТК.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-3230.2018.8).

Список литературы

- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей про-

- катки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 8–14.
3. Карташев И.И., Плакида А.В., Хромышев Н.К. Анализ провалов напряжения в электрических сетях 100/220 кВ // Электричество. 2005. № 4. С. 2–8.
 4. Шпиганович А.Н., Муров И.С. Провалы напряжения в электрических системах предприятий // Национальная Ассоциация Ученых. 2015. № 2–4 (7). С. 6–7.
 5. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods / Mustafa S.S., Önder P., Kahraman Y., Ömer G., Necip E.A. // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211–215.
 6. Mei Fei. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM / Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 432–437.
 7. Иванов В.И., Арцишевский Я.Л. Методика прогнозирования статистики провалов питающего напряжения в секционированных распределительных сетях электро-снабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2004. № 6. С. 18–22.
 8. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК-METALURJI» / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев, Е.Б. Славгородский // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. С. 235–238.
 9. Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. № 4. С. 35–41.
 10. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, T.R. Khrumshin, I. Ackay, Y. Gok // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014. Calgary, Canada. 12–14 November 2014, pp. 235–241.

Поступила 01.02.18.

Принята в печать 12.03.18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-61-70>

ANALYSIS OF VOLTAGE FALL IN 380 KV REGIONAL ELECTRICAL POWER NETWORKS OF HATAY AND ADANA PROVINCES, TURKEY

Aleksandr A. Nikolaev – Ph.D. (Eng.), Associate ProfessorNosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.**Vladimir S. Ivekeev** – Postgraduate Student

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

Igor A. Lozhkin – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: igor-yoha@ya.ru.

Abstract

Relevance of the task. Quality of electrical energy is a vital prerequisite for operation of compact metallurgical plants consisting of melting complexes based on electric-arc furnaces and static var compensators that work together with rolling mills consisting of flat steel and section mills as well as continuous machining of the strip. Quality parameters of electrical energy, in turn, depend upon a number of characteristics that influence operation of essential consumers at such plants. One of the most significant quality characteristics is voltage fall in the external supply network. It negatively affects plants overall. For today, there is little research among domestic and foreign researchers that deal with reasons of voltage fall in regional power networks. Also, there is no research that would deal with measures for maintaining voltage at a desired level even during designing inner electrical supply. Existing methods of damping voltage fall are based on purchasing new equipment which reacts to changing voltage in the distribution network and restores normal operation mode by switching to a standby power supply. Such a method is unfavorable economically as equipment is expensive, and not

every plant is ready to buy it. As such, the task to do is development of a new method of designing electrical power supply systems for workshops. Such method would be based on in-house reserves of reactive power accumulated in static compensators for dumping voltage falls. **Goal of the job:** analyzing voltage fall in regional electrical networks which are caused by external factors and working out recommendations on designing electrical power systems for small metallurgical plants which don't require significant investments for purchasing additional equipment. **Methods used:** the basic information for the research is datasets on voltage falls at existing metallurgical plant MMK Metalurji Ltd., Iskanderun, Turkey, and information on weather conditions within the researched power districts. Experimental data has been statically processed by Microsoft Office Excel. **Originality:** the research findings are new as there has been a research on how voltage falls depend on lightning discharges. Based on this research, a new method of designing in-shop electrical power systems has been developed which defends the electrical power systems from voltage fall in the outer power system. **Findings:** by the example of MMK Metalurji Ltd. we

can see principles of occurring voltage falls depending on weather conditions in various seasons; also, measures of improvement of in-shop power systems have been developed with the aim of making them more reliable. **Practical relevance.** The results obtained are highly significant for existing small metallurgical plants consisting of electric furnace and rolling steelmaking. Also, the results can be used at designing of new metallurgical plants.

Keywords: Reliability of power supply, voltage dips, lightning discharges, frequency converter, hot rolling mill, electric drive of the rolling stand, electric arc furnace, static var compensator.

References

1. GOST 32144-2013. *Mezhhgosudarstvennyj standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoy ehnergii v sistemah ehlektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standart 32144-2013. Russian National Standard. Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. Moscow, 2013. (In Russ.).
2. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Tikhvatullin M.M. Investigation of the influence of voltage dips in the power supply system of the plant MMK METALURJI on the work of the main electric drives of the hot rolling mill. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2015, no. 3(28), pp. 8-14. (In Russ.).
3. Kartashev I.I., Plakida A.V., Khromyshev N.K. Analysis of voltage dips in electrical networks 100/220 kV. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, no. 4, pp. 2-8. (In Russ.).
4. Shpiganovich A.N., Murov I.S. Voltage dips in the electrical systems of enterprises. *Nacional'naya Associaciya Uchenyh* [National Association of Scientists]. 2015, no. 2-4(7), pp. 6-7. (In Russ.).
5. Mustafa Selim Sezgin, Önder Polat, Kahraman Yumak, Ömer Gul, Necip Erman Atilla. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211-215.
6. Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM. 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences Year: 2017. Pages: 432-437.
7. Ivanov VI, Artsishevsky Ya. L. The method of forecasting the statistics of supply voltage failures in the sectional distribution networks of power supply. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. EHlektromekhanika* [Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Electromechanics]. 2004, no. 6, pp. 18-22. (In Russ.).
8. Komilov G.P., Nikolaev A.A., Anufriev A.V., Lozhkin I.A., Ivekeev V.S., Slavgorod E.B. Features of electricity supply to the metallurgical plant "MMK-METALURJI". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2012, no. 20, pp. 235-238. (In Russ.).
9. Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. Analysis of voltage failures in the supply networks of enterprises and methods of protecting electrical equipment. *Elektrooborudovanie: ehkspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair]. 2011, no. 4, pp. 35-41. (In Russ.).
10. Nikolaev A.A., Komilov G.P., Khramshin T.R., Ackay I., Gok Y. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises. Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014. Calgary, Canada, 12-14 November 2014, pp. 235-241.

