

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2019. Т.17, №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),
Я. Грум (Словения), 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. Счастливцев (Россия),
Ю Фенг (КНР), Р. Цин (Великобритания)

Редакция:

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун
Ответственные секретари: М.А. Полякова, М.В. Шубина
Редактор: Н.В. Кутекина
Технический редактор: И.В. Ключникова
Перевод на английский: В.И. Елесина, О.Е. Сухих

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

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

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

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

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

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии

Выход в свет 25.03.2019. Заказ 77. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2019. Vol. 17, 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), J. Grum (Slovenia)
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: I.V. Klyunnikova

Translated into English: V.I. Elesina, O.E. Sukhikh

© 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, Chelyabinsk Region, 455000)

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

Editorial office:

402, 45/2 Karla Marksa prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Phone: +7 (3519) 221 493.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Editorial office:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 25.03.2019. Order 77. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

К юбилею МГТУ им. Г.И. Носова	5
<i>Гун Г.С., Корчунов А.Г., Корнилов Г.П., Корнилов С.Н., Полякова М.А.</i>	
Основные направления журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова» (научный обзор).....5	
Разработка полезных ископаемых	18
<i>Монтянова А.Н., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Вильчинский В.Б., Наговицын Ю.Н.</i>	
Опыт и эффективность применения пластифицированных закладочных смесей 18	
Литейное производство	26
<i>Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М.</i>	
Повышение срока эксплуатации литых броней из высокомарганцевой стали мельницы полусамозмельчения 26	
<i>Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh.</i>	
Effect of chemical composition on the performance of centrifugally cast indefinite chilled cast iron rolls 32	
<i>Колокольцев В.М., Савинов А.С., Андреев С.М., Ангольд К.В.</i>	
Расчет термонапряженного состояния нагрева стального цилиндрического объекта 37	
Обработка металлов давлением	46
<i>Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ортуета, Агустин Анитиа</i>	
Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников 46	
Материаловедение и термическая обработка металлов.....	53
<i>Luca Pezzato, Alessandro Minotto, Katya Brunelli, Manuele Dabalà</i>	
Optimization of softening heat treatment for the Pt950Ru jewelry alloy..... 53	
<i>Ivanov Yu., Klopotov A., Teresov A., Petrikova E., Shugurov V., Song G., Tang G., Gromov V.</i>	
Effect of the cooling rate on phase transformations in a surface-alloyed layer of steel 58	
<i>Рааб Г.И., Кодиров И.С., Алешин Г.Н., Рааб А.Г., Ценев Н.К.</i>	
Влияние особенностей формирования градиентной структуры при интенсивной пластической деформации сплавов с различными типами кристаллической решетки 64	
<i>Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Frolov V.A.</i>	
Study on the influence of heat treatment modes on mechanical and corrosion properties of rolled sheet products from a new aluminum alloy, economically alloyed with scandium..... 76	

CONTENTS

NMSTU Anniversary	5
<i>Gun G.S., Korchunov A.G., Kornilov G.P., Kornilov S.N., Polyakova M.A.</i>	
Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University: key areas (scientific review)..... 5	
Mineral Mining	18
<i>Montyanova A.N., Trofimov A.V., Rummyantsev A.E., Vilchinskiy V.B., Nagovitsyn Yu.N.</i>	
Experience and efficiency of application of plasticized backfilling concrete 18	
Metal Casting	26
<i>Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M.</i>	
Increasing the lifetime of cast high-manganese steel liners for the semi-autogenous grinding mill 26	
<i>Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh.</i>	
Effect of chemical composition on the performance of centrifugally cast indefinite chilled cast iron rolls..... 32	
<i>Kolokolitsev V.M., Savinov A.S., Andreev S.M., Angold K.V.</i>	
Calculation of a thermal stress state, when heating a steel cylindrical object 37	
Metal Forming.....	46
<i>Gun E.I., Vakhitov A.R., Salnikov V.V., Gun I.G., Jon Ortueta, Agustin Anitua</i>	
Simulation of the axial oint pressing process 46	
Materials Science and heat treatment of metals	53
<i>Luca Pezzato, Alessandro Minotto, Katya Brunelli, Manuele Dabalà</i>	
Optimization of softening heat treatment for the Pt950Ru jewelry alloy 53	
<i>Ivanov Yu., Klopotov A., Teresov A., Petrikova E., Shugurov V., Song G., Tang G., Gromov V.</i>	
Effect of the cooling rate on phase transformations in a surface-alloyed layer of steel..... 58	
<i>Raab G.I., Kodirov I.S., Aleshin G.N., Raab A.G., Tsenev N.K.</i>	
Influence of special features of the gradient structure formation during severe plastic deformation of alloys with different types of a crystalline lattice 64	
<i>Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Frolov V.A.</i>	
Study on the influence of heat treatment modes on mechanical and corrosion properties of rolled sheet products from a new aluminum alloy, economically alloyed with scandium 76	

Наноматериалы и нанотехнологии	82
<i>Ashkeyev Zh.A., Andreyachshenko V.A., Abdiramanov S.T.</i>	
Determination of the stress state and the specific force during severe plastic deformation in a closed die	82
Стандартизация, сертификация и управление качеством	86
<i>Снимщиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А.</i>	
Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации	86
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	94
<i>Большанин Г.А., Скулина Е.Г.</i>	
Связь коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами	94
Сведения об авторах	104

Nanomaterials and Nanotechnologies.....	82
<i>Ashkeyev Zh.A., Andreyachshenko V.A., Abdiramanov S.T.</i>	
Determination of the stress state and the specific force during severe plastic deformation in a closed die.....	82
Standardization, Certification and Quality Management	86
<i>Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A.</i>	
Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization	86
Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems	94
<i>Bolshanin G.A., Skulina E.G.</i>	
Relationship between the coefficients of a six-terminal network with two input and four output terminals	94
Information about authors	104

К ЮБИЛЕЮ МГТУ ИМ. Г.И. НОСОВА

УДК 001.89

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-5-17>

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК МГТУ ИМ. Г.И. НОСОВА» (научный обзор)

Гун Г.С., Корчунов А.Г., Корнилов Г.П., Корнилов С.Н., Полякова М.А.

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

Аннотация. В статье, посвященной 85-летию Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, представлен анализ положения журнала «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» в рейтинге российских журналов, отмечено, что за 16 лет в журнале опубликованы статьи авторов из 28 стран мира, в редакционный совет входят известные ученые из 13 стран. На примере научного обзора статей, вышедших в Вестнике МГТУ им. Г.И. Носова в 2018 году, показаны основные направления журнала, востребованные мировым научным сообществом.

Ключевые слова: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, журнал «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова», рейтинг, научные направления.

Введение

Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г.И. Носова в 2019 году исполняется 85 лет, а журналу «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – 16 лет. МГТУ им. Г.И. Носова за годы своей деятельности вырос в крупный многопрофильный вуз российского значения.

В стенах опорного вуза России подготовлено свыше 80 тысяч высококвалифицированных специалистов, в настоящее время реализуется 848 образовательных программ, действуют 6 диссертационных советов, заключено более 60 договоров о сотрудничестве с вузами 28 государств. Университет осуществляет образовательную деятельность по 30 укрупненным группам направлений и специальностей высшего образования и 12 – среднего профессионального образования. По уровню СПО реализуется 51 образовательная программа по 23 специальностям. По уровням высшего образования:

- 423 образовательные программы по 51 направлениям подготовки;
- 107 образовательных программ по 8 специальностям;
- 138 образовательных программ по 34 направлениям подготовки магистратуры;

– 85 образовательных программ по 15 направлениям подготовки аспирантуры.

Коллектив вуза разрабатывает и реализует стратегические проекты: «Научно-образовательный центр новых материалов и iSmArt-металлургии»; «Комфортная среда»; «Время компетенций и профессионализма».

В 2017 году МГТУ им. Г.И. Носова победил в конкурсе Минобрнауки РФ на получение статуса Университетского центра технологического развития региона в рамках реализации приоритетного федерального проекта «Вузы как центры пространства создания инноваций».



Рис. 1. Председатель правительства РФ Д.А. Медведев знакомится с научными разработками МГТУ им. Г.И. Носова

На базе университета открыт научно-образовательный центр «Schneider Electric – МГТУ им. Г.И. Носова», созданный совместно с мировым лидером в области электроэнергетики и автоматизации «Schneider Electric»; действуют НИИ наносталей, НИИ металлургических технологий и обработки материалов давлением, НИИ комплексного освоения георесурсов; инновационно-технологический центр, R&D и студенческий бизнес-инкубатор. В период 2010–2016 гг. шесть проектов МГТУ им. Г.И. Носова становились победителями конкурса на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства (в соответствии с постановлением Правительства РФ № 218). В 2017 году вуз победил в конкурсе на получение грантов Правительства РФ по привлечению ведущих ученых в российские организации высшего образования (в рамках постановления Правительства РФ №220).

Университет активно сотрудничает с крупнейшими производственными предприятиями, в частности, с одним из крупнейших в мире – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», являющимся стратегическим партнёром университета в области подготовки кадров и проведения совместных научных исследований. Партнерами-работодателями являются также группа компаний ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», группа компаний ОАО «Мечел», группа компаний ЗАО «Русская медная компания» и др.

Помимо технических в МГТУ также реализуются гуманитарные направления подготовки, что позволяет говорить об университете как о классическом. На базе вуза действует Научно-исследовательский институт исторической антропологии и филологии, деятельность которого направлена на разработку междисциплинарных проектов в области классической археологии, истории, лингвистики, литературоведения, культуры России и зарубежья. В его состав входит одна из авторитетных в России и мире научно-исследовательская словарная лаборатория, деятельность которой направлена на улучшение подготовки специалистов-филологов, решение фундаментальных и прикладных проблем русистики в рамках лексикографии и фразеологии.

МГТУ им. Г.И. Носова обладает широким спектром программ международного взаимодействия с иностранными вузами-партнерами.

Студенты нашего университета проходят обучение в университетах Италии, Франции, Чехии, Сербии, Германии, Китая. Список стран постоянно расширяется. Своими глазами уви-

деть класс, в котором Галилео Галилей преподавал в итальянском университете с более чем 800-летней историей, узнать, сколько фамилий выдающихся ученых расположены на Эйфелевой башне в Париже и где находится самая большая площадь Европы, а также расширить профессиональные знания и практические навыки – такие возможности способствуют развитию профессионализма.

Основными достоинствами программ обмена, по рассказам студентов-участников, являются полезный опыт обучения в университете другой страны, самостоятельная организация жизни, новый взгляд на будущую профессию, незабываемые впечатления.

МГТУ им. Г.И. Носова в свою очередь привлекателен и для иностранных студентов. Ежегодно осуществляется прием иностранных граждан на программы обучения высшего образования из Франции, Италии, Великобритании, Бразилии и других стран. Университет регулярно организует встречи с прибывшими студентами, что является уникальной возможностью для общения и обмена опытом с носителями языка, для приобретения новых друзей.

Университет является учредителем и соучредителем 22 научных журналов, из которых 2 – «Черные металлы» и «CIS Iron and Steel Review» включены в Scopus – международную библиографическую и реферативную базу данных, 3 – «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова», «Проблемы истории, филологии, культуры» и «Электротехнические системы и комплексы» входят в Перечень ВАК, а также еще 17 сериальных научных журналов по актуальным проблемам в области гуманитарных и технических наук индексируются в базе данных РИНЦ.

«Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии,

стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Журнал издается с 2003 г., за прошедшие годы в нем опубликованы статьи авторов из 28 стран

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

В Перечень ВАК журнал вошел по группам следующих научных специальностей:

- 25.00.00 – науки о Земле;
- 05.16.00 – металлургия и материаловедение;
- 05.02.00 – машиностроение и машиноведение;
- 05.09.00 – электротехника.

Сведения о журналах содержатся в международных базах данных Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, а также в ВИНТИ и РИНЦ. В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Германии, Индии, Италии, Польши, Казахстана, Англии, Франции, Малайзии, Китая, Сербии, Словении.

Журнал «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» динамично развивается, в настоящее время он занимает по данным РИНЦ в рейтинге Science Index 355 позицию из 3557 журналов, 702 место из 3461 изданий в рейтинге по результатам общественной экспертизы, импакт-фактор по 2018 г. 1,02, что выше большинства российских журналов аналогичной тематики.

Представим анализ научных направлений и структуры журнала на примере обзора выпусков 2018 года. Можно отметить, что результаты анализа отражают типичную картину всех выпусков последних десяти лет жизни журнала.

Структура 4-х выпусков журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова» следующая: 38 статей (в том числе 10 статей зарубежных авторов); 140 авторов из 6 стран, 21 города, 36 предприятий и учреждений, в том числе 25 зарубежных авторов, 28 докторов наук. Мы видим, что авторский состав журнала достаточно широк по географии, представительству и квалификации.

Распределение 40 статей журналов 2018 года по тематике следующее:

- науки о земле – 13;
- металлургия и материаловедение – 19;
- машиностроение и машиноведение – 3;
- электротехника – 3.

Ниже приведем результаты анализа статей по направлениям.

Публикации в разделе «**Науки о земле**» соответствуют тематике научной школы, сформировавшейся в МГТУ, – Развитие теории комбинированной геотехнологии при разработке природных и техногенных ресурсов. В соответствии с научными направлениями опубликованные статьи содержат результаты исследований в областях: «Разработка полезных ископаемых» и «Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов».

Разработка полезных ископаемых

В статье Голик В.И. и Дмитрак Ю.В. [1] рассматривается актуальная проблема упрочнения минерально-сырьевой базы цветной металлургии путем вовлечения в производство недоступных для традиционной технологии переработки запасов технологически вскрываемых руд преимущественно цветных металлов. Авторами предлагается комбинирование традиционных технологий разработки с инновационными технологиями выщелачивания металлов. Данный подход 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.

Соколов И.В. в соавторстве с другими учеными [2] обосновал возможность расширения сырьевой базы кварцевой отрасли за счет вовлечения в отработку малых кварцевых жил с незначительными запасами. При этом первоочередной задачей является выбор способа отработки жил. В данном исследовании, на примере жилы №193 Кузнечихинского месторождения гранулированного кварца действующего Кыштымского ГОКа, комплексно рассматривается вопрос об эффективности и целесообразности отработки запасов малого месторождения ценного сырья подземным способом. Авторами выполнено сравнение подземного способа разработки с открытым способом и выявлены его экономические и экологические преимущества.

Учеными Хоменко О.Е. и Ляшенко В.И. [3, 4] представлены основные научные и практические результаты исследований повышения геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с раз-

личными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. Авторами получены исходные данные для проектирования подземной разработки сложноструктурных месторождений в зависимости от ориентации максимальных напряжений относительно выработки. Для изменения интенсивности влияния техногенного состояния массива, сформированного последовательно-сближенными выработанными пространствами, предложен способ разрушения породных целиков, разделяющих их полости, что позволяет снизить энергетическую напряженность массива до 6 раз и вторичную обводненность рудных залежей в лежащем боку шахтного поля. Это дает возможность проведения подготовительных выработок без применения крепей и увеличения размеров очистных камер в 1,5–2 раза.

В горной промышленности экологические требования существенно корректируют область рационального применения автомобильного транспорта и требуют применения более чистых и эффективных транспортных средств с меньшим объемом выбросов отработанных газов. Все острее встает проблема значительного сокращения дорогостоящего топлива, потребляемого карьерной техникой. Авторы статьи Хазин М.Л. и Штыков С.О. [5] обосновывают способы повышения энергоэффективности на открытых горных работах, в частности, перевод автотранспорта на потребление электроэнергии (применение троллейбусов). Выявлено, что в этом случае снижаются эксплуатационные расходы на транспортирование горной массы на 15–20%, а также исключается загазованность карьера.

В статье Чебан А.Ю., Хруниной Н.П. и Якименко Д.В. [6] анализируется возможность совершенствования комплекса горнотранспортного оборудования для работы совместно с фрезерными машинами. Предлагается на участках, расположенных вблизи перегрузочного комплекса, выемку и транспортировку горной массы вести посредством модернизированных колесных скреперов, а с удаленных участков выемку и транспортировку горной массы производить одноковшовыми погрузчиками и автосамосвалами. Выемка различными комплектами горного оборудования, в зависимости от дальности транспортировки разрыхленной фрезерными машинами горной массы, позволяет оптимизировать затраты на функционирование сборочного карьерного транспорта и повысить рентабельность горного производства.

Великанов В.С., Панфилова О.Р. и Усов И.Г. [7] рассмотрели вопросы прогнозирования пока-

зателей надежности рукояти карьерного экскаватора. В качестве основного показателя надежности ими принят показатель долговечности – средний ресурс. Целью исследования явилось обоснование расчетных зависимостей, позволяющих определить числовые характеристики ресурса рукояти экскаватора методами физической теории надежности. В результате разработаны расчетные формулы для определения среднего ресурса рукояти на основании измерений или расчетов действующих на нее нагрузок и, следовательно, возникающих в рукояти напряжений. Авторами предлагается методика для расчета численных значений ресурса рукояти карьерного экскаватора с учетом случайной природы этого параметра и изменяющихся эксплуатационных условий.

Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов

В статье Молмаковой М.С. и Кожанова А.К. [8] приведены результаты исследования по выщелачиванию меди из хвостов флотационного обогащения золотомедной руды месторождения Кумбель. Для выбора условий процесса выщелачивания меди изучены зависимости расхода серной кислоты, продолжительности, температуры, соотношения Т:Ж. Для интенсификации процесса сернокислотного выщелачивания предложено использовать ферромагнитный порошкообразный катализатор, введение которого способствует снижению кинетики выщелачивания и расхода растворителя, повышает уровень извлечения меди.

Под руководством профессора Чижевского В.Б. выполнено исследование флотиремости графита углеводородами и кислородсодержащими соединениями [9]. Изучено действие представителей основных классов углеводородов и кислородсодержащих соединений. Установлено, что наиболее флотоактивны алканы, алкены и ароматические углеводороды. Выявлены наиболее эффективные собиратели для графита – реагенты, содержащие, в основном, высокомолекулярные парафиновые и ароматические углеводороды.

Исследованиями Кожанова А.К., Молмаковой М.С. и Дуйшонбаева Н.П. [10] выявлено, что в условиях полного водооборота обогащательной фабрики, при неэффективной работе процессов обезвоживания, происходит насыщение циркулирующей воды шламами крупностью менее 5 мкм. В результате снижается производительность фильтровального оборудования и повышается влажность готовой продукции. Выполнен анализ минералогического состава фильтруемых продуктов, подбор реагента-флокулянта для эф-

фективного сгущения и фильтрации флотационных концентратов. Установлены причины забивания пор фильтрующих элементов и определены направления повышения производительности и достижения проектных показателей по влажности готовой продукции.

В статье Замотина П.А. и Лобанова В.Г. [11] представлены основные научные и практические результаты исследования повышения эффективности измельчения золотосодержащих пород в процессе рудоподготовки с применением поверхностно-активных веществ. Предложена методика подбора поверхностно-активных веществ через измерение краевого угла смачивания на поверхности минерала. Разработана технология интенсификации процесса измельчения породы, которая отличается от аналогов оборотным использованием раствора для экономии последнего, а также тем, что в качестве дополнительного разрушающего физического воздействия используются не электрические, а акустические импульсы (ультразвук). Авторами определены наиболее эффективные ПАВ, по выходу каждого класса после процесса измельчения, – КиСК-1, -3, -8, Antiprex D и ЛСН.

Авторы Панкратьев П.В., Коломоец А.В. и Пантелеев В.С. [12] исследуют один из перспективных золоторудных районов оренбургского Урала, в частности Кумакское месторождение, где развиты золото-кварцевая и золото-сульфидно-кварцевая формация в углеродистых сланцах. Для такого рода объектов привлекательной является технология выщелачивания золота из руд непосредственно на месте их залегания, без проведения добычных работ. Предлагается применить на Кумакском месторождении метод скважинного подземного выщелачивания, который позволит решить проблему пополнения золотых запасов за счет разработки месторождений, нерентабельных для механических методов добычи.

Отечественными специалистами и зарубежными учеными выполнен обзор [13] основных вариантов удаления сульфатов для техногенных сточных вод, экономическое и техническое сравнение доступных технологий. На основе продемонстрированного сравнения и экономических выгод установлено, что наиболее перспективными на сегодняшний день являются биологический и реагентные технологии. Предлагается эффективный вариант недорогой и предварительной обработки для сульфата - обработка известью при условии, что концентрация сульфата превышает 2000 мг/л.

В разделе «Металлургия и материаловедение» традиционно публикуются статьи ведущих ученых Российской Федерации, ближнего и дальнего зарубежья, посвященные результатам научных исследований по всем переделам металлургического производства: выплавка чугуна из железной руды в доменных печах, переработка чугуна в сталь, обработка металлов давлением, производство металлоизделий различного назначения. Тематика публикуемых в данном разделе статей довольно широка. В данный раздел включаются статьи, посвященные результатам моделирования металлургических процессов, большой блок представляют статьи, посвященные изучению особенностей структуро- и свойствообразования в металлах и сплавах при различных видах внешнего воздействия.

Как известно, доменное производство является первым переделом производственного цикла производства металлоизделий. В статье А.С. Харченко [14] представлены результаты диссертационных исследований, посвященные выявлению закономерностей поступления компонентов шихты по крупности из бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) в колошниковое пространство печи для разработки рациональных режимов загрузки железорудных материалов в доменную печь, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей плавки. Автором установлены закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, позволяющие равномерно распределять материалы по окружности печи. Разработанные математические зависимости позволяют установить очередность и равномерность поступления железорудных материалов по крупности из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных режимах загрузки. С практической точки зрения использование разработанных режимов загрузки на доменных печах ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, позволит повысить окружающую равномерность распределения шихтовых материалов по крупности, что обеспечит увеличение технико-экономических показателей работы доменной печи.

Разработка режимов технологических процессов металлургической отрасли базируется на использовании различных методов математического моделирования. Так, в работе [15] решена задача оптимизации закупки угольной шихты и подборе долевого участия поставщиков, обеспечивающего минимальную ее стоимость при технологически

заданном качестве кокса. Результатом проведенного исследования являются разработка методики оптимального потребления угольной шихты, определение нелинейных статистических взаимосвязей между показателями качества угольной шихты и показателями качества получаемого кокса, определение принципиальной возможности построения модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Использование компьютерной программы LVM FLOW позволило определить наиболее вероятные места образования дефектов и зависимость количества дефектов отливки от технологических параметров [16]. Авторами предложена 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, что является, несомненно, важным фактом в литейной практике.

Математическое моделирование также используется для определения оптимальной формы используемого оборудования и оснастки. Так, в работе [17] представлены результаты расчета в среде математического пакета MathCad 15 величины моментов и возникающих от их действия напряжений в используемых в метизной промышленности пластиковых катушках для смотки проволоки. Преимуществом применяемой модели является возможность визуализации полученных зависимостей в виде графиков. Основным результатом исследований стало предложение выполнять дополнительные ребра жесткости, расположенные на внешней стороне фланца катушки, в соответствии с возможными направлениями главных напряжений, под углом к радиальным и кольцевым ребрам жесткости.

Прогрессивное развитие техники и технологий, необходимость управления свойствами конструкционных материалов являются мощным стимулом для разработки новых составов сталей и сплавов, обладающих уникальными свойствами с учетом условий их эксплуатации.

В статье [18] проведен сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л при использовании модификатора различной крупности. Разработанный авторами диффузионный раскислитель алюмосодержащий РДА отличается высокой дисперсностью частиц, эффективнее раскисляет металл по сравнению с модификатором L-Cast® 5,3. Это позволяет повысить износостойкость стали за счет формирования однородной микроструктуры, улучшить жидкотекучесть стали и обеспечить лучшую заполняемость форм.

В рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» совместно с ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при поддержке Минобрнауки России, разрабатывается опытно-промышленная технология производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката для импортозамещения материалов, в том числе криогенных, используемых в условиях сверхнизких критических температур, повышенной коррозионной активности, а также в арктических широтах. В статье [19] представлены результаты исследования влияния режимов многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры листового проката криогенной конструкционной стали, обладающей повышенной хладостойкостью. Проведенные исследования позволили установить влияние режимов термической обработки на особенности формирования микроструктуры стали марки 0Н9А, содержащей 9% Ni. Полученные результаты представляют научный интерес для понимания особенностей механизмов разрушения при криогенных температурах исследуемых сплавов, применяемых для изготовления резервуаров для хранения и транспортировки сжиженного газа.

Предложен и научно обоснован новый способ получения биметаллической проволоки из драгоценных металлов для ювелирных цепей, защищенный патентом Российской Федерации [20]. С использованием разработанных режимов проведены экспериментальные исследования по получению биметаллической проволоки, у которой в качестве сердечника использован сплав серебра 925 пробы, а в качестве оболочки – сплав золота 585 пробы. Опытно-промышленная апробация технологии получения биметаллической проволоки в ОАО «Красцветмет» для изготовления ювелирной цепи типа «Ромб двойной» позволила получить качественную продукцию.

Доказательства возможности использования коррозионностойкой и жаропрочной стали 13Х12Н2В2МФ для изготовления запорной арматуры и деталей нефтяных насосов представлены в статье [21]. Технические условия для сталей этого класса сводятся к требованию стойкости по отношению к коррозии, высоким значениям ударной вязкости KCV при – 60°C, а также пределов текучести и прочности. Сложность ситуации заключается в том, что изготавливаемые детали могут иметь разную массу, поэтому для разработки режимов термической обработки, обеспечивающей необходимое сочетание меха-

нических свойств, была проведена серия экспериментов. Доказано, что достигнутые величины механических свойств исследуемой марки стали удовлетворяют требованиям к изделиям, причём имеется запас по ударной вязкости, который важен для массивных деталей.

Широкий круг вопросов, связанных с развитием методов, основанных на применении внешних воздействий различной физической природы, и изучение их влияния на свойства и структуру обрабатываемых сталей представлен в статьях [22-24]. Так, установлены закономерности воздействия импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации [22]. В результате проведенных исследований было установлено, что импульсное магнитное поле является эффективным внешним энергосиловым фактором, способным влиять на энергетическое и динамическое состояние расплава, которое изменяет статическое внутреннее давление в парамагнитном расплаве. Проведенные расчеты показывают, что магнитное поле увеличивает значение потенциала Гиббса для жидкой фазы, что ведет к возрастанию скрытой теплоты фазового перехода. Полученные результаты могут быть использованы при анализе экспериментальных данных по кристаллизации парамагнитных расплавов под действием магнитного поля и без него в управляемом кристаллизаторе, а также при разработке новых методов, способов или технологий получения материалов с заранее заданными физико-механическими свойствами. Аэротермоакустическая обработка может использоваться для увеличения прочностных характеристик быстрорежущих сталей [23]. Исследование особенностей микроструктуры циркониевого сплава в наковальнях Бриджмена [24] позволило установить значение стабилизирующей температуры для метастабильной фазы, что может быть использовано для прогнозирования конструкционной долговечности оборудования, применяемого в аэрокосмической и атомной индустрии.

Изучение особенностей микроструктуры стали на различных масштабных уровнях является одним из ключевых аспектов современного материаловедения, поскольку каждый элемент структуры оказывает влияние на механические свойства материалов, что в свою очередь предопределяет показатели надежности и долговечности металлоизделий. Новизна результатов работы [25] заключается в установлении закономерностей формирования, особенностей структуры и кинетики образования и поведения углерода при образовании бескарбидного бейнита в

стали, содержащей мас. %: 0,98 C, 1,52 Si, 1,91 Mn, 1,44 Cr, 0,11% V. Авторы установили причины резкого различия между рассчитанными для тетрагонального феррита и наблюдаемыми концентрациями углерода. Практическая значимость полученных результатов 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.

В отдельное научное направление следует выделить цикл статей, посвященных электрохимической обработке алюминиевых сплавов [26-28]. Известно, что технический алюминий с повышенным содержанием железа, кремния и других примесей из-за низких эксплуатационных характеристик не может найти применение в промышленности. С этой точки зрения разработка новых составов сплавов на основе алюминия является весьма актуальной задачей. Результаты исследований показали, что добавки лития незначительно увеличивают теплоту, энтальпию и энтропию исходного сплава АЖ2.18 и не влияют на величину энергии Гиббса [26]. Показано [27], что легирование алюминиево-магниевого сплава редкоземельными металлами приводит к увеличению прочностных свойств, коррозионной стойкости, электросопротивления и температурного порога работы. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме исследовано анодное поведение сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием [28]. Получены данные об особенностях коррозионного разрушения данного сплава в электролите NaCl различной концентрации. Изучение природы коррозионного поведения сплавов данной системы является важным шагом к познанию процессов их рафинирования и получению материалов с заданными механическими свойствами.

Трубная промышленность является одной из передовых отраслей российской металлургии с точки зрения используемых технологий, оборудования и производимой продукции. Работы [29-31] посвящены изучению ряда теоретико-экспериментальных аспектов производства труб. В статье [29] предложен химический состав трубной стали, что является исходной информацией при проектировании технологических режимов контролируемой прокатки. Тонкостенные трубы из коррозионностойких сталей находят широкое применение в авиации, ракетостроении, космической технике, судостроении, машиностроении, черной и цветной металлургии, атом-

ной энергетике, химической, нефтяной и газовой промышленности и других отраслях, поэтому изучение особенностей производства данных труб гибкой является актуальной задачей [30]. Использование аналитических соотношений для определения остаточных напряжений, представленных в статье [31], позволяет прогнозировать поведение трубных металлоизделий в условиях эксплуатационных нагрузок и предотвращать их разрушение.

Как известно, многороликовые калибры позволяют реализовать преимущество деформации металла, которое заключается в создании объемного напряженно-деформированного состояния металла, что повышает его пластичность, увеличивает степень деформации за один проход и при этом улучшает физико-механические свойства готовых изделий. Так, в работе [32] описан алгоритм определения энергосиловых параметров волочения металла в роликовых калибрах на основе методики дискретизации очага деформации с помощью аналитических уравнений описания формоизменения. Это позволило разработать теоретическое обоснование технического решения при создании нового экономически эффективного технологического процесса волочения провода контактного типа МФ из меди и ее сплавов по ГОСТ Р 55647-2013 в вдвоенном комплекте роликовых калибров из круглой заготовки за один проход. Внедрение данного процесса в промышленное производство позволит сократить энергозатраты за счет снижения количества фасонных переходов при волочении, а также повысить стойкость инструмента за счет замены трения скольжения на трение качения.

Статьи, опубликованные в разделе «**Машиностроение и машиноведение**», посвящены практикоориентированным исследованиям процессов и объектов металлургических машин и оборудования. Научно-технические результаты, содержащиеся в этих статьях, обладают практической значимостью и представляют интерес как для специалистов промышленных предприятий, так и для ученых и обучающихся высших учебных заведений по направлению «Технологические машины и оборудование».

В статье Лехова О.С. и др. [33] рассматриваются актуальные вопросы разработки и исследования компактной установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации при получении листовой стали для производства сварных труб. Одним из основных достоинств установки является возможность достижения высокого качества продукции за счет литья тонкого сляба и его обжатия стенками-бойками с

высокой степенью деформации в узком температурном интервале, что обеспечивает значительную проработку литой структуры и однородную мелкозернистую структуру металла.

Технологические режимы обработки и параметры оборудования определены, исходя из результатов компьютерного моделирования в комплексе ANSYS. Практическая реализация продемонстрирована на примере получения листов из стали марки 09Г2С сечением 3÷8х2250 мм для сварных труб.