Received 01/02/18
Accepted 12/03/18

Образец для цитирования

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций Хатай и Адана Турецкой республики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-61-70>

For citation

Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. Analysis of voltage fall in 380 kV regional electrical power networks of Hatay and Adana provinces, Turkey. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-61-70>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Азимов Холиқназар Хакимович – аспирант Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: kholikazim@mail.ru

Амонов Ильхом Тимурович – канд. техн. наук, доц., ректор Технологического университета Таджикистана, Душанбе, Таджикистан. E-mail: ilhomamonov@mail.ru

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

Быков Петр Олегович – канд. техн. наук, проректор по академической работе, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, Павлодар, Республика Казахстан. E-mail: bykov_petr@mail.ru

Ганиев Изатулло Наврузович – д-р хим. наук, проф., зав. лабораторией Института химии им. В.И. Никитина, академик АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: ganiev48@mail.ru

Голник Владимир Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский государственный технологический университет», Владикавказ, Россия.

Дмитрак Юрий Витальевич – д-р техн. наук, проф., ректор, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский государственный технологический университет», Владикавказ, Россия.

Иброхимов Насим Файзуллоевич – научный сотрудник Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: nasimqon@mail.ru

Ивекеев Владимир Сергеевич – аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: vivekeev@yandex.ru.

Карман Юрий Владимирович – директор ПФ ТОО «Кастинг», Павлодар, Республика Казахстан. E-mail: office@pf.casting.kz

Касимгазинов Асет Давлетович – главный технолог ПФ ТОО «Кастинг», Павлодар, Республика Казахстан. E-mail: kasimgazinov@pf.casting.kz

Ложкин Игорь Александрович – аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: igor-yoha@ya.ru

Лозов Виталий Степанович – главный металлург ПАО «Михайловский ГОК», Железнодорожск, Россия. E-mail: V_Lozov@mgok.ru

Мин Ту Аунг – аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: minthuaung000370@gmail.com

Мирзаев Джалал Аминов – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры материаловедения и физико-химии материалов, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный уни-

верситет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. E-mail: mirzaevda@susu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4696-8258>.

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

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru, alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Пашнева Татьяна Владимировна – канд. физ.-мат. наук, преподаватель кафедры физики и химии, ВУНЦ ВВА им. проф. Жуковского и Ю.Н. Гагарина, Воронеж, Россия. E-mail: Tat120675@yandex.ru

Попов Сергей Викторович – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры физики и химии, ВУНЦ ВВА им. проф. Жуковского и Ю.Н. Гагарина, Воронеж, Россия. E-mail: spopov@yandex.ru

Суздорф Виктор Иванович – канд. техн. наук, проф., Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: susdorf@mail.ru

Сушко Татьяна Ивановна – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры физики и химии, ВУНЦ ВВА им. проф. Жуковского и Ю.Н. Гагарина, Воронеж, Россия. E-mail: Tat120675@yandex.ru

Терещенко Наталья Адольфовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Лаборатория физической металлургии, Институт физики металлов, Екатеринбург, Россия. E-mail: labmet@imp.uran.ru

Турищев Владислав Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия.

Хазин Марк Леонтьевич – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Чайкин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, технический директор ООО «Металлург», Смоленское региональное отделение Российской ассоциации литейщиков, Сафоново, Россия. E-mail: chaika1983@inbox.ru

Чайкин Владимир Андреевич – д-р техн. наук, проф., генеральный директор ООО «Металлург», Смоленское региональное отделение Российской ассоциации литейщиков, Сафоново, Россия. E-mail: sro_ral@mail.ru

Штыков Сергей Олегович – бакалавр, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Яковлева Ирина Леонидовна – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатория физической металлургии, Институт физики металлов, Екатеринбург, Россия. E-mail: labmet@imp.uran.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

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

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

Онлайн-перевод запрещается!

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

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

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

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата A4.

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

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

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

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

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

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

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и неотредактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

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

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.