В статье Зайдеса С.А. [34] приводятся результаты многолетних исследований по разработке новых способов поверхностного пластического деформирования и технологического оборудования для их реализации. В основе предлагаемых способов обработки использован принцип центробежного упрочнения и упрочнения роликом с измененной кинематикой вращения. Заслуживает внимания оригинальная конструкция центробежного обкатника, позволяющая регулировать рабочее усилие, генерируемое центробежной силой. В процессе исследований установлены основные технологические факторы поверхностной упрочняющей обработки, оказывающие существенное влияние на качество обрабатываемых материалов. Результаты работы представляют несомненный интерес для специалистов машиностроительных предприятий, занимающихся отделочно-упрочняющими операциями.

Статья Попова И.П., Кубаревой С.Ю. [37] посвящена исследованию автобалансировки вибрационных машин. Основное внимание уделено рабочим органам машин, совершающим линейные колебания с высокой для их массы частотой, с целью снижения непроизводительной механической реактивной мощности и повышения энергоэффективности. В ходе исследований установлено минимальное число рабочих органов, совершающих линейные колебания в сбалансированном механизме с постоянным приведенным моментом инерции. Приведены примеры автобалансировки механизмов с постоянным приведенным моментом инерции с различным количеством рабочих органов.

Статьи, опубликованные в разделе «**Электротехника**», посвящены, как правило, наиболее актуальным, практически значимым проблемам современной энергетики, в том числе и на металлургических предприятиях. Их отличает высокий научный уровень в постановке и решении конкретных научно-технических задач.

Заслуживает внимания статья Николаева А.А. – заведующего кафедрой, и его аспирантов [36].

Эта статья интересна тем, что посвящена проблемам качества электроэнергии в Турции, где почти 10 лет успешно работает метал-лургический завод «ММК-Metalurji». Начиная с 2011 года – первого рабочего визита Николаева А.А. с группой студентов и последующих поездок на этот объект (всего их было шесть) с повзрослевшими магистрантами и аспирантами, авторским коллективом собран и обработан богатейший материал об особенностях климатических условий горных прибрежных районов Турции и их воздействии на протяженные линии электропередач 380 кВ; установлены зависимости глубины и частоты провалов напряжения от сезонных грозных разрядов. Это позволило сформулировать новые схемотехнические принципы построения цеховых систем электроснабжения, обеспечивающие их надежное функционирование при провалах напряжения во внешней питающей сети.

Статья профессора Мугалимова Р.Г. [37] очень полезна для научно-производственных коллективов. Асинхронный двигатель (АД), изобретенный русским инженером М.О. Даливо-Добровольским почти 130 лет назад, сегодня является самым массовым во всех отраслях промышленности. Асинхронные двигатели потребляют 2/3 всей электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране. На протяжении последних 20 лет творческий коллектив Мугалимова Р.Г. последовательно и целенаправленно решает важную народно-хозяйственную задачу – повышение энергоэффективности АД за счёт инновационных разработок и усовершенствования конструкции обмоток. В рассматриваемой статье дана методика оценки магнитных свойств электротехнической стали двигателей при проведении капитального ремонта. Эта методика весьма необходима для окончательного принятия решения в каждом конкретном случае – ремонтировать или утилизировать АД. Безусловно, результаты исследований будут интересны и полезны специалистам-энергетикам во всех отраслях промышленности.

Интересна статья учёных ЮУрГУ о применении термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии [38]. В ходе исследований предложена методика построения модели элементарной термоэлектрической ячейки, выполнен анализ различных статических режимов генерации электроэнергии. Термоэлектрические модули Пельтье в режиме генерации электрической энергии являются экологически чистым источником энергии, позволяют получить с одного генераторного модуля (40×40×10 мм) электрическую энергию мощностью до 40 Вт. Применение термоэлектрических

модулей обладает целым рядом преимуществ: отсутствие движущихся и изнашивающихся частей; малый размер и вес; устойчивость к механическим воздействиям. Кроме того, твердотельная герметичная конструкция теплового насоса на основе модуля Пельтье позволяет отводить тепло из герметично закрытых объемов, например, для охлаждения электронных компонентов вычислительной техники.

Заключение

Таким образом, журнал «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова» является солидным журналом, с высоким импакт-фактором, значительным охватом авторов по географическому признаку, квалификации, научным знаниям. Некоторое преобладание металлургической и горной тематики объясняется творческими контактами с научными школами магнитогорского университета.

Список литературы

1. 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.
2. Целесообразность подземной отработки малых кварцевых жил / Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 4–13.
3. Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Повышение геомеханической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 14–21.
4. Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Геодинамическая безопасность при увеличении глубины разработки рудных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 4–12.
5. 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.
6. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П., Якименко Д.В. Совершенствование комплекса горнотранспортного оборудования для работы совместно с машинами послыного фрезерования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 40–45.
7. Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 13–20.
8. Молмакова М.С., Кожонов А.К. Способ получения меди из хвостов флотации золотомедной руды // Вестник Магнитогорского государственного технического уни-

- верситета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 22–28.
9. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В., Гмызина Н.В. Флотиримость графита углеводородами и кислородсодержащими соединениями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 5–16.
10. Кожонов А.К., Молмакова М.С., Дуйшонбаев Н.П. Выявление возможных причин проблем при обезвоживании продуктов флотационного обогащения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С.17–24.
11. Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С.25–32.
12. Панкратьев П.В., Коломоец А.В., Пантелеев В.С. Разработка остаточных запасов Кумакского золоторудного месторождения (Оренбургская область) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 33–39.
13. Обзор методов удаления сульфатов из техногенных вод горных предприятий / Абдрахманова Р.Н., Орехова Н.Н., Фишер Х.-Б., Абдрахманов Р.Н., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 21–29.
14. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 46–56.
15. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / Липатников А.В., Шмелёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 30–38.
16. 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.
17. Анализ особенностей напряженного состояния фланца намоточного устройства как кольцевой пластины / Конев С.В., Михайлец В.Ф., Тефтелев И.Е., Файнштейн А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 98–102.
18. 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.
19. Исследование влияния многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры криогенной конструкционной стали / Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Гущина М.С., Степанов П.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 29–40.
20. Исследование технологии получения биметаллических деформированных полуфабрикатов при производстве ювелирных цепей из сплавов красного золота / Сидельников С.Б., Чибисова Е.С., Лопатина Е.С., Дитковская Ю.Д., Биндарева К.А., Лопатин В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 39–44.
21. Влияние межкритической закалки на механические свойства стали 13X11H2B2MФ / Мирзаев Д.А., Безик А.С., Созыкин С.А., Маковецкий А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 45–49.
22. Воздействие импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации / Долгушин Д.М., Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Риве В.В., Долгушина О.В., Кайпер А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 57–66.
23. Атрошенко С.А. Влияние азотермоакустической обработки на характеристики быстрорежущих сталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 50–56.
24. Структурно-фазовые превращения, происходящие в псевдомонотонном цирконии при тепловой деформации в камере Бриджмена / Егорова Л.Ю., Хлебникова Ю.В., Пацелов А.М., Пилюгин В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 120–128.
25. 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.
26. Влияние литья 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.
27. Норова М.Т., Вазилов Н.Ш., Ганиев И.Н. Влияние цезия, празеодима и неодима на электрохимические характеристики алюминиевого сплава АМг6 в нейтральной среде NaCl // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 41–47.
28. О коррозионном потенциале сплава АЖ5К10, модифицированного щелочноземельными металлами, в среде электролита NaCl / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М., Ганиева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 109–119.
29. Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита / Полецков П.П., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Никитенко О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 67–77.
30. Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскаты-

- ванием / Бобылев А.В., Козлов А.В., Максимов С.П., Халиулин Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 87–97.
31. Колмогоров Г.П., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В. Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 103–108.
 32. Славин В.С., Норец А.И., Жиркин Ю.В. Методика определения энергосиловых параметров при волочении профилей типа МФ в сдвоенных роликовых калибрах за один проход // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 78–86.
 33. Исследование напряженного состояния системы бойки-полоса при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 48–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-48-53>
 34. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>
 35. Попов И.П., Кубарева С.Ю. Автобалансировка вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144>
 36. 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.
 37. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте, модернизации и утилизации двигателей асинхронных электроприводов / Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Одинцов К.Э. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 145–159.
 38. Моделирование термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии в среде ANSYS Workbench / Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 57–64.

Поступила 15.02.19

Принята в печать 25.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-5-17>

VESTNIK OF NOSOV MAGNITOGORSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY: KEY AREAS (scientific review)

Gennady S. Gun – DSc (Eng.), Professor, Adviser to the Rector

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

Alexey G. Korchunov – DSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Design

and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Vice Rector for International Affairs

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

ORCID 0000-0002-2844-8283

Gennady P. Kornilov – DSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Power Supply

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

ORCID 0000-0002-2451-3850

Sergey N. Kornilov – DSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Logistics

and Transportation System Management

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

Marina A. Polyakova – DSc (Eng.), Associate Professor,

Professor of the Department of Materials Processing Technologies

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Abstract. The paper, devoted to the 85th anniversary of Nosov Magnitogorsk State Technical University, analyzes *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University* with regard to the ranking of Russian journals. It is stated that in the past 16 years the journal published papers of authors from 28 countries; the editorial board includes well-known scientists from 13 countries. A scientific review of papers issued in 2018 is used as an ex-

ample to show key areas of the journal, which are important for the world scientific community.

Keywords: Nosov Magnitogorsk State Technical University, *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, ranking, research areas.

References

1. 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.
2. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A. Economic feasibility of underground development of small quartz veins. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 4–13.
3. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Improved geomechanical safety in the underground mining of complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 14–21.
4. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Geodynamic safety when increasing the depth of underground mining of ore deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 4–12.
5. 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.
6. Cheban A.Yu., Khrunina N.P., Yakimenko D.V. Enhanced mining and hauling equipment complex to be used together with surface miners. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 40–45.
7. Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G. Analysis of the dipper handle durability. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13–20.
8. Molmakova M.S., Kozhonov A.K. Method of extracting copper from flotation tailings of gold and copper ore. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 22–28.
9. Chizhevsky V.B., Fadeeva N.V., Gmyzina N.V. Floatability of graphite with hydrocarbons and oxygen containing compounds. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 5–16.
10. Kozhonov A.K., Molmakova M.S., Duyshonbaev N.P. Identifying possible causes of problems in the dewatering of flotation products. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 17–24.
11. Zamotin P.A., Lobanov V.G. Intensification of gold ore grinding process with the help of surfactants and additional ultrasonic. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 25–32.
12. Pankratiev P.V., Kolomoets A.V., Panteleev V.S. Development of the remaining reserves of the Kumak gold deposit (Orenburg region). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 33–39.
13. Abdrakhmanova R.N., Orekhova N.N., Fischer H.-B., Abdrakhmanov R.N., Nefedjev A.P., Kossov D.Y. Methods of sulfate removal from mining waste waters: overview. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 21–29.
14. Kharchenko A.S. Size related charging patterns dictated by charging conditions when components are fed from the BLT charging hopper to the furnace top. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 46–56.
15. Lipatnikov A.V., Shmelyova A.E., Stepanov E.N., Shnyder D.A. Mathematical modeling and optimization of raw coal consumption in PJSC «MMK». *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 30–38.
16. Sushko T.I., Turishev 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.
17. Konev S.V., Mikhaylets V.F., Tefteliev I.E., Fainshtein A.S. Analysis of the characteristic stress state of the coil flange as a circular plate. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 98–102.
18. Chaykin A.V., Chaykin V.A., Lozov V.S., Kasimgazinov A.D., Karman Yu.V., Bykov P.O. Comparative analysis 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.
19. Poletskov P.P., Denisov S.V., Nikitenko O.A., Gushchina M.S., Stekanov P.A. Understanding the effect of multi-stage heat treatment on the microstructure of cryogenic structural steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 29–40.
20. Sidelnikov S.B., Chibisova E.S., Lopatina E.S., Ditskovskaya Yu.D., Bindareva K.A., Lopatin V.A. Study of the technique to produce bimetallic deformed semi-finished products for jewelry chains made from red gold. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 39–44.
21. Mirzaev D.A., Bezik A.S., Sozykin S.A., Makovetskii A.N. Effect of intercritical quench hardening on mechanical properties of 11% CR steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 45–49.
22. Dolgushin D.M., Dubsky G.A., Nefedev A.A., Rive V.V., Dolgushina O.V., Kayper A. Effect of pulsed magnetic field on paramagnetic melt during crystallization. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 57–66.

23. Atroshenko S.A. Changes in the characteristics of tool steel after aerothermoacoustic treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 50–56.
24. Egorova L.Yu., Khlebnikova Yu.V., Patselov A.M., Pilyugin V.P. Structural phase transformations in zirconium pseudo-single crystals subjected to thermal deformation in the bridgeman chamber. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 120–128.
25. Mirzayev 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.
26. Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ibrohimov 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.
27. Norova M.T., Vazirov N.Sh., Ganiev I.N. Effect of cerium, praseodymium and neodymium on the electrochemical properties of the AMg6 aluminium alloy in the NaCl neutral medium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 41–47.
28. Yakubov U.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M., Ganieva N.I. On the corrosion potential of AlFe5S10 alloy inoculated with alkaline-earth metals in the NaCl medium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 109–119.
29. Poletskov P.P., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A. Understanding the effect of controlled rolling regimes for pipe steel on the structural condition of hot-deformed austenite. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 67–77.
30. Bobylev A.V., Kozlov A.V., Maksimov S.P., Khaliulin E.V. Understanding the thermal phenomena occurring during pipe bending and rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 87–97.
31. Kolmogorov G.L., E.V. Kuznetsova E.V., Khabarova D. Relaxation of residual stresses and precision of steel pipes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 103–108.
32. Slavin V.S., Norets A.I., Zhirkin Yu.V. Method for defining drawing force parameters when drawing MF type sections in double gauge rollers in one. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 78–86.
33. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Understanding the stress state of the movable platen and the strip in the production of steel sheets on a combined continuous casting and rolling line. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 48–53.
34. Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139.
35. Popov I.P., Kubareva S.Yu. Autobalanced vibration. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 140–144.
36. 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.
37. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Enhanced energy efficiency and resource saving in the overhauling, retrofitting and disposal of induction motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 145–159.
38. Romanov K.V., Motorin A.V., Solomin E.V., Kovalyov A.A., Diachenko I.I., Galeev R.G. Simulating the Peltier thermoelectric module in the electricity generation mode in the ANSYS Workbench environment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 57–64.

Received 15/02/19

Accepted 25/02/19

Образец для цитирования

Основные направления журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова» (научный обзор) / Гун Г.С., Корчунов А.Г., Корнилов Г.П., Корнилов С.Н., Полякова М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 5–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-5-17>

For citation

Gun G.S., Korchunov A.G., Kornilov G.P., Kornilov S.N., Polyakova M.A. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University: key areas (scientific review). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 5–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-5-17>

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.27

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25>ОПЫТ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙМонтянова А.Н.¹, Трофимов А.В.², Румянцев А.Е.², Вильчинский В.Б.², Наговицин Ю.Н.³¹ООО «Технологии закладки выработанного пространства», Москва, Россия²ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия³Заполяный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Системы разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями широко распространены при добыче весьма ценных руд в сложных горно-геологических условиях в части управления горным давлением и поддержания устойчивости выработок, в особенности на удароопасных рудниках. Совершенствование составов закладочных бетонов – тема весьма актуальная, т.к. в производственной себестоимости добычи руды системами разработки с закладкой выработанного пространства на долю закладочных работ приходится 20–25%. Снижение расходов на закладочные работы достигается применением различных типов безцементных вяжущих, вовлечением различного рода химических добавок и отходов промышленности. Особенности использования химических добавок в условиях Крайнего Севера создают перечень существенных ограничений, что делает производство пластифицированных закладочных смесей вопросом весьма сложным. **Цель работы:** в рамках выполненной работы целью являлось снижение себестоимости 1 м³ закладочного бетона. При этом граничными условиями являлись минимальные корректировки существующей технологии, рецептуры составов и производительности мельниц. **Используемые методы:** снижение себестоимости закладочного бетона достигается введением химической добавки лигносульфоната технического (ЛСТ), которая позволяет снизить водопотребность смесей на 40–60 л на 1 м³ без изменения подвижности смеси и ухудшения реологических характеристик. В свою очередь, более оптимальное водоцементное отношение позволяет повысить прочностные показатели или при снижении расхода вяжущего выйти на регламентные показатели прочности. **Новизна:** в работе отражены результаты исследований применения пластифицированных добавок при производстве закладочных смесей. **Результат:** многочисленными лабораторными и опытно-промышленными экспериментами на рудниках АК «АЛРОСА» (внедрены в 2005 году) и ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» достигнуто снижение расхода портландцемента до 50 кг/м³. **Практическая значимость:** на основе положительных результатов опытно-промышленных испытаний разработан технологический регламент на техническое перевооружение ПЗК рудников Талнах и ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Ключевые слова: пластифицирующие добавки, лигносульфонат технический, подземная разработка, закладочные комплексы, твердеющие закладочные смеси, технологии закладки выработанного пространства, искусственный массив.

Введение

Системы разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями широко распространены при добыче весьма ценных руд сложной морфологии и в сложных горно-геологических условиях в части управления горным давлением и поддержания устойчивости выработок [1, 2]. Особенно актуально применение закладочных бетонов на удароопасных рудниках, в том числе это подтверждают лучшие мировые практики [3, 4].

Совершенствование составов закладочных бетонов – тема весьма актуальная, т.к. в производственной себестоимости добычи руды системами разработки с закладкой выработанного пространства на долю закладочных работ приходится 20–25%. Невысокие требования к прочностным показателям позволяют эффективно применять различные типы безцементных вяжущих в твердеющих композициях [5–8], а также различного рода химических добавок.

Несмотря на широкий спектр добавок различного назначения, эффективно применяемых в строительстве, при производстве закладочных смесей данные вещества используются крайне редко. Отмеченное обусловлено тем, что закла-

дочные смеси имеют свои специфические особенности, которые вносят существенные коррективы в применение добавок:

1. Подвижность (растекаемость) закладочных смесей значительно выше, чем у строительных растворов и бетонов.

2. Содержание тонкодисперстных фракций (менее 0,14 мм) в используемом заполнителе закладочных смесей составляет ~ 30% и более, что значительно превышает показатели для заполнителей бетонов (не более 2%, ГОСТ 8736 и 8267).

3. Водоцементное (В/Ц) отношение, определяющее прочность, у бетонов и растворов варьирует от 0,2 до 1,0; в закладочных смесях – от 1,0 до 4,0. Причем, если в строительстве зависимость прочности от В/Ц близка к линейной, то в закладочных смесях – выраженная квадратичная и влияние В/Ц на прочность в граничных диапазонах кривой не существенно.

4. Содержание цемента в закладочных смесях относительно бетонов – пониженное (50–300 кг/м³), т.к. требуемая прочность характеризуется невысокими показателями – от 0,5 до 10 МПа.

5. В силу необходимости транспортирования закладочных смесей на значительные расстояния по трубопроводу в самотечном режиме недопустимо применение добавок, сокращающих сроки схватывания смеси или «темпа старения», как принято характеризовать данное свойство у закладчиков.

6. Закладочные смеси и добавки, как составляющая их часть, не должны выделять в шахтную атмосферу опасные для здоровья вещества.

7. Объем производства закладочных смесей значительно превышает объемы производства бетонов и растворов в строительстве, что обуславливает необходимость отказа от перемерзающих добавок, требующих организации масштабных теплых складов для хранения добавки, т.к. это сопряжено со значительными капитальными затратами. Вместе с тем опытом работы с перемерзающими материалами в северных условиях выявлено, что зачастую даже при наличии теплых складов композиции полностью направляются в отход после аварийных отключений электроснабжения. Рисковать работоспособностью закладочных комплексов и соответственно планами добычи не представляется возможным. Следовательно, для рудников, расположенных в условиях Крайнего Севера и поставляющих материалы по навигации, недопустимо применение жидких добавок, утрачивающих свои свойства при перемерзании.

Материалы и методы исследования

Под руководством одного из авторов статьи, лабораторией технологий закладки АК

«АЛРОСА» выполнялись многочисленные эксперименты по опробованию известных в строительстве новинок-добавок в закладочных смесях. Испытания добавок проводились в составах закладочных смесей на основе портландцемента марки М400 Якутского цементного завода. В качестве заполнителя использовались мелкозернистый песок месторождения «Прикарьерное» или диабазовые породы, подготовленные по «мельничной» технологии.

Установлено, что по сравнению со строительными смесями в закладочных смесях использование лигносульфоната технического (ЛСТ) более эффективно, чем применение добавок последнего поколения (рис. 1, 2). Эффективность ЛСТ основана на адсорбционном взаимодействии не только с продуктами гидратации цемента, но и с тонкодисперсными частицами закладочных смесей. Отмеченное сопровождается сокращением водосодержания минеральных систем и увеличением их прочности при снижении расхода цемента. Кроме того, лигносульфонаты характеризуются значительно меньшей стоимостью по сравнению с различными добавками нового поколения.

Лигносульфонаты технические (ЛСТ) – побочный продукт переработки древесины. Состав по компонентам, % мас.: лигносульфонат натрия – 66–71, сахара – 10–12, натриевые соли сернистой кислоты 12–14. На закладочные комплексы поставляются порошкообразные материалы, растворимые в воде.

Внедрение и успешное использование лигносульфоната технического (ЛСТ) при производстве закладочных смесей на алмазодобывающих рудниках АК «АЛРОСА» подтверждено 16-летней практикой [9]. В 2000 г. на руднике «Интернациональный» выявлено, что применение лигносульфоната технического позволяет увеличить растекаемость закладочных смесей в выработанном пространстве с 40 до 80 м, снижает водоотделение от закладочного массива в два раза и повышает прочность закладки эквивалентно ~ 50 кг портландцемента. В условиях рудника «Айхал» (с 2005г.) дополнительно зафиксировано, что смеси с ЛСТ самотеком освобождают трубопровод до начала его промывки (угол наклона горизонтального участка 2о). На руднике «Мир» добавка ЛСТ применялась с 2009г. (до его закрытия в августе 2017г.) в составах закладочных смесей на комплексном вяжущем, получаемом из цементного клинкера и цеолитовых пород.

В 2015–2017 гг. ООО «Технологии закладки» совместно с ООО «Институт Гипроникель» раз-

работали пластифицированные закладочные смеси для рудников Талнаха ПАО «ГМК «Норильский никель» [10]. На данных горных предприятиях наибольший удельный вес имеют составы закладочных смесей на основе ангидрита – АШЦ (ангидрито-шлако-цементные) – 28,9% и АШЩЦ (ангидрито-шлако-цементные со щебнем) – 29,6%, далее ШЩЦ (шлако-цементные со щебнем) – 26,4% и ШХЦ (шлако-цементные с хвостами обогащения) – 15,1%. Система разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства на рудниках Талнаха и требования к качеству смесей описаны в работе [3].

Затраты на закладку составляют порядка 4 млрд руб. в год. В производственной себестоимости добычи руды системами разработки с закладкой выработанного пространства на долю закладочных работ приходится 21–22%. В себестоимости закладки затраты на материалы составляют 60–61%. В структуре затрат на материалы на цемент относится 45–51%; ангидрит – 30–37%; щебень – 1–12%; граншлак – 2%, хвосты обогащения – 11% (используются только на шахте «Комсомольская»). Стоимость материалов для производства закладочных смесей, руб./т (в ценах 2017 г.): цемент – 5759; ангидрит – 1428; щебень – 425; граншлак – 39; хвосты обогащения – 110.

В 2016 г. выполненными лабораторными экспериментами установлено, что добавка лигносульфоната технического (ЛСТ) позволяет без потери прочности закладки сократить расход цемента в шлако-цементных твердеющих смесях

марки М30 на 25%, а в ангидритовых составах – на 10%. В закладочных смесях на основе хвостов обогащения Талнахской обогатительной фабрики эффективное использование пластифицированных добавок не зафиксировано.

В 2017 г. на шахте «Скалистая» проведены опытно-промышленные испытания (далее – ОПИ) новых пластифицированных закладочных смесей. В процессе ОПИ использовались следующие материалы: шлак гранулированный никелевый; цемент Норильского цементного завода ПЦ300-Д20; щебень карьера «Скальный»; ангидрит шахты «Ангидрит»; порошкообразный лигносульфонат технический (ЛСТ).

Закладочный комплекс шахты «Скалистая» – самый новый из всех закладочных комплексов Заполярного филиала. Его строительство завершено в 2015г. Технологическая линия производства твердеющих смесей оснащена двумя шаровыми мельницами СМ 4х13,5 м (рис. 3), системой автоматизации с автоматическими дозаторами материалов и показаниями расходомеров материалов на мониторе оператора ПЗК.

По рекомендациям производителей в процессе ОПИ производительность мельницы выдерживалась 160 м³/ч – на составах без щебня и 130 м³/ч – на составах со щебнем. Подача пластифицирующей добавки в технологию осуществлялась со специально организованной площадки (отм.+15м), в отдозированном сухом виде непосредственно в приемную точку мельницы (рис. 4).

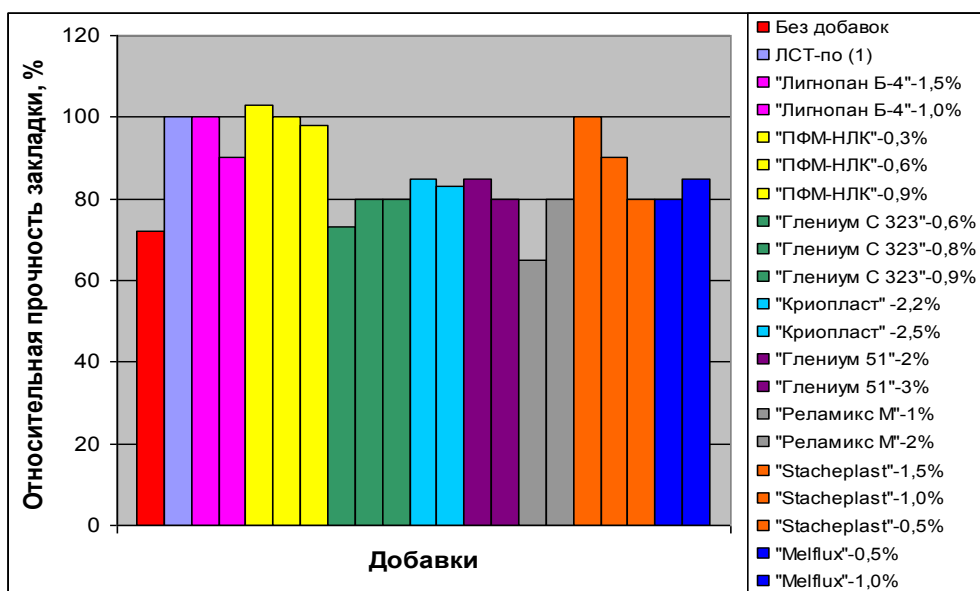


Рис. 1. Влияние добавок на прочностные показатели закладки на основе мелкозернистого песка

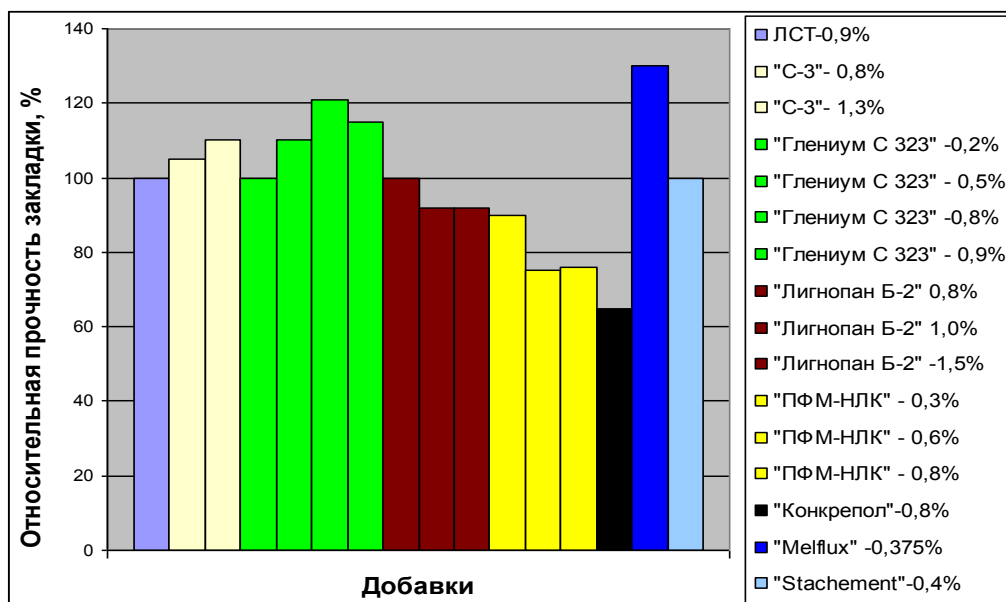


Рис. 2. Влияние добавок на прочностные показатели закладки на основе диабазовых пород («мельничный» способ получения закладочных смесей)



Рис. 3. «Мельничная» технология приготовления закладочных смесей на ПЗК шахты «Скалистая»



Рис. 4. Дозирование пластифицирующей добавки в люк конвейера №2 ПЗК ШС

На стадии приготовления твердеющих смесей достигалась их растекаемость на приборе Суттарда 30–33 см, что соответствует растекаемости применяемых закладочных смесей на рассматриваемых рудниках (показатель выявлен на стадии технического аудита). Дополнительно фиксировались плотность, влажность, грансостав смесей, производился расчет фактической производительности мельницы ($\text{м}^3/\text{ч}$) и фактического состава закладочной смеси. Опробования и расчеты выполнены в соответствии с разработанной методикой проведения ОПИ.

Готовые пластифицированные закладочные смеси подавались в экспериментальную выработку за фильтрующую перемычку. Искусственный массив на шахте «Скалистая», как и на всех подземных рудниках Заполярного филиала, формируют последовательно с единовременным подъемом высоты слоя закладки на 0,5–0,7 м. С внешней стороны перемычки выполняется породная подсыпка с целью увеличения ее устойчивости к гидростатическому напору.

Подача готовых закладочных смесей в экспериментальную выработку 38/4, оконтуренную перемычкой, осуществлялась самотеком по трубопроводу, в штатном режиме. Из произведенных закладочных смесей формировался многослойный искусственный массив, отметки слоев закладочной смеси наносились на перемычку.

В процессе ОПИ было отмечено, что пластифицированные закладочные смеси обладают улучшенной, по сравнению с базовыми составами, растекаемостью с повторением контуров рудного тела и ускоренными сроками затвердевания в выработанном пространстве.

В выработке 38/4 сформировано 9 слоев различного состава. Общий объем сформированного многослойного закладочного массива в выработке 38/4 ~ 2365 м³.

В процессе всего периода ОПИ из приямка мельницы на закладочном комплексе производился отбор проб пластифицированных закла-

дочных смесей, из которых формовались образцы-кубы размером 10х10х10 см. Хранение образцов при нормальных условиях твердения осуществлялось в Центре геодинамической безопасности ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»» (далее – ЦГБ). Через 28, 90 и 180 сут выполнены испытания образцов-кубов на прочность при одноосном сжатии.



Рис. 5. Выбуривание керна из многослойного закладочного массива в выработке 38/4

Через 150 сут твердения закладочного массива из сформированных в выработке 38/4 искусственных слоев выбурен керн (рис. 5). Трассировка скважин указана на рис. 6. Керн хранится в ЦГБ в герметично упакованном состоянии до достижения срока твердения 180 сут, по истечению данного срока – испытан.

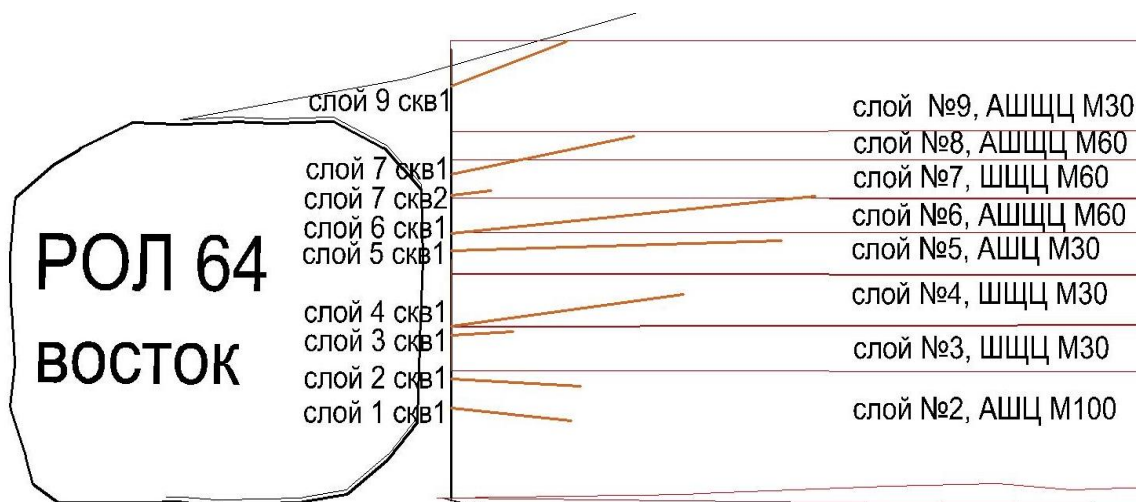


Рис. 6. Ориентация скважин при выбуривании керна (выработка 38/4)

На рассматриваемых рудниках наиболее распространены пять составов закладочных смесей: ШЩЦ М30 (26,4%); АШЩЦ М30 (20,5%); АШЩЦ М30 (24,1%); АШЩЦ М60 (4,0%); АШЩЦ М100 (6,1%). Четыре из указанных типов и марок закладки при их пластификации (ШЩЦ М30, АШЩЦ М30, АШЩЦ М30, АШЩЦ М100) прошли опытно-промышленные испытания с положительным результатом. Кинетика набора прочности пластифицированных составов закладочных смесей, прошедших испытания, отражена на **рис. 7**. В производственных условиях подтверждено соответствие реологических и прочностных характеристик но-

вых закладочных смесей требованиям регламента технологического производственных процессов при ведении закладочных работ на рудниках ЗФ ПАО ГМК «Норильский Никель» (далее – РТПП).

Закключение

Пластифицированные составы ШЩЦ М30, АШЩЦ М30, АШЩЦ М30, АШЩЦ М100 рекомендованы к применению с целью сокращения расхода цемента в твердеющих смесях на 25, 10, 10 и 13% соответственно и снижения себестоимости закладочных работ, без снижения прочности закладки (**см. таблицу**).

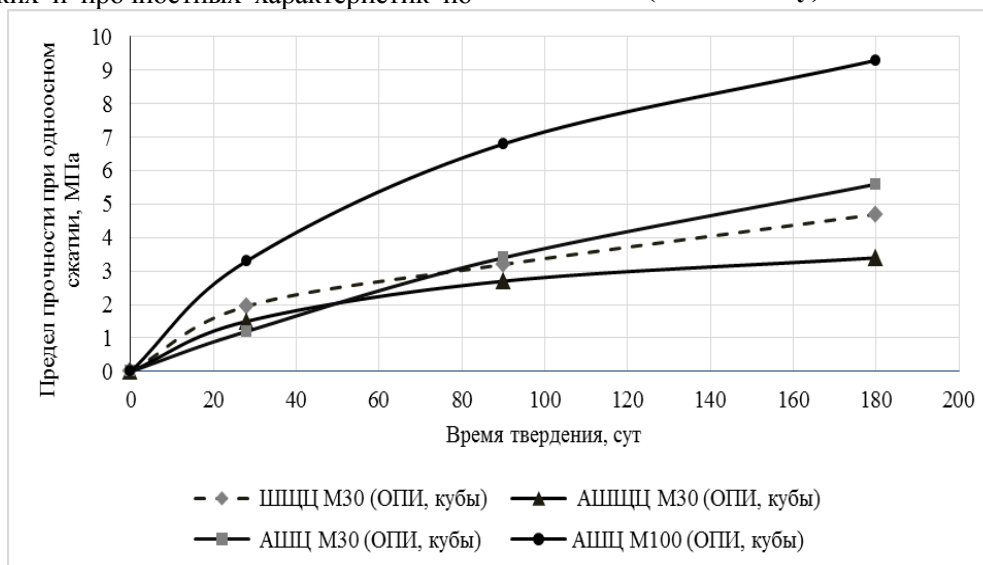


Рис. 7. Кинетика набора прочности пластифицированных закладочных смесей

Рецептура и свойства пластифицированных закладочных смесей, рекомендованных в производство для рудников ПАО «ГМК «Норильский никель»

Номер состава	Тип и марка заклад-	Состав закладочной смеси**, кг/м ³						Свойства закладочной смеси*			Снижение содержания цемента в смеси по сравнению с РТПП***, %	Прочность при одноосном сжатии, МПа через суток		
		Цемент	Ангидрит	Шлак	Щебень	Вода	ЛСТ	РК см	γ т/м ³	W, %		28	90	180
1	ШЩЦ М30	135	–	765	665	490	1	30–33	2,05	≤ 24,0	25	2,0	3,2	4,0
2	АШЩЦ М30	70	445	450	640	490	1	30–33	2,10	≤ 23,5	10	1,5	2,7	4,0
3	АШЩЦ М30	45	760	830	–	490	1	30–33	2,13	≤ 23,5	10	1,2	3,2	5,4
4	АШЩЦ М100	130	740	740	–	490	1	30–33	2,11	≤ 24,0	13	4,5	6,0	9,0

* РК, γ , W – растекаемость на приборе Сутгарда, плотность и влажность смесей соответственно.

** Исходя из нестабильности свойств и влажности исходных материалов, расход воды в процессе производства твердеющих смесей уточняется по растекаемости смесей на приборе Сутгарда 30–33 см. При этом расход цемента и добавки ЛСТ выдерживаются строго по рецептуре.

*** РТПП – Регламент технологических производственных процессов при производстве закладочных работ.

На стадии технологического регламента на проектирование осуществлена разработка технологических схем участка приготовления раствора добавки и подачи его в технологию получения твердеющих смесей. Определены спецификации оборудования и требуемые инвестиционные вложения. Произведен расчет необходимых ресурсов (материалы, сжатый воздух, вода, электроэнергия, штаты) для внедрения нового технического решения.

Список литературы

1. Обоснование целесообразности применения систем разработки с закладочными смесями на рудниках Талнаха / В. Б. Вильчинский, А. В. Трофимов, А. Б. Корейво, Р. Б. Галаов, В. П. Марысюк // Цветные металлы. 2014. №9.
2. Оптимизация прочности закладочной смеси с учетом напряженности пород / В. И. Голик, В. Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 6. С. 6–14.
3. Nagaratnam Sivakugan, Ryan Veenstra, Niroshan Naguleswaran Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, June 2015.
4. Eugie Kabwe, Yiming Wang Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines Open Journal of Safety Science and Technology, 2015, 5, 104–121.
5. Корнеева Е.В., Павленко С.И. Композиционное бесцементное вяжущее из промышленных отходов и закладочная смесь на его основе: монография. М.: Изд-во АСВ, 2009. 139 с.
6. Разработка композиционных вяжущих для закладочных смесей / М.С. Агеева, Д.М. Сопин, А.В. Гинзбург, Н.В. Калашников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 43–47.
7. Крупник Л.А., Абдыкалыкова Р.С. Закладочные смеси пастовой закладки, их свойства и технология приготовления // Труды международного форума «Инженерное образование и наука в 21 веке: проблемы и перспективы», посвященного 80-летию КазНТУ им. К.И. Сатпаева. Алматы, 2014. Т. 1.
8. Гальцева Н.А., Бурьянов А.Ф. Закладочные смеси на основе синтетического ангидрита из отходов промышленно-сти // Строительные материалы. 2016. № 7. С. 33–36.
9. Монтянова А.Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М.: Горная книга, 2005. 597 с. Библиогр.: с.584–594. ISBN 5-98672-014-8 (в пер.).
10. Монтянова А.Н., Вильчинский В.Б., Трофимов А.В. К вопросу сокращения стоимости закладочных смесей на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 45–49.

Поступила 05.10.18

Принята в печать 26.10.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25>

EXPERIENCE AND EFFICIENCY OF APPLICATION OF PLASTICIZED BACKFILLING CONCRETE

Antonina N. Montyanova – DSc (Eng.), General Director
LLC Backfilling Technology, Moscow, Russia

Andrey V. Trofimov – PhD (Eng.), Head of the Physical and Mechanical Research Center
LLC Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0001-7557-9801

Alexandr E. Rumyantsev – PhD (Eng.), Leading Researcher
LLC Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-2204-961X

Vladislav B. Vilchinskiy – PhD (Eng.), Head of the Mining Laboratory
LLC Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia

Yuri N. Nagovitsyn – Principal Engineer, Geodynamic Safety Center
PJSC MMC Norilsk Nickel Polar Division, Norilsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Backfilling systems are widespread in the extraction of very valuable ores in difficult mining and geological conditions with regard to controlling rock pressure and maintaining the stability of the excavations, especially in the rockburst prone mines. Improving the composition of backfilling concrete is currently very relevant. In the production cost of mining ore with filling of a mined-out area, a share of backfilling work accounts for 20–25%. Reducing backfilling work costs is achieved by using various types of cement-free binders, involving various kinds of chemical additives and industrial

wastes. The peculiarities of the use of chemical additives in the conditions of the Far North create a list of significant limitations, which make it highly complex to manufacture plasticized filling mixtures. **Objectives:** a main goal was to reduce the cost of one cubic meter of backfilling concrete. At the same time, the boundary conditions were minimum adjustments to the existing technology, formulation of compositions and productivity of mills. **Methods Applied:** the backfilling concrete cost reduction is achieved by introducing technical lignosulfonate, a chemical additive, which allows us to reduce the water demand of mixtures by 40–60

liters per cubic meter without changing the mobility of the mixture and lowering rheological characteristics. In its turn, a more optimal water/cement ratio makes it possible to increase the strength parameters, or with a decrease in binder consumption to reach the specified strength parameters.

Originality: the paper presents the results of the studies on the application of plasticized additives in the production of backfilling concrete. **Findings:** Numerous laboratory and pilot industrial experiments at ALROSA mines (implemented in 2005) and the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel resulted in a decrease in portland cement consumption of up to 50 kg / m³. **Practical Relevance:** on the basis of positive results of pilot industrial tests, a technological regulation was developed for the revamping of the backfilling factories of Talnakh mines and the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel.

Keywords: Plasticizers, technical lignosulfonate, underground minig, backfilling factories, hardening backfilling concrete, backfilling techniques, artificial massif.

References

1. Vilchinskiy V.B., Trofimov A.V., Koreyvo A.B., Galaov R.B., Marysyuk V.P. Rationale for the application of backfilling at Talnakh mines. *Tsvetnye metally* [Nonferrous metals], 2014, no.9. (In Russ.)
2. Golik V.I., Lukyanov V.G. Optimization of the strength of backfilling concrete based on rock mass stress. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [News of Tomsk Polytechnic University]. *Inzhiniring georesursov* [Engineering of georesources], 2016, vol. 327, no. 6, pp. 6–14. (In Russ.)
3. Nagaratnam Sivakugan, Ryan Veenstra, Niroshan Naguleswaran. Underground mine backfilling in Australia using paste fills and hydraulic fills. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, June 2015.
4. Eugie Kabwe, Yiming Wang. Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 5, 104–121.
5. Korneeva E.V., Pavlenko S.I. *Kompozitsionnoe bestsementnoe vyazhushchee iz promyshlennykh otkhodov i zakladochnaya smes na ego osnove: monografiya* [A composite cement-free binder from industrial waste and backfilling concrete based on it: monograph]. Moscow: ACB, 2009, 139 p. (In Russ.)
6. Ageeva M.S., Sopin D.M., Ginzburg A.V., Kalashnikov N.V. Development of composite binders for backfilling mixtures. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Shukhov Belgorod State Technological University], 2013, no. 4, pp. 43–47. (In Russ.)
7. Krupnik L. A., Abdykalykova R. S. Paste backfilling, their properties and technology of preparation. *Trudy mezhdunarodnogo foruma «Inzhenernoe obrazovanie i nauka v 21 veke: problemy i perspektivy», posvyashchennogo 80-letiyu KazNTU im. K.I. Satpaeva* [Proceedings of the International Forum "Engineering education and science in the 21st century: problems and prospects" dedicated to the 80th anniversary of Satpayev KazNTU]. Almaty, 2014, vol. 1. (In Russ.)
8. Galtseva N.A., Buryanov A.F. Backfilling concrete based on synthetic anhydrite from industrial waste. *Stroitelnye materialy* [Building materials], 2016, no. 7, pp. 33–36. (In Russ.)
9. Montyanova A.N. *Formirovanie zakladochnykh massivov pri razrabotke almaznykh mestorozhdeniy v kriolitozone* [Formation of backfilling masses in the development of diamond deposits in the cryolithozone]. Moscow: Gornaya kniga, 2005, 597 p. ISBN 5-98672-014-8. (In Russ.)
10. Montyanova A.N., Vilchinsky V.B., Trofimov A.V. The issue of reducing the backfilling concrete cost in mines of the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 4, pp. 45–49. (In Russ.)

Received 05/10/18

Accepted 26/10/18

Образец для цитирования

Опыт и эффективность применения пластифицированных закладочных смесей / Монтянова А.Н., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Вильчинский В.Б., Наговицин Ю.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 18–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25>

For citation

Montyanova A.N., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Vilchinskiy V.B., Nagovitsyn Yu.N. Experience and efficiency of application of plasticized backfilling concrete. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 18–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-18-25>

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.019:622.73-1:669.1

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИТЫХ БРОНЕЙ ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ МЕЛЬНИЦЫ ПОЛУСАМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М.

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

Аннотация. На обогатительных фабриках горной промышленности значительная часть общих затрат на переработку (от 45 до 65%) расходуется на выполнение операций дробления и измельчения, в том числе и на мельничную футеровку. Обеспечение работоспособности измельчительного оборудования в условиях абразивного воздействия руды и круглосуточного режима работы, требует производить периодическую замену изношенной футеровки. Затраты на ее приобретение, доставку и монтаж в течение года составляют десятки миллионов рублей, а простой оборудования, связанный с заменой футеровки, сокращает объемы готовой продукции на сотни миллионов рублей в год. Практическая эффективность мельничных броней импортного производства не всегда подтверждается ожидаемо положительным результатом фактической эксплуатации, и повышением коэффициента использования оборудования (КИО), но их использование обязательно требует значительных финансовых расходов и связано с рисками в условиях нестабильной политической и финансовой ситуации. Поэтому задача повышения срока эксплуатации броней мельничной футеровки является актуальной задачей. В статье рассмотрено предложенное и реализованное решение задачи повышения срока эксплуатации футеровки мельницы мокрого полусамои измельчения (МПСИ-70х23) из стали 110Г13Л. Приведены результаты мониторинга фактической эксплуатации футеровки и математического моделирования траектории рудно – шарового потока в мельнице, выявлены зоны интенсивного износа, дефекты отливок броней и разработаны новые конструкции элементов футеровки. С помощью программного пакета моделирования исследованы существующие литейные технологии, выявлены причины возникновения дефектов и разработаны технологии литья броней новой конструкции, исключающие образование дефектов. Показаны результаты промышленных испытаний броней новой конструкции, изготовленных по разработанным технологиям.

Ключевые слова: мельница полусамои измельчения, отливка, моделирование, технология литья.

Введение

Проблема повышения срока эксплуатации мельничной футеровки не нова и окончательно не решена. Применение достижений научно-технического прогресса различных областей, способствует развитию новых методов и инструментов для решения этого вопроса и позволяет достичь рационального и эффективного результата [1, с. 173]. Решение проблемы повышения срока эксплуатации футеровки особенно важно для фабрик, работающих по схеме полусамои измельчения. Тяжелые, ударно-абразивные условия эксплуатации футеровки требуют более частую остановку мельницы для замены защитных броней. А в случае отсутствия резервной технологической нитки первой стадии, на период замены футеровки, необходимо останавливать весь про-

изводственный процесс [2]. Увеличение продолжительности эксплуатационного ресурса футеровки мельниц позволит сократить количество и продолжительность остановок оборудования, снизить затраты на приобретение и приведет к увеличению производительности и прибыли.

В начальный период эксплуатации мельницы Хайбуллинской обогатительной фабрики для выявления свойств футеровки и оптимизации продолжительности межремонтного периода были исследованы металлические брони, изготовленные из стали 110Г13Л. Сталь Гадфильда имеет свойство упрочняться под действием ударных нагрузок, поэтому ее применяют для изготовления футеровки дробильного и измельчительного оборудования. По химическому составу это аустенитная сталь и обладает хорошими эксплуатационными свойствами. С целью повышения определенных свойств ее дополнительно модифицируют и легируют [3–6].

© Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М., 2019

Важным условием в процессе решения задачи было исключить или минимизировать возможные затраты. Поэтому решили исключить легирование и достичь максимально возможного результата с бронями из стали 110Г13Л.

В течение 3-х лет провели мониторинг стойкости футеровок: выполняли промежуточные осмотры, замеры и сбор статистических данных, определяющих скорость истирания рабочих поверхностей и характер износа профиля, с учетом объемов перерабатываемой руды и ее механических свойств.

В ходе наблюдения для каждого вида броней выявлены особенности демонтажа, средняя продолжительность эксплуатации, расположение общих характерных зон интенсивного износа (рис. 1, а), наличие идентичных скрытых дефектов литья (рис. 1, б) (усадочная раковина, усадочная пористость, литейные трещины, пригар [7, 8, с. 145–161, 9, с. 46–51]), ухудшающие эксплуатационные свойства.



Рис. 1. Износ броней торцевой загрузочной стенки (а) и дефекты литья, выявленные в процессе эксплуатации (б)

Общеизвестно, что наличие литых дефектов в отливках способно приводить к снижению их эксплуатационной стойкости. Наличие углублений и неровностей на поверхности отливки, образованных раковинами и пористостью, способствует отрыву частиц металла от тела брони и ускоряет истирание при ударно-абразивном износе, воздействующем на мельничную футеровку [10, с. 104–106]. Наиболее опасными являются скрытые литые дефекты, которые нельзя исправить после производства литой детали.

Применив программный пакет ROCKY DEM Particle Simulator [11] и реальные параметры, смоделировали и визуализировали траекторию рудно-шарового потока в области торцевой загрузочной крышки и центральной части барабана (рис. 2, а, 3, а). Таким образом, зоны интенсивного износа обнаружили в зоне контакта максимально движущейся части рудно-шарового потока и футеровки, которые расположены радиально, в области стыка внешнего и среднего рядов броней торцевой крышки, и по центральной части барабана.

Сравнение данных, полученных моделированием, с фактическим состоянием футеровки после эксплуатации подтверждает правильность созданной модели и виртуально воссозданного процесса (рис. 2, 3).

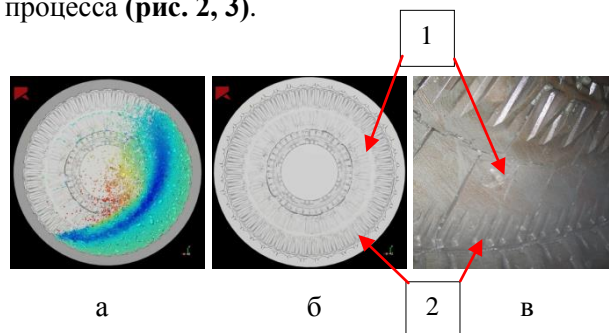


Рис. 2. Траектория (а) и зоны износа на смоделированной (б) и фактической (в) торцевой загрузочной стенке после эксплуатации: 1 – зона максимального износа; 2 – зона минимального износа броней

Полученное расположение зон максимального износа броней торцевой крышки и барабана при сопоставлении идентично положению этих зон в реально действующей мельнице.

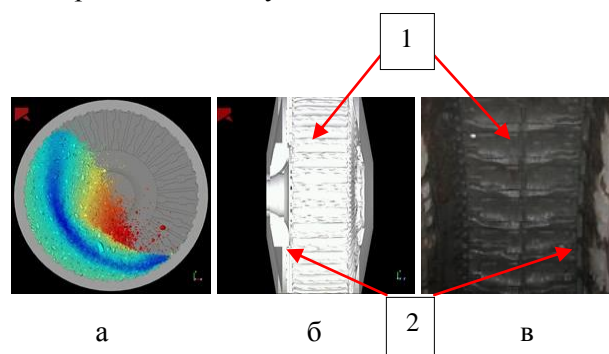


Рис. 3. Траектория (а) и зоны износа смоделированной (б) и фактической (в) футеровки барабана после эксплуатации: 1 – зона максимального износа; 2 – зона минимального износа броней

Малоизнашиваемой участки являются конструкционным балластом, увеличивая общую массу футеровки. За счет перераспределения малоизнашиваемой части металла в зону максимального износа и уменьшения высоты лифтеров футеровки внутреннего ряда были разработаны новые конструкции броней торцевой загрузочной крышки и барабана.

Промышленные испытания экспериментального комплекта броней разработанной конструкции в условиях действующего производства показали увеличение периода эксплуатации на 30,7% по сравнению с бронями базовой конструк-

ции. Однако при осмотрах в процессе эксплуатации и постепенного износа рабочей поверхности броней в отливках также выявлены скрытые усадочные раковины и пористость. Характер и положение этих дефектов идентичны дефектам, выявленным при эксплуатации базового комплекта броней (см. **рис. 1, а**). Это подтвердило необходимость изучения существующей литейной технологии и структуры металла в отливках для разработки новой технологии литья броней, исключающей возникновение дефектов.

Для анализа существующей в литейном цехе технологии, используя отечественную программу трехмерного моделирования CAE LVM Flow, смоделировали процессы заливки и кристаллизации отливок «Броня торцовая средняя» и «Броня торцовая внешняя». В этой программе для прогнозирования пористости в отливках стандартно включен расчет безразмерного критерия Ниямы (Ny). Его используют для предсказания усадочной пористости, возникновение которой зависит от питания двухфазной зоны [12].

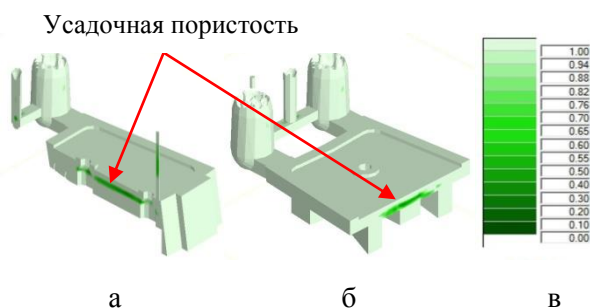


Рис. 4. Усадочная пористость на модели отливки «Броня торцовая средняя» (а, б) и шкала критерия Ниямы (в)

На представленном **рис. 4** видно, что критерий Ниямы в средней части может варьироваться от 0,20 до 0,55 единиц, указывая на наличие несплошности в теле отливки, изготовленной по существующей технологии. Кроме того, следует отметить, что чем меньше критерий Ниямы, тем более ярко выражена в процентном отношении микропористость отливки.

Учитывая результаты моделирования существующей литейной технологии, предложены два варианта литья для каждого вида броней, с различным расположением литниково-питающей системы. Анализ каждого из смоделированных вариантов показал, что предложенные технологии могут обеспечить отсутствие несплошностей (скрытых усадочных раковин, пористости) в исследуемых отливках. Также в процессе компьютерного моделирования существующей и пред-

ложенных литейных технологий были составлены компьютерные топографии усадочной пористости в продольном сечении брони, численно выраженные в виде критерия Ниямы. В качестве примера на **рис. 5** графически дана топография усадочной пористости в отливке «Броня торцовая средняя».

На **рис. 5** видно, что зона повышенной микропористости расположена в центральной части отливки и может быть причиной преждевременного изнашивания детали в процессе эксплуатации.

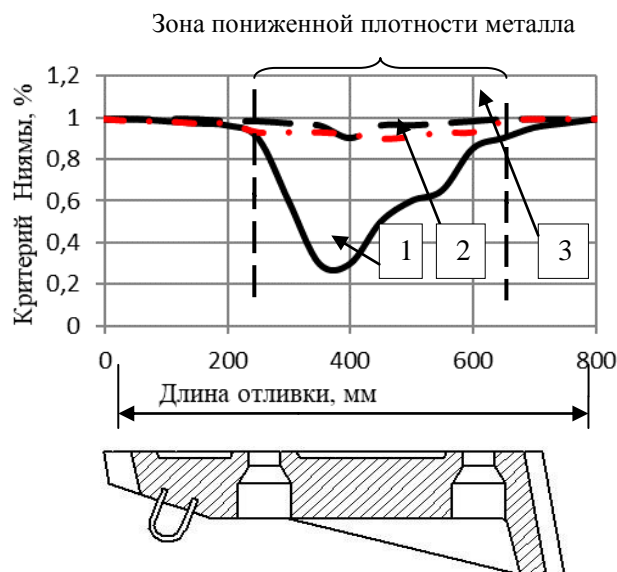


Рис. 5. Сравнительная топография усадочной пористости в отливке «Броня торцовая средняя»: 1 – существующая технология; 2 – предложенная технология, вариант № 1; 3 – предложенная технология, вариант № 2

С целью более корректной оценки данных сравнили полученные результаты с характером износа выведенной из эксплуатации брони.

Сопоставление положений зоны пористости, определенное на топографии с помощью критерия Ниямы, и зоны фактической пористости в отливке подтверждает их идентичность. Аналогичную картину наблюдали и для отливок «Броня торцовая внешняя».

Анализ полученных после моделирования результатов показал, что предложенные технологии могут обеспечить отсутствие несплошностей (скрытых усадочных раковин, пористости) в исследуемых отливках [13]. Кроме того, некоторые из предложенных вариантов позволяют получать такой же уровень технологического выхода годного, каким он был до изменения технологии производства «Броней торцовых». Сравнительная гистограмма значений техноло-

гического выхода годного различных вариантов литейных технологий представлена на **рис. 6**.

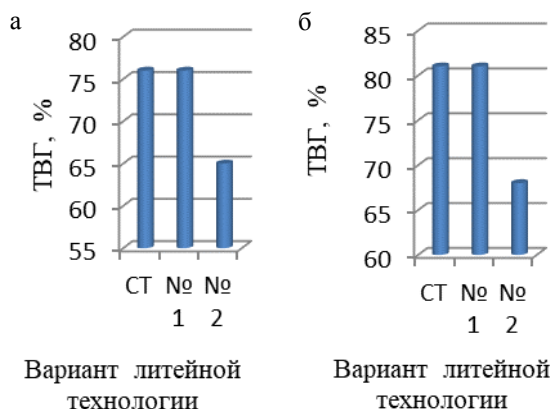


Рис. 6. Сравнительные гистограммы технологического выхода годного различных вариантов технологий: а – «Броня торцовая средняя»; б – «Броня торцовая внешняя»; СТ – существующая технология; № 1 – вариант № 1; № 2 – вариант № 2

Для объективности и достоверности полученных теоретических выводов по скорректированным технологиям с легкоотделяемой прибылью отлили опытные образцы броней и провели металлографический анализ макро- и микроструктуры различных частей отливок [14, 15]. После проведения финишных операций (очистки от пригара, удаления элементов литниково-питающей системы и термообработки) каждую отливку порезали по зонам тепловых узлов (**рис. 7**). Дефектов в отливках, полученных по новой литейной технологии, не обнаружили. Кроме того, осуществили ультразвуковой контроль, который также не показал дефектов.

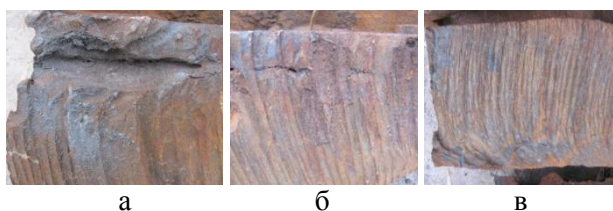


Рис. 7. Зоны отливки для исследования: а – усадочная раковина; б – усадочная пористость; в – плотный металл

Для практического подтверждения результатов, полученных в ходе работы, были проведены эксплуатационные испытания опытной партии броней новой конструкции, изготовленных по разработанным технологиям литья.

Эксплуатационные испытания опытных образцов проводили в мельнице первой стадии измельчения МПСИ-70х23 в условиях действующего

производства Хайбуллинской обогатительной фабрики. Выполнение работ по монтажу и демонтажу произведено без трудностей. Условия соответствия габаритных и посадочных размеров опытных образцов выполнены.

В результате проведенных испытаний период эксплуатации броней составил 2280 ч. Это на 46,1% больше продолжительности эксплуатационного периода футеровки базовой конструкции.

Заключение

Таким образом, усовершенствование конструкции броней привело к увеличению эксплуатационного периода на 30,7%, а разработка литейной технологии позволила изготовить качественные отливки и повысить срок эксплуатации еще на 15,4%.

Увеличение срока эксплуатации броней позволило сократить количество приобретаемых за год комплектов футеровки и время простоя фабрики.

Годовая экономия от внедрения в производство футеровки составляет более 10,5 млн руб. (75 т литья) без учета дополнительного объема медного концентрата, полученного за счет сокращения простоя фабрики.

Для создания мельничной футеровки с наилучшими эксплуатационными свойствами требуется в первую очередь изучить характер ее износа и определить зоны, подверженные максимальному воздействию рудно-шарового потока. Анализ динамики износа броней позволяет разработать наилучший профиль рабочей поверхности футеровки и устранить выявленные недостатки ее материала или технологии производства.

Список литературы

1. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. М., 1965. 182 с.
2. Liners for the Grinders / Written by E&MJ News [Электронный ресурс]: URL: <http://www.e-mj.com>, // Published: Tuesday, 08 June 2010 15:04 (дата обращения 22.05.2017).
3. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino, Kati Valtonen, Anssi Laukkanen, Kenneth Holmberg, Veli-Tapani Kuokkala. The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions / Tribology Letters. 57:24. March 2015. Doi: 10.1007/s11249-015-0477-6.
4. Nasajpour, A., Kokabi, A.H., Davami, P., Nikzad, S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 659, pp. 262–269.
5. I. Mejia, A. Bedolla-Jacuinde, J.R. Pablo Sliding wear behavior of a high – Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb / Wear.

- Volume 301, Issues 1–2, April – May 2013. P. 590–597. Doi: 10.1016/j.wear.2013.01.054.
6. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys / Journal of Materials Science. Volume 43, Issue 18. September 2008. P. 6214–6222. Doi: 10.1007/s10853-008-2919-0
 7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Исследование процесса эксплуатации литых броней из стали марки 110Г13Л в мельнице МПСИ-70Х23 // Литейные процессы. 2013. № 12. С. 8–11.
 8. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение-1, 2005. 330 с.
 9. Литейные дефекты и способы их устранения / А.В. Лакедемонский, Ф.С. Кваша, Я.И. Медведев и др. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
 10. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений. 3-е изд., перераб., доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
 11. Моделирование динамики частиц методом DEM / [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rockydem.ru/mills/> (дата обращения: 17.08.2016).
 12. KENTD. CARLSON Прогнозирование объемной доли усадочной пористости с использованием безразмерного критерия НИЯМЫ / KENT D. CARLSON, CHRISTOPH BECKERMANN [Электронный ресурс]. URL: http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckermann_Niyama.pdf (Дата обращения: 22.10.2017).
 13. Вдовин К.Н., Хабибуллин Ш.М. Совершенствование технологии производства литых броней из стали марки 110Г13Л для мельницы МПСИ-70Х23 // Литейщик России. 2014. № 1. С. 13–15.
 14. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Отработка технологии производства и исследование качества литых броней с применением методов неразрушающего контроля // Литейные процессы. 2014. № 13. С. 75–82.
 15. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, В.П. Чернов, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, В.К. Дубровин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–62.

Поступила 10.01.19

Принята в печать 24.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

INCREASING THE LIFETIME OF CAST HIGH-MANGANESE STEEL LINERS FOR THE SEMI-AUTOGENOUS GRINDING MILL

Konstantin N. Vdovin – DSc (Eng.), Professor

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3244-3327>

Nikolai A. Feoktistov – PhD (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Shamil M. Khabibullin – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: 0000-0002-1543-3015

Abstract. At the processing plants of the mining industry, a significant part of the total processing costs (from 45 to 65%) is spent on crushing and grinding operations, including mill lining. The efficiency of grinding equipment in the conditions of abrasive impact of ore and a continuous operation requires periodic replacement of a worn-out lining. The costs for its purchase, delivery and installation during a year amount to tens of millions of rubles, and the equipment downtime associated with the replacement of the lining reduces the volume of finished products by hundreds of millions of rubles per year. The practical efficiency of imported mill liners is not always confirmed by the expected positive result of their actual operation, and an increase in the equipment utilization coefficient (EUC), but their use definitely requires significant financial costs and entails risks in an unstable political and financial situation. Therefore, the task of increasing the service life of the mill liners is urgent. The paper presents a suggested and implemented solution to increase the lifetime of 110G13L steel lining for the wet semi-

autogenous grinding mill (SAG mill-70x23). It includes monitoring of the actual liner operation and a mathematical simulation of the ore and ball trajectory in the mill, reveals zones of intensive wear, defects of liner castings and developed new structures of the lining elements. Applying the simulation software package, the authors studied the existing casting technologies, found reasons for defects and developed the casting technology for a new design of liners excluding defects. The paper contains industrial tests of the liners of a new design manufactured according to the developed technologies.

Keywords: Semi-autogenous grinding mill, casting, simulation, casting technology.

References

1. Kryukov D.K. *Futrovki sharovykh melnits* [Ball mill lining]. Moscow, 1965, 182 p. (In Russ.)
2. Liners for the Grinders. Written by E&MJ News [Electronic resource]. Available at: <http://www.e-mj.com>. Published:

- Tuesday, 08 June 2010 15:04 (Accessed: 22.05.2017).
3. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino, Kati Valtonen, Anssi Laukkanen, Kenneth Holmberg, Veli-Tapani Kuokkala. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed hadfield steel in abrasive and impact conditions. *Tribology Letters*. 57:24. March 2015. Doi: 10.1007/s11249-015-0477-6.
 4. Nasajpour A., Kokabi A.H., Davami P., Nikzad S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 659, pp. 262–269.
 5. I. Mejia, A. Bedolla-Jacuinde, J.R. Pablo. Sliding wear behavior of a high-Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb. *Wear*, vol. 301, issues 1–2, April–May 2013, pp. 590–597. Doi: 10.1016/j.wear.2013.01.054.
 6. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys. *Journal of Materials Science*. September 2008, volume 43, issue 18, pp. 6214–6222. Doi: 10.1007/s10853-008-2919-0.
 7. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. The study of the process of operation of 110G13L steel cast liners in SAG mill 70X23. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2013, no. 12, pp. 8–11. (In Russ.)
 8. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteynykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of casting defects. Ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005, 330 p. (In Russ.)
 9. Lakedemonkiy A.V., Kvasha F.S., Medvedev Ya.I. et al. *Liteynye defekty i sposoby ikh ustraneniya* [Casting defects and methods of their elimination]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 152 p. (In Russ.)
 10. Lakhtin Yu.M. Leonteva V.P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vyssh. tekhnich. uchebn. zavedeniy* [Materials science: the textbook for higher technical education institutions]. 3rd edition; revised and updated. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 528 p. (In Russ.)
 11. Particle dynamics simulation by the DEM method [Electronic resource]. Available at: <http://www.rockydem.ru/mills/> (Accessed: 17.08.2016). (In Russ.)
 12. Kent D. Carlson, Christoph Beckermann. *Prognostirovanie obemnoy doli usadochnoy poristosti s ispolzovaniem bezrazmernogo kriteriya Niyamy* [Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion], [Electronic resource]. Available at: http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckermann_Niyama.pdf (Accessed: 22.10.2017). (In Russ.)
 13. Vdovin K.N., Khabibullin Sh.M. Improvement of the production technology for 110G13L steel cast liners for SAG mill 70X23. *Liteishchik Rossii* [Russian Foundryman], 2014, no. 1, pp. 13–15. (In Russ.)
 14. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. Development of production technology and study of the quality of cast liners with the use of NDT methods. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2014, no. 13, pp. 75–82. (In Russ.)
 15. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Dubrovin V.K. Study of abrasive and impact and abrasive wear mechanisms of high-manganese steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 54–62. (In Russ.)

Received 10/01/19

Accepted 24/01/19

Образец для цитирования

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Повышение срока эксплуатации литых броней из высокомарганцевой стали мельницы полусамомельчения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 26–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

For citation

Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. Increasing the lifetime of cast high-manganese steel liners for the semi-autogenous grinding mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 26–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE PERFORMANCE OF CENTRIFUGALLY CAST INDEFINITE CHILLED CAST IRON ROLLS

Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh.

Kushva Roll Manufacturing Factory, Kushva, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): An urgent task of rolling mill operators includes minimizing the cost of manufactured products while ensuring the required quality. To accomplish the task, measures are being taken to optimize the rolling process aimed at increasing the duration of the rolling campaigns and reducing the number of roll regrinds. The performance of the rolls is influenced by the properties of the working layer material which determine wear resistance, formation and development of fire cracks, as well as resistance to metal sticking. Finishing mill rolls dictate the surface quality of the rolled steel. That is why it is important to make timely regrinds in order to completely remove the fire crack layer. The removal depth and the acceptable duration of the campaigns depend on the properties of the roll working layer material. To improve the properties of the rolls, the roll manufacturers need the actual roll operation data to be able to analyze how the chemical composition and the structure of the roll working layer is related to the roll performance. Such analysis will help improve the structure and properties of the materials used, as well as develop new ones. **Objectives:** The objective of this research is to understand how the chemical composition of the working layer of indefinite chilled cast iron rolls used in finishing mills dictates the roll performance, to evaluate the effect of each chemical element, and to determine what concentrations of the chemical elements could most effectively benefit the performance of indefinite chilled cast iron rolls. **Methods Applied:** The methods applied include building a database of the finishing mill indefinite chilled cast iron rolls and using artificial neural networks based on a dual-function algorithm. **Originality:** The authors built a neuromodel which can help understand the effect of the chemical composition of the roll working layer and predict the performance of indefinite chilled cast iron rolls. The authors studied the effect of carbon, silicon, manganese, chromium, nickel, molybdenum, vanadium, niobium and boron on the performance of indefinite chilled cast iron rolls. **Findings:** Graphic diagrams were built which demonstrate the effect of each chemical element on the performance of indefinite chilled cast iron rolls at constant concentrations of the remaining elements. The authors looked at the relationship between the chemical elements and the roll performance in terms of the impact of the former on the structure of indefinite chilled cast iron rolls. The effective concentrations of the chemical elements were also determined. **Practical Relevance:** The authors developed a new chemical composition of indefinite chilled cast iron to be used for the working layer of finishing mill rolls. As a result, a 12–14% increase in the roll performance was achieved.

Keywords: Mill rolls, indefinite chilled cast iron, chemical composition, effect, performance, wear resistance.

Introduction

In modern conditions of rolling production, the efficiency of using mill rolls is estimated by the ratio of quality and roll prices. At rolling sites producing plate metal, performance records are being held in time per roll in tons or kilometers of rolled metal, in tons of rolled metal per 1 mm of working layer removal, in tons of rolled metal per installation. Comparing different manufacturers roll performances, and comparing the prices of the rolls, the distributors make up the rating of suppliers and determine the volume of orders. In a competitive environment, the manufacturers' task is to ensure high performance characteristics of the mill rolls at minimal cost. This will increase the duration of the campaigns and more efficiently use rolling rolls. One of the ways to solve this problem is to optimize the chemical composition of rolls working layer in or-

der to increase productivity.

To assess the alloying efficiency of rolls working layer, it is advisable to research the effect of each chemical element separately, at constant concentrations of the remaining elements. This will allow you to determine the rational concentration of chemical elements that will increase the productivity of rolling rolls.

Main Part

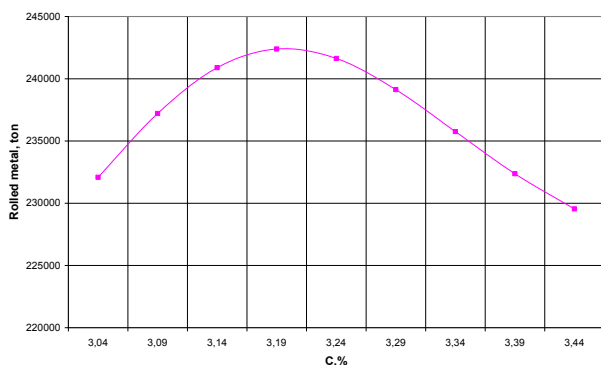
In order to study the influence of working layer chemical composition of centrifugal casted finishing stands indefinite rolls on productivity, neural network processing of a database of 85 rolls with a barrel diameter of 820 mm was performed. The content of chemical elements in the working layer of the rolls varies within the following limits: 3,05÷3,45% C, 0,90÷1,18% Si, 0,80÷1,00% Mn, 0,007÷0,028% S, 1,70÷2,15% Cr, 4,05÷4,60% Ni, 0,30÷0,43% Mo, 0,02÷0,31% V, 0,01÷1,13% Nb, 0,002÷0,090% B.

© Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh., 2019

The resulting neuromodel allows us to predict the performance of the rolls in tons of rolled steel with a relative error of up to 10%. The influence of each element was researched at constant concentrations of the remaining elements and constant values of casting technological parameters. The following chemical composition was used as the base: C=3,36%, Si=1,18%, Mn=0,80%, S=0,07%, Cr=1,82%, Ni=4,23%, Mo=0,30%, V=0,31%, Nb=0,65%, B=0,002%.

Picture 1 shows the effect of carbon in the working layer on the productivity of indefinite rolls.

With an increase in carbon content to 3,20%, the productivity increases from 232,000 tons to 242,400 tons (by 4,5%), then decreases. In the indefinite cast iron of the studied composition, carbon increases the amount of cementite and special carbides of type MC, contributing to an increase in the productivity of the rolls due to an increase in wear resistance of the working layer. A further increase in carbon content leads to the enlargement of cementite inclusions, which increases their tendency to chipping out of the matrix.

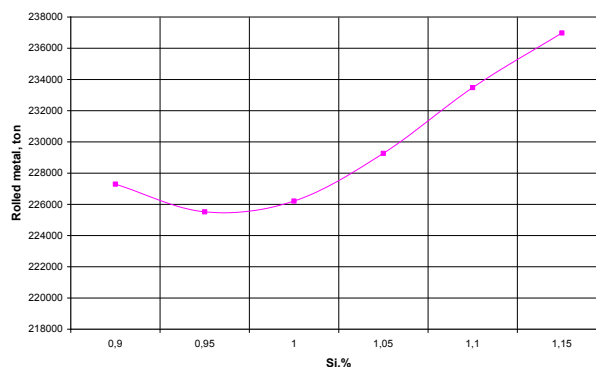


Pic. 1. The influence of carbon working layer on the indefinite rolls performance

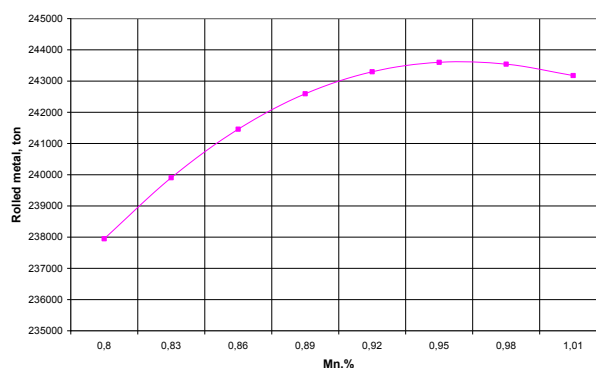
Silicon with its content of more than 1,00% increases the productivity of the rolls by 5,0% (**pic. 2**). Silicon reduces the iron's tendency to oxidation and increases the resistance to wear [1, 2], which has a positive effect on the performance of indefinite rolls. In [3] it is shown that, despite the graphitizing effect of silicon and a decrease in the amount of cementite, it promotes an increase in the amount of martensite in the matrix, slightly increasing the hardness at a content up to 1,20% Si. Reducing the amount of cementite leads to a decrease in chipping of inclusions of cementite from the matrix, and, consequently, to a decrease in wear.

Manganese, with an increase in its content to 0,95%, increases productivity by 2,4% (**pic. 3**). Alloying cementite and increasing the proportion of martensite, manganese contributes to an increase in

wear resistance, but because of its austenitizing effect, it is necessary to limit its content to 1,00% [3].



Pic. 2. The influence of silicon working layer on the indefinite rolls performance



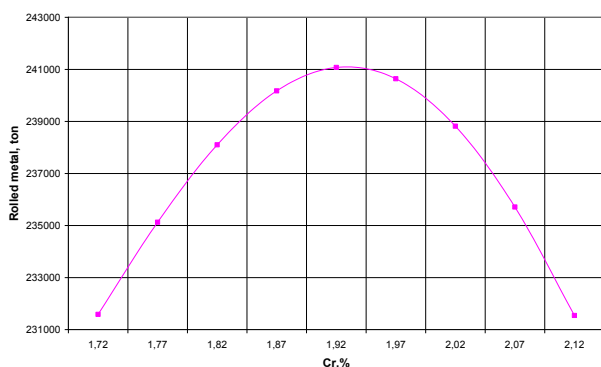
Pic. 3. The effect of manganese working layer on the indefinite rolls performance

Increasing the chromium content to 1,90% also increases the productivity of the rolls by 4,1% (**pic. 4**). As a strong carbide forming element, chromium increases the amount of carbides $(Fe,Cr)_3C$, increasing the wear resistance of indefinite cast iron. A further increase in the chromium content leads to an increase in the share of ledeburite, and, as a consequence, to a more intensive development of microcracks during the operation of the rolls [3].

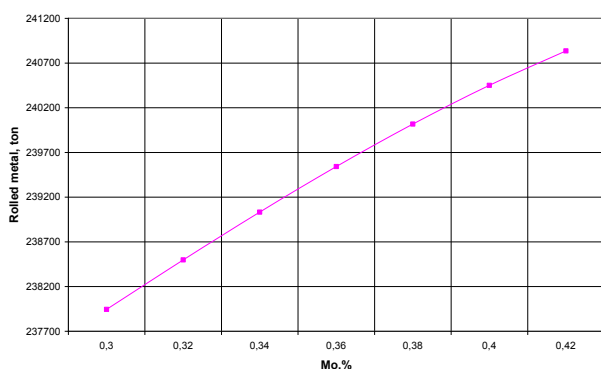
Nickel in the studied interval has a weak effect on productivity, and, given the high cost of nickel, it does not make sense to increase its content by more than 4,30%. Molybdenum in the entire researched interval contributes to an increase in the productivity of the rolls by 1,2% (**pic. 5**). Molybdenum has a beneficial effect on the indefinite cast iron matrix, increasing its dispersion, strength at high temperature, resistance to thermal cyclic loads and wear [4]. However, the economic feasibility of increasing its content above 0,40% should be evaluated.

Vanadium increases rolls productivity of the studied composition by 2,3% (**pic. 6**). It increases

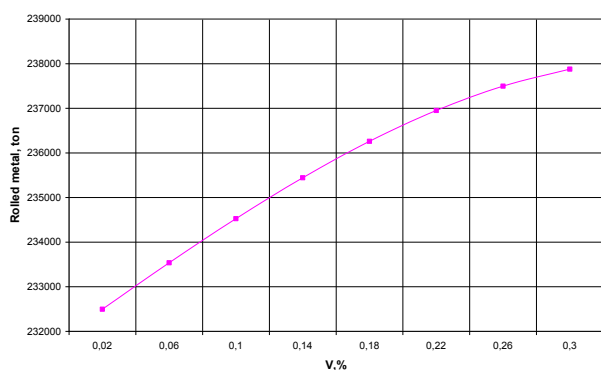
the dispersion of the dendritic structure, forms highly solid fine VC carbides, and increases strength and wear resistance [4].



Pic. 4. The effect of chromium working layer on the indefinite rolls performance



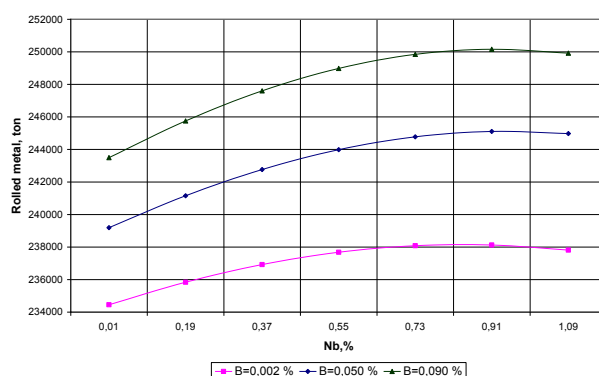
Pic. 5. The effect of molybdenum working layer on the indefinite rolls performance



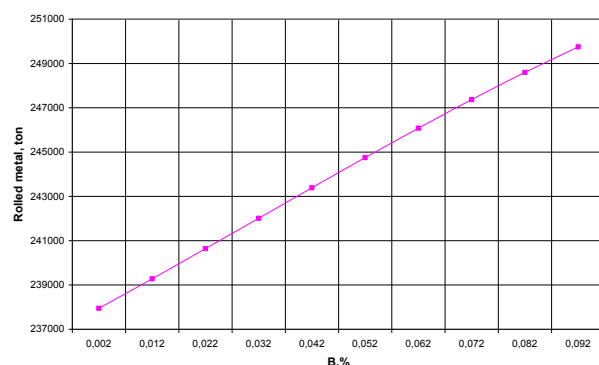
Pic. 6. The effect of vanadium working layer on the indefinite rolls performance

Pic. 7 shows the effect of niobium on the performance of indefinite iron with different boron contents. Just like vanadium, it forms highly solid fine MC carbides, which have a high fracture resistance due to the compact form of the inclusions and close lattice parameters of the carbides and the matrix [5]. However, its effect amplifies with increasing boron

content: at B=0,002%, niobium increases rolls productivity of the studied composition by 1,6%, at B=0,050%, its efficiency increases – productivity also increases by 2,0÷2,9%, and at B=0,090% – by 3,9÷5,0%. This is due to the fact that boron forms iron boride and boron carbides, which additionally increase wear resistance [6, 7]. In the indefinite iron of the studied composition, boron increases the productivity of the rolls up to 5,0% (**pic. 8**). However, it should be taken into account that the abundance-boron content contributes to an increase in the share of ledeburite and to an increase in the brittleness of cast iron [8].



Pic.7. The effect of niobium of the working layer on the indefinite rolls performance



Pic. 8. The influence of boron working layer on the indefinite rolls performance

Conclusion

The conducted studies allow us to determine the rational composition of indefinite cast iron in order to increase the productivity of rolling rolls during finishing rolling.

The carbon content should be in the range of 3,15÷3,25%. This content is sufficient for the formation of special carbides MC, and at the same time will not lead to the consolidation of cementite inclusions.

Silicon in researched limits improves the per-

formance of indefinite rolls, but it is necessary to take into account the graphite-forming effect of silicon [3]. Therefore, it is advisable to limit the silicon content within $1,05 \div 1,15\%$.

To improve rolls performance, the manganese content interval of $0,90 \div 1,00\%$ is rational.

Compared with the studies of chromium effect on the structure presented in Pic [3], in this work, the researched range of chromium content is extended to $2,15\%$, within the optimum performance of the rolls is revealed. Research results have shown that to increase rolls productivity, chromium content should be in the range of $1,90 \div 1,95\%$.

Considering insignificant effect of molybdenum on increasing of rolls productivity at its high cost, it is advisable to limit it within $0,30 \div 0,35\%$.

Vanadium, forming fine VC special carbides, has a beneficial effect on the wear resistance of indefinite cast iron. The recommended vanadium content is $0,25 \div 0,30\%$.

Niobium, like vanadium, forms fine special NbC carbides, which increase wear resistance. However, its reasonable concentration depends on the boron content: in the absence of boron, the rational range of alloying with niobium is $0,60 \div 0,70\%$, and when alloying of cast iron is $0,050 \div 0,090\%$ B, the rational niobium content is higher – $0,80 \div 0,90\%$.

Boron has a significant positive effect on rolls productivity in the researched range of its content. The linear character of boron effect (**pic. 8**) allows you to select the maximum concentration of boron in this interval – $0,080 \div 0,090\%$.

According to the results of research carried out in this work, a new chemical composition of indefinite cast iron was developed for the rolling rolls working layer of plate mills finishing stands. During

the operation of new rolls experimental batches, it was established that their productivity is $12\text{--}14\%$ higher than the performance of the used rolls.

References

1. Pritomanova M.I., Vyshinskaya L.R. The effect of silicon on volume changes in thermal cycling of graphitized alloys. *Struktura i svoystva chuguna i stali. Nauchnyye trudy* [Structure and properties of cast iron and steel. Research papers]. Vol. 26. Ed. by K.P. Bunin. Moscow: Metallurgiya, 1967, pp. 159–168.
2. *Spravochnik po chugunnomu lityu* [Handbook in iron casting]. Ed. by N.G. Girshovich. 3rd ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p.
3. Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh. Influence of chemical composition on the properties of the working layer of centrifugal cast indefinite chill rolls. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 3, pp. 78–89.
4. Belov V.D., Vdovin K.N., Kolokoltsev V.M., Kovalevich E.V., Ten E.B., Ri Khosen, Ri E.Kh. *Proizvodstvo chugunnykh otlivok* [Production of iron castings]. Ed. by V.M. Kolokoltsev and Ri Khosen. 2nd ed. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 521 p.
5. Popov V.S., Vasilenko G.I., Nagornyy P.L. Abrasive wear of some high-carbon alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1970, no. 5, pp. 47–48.
6. Freeman R. B. The Relative Wear of Some Hard Metals. *Metal Progress*, 1937, vol. 31, pp. 281–284.
7. Hirsch W. F. Nickel-Boron Cast Iron for Resistance to Abrasion. *Metal Progress*, 1938, vol. 34, pp. 230–232.
8. *Bor, kaltsiy, niobiy i tsirkoniy v chugune i stali* [Boron, calcium, niobium and zirconium in iron and steel]. Translated from English by V.A. Mchedlishvili and V.V. Khovrin. Ed. by S.M. Vinarov. Moscow: GNTI ChTsM, 1961, 460 p.

Received 06/08/18

Accepted 17/01/19

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 621.74:621.771

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-32-36>

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТЫХ ИНДЕФИНИТНЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х.

ЗАО «КЗПВ», Кушва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Актуальной задачей для прокатчиков является минимизация затрат на выпускаемую продукцию при условии обеспечения требуемого качества. Для ее решения осуществляются мероприятия по усовершенствованию технологического процесса прокатки, направленные на увеличение длительности кампаний и уменьшение количества переточек валков. На производительность прокатных валков влияют свойства материала рабочего слоя валков, определяющие со-

шенствованию технологического процесса прокатки, направленные на увеличение длительности кампаний и уменьшение количества переточек валков. На производительность прокатных валков влияют свойства материала рабочего слоя валков, определяющие со-

противление износу, образованию и развитию сетки разгара, устойчивость к налипанию металла. Листопрокатные валки чистовых клетей определяют качество поверхности листового проката, поэтому важно своевременно производить переточки для полного удаления слоя с сеткой разгара. Глубина съема и приемлемая длительность кампаний зависят от свойств материала рабочего слоя валков. Для улучшения свойств прокатных валков изготовителям валков важно иметь информацию о результатах эксплуатации валков в станах, позволяющую провести анализ влияния химического состава и структуры рабочего слоя валков на их производительность. Проведение такого анализа позволит улучшить структуру и свойства применяемых материалов и разработать новые.

Цель работы. Исследование влияния химического состава рабочего слоя индифинитных листопрокатных валков чистовых клетей на производительность (наработку) валков, оценка эффективности влияния каждого химического элемента и определение интервалов содержания химических элементов, наиболее эффективно повышающих производительность индифинитных листопрокатных валков.

Используемые методы. Создание базы данных по наработке индифинитных листопрокатных валков чистовых клетей,

искусственные нейронные сети на основе алгоритма двойственного функционирования.

Новизна. Получена нейромодель, позволяющая изучить влияние химического состава рабочего слоя и прогнозировать производительность индифинитных валков. Исследовано влияние углерода, кремния, марганца, хрома, никеля, молибдена, ванадия, ниобия и бора на производительность индифинитных валков.

Результаты. Построены графические диаграммы влияния каждого химического элемента на производительность индифинитных валков при постоянных концентрациях остальных элементов. Рассмотрено влияние химических элементов на производительность с точки зрения воздействия их на структуру индифинитного чугуна. Определены эффективные интервалы содержания химических элементов.

Практическая значимость. Разработан новый химический состав индифинитного чугуна для рабочего слоя прокатных валков чистовых клетей листопрокатных станов, достигнуто повышение производительности валков на 12–14%.

Ключевые слова: прокатные валки, индифинитный чугун, химический состав, влияние, производительность, износостойкость.

Поступила 06.08.18

Принята в печать 17.01.19

Образец для цитирования

Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh. Effect of chemical composition on the performance of centrifugally cast indefinite chilled cast iron rolls // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 32–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-32-36>

For citation

Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulin I.Kh. Effect of chemical composition on the performance of centrifugally cast indefinite chilled cast iron rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 32–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-32-36>

РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВА СТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Колокольников В.М., Савинов А.С., Андреев С.М., Ангольд К.В.

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

Аннотация. Исследован процесс возникновения продольных деформаций по высоте объекта цилиндрической формы вследствие температурного перепада по его радиусу. Рассмотрен частный случай термонапряженного состояния при нагреве цилиндра. Получена количественная оценка деформационного поля при решении осесимметричной задачи нагрева объекта цилиндрической формы. На основании существующих аналитических зависимостей получены математические зависимости, позволяющие рассчитать нормальные, касательные и эквивалентные напряжения. В динамике их развития рассчитано напряженное состояние цилиндров радиусами 0,1 и 0,05 м при нагреве до 400°C. Показано, что изменение радиуса цилиндра при одинаковых условиях нагрева приводит к уменьшению максимальных растягивающих напряжений с 45,9 до 23,9 МПа, а сжимающих с 43,1 до 22,5 МПа. Определены главные напряжения по радиусу цилиндрического стержня при нагреве. С использованием критерия Губера–Мизеса–Генки определено изменение интенсивности напряженного состояния по радиусу цилиндра. Установлено, что в момент выравнивания температуры по радиусу цилиндра наибольшие напряжения возникают в периферии слоя и центральных областях исследуемого объекта и составляют при заданных условиях расчета 40,5 МПа. Отмечено, что разработанный математический аппарат может быть использован для оценки термонапряженного состояния прокатных валков в процессе их термообработки.

Ключевые слова: тепловое поле, радиальные координаты, термонапряженное состояние, главные напряжения, температурные деформации, условия прочности.

Введение

Технологические процессы в металлургии зачастую происходят с изменением температурного режима рабочих узлов и деталей используемого оборудования. При этом могут возникать значительные термические напряжения, приводящие к выходу из строя машин и агрегатов в различных отраслях металлургии. В связи с этим возникает необходимость достаточно точного расчета термонапряженного состояния объектов металлургической промышленности, что может быть использовано для анализа и прогнозирования критических состояний как узлов и механизмов, так и изделий в процессе их изготовления, например термической обработки [1,2]. Одним из таких объектов являются прокатные валки, имеющие поверхность вращения, термическая обработка которых сопряжена с риском возникновения критических напряжений и, как следствие, с нарушением сплошности материала отливки. Поэтому математическое описание процесса термонапряженного состояния является весьма актуальной задачей.

Методы исследования

Рассмотрим возникновение напряженного состояния при нагреве цилиндрического стержня

в условиях упругого деформирования. Известно, что при перепаде температур по телу цилиндра при его нагреве возникают радиальные σ_r , окружные σ_θ , продольные $\sigma_{терм}$ и касательные $\tau_{терм}$ напряжения (рис. 1).

При разрушении хрупкого тела пределы прочности при растяжении значительно ниже пределов прочности на сжатие. Следовательно, считается, что растягивающие напряжения опаснее сжимающих. Известно, что при упругих деформациях напряжения прямо пропорциональны возникающим внутри тела деформациям.

Данная работа посвящена вопросу возникновения растягивающих и сжимающих упругих относительных деформаций и напряжений при температурном перепаде по радиусу цилиндра.

Рассмотрим цилиндр радиусом R и высотой l_i , разрез которого представлен на рис. 2, а. Учитывая, что по осям x и y задача симметричная, определим возникновение напряжений в четверти рассматриваемого цилиндра (рис. 2). Разобьем исследуемый объект на ряд слоев толщиной h , обозначив границы полученных слоев как $i=[1...N]$, $[N+1...K]$ (рис. 2, а, б). В процессе решения поставленной задачи будем определять деформацию границы $i=N$ при охлаждении цилиндра [3–5]. Считаем, что температурное поле цилиндрического стержня, выраженного температурами в границах слоев T_i в исследуемый момент времени, известно.

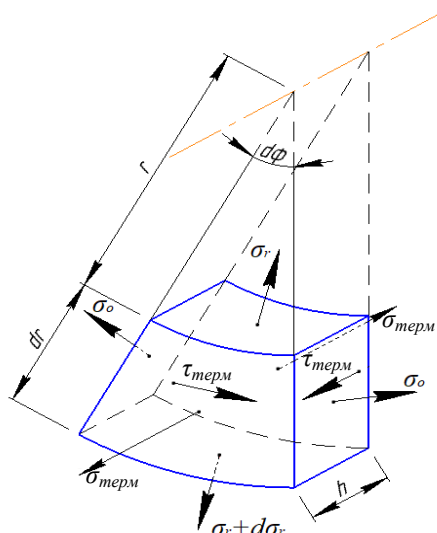


Рис. 1. Схема напряженного состояния при нагреве цилиндра

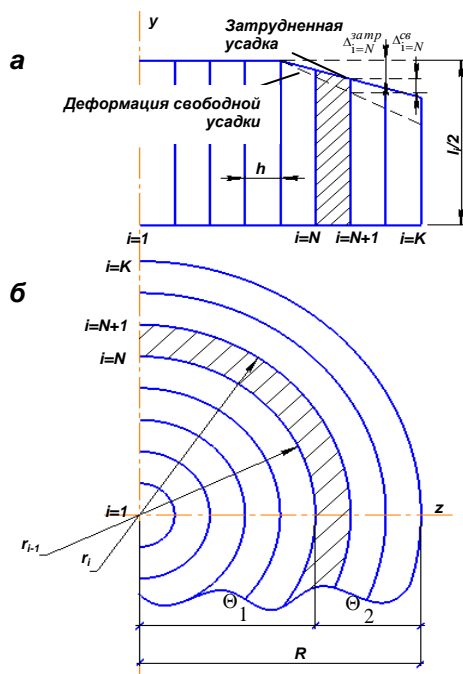


Рис. 2. Схема к расчету температурных деформаций

Рассмотрим температурные деформации, возникающие в сплошном цилиндре радиусом R . Деформация свободной усадки $\Delta_{i=N}^{св}$ границы $i=N$ без учета влияния соседних растягивающих и сжимающих ее слоев по оси y будет выражена следующей формулой:

$$\Delta_{i=N}^{св} = \frac{1}{2} l_i \Delta T^p \alpha, \quad (1)$$

где $\Delta_{i=N}^{св}$ – абсолютное значение свободной усадки границы $i=N$, м;

$\Delta T^p = T_{\max} - T_{i=N}$ – разность между максимальной температурой цилиндра (температурой центра при охлаждении) и температурой исследуемой границы слоя $i=N$, °C;

α – коэффициент температурного расширения, °C⁻¹.

Тогда абсолютная деформация при затруднении $\Delta_{i=N}^{затр}$ будет складываться из соотношения жесткостей слоев, растягивающих границу θ_1 и сжимающих ее θ_2 (индекс 1 относится к элементу, формируемому слоями $i=1 \dots N$, индекс 2 – к элементу, формируемому слоями $i=N+1 \dots K$), и выражаться как [6]

$$\Delta_{i=N}^{затр} = \frac{1}{2} l_i \Delta T^p \alpha \left(\frac{\Theta_2}{\Theta_1 + \Theta_2} \right), \quad (2)$$

где

$$\Theta_1 = \sum_{i=1}^{N-1} E_i(t) A_i, \quad (3)$$

$$\Theta_2 = \sum_{i=N+1}^K E_i(t) A_i, \quad (4)$$

где $E_i(t)$ – температурная зависимость модуля продольной упругости i -й границы слоя, МПа;

A_i – площадь слоя, см².

Площадь слоя вычисляется по формуле

$$A_i = \pi r_i^2 - \pi r_{i-1}^2. \quad (5)$$

Откуда при толщине слоя h (см. рис. 2)

$$A_i = \pi h^2 (2i - 3). \quad (6)$$

Учитывая уравнение равновесия [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X &= 0, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y &= 0, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx}, \end{aligned} \quad (7)$$

где X , Y и Z – составляющие массовых сил, приходящихся на единичный объем.

Для учета влияния температуры слоев, находящихся слева и справа от рассматриваемого слоя $i=N$, перепишем выражения (3) и (4) как [8]

$$\Theta_1 = \sum_{i=1}^{N-1} E_i(t) \pi h^2 (2i - 3) \left(\frac{T_i - T_N}{T_{\max} - T_N} \right), \quad (8)$$

$$\Theta_2 = \sum_{i=N+1}^K E_i(t) \pi h^2 (2i - 3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right), \quad (9)$$

где T_i – температура i -й границы слоя, °C;
 T_N – температура границы слоя $i=N$, °C.

Величина абсолютной растягивающей деформации равна разности между величинами свободной и затрудненной усадки:

$$\Delta_{i=N}^{расм} = \Delta_{i=N}^{св} - \Delta_{i=N}^{затм}. \quad (10)$$

Подставив в выражение (10) уравнения (1), (2), получим:

$$\Delta_{i=N}^{расм} = \frac{1}{2} l_i \Delta T^p \alpha \left(1 - \frac{\Theta_2}{\Theta_1 + \Theta_2} \right). \quad (11)$$

Приняв во внимание выражение (8), (9), на основании формулы (11) вычислим зависимость растягивающей абсолютной деформации при температурном перепаде по радиусу цилиндра

$$\Delta_{i=N}^{расм} = \frac{1}{2} l_i \Delta T^p \alpha \left(1 - \frac{\sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)}{\sum_{i=1}^{N-1} E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_i - T_N}{T_{\max} - T_N} \right) + \sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)} \right). \quad (12)$$

Разделив обе части уравнения (12) на $\frac{1}{2} l_i$, получим выражение относительной растягивающей деформации границы $i=N$

$$\varepsilon_{i=N}^{расм} = \Delta T^p \alpha \left(1 - \frac{\sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)}{\sum_{i=1}^{N-1} E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_i - T_N}{T_{\max} - T_N} \right) + \sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)} \right). \quad (13)$$

Аналогичный подход был применен для определения относительной деформации слоя $i=N$ при сжатии

$$\varepsilon_{i=N}^{сжс} = \Delta T^{сжс} \alpha \left(\frac{\sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_N - T_i}{T_N - T_{\min}} \right)}{\sum_{i=1}^{N-1} E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_i - T_N}{T_N - T_{\min}} \right) + \sum_{i=N+1}^K E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_N - T_i}{T_N - T_{\min}} \right)} \right), \quad (14)$$

где $\Delta T^{сжс} = T_N - T_{\min}$ – разность между температурой исследуемой границы слоя $i=N$ и минимальной температурой i -го слоя цилиндра, °C.

Если в работе происходит моделирование напряженного состояния цилиндрического объекта с циклическим изменением окружающей среды (например, при термической обработке), то для таких случаев выражения (13) и (14) следует переписать как

$$\varepsilon_{i=N}^{расм} = \Delta T^p \alpha \left(1 - \frac{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i < T_N; N \neq i}}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)}{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i \geq T_N; N \neq i}}^K E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_i - T_N}{T_{\max} - T_N} \right) + \sum_{\substack{i=1, \\ T_i < T_N; N \neq i}}^K E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_N - T_i}{T_{\max} - T_N} \right)} \right), \quad (15)$$

$$\varepsilon_{i=N}^{сжс} = \Delta T^{сжс} \alpha \left(\frac{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i \leq T_N; N \neq i}}^K E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_N - T_i}{T_N - T_{\min}} \right)}{\sum_{\substack{i=1, \\ T_i > T_N; N \neq i}}^{N-1} E_i(t)(2i-3) \left(1 + \frac{T_i - T_N}{T_N - T_{\min}} \right) + \sum_{\substack{i=1, \\ T_i \leq T_N; N \neq i}}^K E_i(t)(2i-3) \left(\frac{T_N - T_i}{T_N - T_{\min}} \right)} \right). \quad (16)$$

Общую относительную деформацию границы $i=N$ определим как результирующую деформаций сжатия и растяжения:

$$\varepsilon_{i=N}^{общ} = \varepsilon_{i=N}^{расст} - \varepsilon_{i=N}^{сж} \quad (17)$$

Результаты исследования

С использованием выражений (13)–(17) проведем расчет температурных деформаций цилиндра из стали марки Ст3. Время расчета 200 с, радиус цилиндра 0,1 м, система разбивалась на 50 слоев толщиной $\delta=0,001$ м, шаг по времени

0,1 с, теплопроводность $\lambda = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{°C}}$, теплоемкость

$c = 502 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$, плотность исследуемого объекта

$\rho = 7820 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, модуль продольной упругости

$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коэффициент температурного расширения $\alpha = 15 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$. Начальная температура цилиндра $T_0 = 20 \text{ °C}$, температура окружающей среды $T_{cp} = 400 \text{ °C}$.

Для определения температурных деформаций с использованием численного метода решения задач теплопроводности проведен расчет изменения теплового поля во времени. Результат расчета нагрева цилиндра представлен на **рис. 3, а**.

Полученные количественные значения температур по радиусу цилиндра были использованы для определения возникающих температурных деформаций по формулам (15)–(17). Результаты расчета показаны на **рис. 3, б**. Видно, что наибольшую растягивающую деформацию испытывает центр нагреваемого тела, в то время как на поверхности происходит сжатие периферийных слоев цилиндра.

Действительно, периферийные слои цилиндра, подвергаясь нагреву, не могут свободно деформироваться в связи с влиянием соседних, более холодных слоев, вследствие чего происходит сжатие поверхностного слоя, в то время как центр объекта имеет наименьшую температуру, а следовательно, более нагретые слои растягивают его (**см. рис. 3, б**).

Рассмотрим вопрос связи упругих продольных деформаций цилиндрического объекта с возникающими напряжениями.

Пусть в плоской системе сил вычленили по радиусу цилиндра квадратный элемент, площади которого ограничены слоями $i, i+1$ (**рис. 4, а**).

В начальный момент времени величина стороны элемента равна δ . Под воздействием температурного поля в момент времени j произошло изменение размеров, выраженное относительной деформацией границ $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}$, которые к моменту времени j будут иметь следующие размеры (**рис. 4, б**). При этом в первом приближении считаем, что нижняя грань элемента усаживается свободно, и ее размер может быть выражен следующей формулой:

$$z^j = (\delta + \alpha \Delta T \delta), \quad (18)$$

где $\Delta T = T_{i+\frac{1}{2}} - T_{нач}, \text{ °C}$;

а боковые грани элемента изменяются как

$$\delta_i^j = (\varepsilon_i + 1)\delta, \quad (19)$$

$$\delta_{i+1}^j = (\varepsilon_{i+1} + 1)\delta. \quad (20)$$

Возникающий при температурной продольной деформации угол γ можно определить

$$\text{tg} \gamma = \frac{x}{z^j}, \quad (21)$$

где γ – угол сдвига, рад.

При

$$x = \frac{\delta_i^j - \delta_{i+1}^j}{2}. \quad (22)$$

Получим

$$\text{tg} \gamma = \left| \frac{\delta_i^j - \delta_{i+1}^j}{2z^j} \right|. \quad (23)$$

Учитывая выражения (19)–(22), получим

$$\text{tg} \gamma = \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2(1 + \alpha \Delta T)} \right|. \quad (24)$$

Откуда

$$\gamma = \arctg \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2(1 + \alpha \Delta T)} \right|. \quad (25)$$

Делитель $(1 + \alpha \Delta T)$ – величина второго порядка малости и практически не влияет на конечный расчет угла сдвига. Тогда уравнение (25) можно переписать как

$$\gamma = \arctg \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2} \right|. \quad (26)$$

Откуда, используя закон Гука для деформации упругого сдвига, возможно определение возникающих касательных напряжений:

$$\tau = G(t)\gamma, \quad (27)$$

где $G(t)$ – температурная зависимость модуля упругости II рода (модуля сдвига), МПа.

Тогда, подставив в (27) выражение (26), получим формулу термических напряжений при температурной деформации продольных слоев:

$$\tau_{терм} = G(t) \operatorname{arctg} \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2} \right|. \quad (28)$$

В случае если температурная зависимость модуля сдвига для материала не известна, то полученные касательные напряжения можно выразить через температурные зависимости модуля продольной упругости [9]:

$$\tau_{терм} = \frac{E(t)}{2(1+\mu)} \operatorname{arctg} \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{2} \right|. \quad (29)$$

Возникающие при температурном перепаде нормальные напряжения определяли по формуле

$$\sigma_{терм} = E(t) \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2}. \quad (30)$$

По полученным формулам (28)–(30) проведен расчет изменения нормальных и касательных напряжений в динамике, где видно, что наибольший рост напряжений для рассматриваемого объекта идет до 160–180 с. В дальнейшем происходит уменьшение скорости роста напряжений, связанное с выравниванием температурного поля по радиусу цилиндра (рис. 5, а). Аналогичная картина возникает и при определении касательных напряжений (рис. 5, б).

Анализ распределения нормальных напряжений по радиусу цилиндра (рис. 6) говорит о смене напряженного состояния с напряжений сжатия на напряжения растяжения, максимумы которых возникают в центре исследуемого объекта. Действительно, поверхность объекта под воздействием температур греющей среды подвергается сжимающим деформациям вследствие соприкосновения с более холодными слоями, располагающимися внутри исследуемого объекта. Между тем, как показывает рис. 3, а, наименьшую температуру имеет центр цилиндра, который, взаимодействуя с более нагретыми слоями, подвергается максимальным растягивающим напряжениям, что и отражено на рис. 6.

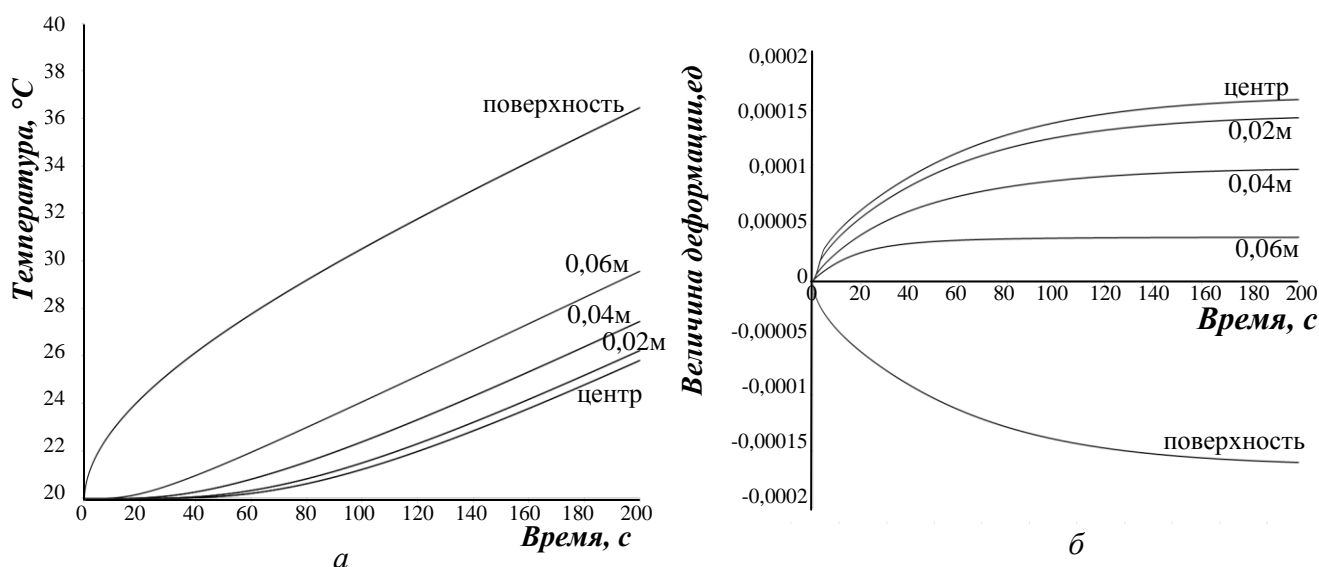


Рис. 3. Зависимости величин во времени по толщине слоя для цилиндра радиусом 0,1 м: а – зависимость температуры; б – зависимости величины деформации

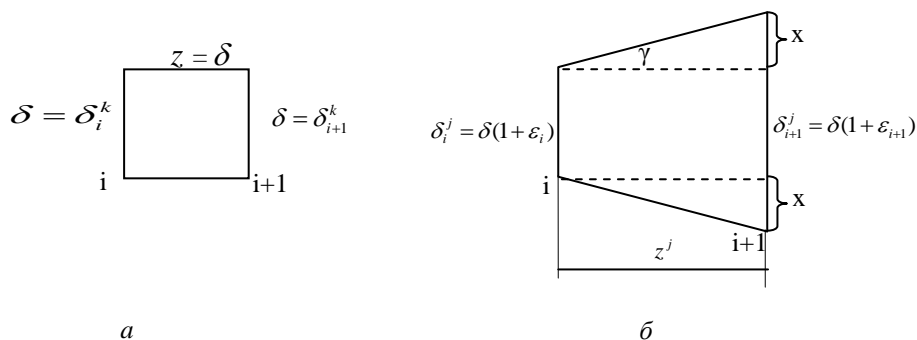


Рис.4. Схема к расчету напряженного состояния:
а – в первый момент времени; б – в момент времени γ

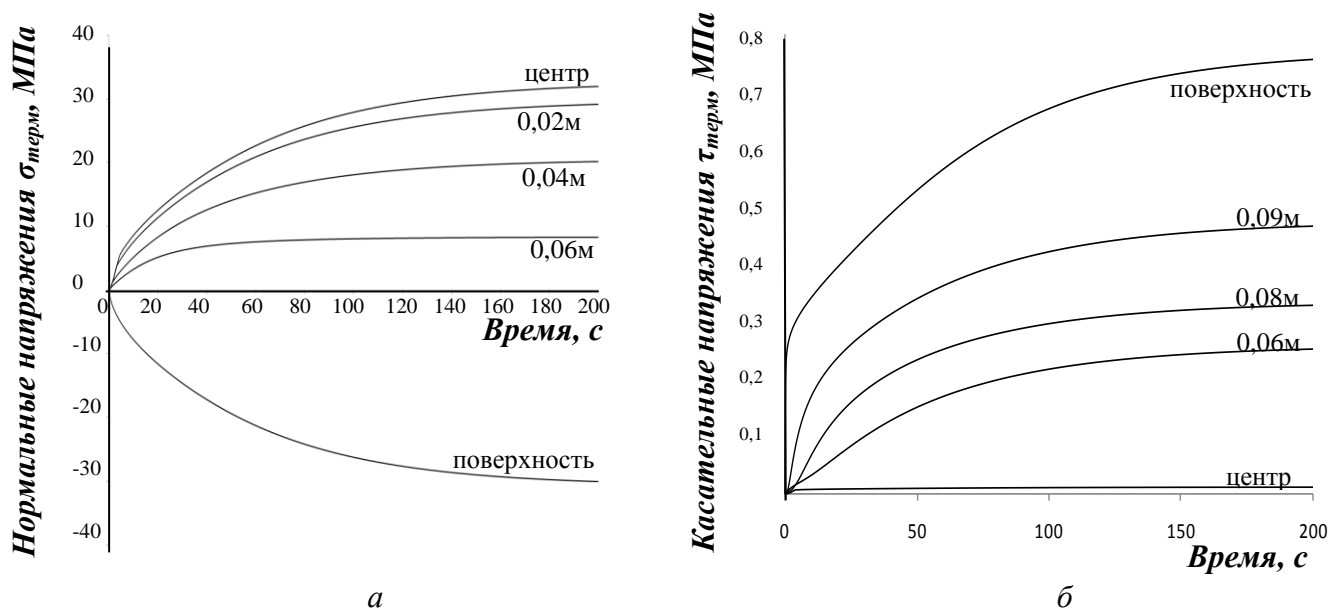


Рис. 5. Зависимости напряжений во времени по толщине слоя для цилиндра радиусом 0,1 м:
а – зависимость нормальных напряжений; б – зависимость касательных напряжений

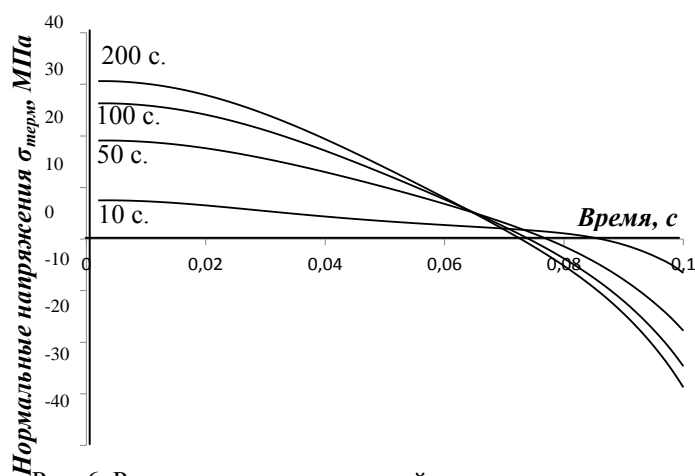


Рис. 6. Распределение напряжений во времени
по радиусу цилиндра 0,1 м

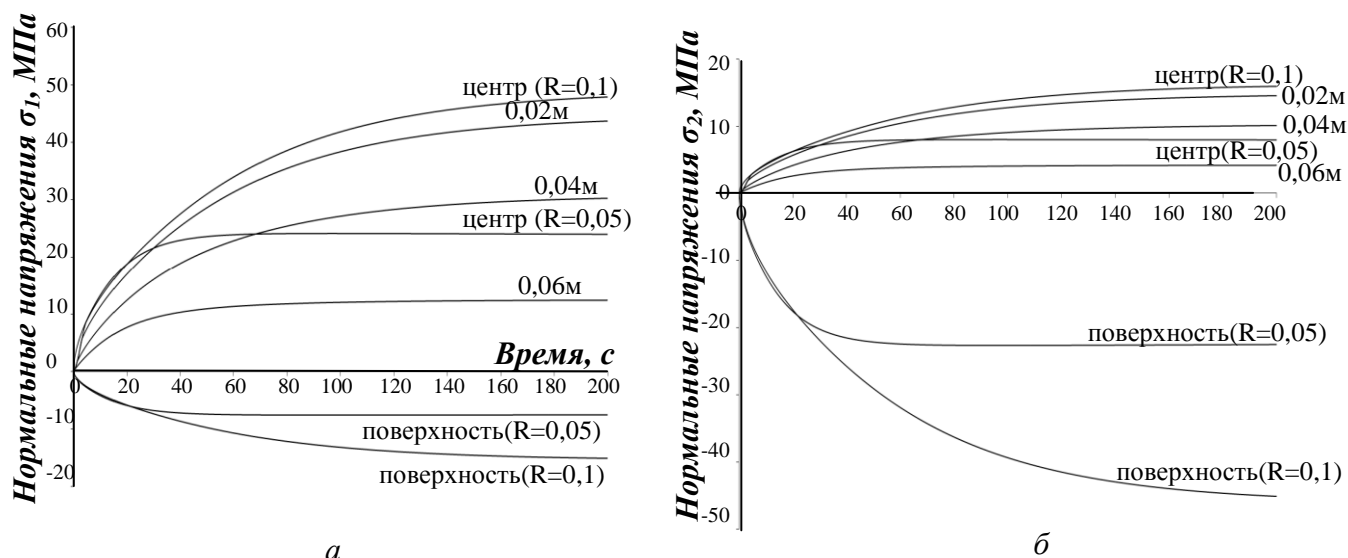


Рис. 7. Зависимости нормальных напряжений во времени по толщине слоя для цилиндров радиусом 0,1 и 0,05 м

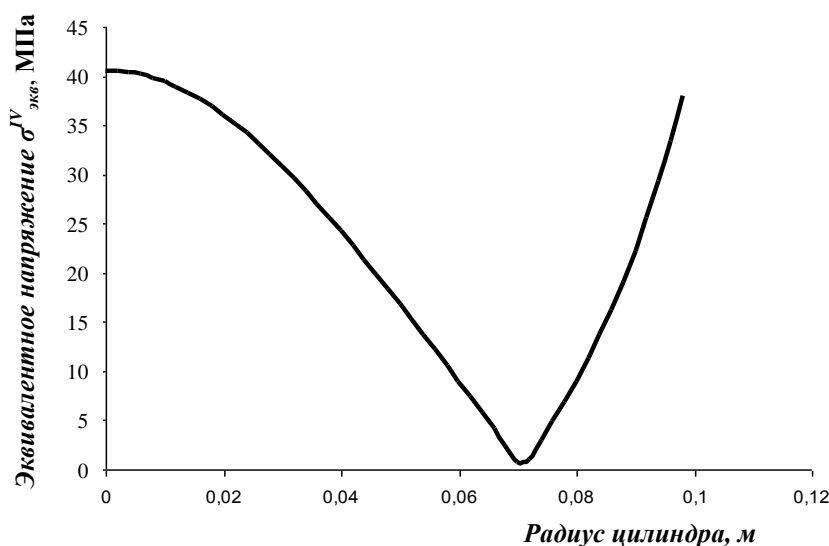


Рис. 8. Распределение эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$ по радиусу цилиндра

При этом исследование изменения нормальных напряжений по радиусу цилиндра показывают, что существует переход от растянутых слоев к сжатым (точка пересечения с осью абсцисс, см. рис. 6). В этих точках происходит только деформация чистого сдвига. Со временем положение слоев с деформацией чистого сдвига смещается к центру цилиндра.

Полученная картина распределения напряжений при продольных деформациях позволила определить главные напряжения σ_1 , σ_2 , возникающие при температурном перепаде по радиусу цилиндра (см. рис. 5). Расчет производится по следующим формулам [10]:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{\text{терм}}}{2} + \frac{\sqrt{\sigma_{\text{терм}}^2 + 4\tau_{\text{терм}}^2}}{2}; \quad (31)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{\text{терм}}}{2} - \frac{\sqrt{\sigma_{\text{терм}}^2 + 4\tau_{\text{терм}}^2}}{2}. \quad (32)$$

Как видно на рис. 7, σ_1 значительно больше σ_2 , что согласуется с существующими представлениями о напряженном состоянии стенки цилиндра. Однако анализ изменения напряженного состояния в исследуемых волокнах говорит о совпадении знаков главных напряжений. То есть центр объекта, слои на радиусах 0,02 и 0,04 испытывают всестороннее растяжение. Между тем поверхность цилиндра испытывает всестороннее сжатие.

Для выявления влияния геометрических параметров, выраженных радиусом цилиндра, на его

напряженно-деформированное состояние был произведен расчет главных напряжений σ_1 , σ_2 цилиндра из стали 3 радиусом 0,05 м. Результаты расчета представлены на **рис. 7**. Как видно из рисунка, динамика роста напряженного состояния практически не изменяется от изменения радиуса, однако окончание роста главных напряжений наступает значительно раньше, в районе 40 с. Это связано с более быстрым прогревом объекта и, как следствие, с меньшим перепадом температур по радиусу цилиндра, что приводит к значительному падению возникающих максимальных растягивающих напряжений с 45,9 до 23,9 МПа и сжимающих с 43,1 до 22,5 МПа. Это соответствует физическому смыслу возникновения термонапряженного состояния объекта.

Полученные значения главных напряжений могут быть использованы для оценки прочности изделия. Учитывая, что сталь 3 относится к пластичным материалам, для обобщения полученных напряжений используем четвертую гипотезу прочности [9, 10]:

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_{21} - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \leq [\sigma], (33)$$

где $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$ – эквивалентное напряжение по IV гипотезе прочности, МПа;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Или для плоского напряженного состояния, рассматриваемого в работе:

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq [\sigma]. (34)$$

В момент времени $t=200$ с изменение эквивалентного напряжения по радиусу цилиндра $R=0,1$ м графически выразится зависимостью, представленной на **рис. 8**.

Для пластичного материала опасное состояние возникает при превышении им предела текучести как при деформация сжатия, так и растяжения. Это наблюдается на **рис. 8**, где рост эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$ происходит как на растянутых, так и сжатых слоях, при этом экстремум функции наблюдается в районе нейтрального слоя при переходе от растянутых слоев к сжатым (**см. рис. 6**). Сравнив полученные значения $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$ с допускаемыми напряжениями, можно произвести оценку прочности исследуемого цилиндра.

Заключение

Моделирование и расчет термонапряженного состояния цилиндрического тела (в частности прокатных валков при термообработке), позволяет сравнить текущее напряженное состояние с критическим с целью оценки прочности материала. Это обеспечивает на стадии проектирования технологического цикла термической обработки изделия выявление критических деформаций и напряжений, приводящих к разрушению стенки изделия и, как следствие, возможности управления его напряженно-деформированным состоянием с целью исключения нарушения сплошности материала, приводящего к браку в отливке.

Список литературы

1. T.K. Roy, B. Bhattacharya, C. Ghosh, S.K. Ajmani, Advanced High Strength Steel, Springer Nature Singapore Pte Ltd, New York, 2018.
2. R.B. Hetnarski, Encyclopedia of Thermal Stresses, Springer Dordrecht Heidelberg, New York, 2014.
3. R.B. Hetnarski, M.R. Eslami, Thermal Stresses – Advanced Theory and Applications, Springer, New York, 2009.
4. N. Fonstein, Advanced High Strength Sheet Steels, Springer, New York, 2015.
5. V. V. Kharchenko, Strength of Materials, Springer, New York, 2014.
6. A. Davies, Handbook of Condition Monitoring, Springer, New York, 1998.
7. Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С. Моделирование температурных полей при получении отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 39–43.
8. Савинов А.С., Колокольцев В.М., Ибрагимов Ф.Г. Идентификация термических напряжений при температурном градиенте в плоской стенке отливки // Сталь. 2014. №4. С. 156–160.
9. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
10. Савинов А.С., Дьяченко Д.Я., Фролушкина К.А. Расчет температурных деформаций при охлаждении пластины // Механическое оборудование металлургических заводов. 2012. №1. С. 177–180.
11. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. М.: Мир, 1970. 423 с.
12. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. М.: МАШГИЗ, 1963. 355 с.
13. Дарков А.В., Широ Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1975. 654 с.
14. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1975. 654 с.

Поступила 25.12.18

Принята в печать 14.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-37-45>

CALCULATION OF A THERMAL STRESS STATE, WHEN HEATING A STEEL CYLINDRICAL OBJECT

Valery M. Kolokoltsev – DSc (Eng.), Professor, President

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

Aleksandr S. Savinov – DSc (Eng.), Associate Professor, Director of the Metallurgy,

Mechanical Engineering and Materials Processing Institute

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

Sergey M. Andreev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automated Control Systems

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

Karolina V. Angold – Student

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

Abstract. The paper studies longitudinal strains occurring along the height of a cylindrical object as a result of the temperature difference along the cylinder radius. It describes a particular case of a thermal stress state, when heating a cylinder. A temperature field was measured, when solving an axisymmetric task of heating a cylindrical object. Using the existing analytical dependence, the authors identified mathematical relations to calculate normal, tangential, and equivalent stresses. Such procedure may be applied to determine a stress state of cylinders 0.1 and 0.05 m in radius, when heating up to 400°C. It is shown that changes in a cylinder radius, maintaining the same heating conditions, result in decreasing maximum tension stresses from 45.9 to 23.9 MPa, and compressive stresses from 43.1 to 22.5 MPa. The authors determined principal stresses along a cylindrical rod radius during heating. Applying the Huber–Mises–Hencky criterion, changes in a growth rate of the stress state along a cylinder radius was determined. It is found that at the point of equalizing temperature along the cylinder radius, the highest stresses are in the layer periphery and central areas of the object under study and amount to 40.5 MPa at set conditions of calculations. It is noted that the developed mathematical tool may be used to evaluate a thermal stress state of mill rolls during their heat treatment.

Keywords: Temperature field, radial coordinates, thermal stress state, principal stresses, temperature strains, strength conditions.

References

1. T.K. Roy, B. Bhattacharya, C. Ghosh, S.K. Ajmani. Advanced high strength steel. Springer Nature Singapore Pte Ltd, New York, 2018.
2. R.B. Hetnarski. Encyclopedia of thermal stresses. Springer Dordrecht Heidelberg, New York, 2014.
3. R.B. Hetnarski, M.R. Eslami. Thermal stresses – advanced theory and applications. Springer, New York, 2009.
4. N. Fonstein. Advanced high strength sheet steels. Springer, New York, 2015.
5. V. V. Kharchenko. Strength of materials. Springer, New York, 2014.
6. A. Davies. Handbook of condition monitoring. Springer, New York, 1998.
7. Kolokoltsev V.M., Sinitskiy E.V., Savinov A.S. Modeling temperature fields, when producing castings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 1, pp. 39–43. (In Russ.)
8. Savinov A.S., Kolokoltsev V.M., Ibragimov F.G. Identification of the thermal stress with a temperature gradient in a plane casting wall. *Stal* [Steel], 2014, no. 4, pp. 156–160. (In Russ.)
9. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference methods of solving heat conduction problems]. Tomsk: TPU Publishing House, 2007, 172 p. (In Russ.)
10. Savinov A.S., Dyachenko D.Ya., Frolushkina K.A. Calculation of temperature deformations, when cooling a plate. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants], 2012, no. 1, pp. 177–180. (In Russ.)
11. Durelli A., Riley W. *Vvedenie v fotomekhaniku* [Introduction to photomechanics]. Moscow: Mir, 1970, 423 p. (In Russ.)
12. Abramov V.V. *Ostatochnye napryazheniya i deformatsii v metallakh* [Residual stresses and deformations in metals]. Moscow: MASHGIZ, 1963, 355 p. (In Russ.)
13. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 654 p. (In Russ.)
14. Stepin P.A. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 654 p. (In Russ.)

Received 25/12/18

Accepted 14/01/19

Образец для цитирования

Расчет термонапряженного состояния нагрева стального цилиндрического объекта / Колокольцев В.М., Савинов А.С., Андреев С.М., Ангольд К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 37–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-37-45>

For citation

Kolokoltsev V.M., Savinov A.S., Andreev S.M., Angold K.V. Calculation of a thermal stress state, when heating a steel cylindrical object. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 37–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-37-45>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ
ВНУТРЕННИХ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВГун Е.И.¹, Вахитов А.Р.¹, Сальников В.В.¹, Гун И.Г.¹, Хон Ортутэа², Агустин Анитуа²¹АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия²LANBI S.A., Эльгойбар, Страна Басков, Испания

Аннотация. При проектировании процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников закономерно возникает вопрос о параметрах этого процесса, которые непосредственно оказывают влияние на характер деформации корпуса, и, в конечном счете, на формирование неразъемного соединения шарового пальца и корпуса наконечника. Таковыми параметрами являются усилие, реализуемое прессом, перемещение пуансона и геометрия матрицы. От правильного выбора указанных параметров зависит качество полученного неразъемного соединения. Соединение считается наиболее рациональным, если вкладыш наконечника будет равномерно обжат: нагрузка будет равномерно распределена по рабочей поверхности вкладыша со стороны сферы шарового пальца и сферической поверхности сформированного корпуса. Для этого пресс должен обеспечить необходимое усилие и перемещение, геометрические параметры матрицы должна обеспечить требуемую форму сформированной части корпуса. Качество полученного неразъемного соединения оценивается на готовом изделии по ряду эксплуатационных характеристик, значения которых должны находиться в приемлемых с точки зрения заказчика интервалах. К эксплуатационным характеристикам относятся такие параметры, как момент сопротивления качанию шарового пальца, момент страгивания при качании шарового пальца, осевой зазор в шарнире и осевая жесткость шарнира. С целью определения указанных параметров без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами, была разработана численная модель процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников на базе метода конечных элементов. Требуемое усилие прессы, его перемещение и геометрию матрицы предлагается определять по результатам моделирования процесса опрессовки методом конечных элементов. Проведённые экспериментальные исследования позволили сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов разработанной математической модели с экспериментальными данными.

Ключевые слова: внутренний рулевой наконечник, технологическая операция, технологические параметры, матрица, пуансон, эксплуатационные характеристики, конечно-элементная модель, сборочная линия.

Введение

В настоящее время в России ведущими производителями легковых и малотоннажных грузовых автомобилей в подавляющем большинстве случаев применяется реечный рулевой механизм с возвратно-поступательным движением на выходе. Одно из преимуществ данного типа рулевого механизма является возможность установки боковых поперечных тяг с шарнирами на концах к зубчатой рейке. Такое устройство рулевого управления позволяет не применять маятниковый рычаг и среднюю тягу, тем самым обеспечивая возможность разместить рулевое управление в малом объеме [1]. Указанные преимущества обуславливают широкое распространение реечного рулевого управления.

В этой связи растет потребность и в комплектующих привода реечного рулевого управления, в частности внутренних рулевых наконечниках. Общий вид внутреннего рулевого наконечника представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внутренний рулевой наконечник (общий вид)

Наиболее распространенным типом конструкции внутреннего рулевого наконечника является сферический шарнир (с 3-я вращательными степенями свободы). Неразъемное соединения шарового пальца наконечника и корпуса

формируется посредством пластической деформации (опрессовки) корпуса. От качества процесса опрессовки зависит равномерность распределения нагрузки по рабочей поверхности вкладыша со стороны сферы шарового пальца и сферической поверхности сдеформированного корпуса.

Анализ открытых источников выявил отсутствие какой-либо информации о выборе параметров процесса опрессовки (усилие пресса и перемещение пуансона, геометрия матрицы), которые непосредственно оказывают влияние на характер деформации корпуса наконечника, а следовательно, и на его эксплуатационные характеристики.

В связи с вышеизложенным, актуальной считается задача разработки метода расчётного определения технологических параметров процесса опрессовки на этапе проектирования без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами с целью сокращения сроков проектирования и объема доводочных работ.

Методы исследования

Внутренний рулевой наконечник является элементом привода реечного рулевого управления. Он представляет из себя сферический шарнир, обеспечивающий передачу управляющего усилия от зубчатой рейки на поворотную цапфу через наружный рулевой наконечник. При изменении положения поворотного кулака относительно зубчатой рейки шаровой палец отклоняется на необходимый угол качания. Ограничение трех поступательных степеней свободы происходит посредством формирования неразъемного соединения пластическим деформированием корпуса. Конструкция внутреннего рулевого наконечника представлена на **рис. 2**.

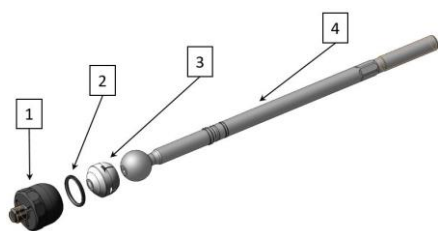


Рис. 2. Внутренний рулевой наконечник:
1 – корпус; 2 – опорное кольцо; 3 – вкладыш;
4 – палец шаровой

Внутренний рулевой наконечник состоит из корпуса 1, опорного кольца 2, вкладыша 3 и шарового пальца 4.

Указанная конструкция защищена патентом на полезную модель (№ 185066 от 19.11.2018г.) [2].

Сборка наконечника состоит из двух технологических операций: подборки и опрессовки. На первой операции опорное кольцо 2 помещается на дно корпуса 1, затем на опорное кольцо 2 располагается вкладыш 3. Далее внутрь вкладыша заправляется консистентная смазка, после чего во вкладыш 3 вставляется шаровой палец. На **рис. 3** показана схема подборки.

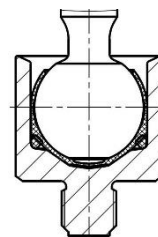


Рис. 3. Схема подборки

За операцией подборки следует операция опрессовки. Подсобранный изделие базируется в матрице. Затем пуансон, перемещаясь в осевом направлении, воздействует на плоский торец корпуса, производя его деформацию в матрице. На **рис. 4** показан результат опрессовки внутреннего рулевого наконечника.

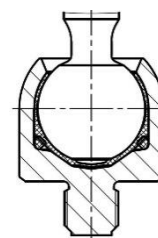


Рис. 4. Результат процесса опрессовки

Качество полученного неразъемного соединения оценивается на готовом изделии по ряду эксплуатационных характеристик, значения которых должны находиться в приемлемых с точки зрения заказчика интервалах. К эксплуатационным характеристикам относятся следующие параметры [3]:

- момент сопротивления качанию пальца;
- момент страгивания при качании пальца;
- осевой зазор в шарнире;
- осевая жесткость шарнира.

Достижение необходимых интервалов значений эксплуатационных характеристик возможно при равномерном обжатии корпусом вкладыша при его деформировании.

О равномерности обжатия корпусом вкладыша можно судить по форме сдеформирован-

ного корпуса, получившегося в результате моделирования. Наиболее рациональным соединением будет считаться при одновременном выполнении двух критериев:

Критерий №1: Центр внутренней сферической поверхности сформированного корпуса должен совпадать с теоретическим положением центра сферы пальца (рис. 5), т.е. размер $\delta \rightarrow 0$.

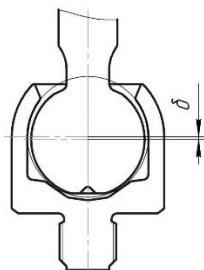


Рис. 5. Размер δ

Критерий №2: Разность между диаметром внутренней цилиндрической поверхности корпуса до деформации и внутренней сферической поверхностью сформированного корпуса должна стремиться к 0 (рис. 6, 7), т.е. $d_{k1} - d_{k2} \rightarrow 0$.

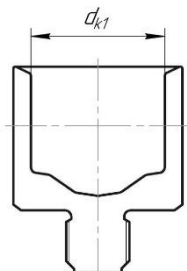


Рис. 6. Диаметр d_{k1}

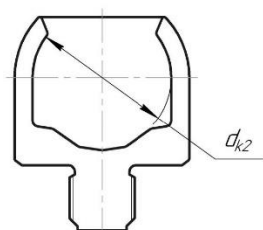


Рис. 7. Диаметр d_{k2}

Задача обеспечения указанных критериев на этапе проектирования посредством выбора указанных технологических параметров была решена для внутреннего рулевого наконечника, который на сегодняшний день входит в состав рулевого управления автомобилей ГАЗель Next и используется при сборке автомобилей на конвейере завода «ГАЗ».

Указанные технологические параметры могут быть определены по результатам моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника с использованием метода конечных элементов при учете физической и геометрической нелинейностей. Так как детали наконечника и оснастка являются телами вращения, рассмотрена 1/12 часть шарнира с граничными условиями симметрии [4]. Расчетная схема представлена на рис. 8.

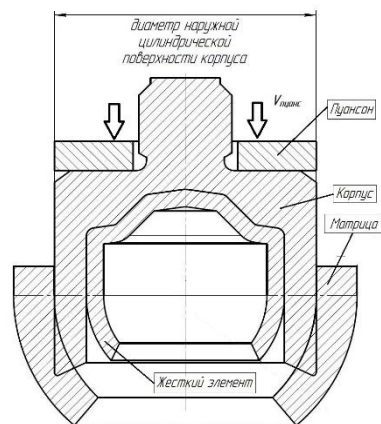


Рис. 8. Расчетная схема

В конечно-элементной модели (КЭМ) приняты следующие допущения:

- рассмотрена 1/12 часть шарнира с граничными условиями симметрии;
- упруго-пластическое поведение материалов описывается билинейной диаграммой напряжения-деформации [4];
- шаровой палец, опорное кольцо и вкладыш представляют собой единый жесткий элемент «палец-опорное кольцо-вкладыш» ввиду того, что наличие вкладыша из высоко-вязкого ацетального гомополимера и резинового опорного кольца в силу меньших по сравнению с корпусом и шаровым пальцем жесткостей не оказывают существенного влияния на процесс опрессовки [4–5]. В рамках проведенных экспериментальных работ справедливость указанного допущения была доказана.

Конечно-элементная сетка шарового пальца, корпуса, элемента «палец-опорное кольцо-вкладыш», пуансона и матрицы реализована в виде объемных восьмиузловых гексаэдров с тремя степенями свободы в узле для вычисления действующих силовых факторов и перемещений, а также одну точку интегрирования в центре гексаэдра для определения напряжений и деформаций. В модель введены балочные элементы для определения усилия опрессовки. Расчетное усилие опрессовки считается равным макси-

мальному значению продольной силы, возникающей в вертикально ориентированном балочном элементе (рис. 9).

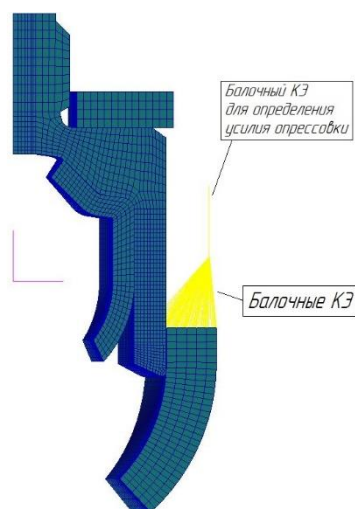


Рис. 9. Конечно-элементная сетка

КЭМ содержала следующие граничные условия:

- условие симметрии;
- заделка в узле балочного элемента, ограничивающая перемещения вдоль трёх осей координат и вращения вокруг них;
- контакт поверхностей (корпуса и матрицы, корпуса и элемента «палец-опорное кольцо-вкладыш», корпуса и пуансона), реализующий метод штрафных функций;
- принудительное перемещение узлов, находящихся на свободной поверхности пуансона.

Геометрические параметры матрицы и перемещение пуансона подбирались итерационно, вплоть до достижения указанных выше критериев. При заданном перемещении пуансона определялось расчетное усилие опрессовки как максимальное значение продольной силы, возникающей в балочном элементе.

Картина деформации приведена на рис. 10.

Для адекватной оценки точности предложенной модели путём сравнения результата моделирования с экспериментальными данными необходимо, чтобы геометрические характеристики деталей КЭМ и их механические свойства соответствовали геометрическим характеристикам и механическим свойствам экспериментальных образцов.

Для этого были отобраны пять корпусов с размерами и свойствами, наиболее близкими к значениям, указанным в процессе моделирования. Механические свойства определялись по поверхностной твердости [6–9]. Процесс опрес-

совки проводился на определенном в результате моделирования перемещении.

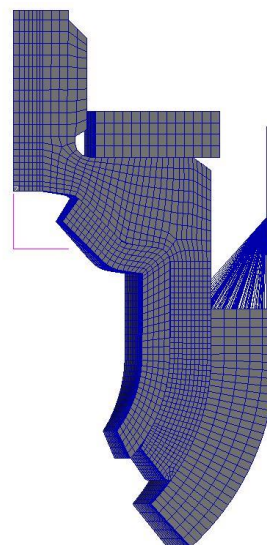


Рис. 10. Картина деформаций

Напряженно-деформированное состояние корпуса приведено на рис. 11.

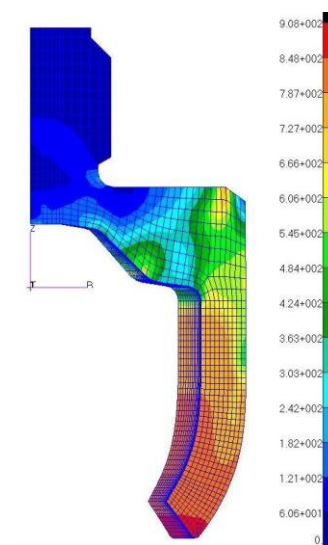


Рис. 11. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу

График расчетного усилия опрессовки в зависимости от перемещения пуансона и полученной экспериментальной кривой представлен на рис. 12. На заданном перемещении расчетное усилие опрессовки имеет значение порядка 350 кН.

Полученная форма сдеформированного корпуса шарнира наконечника после опрессовки приведена на рис. 13.

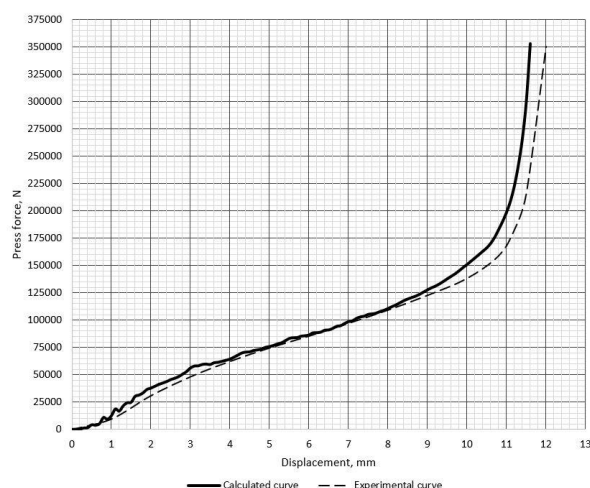


Рис. 12. Расчетная и экспериментальная кривые опрессовки



Рис. 13. Экспериментальный объект

Сравнительные значения указанных критериев на модели и экспериментальных объектах приведены в таблице.

Сравнительные значения критериев оценки качества соединения

Критерий	Значения по результатам моделирования	Экспериментальные значения
δ	0,01–0,03	0,025–0,03
$d_{k1} - d_{k2}$	0,06–0,08	0,07–0,085

Стоит отметить, что полученные значения эксплуатационных характеристик после операции опрессовки для указанных пяти изделий оказались в приемлемых интервалах.

Расчёты, выполненные с использованием разработанной и экспериментально апробированной КЭМ, позволили выбрать технологические параметры процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника, а также оценить напряженно-деформированное состояние корпуса наконечника. Полученная КЭМ будет использована на этапе проектирования перспективных изделий.

Полученное расчетное значение усилия опрессовки позволило выбрать параметры прессы для серийного производства внутренних наконечников ГАЗель Next.

Специалистами АО НПО «БелМаг» было сформулировано техническое задание для компании LANBI S.A. (Spain, Basque Country) с целью проектирования и производства сборочной линии внутренних рулевых наконечников.

Общий вид сборочной линии представлен на рис. 14.



Рис. 14. Общий вид сборочной линии

Сборочная линия включает в себя станции для проведения операций подсортировки, опрессовки, маркировки, а также станцию проверки эксплуатационных характеристик на готовом изделии (момента сопротивления качению пальца, момента страгивания при качении пальца, осевой зазор и осевую жесткость в шарнире).

В процессе совместной работы специалистов LANBI S.A. (Spain, Basque Country) при участии специалистов АО НПО «БелМаг» производственная линия апробирована, доведена и успешно запущена в Российской Федерации.

Заключение

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- разработана КЭМ процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников, позволяющая определять параметры технологического процесса на стадии проектирования с приемлемой степенью точности без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами;

- сравнение результатов расчетных данных и результатов экспериментов доказало адекватность разработанной КЭМ с точностью, приемлемой для прогнозирования напряженно-деформированного состояния изделия в зависимости от параметров технологического процесса;

- разработанная КЭМ может быть применена при проектировании процесса для перспективных изделий;

- результаты расчета, полученные с помощью разработанной КЭМ, позволили провести сравнительный анализ различных конструктивных исполнений матрицы и выбрать значения ее геометрических параметров, а также параметры пресса для новой сборочной линии;

- основываясь в том числе на результатах расчета, было проведена совместная работа специалистов LANBI S.A. (Spain, Basque Country) при участии специалистов АО НПО «БелМаг» по проектированию, производству, доводке, апробации и запуску новой сборочной линии.

Список литературы

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Рулевое управление / пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. А.А. Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.: ил.
2. Шаровой шарнир: пат. 185066 Рос. Федерация, МПК F16C 11/06 (2006.01) / Гун Игорь Геннадьевич, Калмыков Юрий Вячеславович, Гун Евгений Игоревич, Артюхин Владимир Иванович, Вахитов Александр Рафаэлевич.; заявитель и патентообладатель АО НПО «БелМаг». № 2018105009; заявл. 09.02.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. №32. 4 с.
3. Сальников В.В., Михайловский И.А., Гун И.Г. Моделирование процесса разрушения шарового шарнира передней подвески автомобиля при осевом нагружении // Журнал автомобильных инженеров. 2011. №2 (67). С. 51–53.
4. Расчетное определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путем моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников, В.И. Куцеденик, Е.И. Гун // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2(85). С. 20–24.
5. Создание и развитие теории квалитметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №5. С. 67–69.
6. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. 324 с.
7. Стенд для испытаний шаровых шарниров: пат. 2263889 Рос. Федерация: МПК G01M 13/00 (2000.01) / Михайловский И.А., Гун И.Г., Ясаков Ю.М., Лапчинский В.В.; заявитель и патентообладатель ЗАО НПО «БелМаг». № 2003137624/11; заявл. 29.12.2003; опубл. 10.11.2005, Бюл. №16. 2 с.
8. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А., Барышников М.П., Гун Г.С., Долгий Д.К., Ефимова Ю.Ю., Колокольцев В.М., Копцева Н.В., Куранов К.Ю., Лебедев В.Н., Мезин И.Ю., Полякова М.А., Чукин В.В.; под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Металлургиздат. 2014. 276 с.
9. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш., Копцева Н.В., Гун Г.С. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №1. С. 39–44.

Поступила 26.12.19

Принята в печать 28.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>

SIMULATION OF THE AXIAL JOINT PRESSING PROCESS

Evgeny I. Gun – PhD (Eng.), Deputy Technical Director of Design Development and Tests
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: e_goun@belmag.ru

Alexander R. Vakhitov – graduate student, Lead Design Engineer
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vakhitov@belmag.ru

Vitaly V. Salnikov – Deputy Technical Director
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salnikov@belmag.ru

Igor G. Gun – DSc (Eng.), CEO
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: goun@belmag.ru

Jon Ortueta – President of LANBI, S.A., Elgoibar
Basque Country, Spain. E-mail: jon.ortueta@lanbi.com

Agustin Anitua – Sales Manager of LANBI, S.A., Elgoibar
Basque Country, Spain. E-mail: agustin.anitua@lanbi.com

Abstract. When designing the axial joint pressing process, a relevant issue is the process parameters which directly influence the nature of the deformation of the housing, and, ultimately, on the formation of an all-in-one connection of a ball stud with a joint housing. These parameters are press force, punch displacement and matrix geometry. The quality of the all-in-one connection depends on a correct selection of the indicated parameters. If the axial joint insert is compressed evenly, the connection will be considered to be the most rational, that is the load will be distributed uniformly over the entire insert surface from the spherical surfaces of the ball stud and the deformed housing. In this way, the press must provide necessary force and displacement; the matrix geometry must provide the required shape of the deformed part of the housing. The all-in-one connection quality is evaluated by a number of operational characteristics of finished products, whose values must be located in intervals acceptable from the customer's point of view. Such characteristics include the following: ball stud rocking resistance torque, breakaway torque at ball stud rocking, axial spring travel and axial stiffness of the joint. In order to determine the specified parameters without many experiments on physical objects, a computer simulation model of the axial joint pressing process based on the finite element method was developed. Required press force, punch displacement and matrix geometry are determined by a computer simulation of the pressing process based on the finite element method. The accomplished experimental research led to the conclusion about acceptable repeatability of the results of the developed mathematical model and experimental data.

Keywords: Axial joint, process operation, process parameters, matrix, punch, operational characteristics, finite element model, assembly line

References

1. Reimpell J. *Shassi avtomobilya: Rulevoe upravlenie* [Car chassis: Steering]. Translated from German by Palyanov V.N., ed. by Galbreikh A.A. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 232 p. (In Russ.)
2. Gun I.G., Kalmykov Yu.V., Gun E.I., Artyukhin V.I., Vakhitov A.R. *Sharovoi sharnir* [Ball joint]. Patent RF, no. 185066, 2018.
3. Salnikov V.V., Mikhailovsky I.A., Gun I.G. Simulation of the destruction process of the suspension ball joint of the vehicle under axial loading. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2011, no. 2(67), pp. 51-53. (In Russ.)
4. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Salnikov V.V., Kutsependik V. I., Gun E. I. Estimated determination of the strength indicators of ball joints of the vehicle chassis elements by simulating a static test process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2014, no. 2(85), pp. 20-24. (In Russ.)
5. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy quality theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 5, pp. 67-69. (In Russ.)
6. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizatsiya protsessov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovaniya izdeliy s pokrytiyami* [Optimization of technological and operational deformation processes of products with coatings]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 324 p. (In Russ.)
7. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Yasakov Yu.M., Lapchinsky V.V. *Stend dlya ispytaniy sharovykh sharnirov* [Stand for testing ball joints]. Patent RF, no 2263889, 2005.
8. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A., Baryshnikov M.P., Gun G.S., Dolgiy D.K., Efimova Yu.Yu., Kolokoltsev V.M., Koptseva N.V., Kuranov K.Yu., Lebedev V.N., Mezin I.Yu., Polyakova M.A., Chukin V.V. *Proizvodstvo vysokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya* [Production of high-strength steel reinforcement for concrete sleepers of a new generation]. Magnitogorsk: Metallurgizdat, 2014, 276 p. (In Russ.)
9. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Koptseva N.V., Gun G.S. Prospects for the production of high-strength fasteners from blanks of carbon steel with an ultrafine-grained structure]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Die Forging. Metal Forming], 2014, no. 1, pp. 39-44. (In Russ.)

Received 26/12/19

Accepted 28/01/19

Образец для цитирования

Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников / Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ортуэта, Агустин Анитуа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 46-52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>

For citation

Gun E.I., Vakhitov A.R., Salnikov V.V., Gun I.G., Jon Ortueta, Agustin Anitua. Simulation of the axial joint pressing process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 46-52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

UDC 621.78

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-53-57>

OPTIMIZATION OF SOFTENING HEAT TREATMENT FOR THE Pt950Ru JEWELRY ALLOY

Luca Pezzato, Alessandro Minotto, Katya Brunelli, Manuele Dabalà

Department of industrial Engineering, University of Padua, Padova, Italy

Abstract. Platinum is one of the most precious metals in the world: 15 times rarer than gold and it is widely used in jewellery for its characteristic of unicity, incorruptibility, and colour neutrality.

The standard grade in the jewellery industry is Platinum 950‰. In fact, pure platinum jewels are easily scratched, due to the poor hardness linked with the high purity. Among all the commercial alloys available, the Pt-Ru system is the one characterized by the highest mechanical properties. Aim of this work is to find an ideal softening heat treatment, in term of operating time and temperature. The heat treatment must be able to satisfy two main needs: it must permit to complete recrystallization of the work piece, preparing the material for further severe deformation by restoring high ductility and an equiaxed grain distribution; and at the same time, the final average grain size must be fine, in order to avoid counter side aesthetic effects that occur when grain size go over the micrometric scale. Due to its rarity, in literature there are few information about the alloy under discussion. To find the optimal parameters, several samples had been heat treated at different times and temperatures. Then they had been analysed by optical microscopy and with micro hardness tests, providing microstructure images and hardness data. By using a combination of three different temperatures and three different times, significant differences were found between the various samples both in terms of mechanical properties and of grain size. The comparison of the collected data permit to better understand the behaviour of the alloy under recrystallization conditions. In the end, it was observed that the dynamics of recrystallization changes significantly with relative small changes of temperature and was found that the optimal treatment to obtain a fine recrystallized microstructure with the desired mechanical properties is at 1000°C for 15 minutes.

Keywords: Platinum alloy, softening heat treatment, jewellery, microhardness, microstructure.

Introduction

Platinum alloys represent the second most important production filed in the jewelry world, after gold alloys [1].

Despite gold, the most widespread standard for platinum jewels is platinum 950 (95 wt.%). This means that the addition of other metals can be done up to 5 wt.%, limiting the possibility of reinforcing the metal by alloying [2]. Object of the study is the platinum-5 wt.% ruthenium alloy, a widely used alloy for jewelry manufacture which has good values of hardness compared with other platinum alloys (as can be observed in the graph in **Fig.1**, without compromise ductility [3–4].

Besides investment casting, fine jewelry products can be manufactured also via mechanical processes: a forged bar is cold rolled and annealed, and subsequently machined, until the net shape product is obtained. This procedure allows a

reduction of porosity [5]. In order to obtain a high deformation, after every step of cold rolling is necessary an annealing treatment, to recrystallize the structure and permit further deformation [6]. Unfortunately, there are few information in literature about platinum processing, and in particular about annealing parameters [7]. In detail only few works regarding the Pt-5% Cu alloys can be found [4,8]. The aim of this work is to study the role of time and temperature of the annealing process on the microstructure and the hardness of the alloy.

Experimental

The samples studied in the present work come from the industrial process for the production of platinum watchbands. An example of the final product can be observed in **Fig. 2**.

All the samples analyzed are derived from a single sample of platinum-ruthenium alloy in the annealed state, with homogeneous grain size and equiaxed distribution (**Fig. 3**), and a hardness of 185 HV. The nominal composition of the alloy is reported in **Tab.1**.

Tab. 1

Composition of the Pt950Ru alloy

COMPOSITION	
Pt	95%
Ru	5%

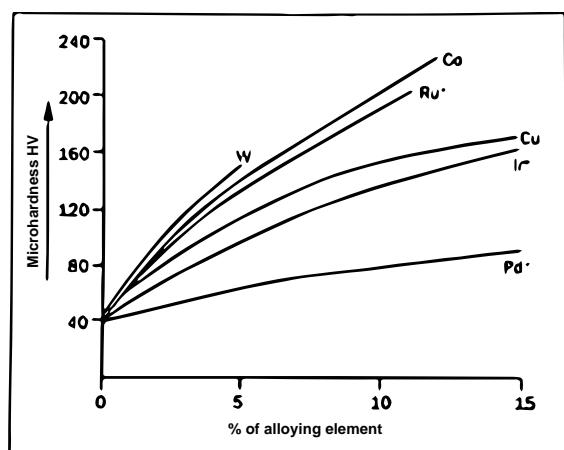


Fig.1. Micro-hardness evolution with different alloying elements in platinum alloys

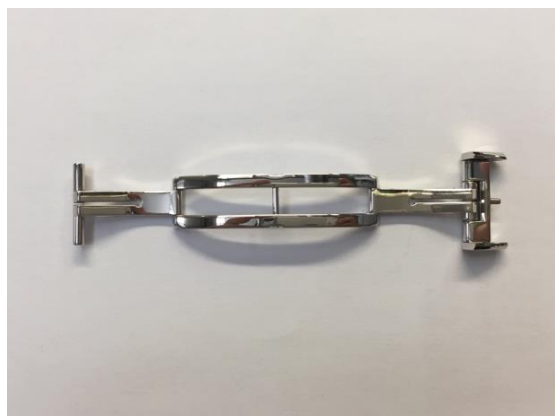


Fig. 2. Example of watchbands in Pt950Ru alloy at the end of the production cycle

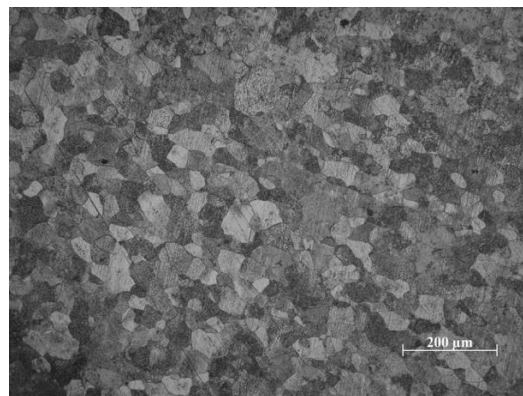


Fig. 3. Microstructure of the starting sample, 100x

The original thickness of 1,6 mm has been reduced to 0,48 mm by a cold rolling process, in order to achieve a reduction of 70%. This percentage of reduction was used for two main reason: it is in line with the common production processes, and allows recrystallization phenomena.

Once cold rolled, the material has been cut in several pieces. The pieces have been heat treated in a furnace with scheduled time and temperature. The low dimensions of the samples make almost negligible heating time of the single piece.

After the heating process, the samples have been quenched in ambient temperature water.

Later, the samples were polished with standard metallographic technique, and microhardness test have been conducted using microVickers 0.5 scale with a Leitz micro indenter.

The etching of grain boundaries has been performed by immersing the samples in boiling aqua regia for 15 minutes. The optical microscope (OM) observation was performed with a Leica DMRE microscope.

Results and discussion

The samples were heat treated at 950 °C, 1000°C and 1050°C for 10, 15 and 20 minutes and the results in term of microstructure and hardness properly evaluated.

In **Fig. 4** can be observed the optical micrographs of the samples heat treated at 950°C for different treatment times. It can be observed that at these temperatures no evident recrystallization phenomena occurs for 10 (**Fig. 4a**) and 15 (**Fig. 4b**) minutes. Only after 20 minutes (**Fig.4c**) recrystallization is partially observed. In all the treatment times the grains resulted still oriented in the rolling direction. Hardness values of the samples decrease to 200 HV (**Tab. 2**) due to the recovery process, but this is not sufficient to permit the subsequent sequences of plastic deformation.

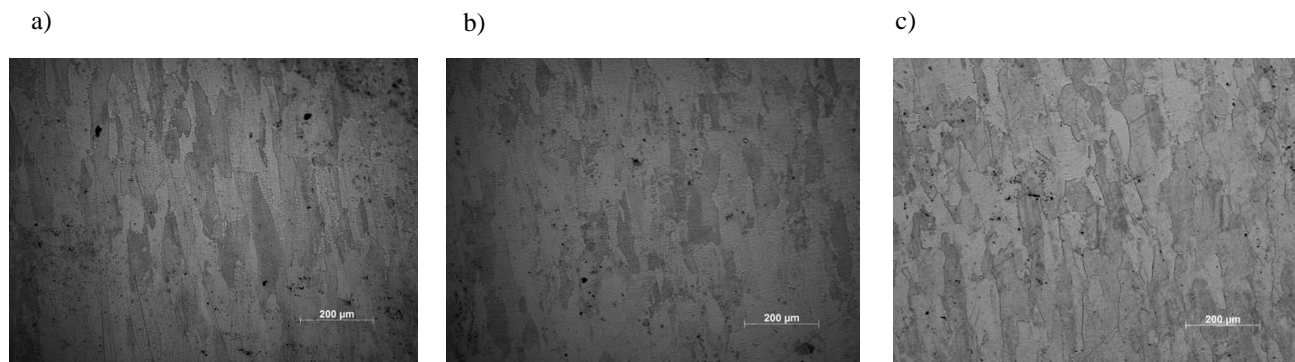


Fig. 4. 950°C and: a) 10 min; b) 15 min; c) 20 min. 100x

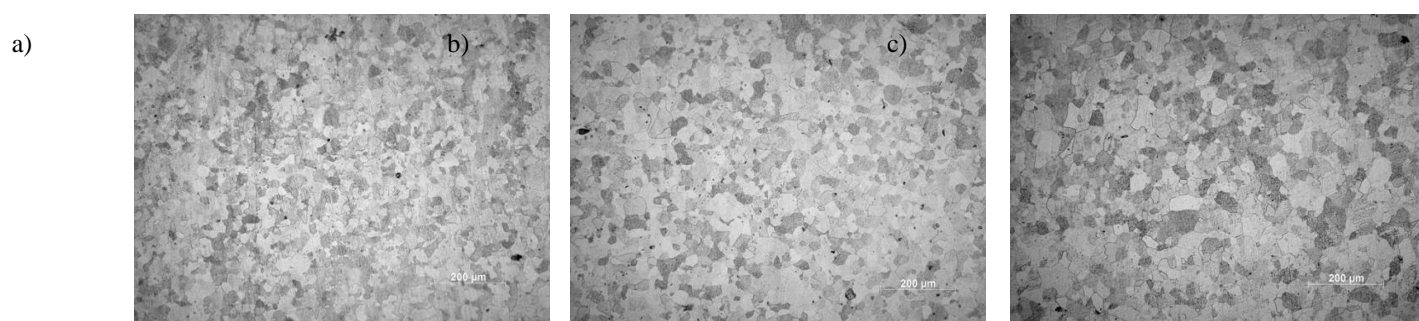


Fig.5. 1000°C and: a) 10 min; b) 15 min; c) 20 min. 100x

At 1050°C the kinetic of recrystallization result substantially faster than the 1000°C one, leading to an irregular grain growth as shown in **Fig.6**. For this reason, it was decided not to take into account a detailed analysis of the samples annealed for longer periods.

reaches an average value of 70 µm. Likewise, the grain growth, hardness decreased from 150 HV to 135 HV (**Tab.2**), proving that the complete recrystallization occurred.

Tab. 2

Hardness values

HARDNESS VALUES (HV 0.5)			
	10 min	15 min	20 min
950°C	210	206	204
1000°C	150	140	135

Tab. 3

Grain size average values

GRAIN SIZE (µm)			
	10 min	15 min	20 min
950°C	Not recrystallized	Not recrystallized	Not recrystallized
1000°C	35	45	70

When heat treated at 1000°C, the sample completely recrystallizes in the first 10 minutes (**Fig.5a**). The new grain is fine and equiaxed (average grain size 35 µm as reported in **Tab.3**), and it is not possible to recognize the orientation of the rolling process. After 15 minutes (**Fig.5b and Tab.3**) the average grain size results increased to 45 µm, and after 20 minutes (**Fig.5c and Tab.3**) it

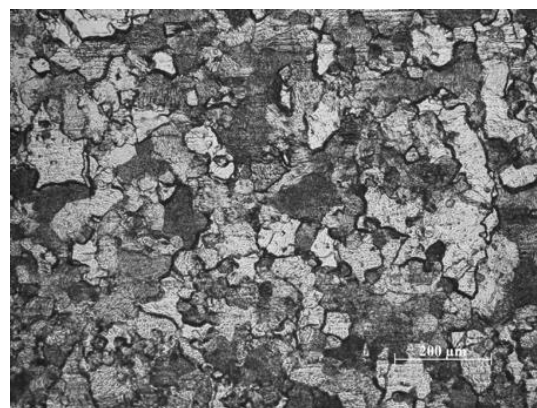


Fig.6. 1050°C and 10 min. 100x

The evolution of the mechanical properties, in terms of micro-hardness, with the treatment time is summarized in **Fig.7**. It can be observed both for 950 and 1000°C samples a decrease in the hardness in comparison with the reference value of the untreated sample. However, for the sample treated at 1000°C the decrease in the hardness is more significant. This behavior can be attributed to the fact that at 950°C only recovery occurs as confirmed by the micrographs previously reported. Instead at

1000°C complete recrystallization phenomena can be observed with the optimal mix in term of hardness and grain size obtained for a treatment of 15 minutes.

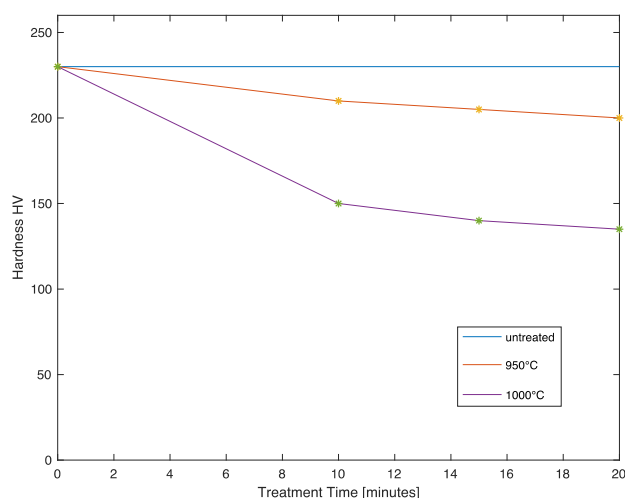


Fig.7. Evolution of the micro-hardness with the treatment time for the samples treated at 950 and 1000°C

Conclusions

From the comparison of the data collected it has been possible to identify the optimal conditions in terms of temperature and treatment time for an annealing softening treatment on a Pt950Ru alloy. In order to obtain the complete recrystallization during the annealing process, it is necessary to use a temperature of 1000°C: at this temperature the new grain originated is fine, equiaxed, and its growth is controllable. As regards the treating time, the 15 minutes sample showed a hardness slightly greater than the 20 minutes one (140 HV the former, 135 the latter), but a much finer microstructure. An image at higher magnification of the sample obtained with optimized treatment conditions can be observed in Fig.8.

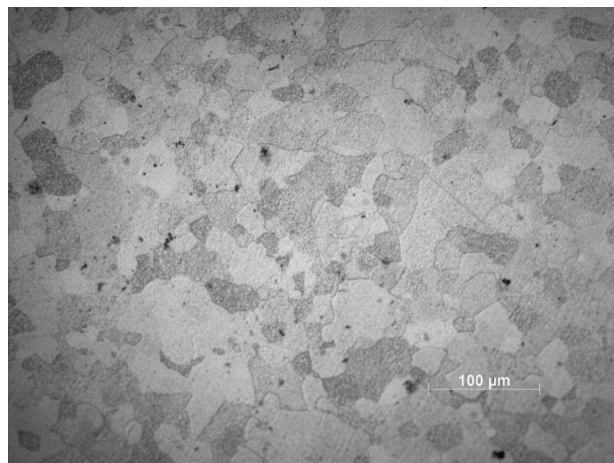


Fig.8. 1000°C and 15 min. 200x

References

1. Gold Demand Trends Q3 2016. World Gold Council, 8th November 2016
2. T. Biggs. The Hardening of Platinum Alloys for Potential Jewellery Application. *Platinum Metals Rev.*, 2005, 49, (1), 2–15
3. G. Rakhtsaum. Platinum Alloys: A Selective Review of the Available Literature. *Platinum Metals Rev.*, 2013, 57, (3), 202–213
4. K.M. Jackson, C. Lang. Mechanical Properties Data for Pt-5 wt.% Cu and Pt-5 wt.% Ru Alloys. *Platinum Metals Rev.*, 2006, 50, (1)
5. S. Tedesco. Manuale di tecnologia e lavorazione del platino, Atti del congresso Tecno Platino, Vicenza 8 Luglio 1999.
6. J.C. Wright. Jewellery related properties of platinum. *Platinum Metals Rev.*, 2002, 46, (2)
7. G. Normandeau, D. Ueno. Understanding Heat treatable Platinum Alloys. "The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 1999", Proceedings of the 13th Santa Fe Symposium in Albuquerque, New Mexico, USA, ed. D. Schneller, Met-Chem Research, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999, 73–103
8. C. Mshumi, C. Lang. Strengthening of Platinum-5wt% Copper by Heat Treatment. *Platinum Metals Rev.*, 2007, 51, 78–82

Received 26/10/18
Accepted 09/12/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 621.78

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-53-57>

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СМЯГЧАЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛЯ ЮВЕЛИРНОГО СПЛАВА Pt950Ru

Лука Пеццато, Алессандро Минотто, Катя Брунелли, Мануэле Дабала

Кафедра промышленного инжиниринга, Падуанской университет, Падуа, Италия

Аннотация. Платина является одним из наиболее ценных металлов в мире. Платина встречается в 15 раз реже золота и находит широкое применение в ювелирном деле благодаря своей уникальности, прочности и нейтральному цвету. Стандартный сорт платины, применяемый в ювелирной отрасли, - это платина 950 пробы. На самом деле изделия из чистой платины легко повредить из-за их недостаточной твердости, связанной с высокой степенью чистоты металла. Среди всех имеющихся промышленных сплавов наилучшими механическими свойствами обладает система Pt-Ru. Целью настоящей работы является определение идеального режима смягчающей термической обработки с точки зрения времени и температуры. Такая термообработка должна выполнять две основные задачи: способствовать завершению процесса рекристаллизации образца и подготовке материала к последующему этапу интенсивной деформации за счет восстановления свойств повышенной вязкости и равноосной микроструктуры; и в то же самое время способствовать образованию мелкозернистой структуры для исключения обратного эстетического эффекта, возникающего, когда размер зерен перестает измеряться в микрометрах. Из-за его редкости в литературе находятся лишь немногие

упоминания о рассматриваемом сплаве. Для определения оптимальных параметров термообработки несколько образцов были подвергнуты термической обработке при различной температуре и различном времени обработки. После этого образцы были изучены на оптическом микроскопе и микротвердомере, с помощью которых были получены изображения микроструктуры и данные о твердости. Образцы были подвергнуты трем различным температурно-временным режимам термообработки. Были обнаружены значительные различия между образцами по механическим свойствам и размеру зерен. Сравнение полученных данных помогает лучше понять поведение сплава в условиях рекристаллизации. В итоге было установлено значительное изменение динамики процесса рекристаллизации при относительно небольших изменениях температуры. Установлено, что оптимальный режим термообработки, позволяющий получить мелкую рекристаллизованную микроструктуру и требуемые механические свойства, подразумевает обработку при температуре 1000°C в течение 15 мин.

Ключевые слова: платиновый сплав, смягчающая термообработка, ювелирные украшения, микротвердость, микроструктура

Поступила 26.10.18

Принята в печать 09.12.18

Образец для цитирования

Luca Pezzato, Alessandro Minotto, Katya Brunelli, Manuele Dabalà. Optimization of softening heat treatment for the Pt950Ru jewelry alloy // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 53–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-53-57>

For citation

Luca Pezzato, Alessandro Minotto, Katya Brunelli, Manuele Dabalà. Optimization of softening heat treatment for the Pt950Ru jewelry alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 53–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-53-57>

EFFECT OF THE COOLING RATE ON PHASE TRANSFORMATIONS IN A SURFACE-ALLOYED LAYER OF STEEL

Ivanov Yu.¹, Klopotov A.², Teresov A.¹, Petrikova E.¹, Shugurov V.¹, Song G.³, Tang G.³, Gromov V.⁴

¹Institute of High Current Electronics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

³Tsinghua University, Shenzhen, China

⁴Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Surface alloying of AISI 420 steel was carried out in a single vacuum cycle, and consisted of spraying a thin (0.5 μm) film of Zr-Ti-Cu alloy by electric arc spraying of a cathode of the composition Zr-6 at.% Ti-6 at.% Cu, and the subsequent irradiation of the “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI 420 steel) substrate” system with an intense pulsed electron beam. It is shown that the concentration of zirconium in the surface layer of steel decreases with an increase in the energy density of the electron beam (E_s). It is established that formation of a surface alloy is accompanied by the following: formation of a cellular crystallization structure (the average cell size increases from 150 nm at $E_s = 20 \text{ J/cm}^2$ to 370 nm at $E_s = 40 \text{ J/cm}^2$); decomposition of a solid solution with the release of zirconium carbide particles (particle sizes increase from (10-15) nm at $E_s = 20 \text{ J/cm}^2$ to (30-40) nm at $E_s = 40 \text{ J/cm}^2$). Particles of the carbide phase based on chromium of the composition Cr_3C_2 , Cr_7C_3 and $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$, along with zirconium carbide particles, are revealed upon the irradiation of the “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI 420 steel) substrate” system with an intense pulsed electron beam ($E_s = 40 \text{ J/cm}^2$). Chromium carbide particles have a round shape; their sizes vary from 40 nm to 60 nm. The authors analyzed phase transformation diagrams taking place under equilibrium conditions in Fe-Zr-C; Cr-Zr-C; Fe-Cr-Zr systems. It is established that ultra-high cooling rates that occur during the irradiation of the “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI 420 steel) substrate” system with an intense pulsed electron beam impose limitations on the formation of phases of the intermetallic type. It is assumed that the formation of predominantly carbide phases in the surface layer of the material is due to high mobility of carbon atoms in steel.

Keywords: AISI 420 steel, electron beam processing, structure, phase composition.

Introduction

Formation of surface alloys is one of the methods for substantial improvement of the structure of parts and products, as well as an increase in their service life. This approach avoids the use of expensive, highly alloyed materials which require significant financial and energy costs, both during the production and processing of parts and products. A promising method for formation of surface alloys is the combined treatment, which includes the deposition of thin films of alloying elements and the subsequent irradiation with concentrated energy fluxes (laser radiation [1, 2], high-intensity electron [3-5] and powerful ion [6, 7] beams, plasma flows and jets [8-11]). A vacuum-arc method based on the generation of highly-ionized metal plasma flows with an arc discharge is often used for deposition of films [12, 13]. Coatings are formed as a result of condensation of plasma flow of the eroding cathode material on the sample surface. Almost any metal, alloy, or metal-based composite can act as a cathode material. The high degree of vacuum arc plasma

ionization (20–100)% and the ability to adjust the parameters of the coating synthesis process over a wide range (working gas pressure, discharge current, bias voltage, etc.) allows to regulate the elemental composition and the structure of condensates [12].

The purpose of this paper is to analyze phase transformations taking place during surface doping of steel with an intense pulsed electron beam.

Material and research methods

Samples of high-chromium steel AISI420 (0.25 C, 13 Cr, 0.6 Si, 0.6 Mn, 0.6 Ni, <0.025 S; <0.03 P, remaining Fe, wt%) were chosen as a material of the study [14]. The samples had the plate-like shape with the dimensions of 15x15x5 mm. Complex modification of the structure and properties of AISI-420 steel samples was carried out on the laboratory installation “COMPLEX”, developed and manufactured at the Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS) [15]. The first stage of modification included formation of a metallic film on the surface of steel samples as a result of condensation of plasma flow of the eroding cathode material. The cathode of the composition Zr-5 at. % Ti-5 at. % Cu, manufactured using methods of powder

© Ivanov Yu., Klopotov A., Teresov A., Petrikova E., Shugurov V., Song G., Tang G., Gromov V., 2019

metallurgy, was used as the spray material. Second stage included the irradiation of the system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate” with an intense pulsed electron beam under the following parameters: electron energy was 17 keV; energy density of the electron beam was (20-40) J/cm²; pulse duration of the electron beam was 200 μs; repetition rate and the number of pulses was 0.3 s⁻¹ and 3, respectively. The elemental and phase composition, and the state of the defective substructure of the modified surface were analyzed using methods of scanning (device SEM-515 “Philips”) and transmission (device EM-125) electron microscopy.

Results and discussion

The main elements of the surface-doped layer are Fe, Cr, Zr, and C. Based on the study of the phase diagrams of Fe-Cr-Zr, Cr-Zr-C, and Fe-Cr-C systems obtained under equilibrium conditions we shall analyze phase transformations in the given alloy.

System Zr-Cr-C. Binary diagrams and the isothermal section of the ternary diagram of the system Zr-Cr-C at a temperature of 1300°C are shown in **Fig. 1** [16]. Formation of a large number of binary compounds as well as a ternary compound based on the binary compound Zr_xC_{1-x} with a limited homogeneity region is possible in this system. The ternary system Zr-Cr-C is characterized by the absence of single-phase regions of ternary compounds of the type C_{1-x}Cr_{1-y}Zr_{x+y} within the isothermal triangle.

System Fe-Zr-C. Binary diagrams and the isothermal section of the ternary diagram of the system Fe-Zr-C are shown in **Fig. 2**. This system is characterized by formation of binary compounds only [17].

System Cr-Fe-Zr. In the system Cr-Fe-Zr (**Fig. 3**), ternary compounds based on binary compounds begin on two sides of the isothermal triangle Fe-Zr and Cr-Zr in the form of wide homogeneity regions with stoichiometric compositions ZrFe₂ (Laves phase with a structure C15) and ZrCr₂ (Laves phase with the structure of C14), respectively [18, 19]. An extended region of the existence of a ternary compound inside the isothermal triangle γ-Zr (Cr, Fe)₂ with the Laves phase structure C14 has been established. This compound is conjugated to two ternary compounds based on ZrFe₂ and ZrCr₂ (**Fig. 3**).

The analysis presented in **Fig. 1 – Fig. 3** of binary and ternary state diagrams indicates the possibility of formation under equilibrium conditions of carbide phases of various composition and Laves phases. It should be expected that ultrahigh cooling rates of the material initiated by irradiation with an

intense pulsed electron beam of the system “film (alloy Zr-Ti-Cu) / (steel AISI420) substrate” will have a significant effect on phase transformations of the material.

The elemental composition of the surface layer of the modified steel was studied using methods of micro-X-ray spectral analysis. It has been established that the relative content of chromium in the surface layer of the irradiated system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate”, regardless of the energy density of the electron beam, varies from 12.5 wt. % to 13.1 wt. %, which is close to chromium content in the initial material. The relative content of zirconium decreases from 2.0 at% to 0.6 atomic% as the energy density of the electron beam increases from 20 J/cm² to 40 J/cm². A decrease in the concentration of zirconium evidently indicates the diffusion of zirconium atoms into the volume of steel, i.e. formation of the surface alloy upon the irradiation of the system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate” with an intense pulsed electron beam.

The phase composition and the defective substructure of the surface layer formed upon the irradiation of the system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate” with an intense pulsed electron beam were studied using methods of transmission electron diffraction microscopy. It has been established that steel doping with elements of the film (Zr-Ti-Cu) leads to formation of a polycrystalline structure based on α-iron in the surface layer, irrespective of the electron beam irradiation parameters (**Fig. 2, a**). The grain substructure is represented by high crystallization cells (**Fig. 4**). The average size of crystallization cells significantly depends on the irradiation parameter and increases from 150 nm at E_s = 20 J/cm² to 370 nm at E_s = 40 J/cm². It is obvious that the reason for the growth of crystallization cells is a decrease in the cooling rate of the material with an increase in the energy density of the electron beam. The volume of crystallization cells contains a dislocation substructure in the form of chaotically distributed dislocations (**Fig. 4, b**).

Particles of the second phase are located along the boundaries of cells, rarely in the volume of cells. The particles have a round shape, and their particle size varies from 15 to 35 nm. Indication of microelectronograms shows that these particles are zirconium carbide (**Fig. 5**). In rare cases, particles of a complex carbide of the type M₂₃C₆ are found in the structure of the surface layer of steel.

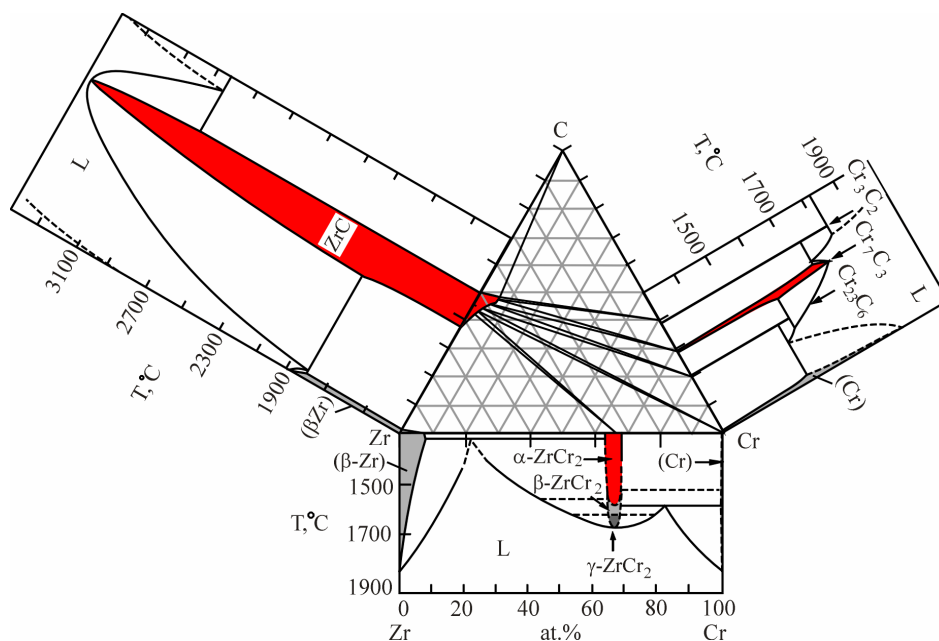


Figure 1. State diagrams of systems C-Zr, C-Cr, Cr-Zr and the isothermal section of the ternary system Zr-Cr-C at a temperature of 1300°C [16]

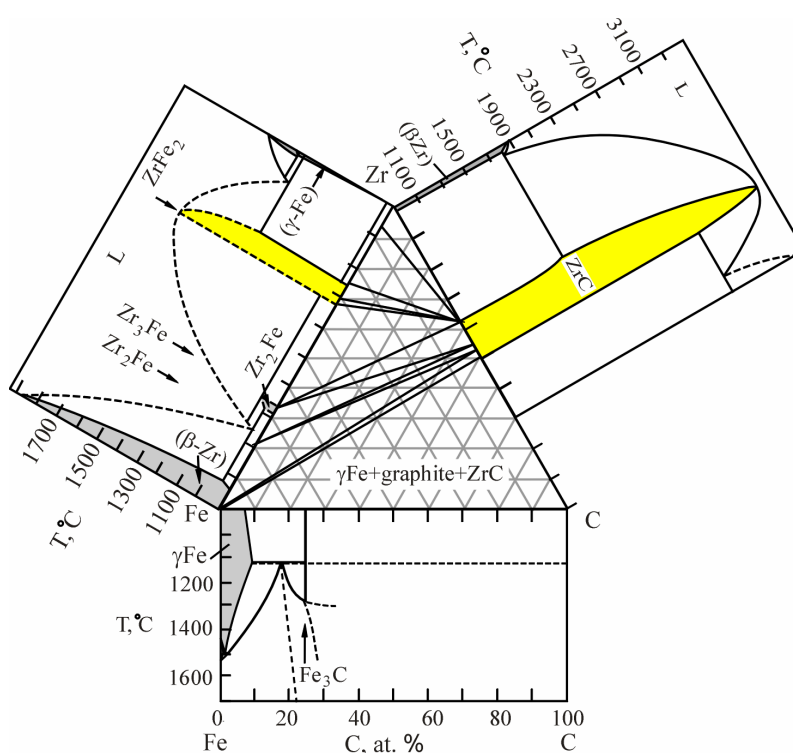


Figure 2. State diagrams of systems C-Zr, C-Fe, Fe-Zr and the isothermal section of the ternary system Zr-Fe-C at a temperature of 900 °C [17]

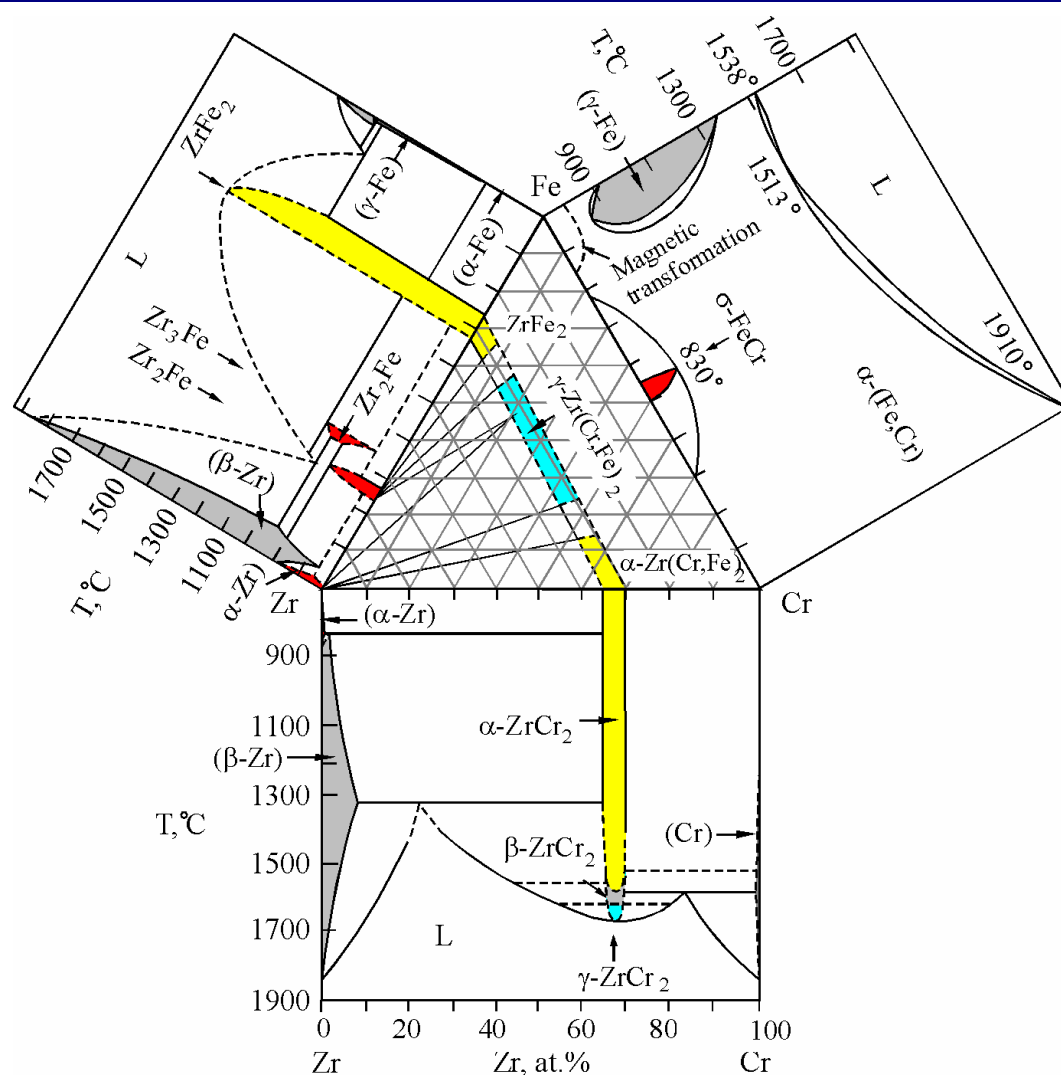


Figure 3. Binary diagrams of systems Cr–Fe, Zr–Cr, Fe–Zr [18] and the isothermal cross section of the ternary system Cr–Fe–Zr at a temperature of $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]

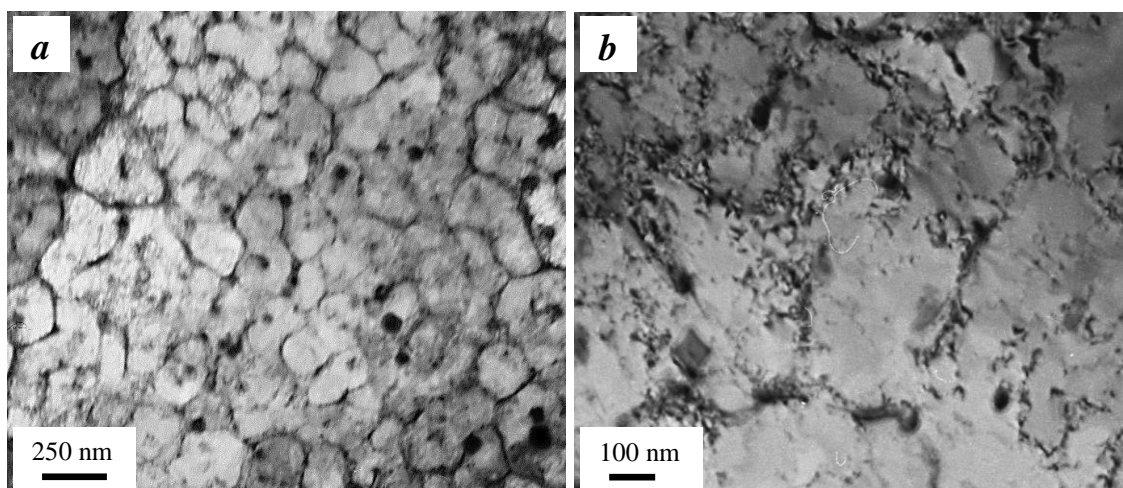


Figure 4. Electron microscopic image of the surface layer structure of the system “film (Zr–Ti–Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate”, subjected to irradiation with an intense pulsed electron beam (18 keV, 40 J/cm^2 , 200 microseconds, 3 pulses; $0,3\text{ s}^{-1}$).

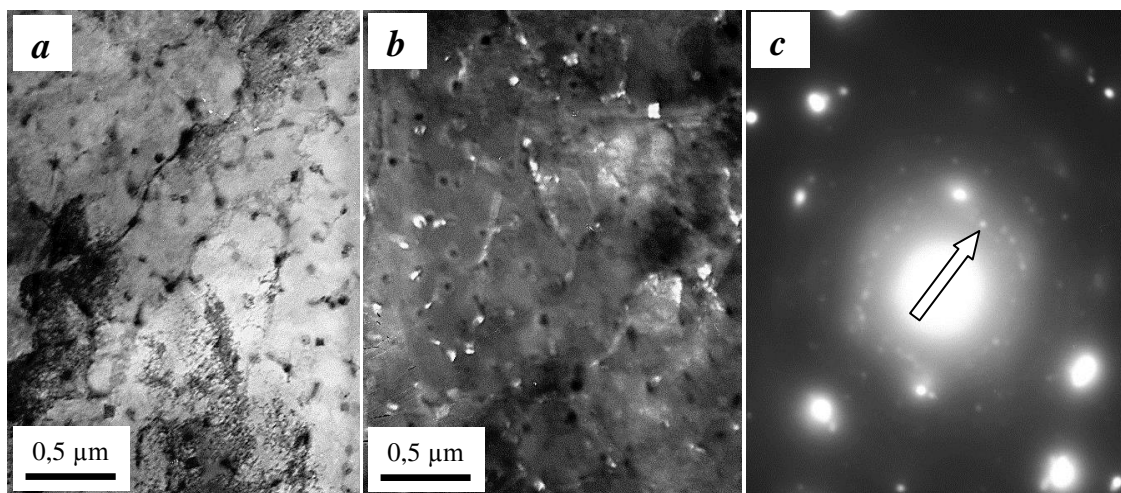


Figure 5. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (AISI420 steel) substrate” subjected to irradiation with an intense pulsed electron beam (18 keV, 30 J/cm², 200 microseconds, 3 pulses; 0,3 s⁻¹); *a* is the bright field; *b* is the dark field obtained in the reflex [002] ZrC; *c* is the microelectronogram (the arrow indicate the reflex in which the dark field is obtained).

Analyzing the results obtained in the study of the system “film (Zr-Ti-Cu alloy) / (20X13 steel) substrate” using methods of diffraction electron microscopy and the results in **Fig. 1** and **Fig. 3**, it can be stated that ultra-high cooling rates, occurring in the process of material treatment with an intense pulsed electron beam, allow to form only carbide phases in the surface layer of the material, i.e. phases, one of whose elements (namely carbon) possesses high mobility in steel. The carried out studies did not reveal any compounds of the intermetallic type.

Conclusion

It has been shown that irradiation of the system “film (alloy Zr-Ti-Cu) / (AISI420 steel) substrate” with an intensive pulsed electron beam is accompanied with the following: formation of a surface alloy, whose concentration of doping elements (Zr) decreases with an increase in the energy density of the electron beam; formation of a cellular crystallization structure; decomposition of a solid solution with a release of zirconium carbide and chromium carbides particles.

The analysis of transformation phase diagrams occurring under equilibrium conditions in systems Fe-Zr-C; Cr-Zr-C; Fe-Cr-Zr has been carried out. It has been established that ultra-high cooling rates, taking place during the irradiation of the system “film (alloy Zr-Ti-Cu) / (AISI420 steel) substrate” with an intense pulsed electron beam, impose certain restrictions on phase formation in these systems. Methods of diffraction electron microscopy have allowed to reveal formation of predominantly carbide phases in the surface layer (i.e. phases, one of whose elements (namely carbon) possesses high mobility in steel). The carried out studies did not reveal any compounds of the intermetallic type.

Acknowledgement

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (project number 16-43-700659-p).

References

1. Poate J., Foti G., Jacobson D. Surface modification and alloying: by laser, ion and electron beams. Moscow: Mashinostroeniye, 1987, 424 p. (In Russ.)
2. Andriyakhin V.M., Fishkis M.M. *Lazery i perspektivy ikh primeneniya v avtomobilstroenii* [Lasers and prospects of their application in the automotive industry]. Moscow: NII Avtoprom, 1980, 40 p. (In Russ.)
3. Belov A.B., Bytsenko O.A., Krainikov A.V. et al. *Silnotochnye impulsnye elektronnye puchki dlya aviatsionnogo dvigatelstroeniya* [High-current pulsed electron beams for aircraft engine building]. Ed. by Novikov A.S., Shulov V.A., Engelko V.I. Moscow: Dipak, 2012, 292 p. (In Russ.)
4. Bugaev S.P., Kreindel Yu.E., Shchanin P.M. *Elektronnye puchki bolshogo secheniya* [Electronic beams of large cross section]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 113 p. (In Russ.)
5. Koval N.N., Oks E.M., Protasov Yu.S., Semashko N.N. *Emissionnaya elektronika* [Emission electronics]. Moscow: BMSTU Publishing House, 2009, 596 p. (In Russ.)
6. Goebel D.M., Schumacher R.W. Long pulse plasma cathode e-gun. Ed. by R.M. Watkins. Proc. SPIE, 2001, pp. 1093–1098.
7. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekunov M.S. et al. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. Surface and Coatings Technology, 1999, vol.114, pp. 206–212.
8. Uglov V.V., Cherenda N.N., Anishchik V.M., Astashinsky V.M., Kvasov N.T. *Modifikatsiya materialov kompressionnymi plazmennymi potokami* [Modification of materials by compression plasma flows]. Minsk: BSU, 2013, 248 p. (In Russ.)
9. Tyurin Yu.N., Zhadkevich M.L. *Plazmennye uprochnyayushchie tekhnologii* [Plasma strengthening technologies]. Kiev: Naukova Dumka, 2008, 216 p. (In Russ.)
10. Gribkov V.A., Grigoriev F.I., Kalin B.A. et al. *Perspektivnye radiatsionno-puchkovye tekhnologii obrabotki metallov*

- [Prospective radiation-beam technologies for metal processing]. Moscow: Krugliy stol, 2001, 528 p. (In Russ.)
11. Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D. et al. *Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov* [Ion-beam and ion-plasma modification of materials]. Moscow: MSU Publishing House, 2005, 640 p. (In Russ.)
 12. Barvinok V.A., Bogdanovich V.I. *Fizicheskie osnovy i matematicheskoe modelirovanie protsessov vakuumnogo ionno-plazmennogo napyleniya* [Physical basis and mathematical modeling of the processes of vacuum ion-plasma spraying]. Moscow: Mashinostroeniye, 1999, 309 p. (In Russ.)
 13. Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M., Grigoriev S.N. *Vakuumno-dugovye ustroystva i pokrytiya* [Vacuum-arc devices and coatings]. Kharkov: NSC KIPT, 2005, 236 p. (In Russ.)
 14. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. et al. *Marochnik staley i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Ed. by Sorokin V.G. Moscow: Mashinostroeniye, 1989, 640 p. (In Russ.)
 15. Ivanov Yu.F., Krysina O.V., Petrikova E.A., Teresov A.D., Shugurov V.V., Tolkachev O.S. Complex electron-ion plasma treatment of titanium: methods, structure, properties. *J. High Temp. Mater. Proc.* 21(1) (2017), pp. 53–64.
 16. Halleck H. *Dvoynye i troynye karbidnye i nitridnye sistemy perekhodnykh metallov* [Double and triple carbide and nitride systems of transition metals]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 319 p. (In Russ.)
 17. M. Jiang, K. Oikawa, T. Ikeshoji, L. Wulff, K. Ishida. *J. Phase Eq.* 4 (2001) 406–17.
 18. Lakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskikh sistem* [State diagrams of binary metal systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1996–2000, vol. 1–3. (In Russ.)
 19. Malakhova T.O., J. Alloys At. Energ. (1979) 123–130.

Received 12/02/18
Accepted 16/04/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 533.9:539.4.015.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-58-63>

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ СЛОЕ СТАЛИ

Иванов Ю.Ф.¹, Клопотов А.А.², Тересов А.Д.¹, Петрикова Е.А.¹, Шугуров В.В.¹, Сонг Г.³, Танг Г.³, Громов В.Е.⁴

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

³Университет цинхуа, Шэньчжэнь, Китай

⁴Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. В едином вакуумном цикле осуществлено поверхностное легирование стали AISI420, заключающееся в напылении тонкой (0,5 мкм) пленки сплава Zr-Ti-Cu электродуговым распылением катода состава Zr-6 ат.% Ti-6 ат.% Cu и последующем облучении системы «пленка (сплав Zr-Ti-Cu) / (сталь AISI420) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что с ростом плотности энергии пучка электронов (E_s) концентрации циркония в поверхностно слое стали снижается. Установлено, что формирование поверхностного сплава сопровождается, во-первых, образованием структуры ячеистой кристаллизации (средний размер ячеек увеличиваются от 150 нм при $E_s = 20$ Дж/см² до 370 нм при $E_s = 40$ Дж/см²); во-вторых, протеканием распада твердого раствора с выделением частиц карбида циркония (размеры частиц увеличиваются от (10–15) нм при $E_s = 20$ Дж/см² до (30–40) нм при $E_s = 40$ Дж/см²). После облучения системы «пленка (сплав Zr-Ti-Cu) / (сталь AISI420) подложка» интенсив-

ным импульсным электронным пучком ($E_s = 40$ Дж/см²) наряду с частицами карбида циркония выявляются частицы карбидной фазы на основе хрома состава Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Частицы карбидов хрома имеют округлую форму, размеры их изменяются в пределах от 40 до 60 нм. Выполнен анализ фазовых диаграмм превращений, протекающих в равновесных условиях в системах Fe-Zr-C; Cr-Zr-C; Fe-Cr-Zr. Установлено, что сверхвысокие скорости охлаждения, реализующиеся при облучении системы «пленка (сплав Zr-Ti-Cu) / (сталь AISI420) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком, накладывают ограничения на образование фаз интерметаллидного типа. Высказано предположение, что формирование в поверхностном слое материала преимущественно карбидных фаз обусловлено высокой подвижностью в стали атомов углерода.

Ключевые слова: сталь AISI-420, электронно-пучковая обработка, структура, фазовый состав.

Поступила 12.02.18

Принята в печать 16.04.18

Образец для цитирования

Ivanov Yu., Klopotov A., Teresov A., Petrikova E., Shugurov V., Song G., Tang G., Gromov V. Effect of the cooling rate on phase transformations in a surface-alloyed layer of steel // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 58–63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-58-63>

For citation

Ivanov Yu., Klopotov A., Teresov A., Petrikova E., Shugurov V., Song G., Tang G., Gromov V. Effect of the cooling rate on phase transformations in a surface-alloyed layer of steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 58–63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-58-63>

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

Рааб Г.И.¹, Кодиров И.С.¹, Алешин Г.Н.¹, Рааб А.Г.¹, Ценев Н.К.²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): В статье описаны особенности и потенциальные преимущества деформации методами волочения со сдвигом (ВсС) и интенсивной пластической деформации (ИПДК) в температурном интервале эффекта динамического деформационного старения (ДДС), которые позволяют получать высокий комплекс физико-механических свойств. **Цель работы:** Исследование и анализ особенностей структурообразования при совместном действии ИПД и эффекта ДДС при деформировании методами волочения со сдвигом и интенсивной пластической деформации кручением, установление закономерностей при образовании градиентной структуры. **Используемые методы:** 1. Компьютерное моделирование в программной среде Deform 3D с целью выявления напряженно-деформированного состояния на материалах с разными типами кристаллических решеток: медь М1 (ГЦК), сталь 10 (ОЦК) и титан ВТ1-0 (ГПУ) и дальнейшего сопоставления с экспериментальными данными. 2. Измерение микротвердости. 3. Растровая и просвечивающая электронная микроскопия. **Новизна:** К элементам новизны относится исследование совместного действия ИПД и эффекта ДДС на формирование градиентной структуры и механические свойства металлов с различными кристаллическими решетками. **Результат:** В статье приведены результаты исследований по формированию структуры в процессе немонотонной пластической деформации сплавов (сталь 10, медь, титан) с различными типами кристаллической решетки методом ВсС, а также РКУП и ИПДК низкоуглеродистой стали в условиях действия эффекта ДДС. Проанализированы механизмы деформации и особенности деформационного поведения на мезоуровне при различных режимах деформационной обработки. Установлены температурные интервалы проявления эффекта ДДС при деформации стали 10 при РКУП и факт формирования градиентной структуры при ИПДК в этих условиях. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы для получения данных при выборе оптимального режима деформационной обработки с эффектом ДДС.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, интенсивная пластическая деформация кручением, волочение со сдвигом, динамическое деформационное старение, сталь 10, медь М1, титан ВТ1-0, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, микроструктура.

Введение

Требования к свойствам конструкционных материалов в современных условиях становятся более высокими и дифференцированными. В первую очередь, это относится к ответственным металлическим изделиям, работающим в экстремальных условиях эксплуатации в аэрокосмической, химической, медицинской и других отраслях промышленности. Один из методов повышения прочности материалов состоит в уменьшении размеров кристаллитов от микронных до наноразмеров. Полученные таким образом материалы, например наноструктурный алюминий или медь, могут стать тверже высокопрочной стали, но эти материалы будут очень

хрупкими и разрушаться при растяжении, очевидно, вследствие локализации деформации.

Одним из приемов, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики изделий, является использование металлических материалов с градиентной структурой [1–5]. Как было установлено, градиентные микроструктуры, в которых размер зерна возрастает от наноразмеров на поверхности до крупнозернистого состояния в центре [заготовки], являются эффективным подходом к повышению пластичности изделия в целом [4–6].

В последние годы исследование градиентных структурных состояний в металлических материалах сформировалось в новое научное направление [6–8]. В этих рамках представляет интерес исследование формирования градиентных структур в длинномерных металлических изделиях (прутках, полосах). Сочетание более твердых поверхностных слоев с относительно «мягкой»

сердцевинной в таких изделиях позволяет увеличить износостойкость, распределять нагрузки, релаксировать концентраторам напряжений и повысить пластичность изделия в целом. В качестве примера следует указать использование немонотонной сдвиговой деформации волочением со сдвигом прутков низкоуглеродистой стали, приводящей к образованию градиентной структуры вплоть до формирования наноструктурных поверхностных слоёв со сверхвысокой микротвёрдостью ($HV \sim 7$ ГПа) и к заметному повышению износостойкости [9, 10].

Сочетание структурной градиентности и проявления других эффектов, например динамического деформационного старения (ДДС [11, 12]), может представлять интерес для управления локальными свойствами изделий. Учитывая, что эффект ДДС проявляется при формировании ультрамелкозернистых и наноструктурных состояний [13] с заметным повышением прочности, создание градиентных структур размерностью от нанодиапазона до крупнозернистого в условиях ДДС имеет перспективу локального управления свойствами изделий и полуфабрикатов.

С учётом вышеизложенного, в настоящей работе поставлена задача исследования особенностей структурных изменений и механического поведения сплавов с различными типами кристаллической структуры в процессе немонотонной пластической деформации методом волочения со сдвигом, а также кручения под высоким гидростатическим давлением низкоуглеродистой стали в условиях действия эффекта динамического деформационного старения.

Для решения поставленной задачи было исследовано деформированное состояние методов ВcC и ИПДК с использованием компьютерного моделирования и проведены физические эксперименты.

Материал и методики исследований

В настоящей работе исследовали материалы с различными типами кристаллической структуры – с ОЦК (сталь 10), ГЦК (сплав М1-0) и ГПУ (сплав ВТ1-0) кристаллическими решётками стандартного химического состава [14].

Перед проведением физических экспериментов по деформационной обработке исследуемых сплавов было проведено компьютерное моделирование процессов волочения со сдвигом, традиционного волочения и кручения под высоким давлением.

1. Волочение со сдвигом длинномерных образцов сплавов железа, меди и титана

1.1. Компьютерное моделирование процесса волочения со сдвигом

Компьютерное моделирование процесса волочения со сдвигом, а также традиционного волочения провели на примере прутков низкоуглеродистой стали 10, реологические свойства которой были заложены при разработке численной модели, согласно [14, 15]. Для реализации процедуры моделирования использовали стандартный пакет прикладных программ (ППП) «DEFORM-3D». С этой целью были созданы объёмные модели фильер (рис. 1) в программном продукте «Компас-3D» с различными углами рабочей части.

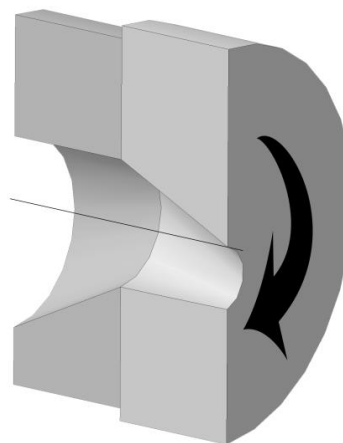


Рис. 1. Трёхмерная модель фильер для волочения со сдвигом. Вращается эксцентриковая волока

Перед моделированием были приняты следующие допущения к моделям традиционного волочения и волочения со сдвигом:

1. Материал заготовки в исходном состоянии является пластичным и изотропным, в нем отсутствуют начальные напряжения и деформации.
2. Температуру среды деформирования принимали равной 20°C.
3. Инструмент является абсолютно жестким, и учет геометрии инструмента производится автоматически.
4. Для моделирования волочения и волочения со сдвигом было выбрано 150 шагов, учитывающих полное прохождение заготовки в фильерах и получение стабильного результата.
5. Заготовка разбита на 55000 трапецидальных элементов.
6. Коэффициент трения между заготовкой и инструментом по Зибелю 0,12.

7. Скорость волочения 0,95 мм/с.

8. Степень деформации после одного прохода 15%.

9. Скорость вращения подвижной фильеры 500 мин⁻¹.

По результатам моделирования также определяли изменения интенсивности накопленной пластической деформации Λ_m вдоль диаметра поперечного сечения прутков после деформационной обработки. Следует отметить, что наиболее значимыми факторами, влияющими на интенсивность деформации при волочении со сдвигом при комнатной температуре, являются угол фильеры, скорость волочения, скорость вращения фильеры вокруг оси и трибологические параметры контакта заготовки с инструментом.

Для сравнения схем волочения и волочения со сдвигом эти процессы были промоделированы в среде «DEFORM-3D», результаты компьютерного моделирования процессов традиционного волочения и волочения со сдвигом представлены на **рис. 2 и 3**.

Как показало компьютерное моделирование, после 5 проходов традиционного волочения величина Λ_m достигает значения лишь $\sim 0,95$ при сравнительно однородном распределении деформации по объёму прутка (**рис. 2**). В то же время после одного прохода волочения со сдвигом наблюдается явно неоднородное распределение интенсивности деформации Λ_m , которая возрастает от центра к периферии прутка и в приповерхностной области достигает величины $\Lambda_m > 2$ (**рис. 3**). Этот факт свидетельствует о более интенсивном деформационном воздействии на заготовку при волочении со сдвигом. Столь интенсивная деформация металла при такой обработке связана с геометрией фильер и условиями их вращения относительно оси волочения. Таким образом, за один цикл обработки методом волочения со сдвигом возможно получение существенно больших значений интенсивности деформации и, следовательно, повышение производительности процесса изготовления высокопрочной длинномерной продукции. При этом наблюдается снижение сил волочения почти в 2 раза и нормальных сил на инструменте в 1,8 раза, по сравнению с традиционным волочением [15–17].

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о том, что при волочении со сдвигом в прутках сплавов формируется градиентная структура, в которой периферийные об-

ласти прутков подвергаются более интенсивному деформационному воздействию по сравнению с центральными областями прутков.

Моделирование волочения со сдвигом, проведённое для прутков сплавов титана (ГПУ) и меди (ГЦК), показало, что картина распределения интенсивности накопленной пластической деформации идентична наблюдаемой на стали 10. Очевидно, такая идентичность обусловлена особенностями моделирования в среде DEFORM-3D и принятыми допущениями, которые не учитывают различий кристаллической структуры сплавов. Изучение влияния этих различий на характер распределения интенсивности накопленной пластической деформации является предметом дальнейших исследований.

Процессы, происходящие в приповерхностной области прутков при волочении со сдвигом, представляют собой интенсивную пластическую деформацию, в которой максимально воздействие сдвиговой деформации под влиянием силы трения со стороны эксцентриковых фильер.

1.2. Физический эксперимент: волочение со сдвигом длинномерных образцов сплавов железа, меди и титана

Волочение со сдвигом включает операции редуцирующей обработки, совмещенной со сдвигом. Реализация метода происходила по схеме волочения за счет приложения тянущей силы через две последовательно расположенные конические волокна с одновременным вращением одной из волокон [7, 9, 16, 17]. Проведение деформационного процесса обеспечивается за счет того, что вращением эксцентриковой волокна обеспечивают дополнительную деформацию сдвига посредством заданного относительно оси вращения эксцентриситета, образованного конусным каналом волокон (**см. рис. 1**).

Волочение со сдвигом (один проход) проводили на волочильном стане с приставкой для вращения фильер. При этом за один проход диаметр прутков уменьшился с 10 до 9,2 мм.

С целью выявления особенностей сформированной градиентной структуры деформированных волочением со сдвигом сплавов проводили исследования микроструктуры методами световой и электронной микроскопии, а также измерения микротвёрдости HV по диаметру поперечного сечения прутков.

На **рис. 4** представлены снимки микроструктуры стали 10 в исходном и деформиро-

ванном состоянии.

В исходном состоянии сталь 10 представляет собой ферритно-перлитную структуру со средним размером зёрен феррита и перлита соответственно 12 и 5 мкм. Если в исходном состоянии структура стали 10 по всей поверхности сечения в основном однородна, а границы зёрен феррита сравнительно прямолинейны, то после деформации в центральной части прутка границы зёрен нередко искривлены и деформированы, однако размер зёрен изменился незначительно (ср. ≈ 11 мкм). В то же время вдоль узкой приповерхностной зоны шири-

ной \sim от 10 до 100 мкм на протяжении большей части длины окружности прутка структура кардинально отличается от таковой в остальной части поперечного сечения прутка (см. рис. 4). Как видно на снимках (рис. 4,б), приповерхностный слой прутка (область II) представляет собой зону интенсивной деформации, которая выглядит как волокнистая структура с волокнами, вытянутыми в направлении касательной к боковой поверхности прутков. Границы зёрен в приповерхностном слое не выявляются вследствие сильной измельчённости структуры.

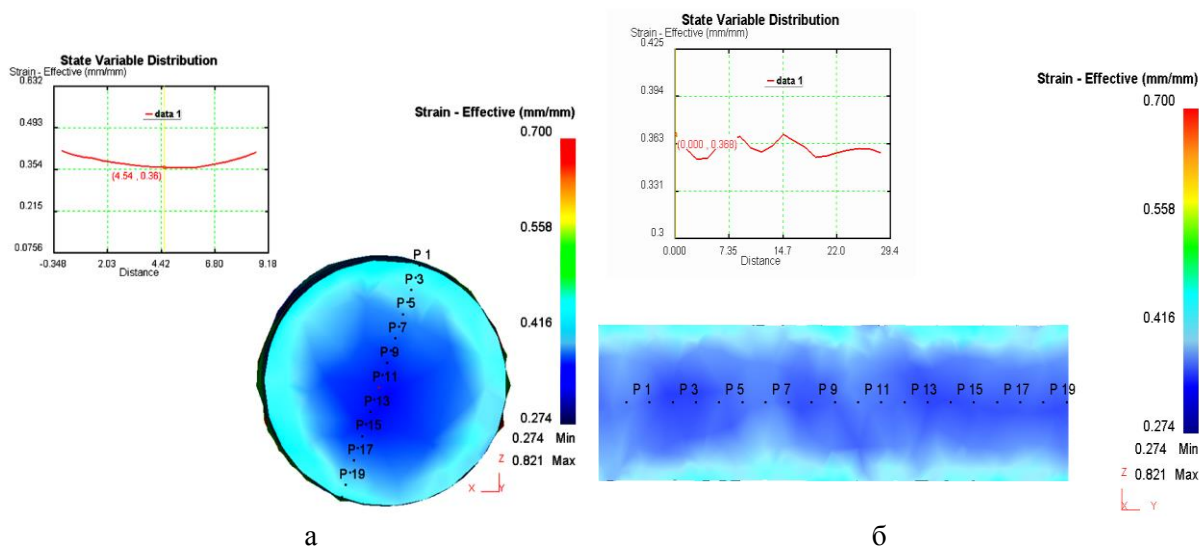


Рис. 2. Компьютерное моделирование процесса традиционного волочения. Распределение интенсивности накопленной деформации в поперечном (а) и продольном (б) сечении прутка стали 10 после традиционного волочения

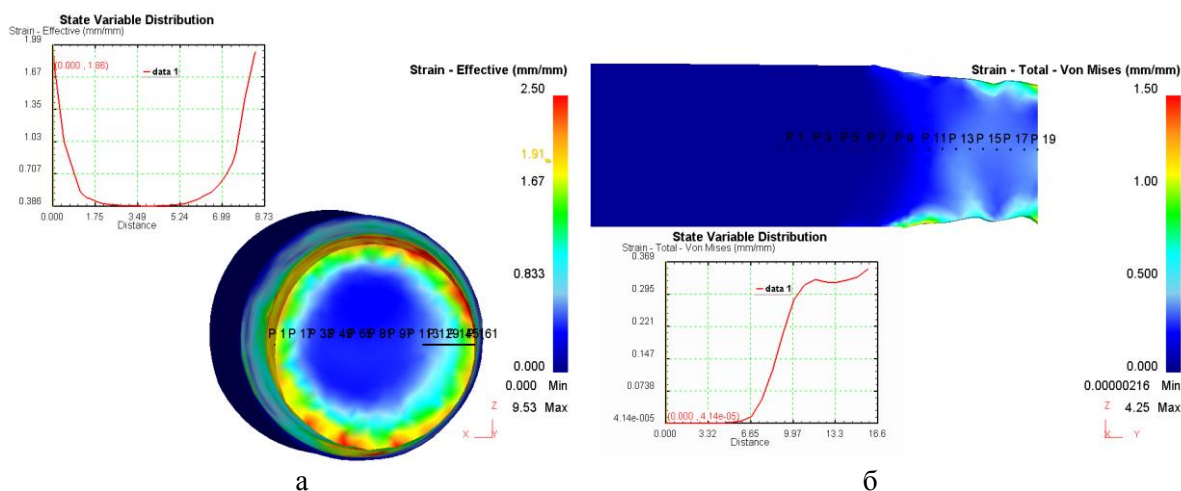
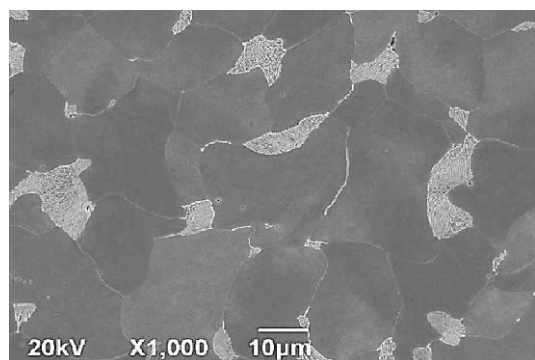


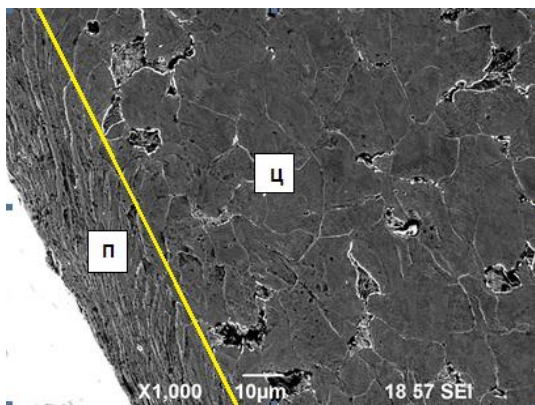
Рис. 3. Компьютерное моделирование процесса волочения со сдвигом. Распределение интенсивности накопленной пластической деформации в прутках стали 10 после волочения со сдвигом: а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Определение микротвёрдости боковой поверхности прутка стали 10 после ВсС также свидетельствует о высокой неоднородности значений HV. Измерения величины HV на боковой поверхности вдоль оси прутка показали, что значения HV изменяются в диапазоне $\sim 3600\text{--}7000$ МПа. При этом увеличение количества проходов волочения со сдвигом приводит к повышению нижней границы этого диапазона до величины более 5200 МПа. Столь высокие значения микротвёрдости приповерхностного слоя способствуют увеличению износостойкости стальных прутков \sim на 25% [18].

Такая структура, представляющая собой сочетание слабodeформированной центральной области прутков с размером зёрен $d \sim 8\text{--}10$ мкм и сильноdeформированной приповерхностной области, размеры структурных элементов в которой не превышают 0,1 мкм, по сути, является градиентной [10].



а



б

Рис. 4. Микроструктура стали 10 в исходном состоянии (а) и после волочения со сдвигом (б) при 200С. Ц – центральная область прутков, П – периферия. РЭМ. Условная линия отделяет сильно деформированный участок П от центральной слабо деформированной области Ц

На рис. 5 представлен снимок микроструктуры прутка сплава М1 после волочения со сдвигом. Микроструктура характеризуется силь-

ной неоднородностью по всему поперечному сечению прутков, и, соответственно, неоднородностью значений микротвёрдости – величина HV изменяется от 800 до 1300 МПа. Определение микротвёрдости вдоль боковой поверхности показало, что она изменяется от 2000 до 3500 МПа. Ширина сильно деформированной приповерхностной области П неоднородна вдоль боковой поверхности прутка и достигает величины ~ 160 мкм, что заметно превышает аналогичные значения для стали 10 после волочения со сдвигом (см. рис. 4). Образование более широкой, по сравнению со сталью 10 (с ОЦК решёткой), сильно деформированной приповерхностной зоны в сплаве М1 (с ГЦК решёткой), очевидно, связано с меньшей твёрдостью и большей пластичностью медного сплава М1. В целом, структура в прутках меди М1 после волочения со сдвигом, также является градиентной.

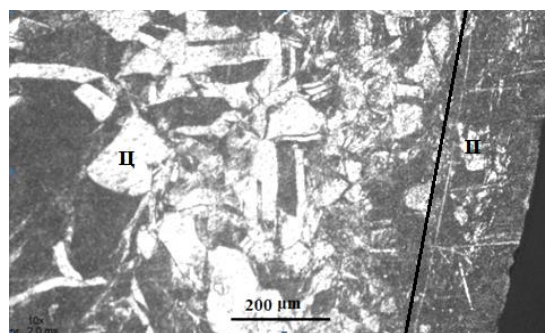


Рис. 5. Микроструктура сплава М1 после 1 прохода ВсС – поперечное сечение прутков: Ц – центральная область и П – периферийная сильно деформированная область (отделена условной линией). Световая микроскопия

На рис. 6 приведен снимок микроструктуры сплава ВТ1-0 в поперечном сечении прутка после волочения со сдвигом. Условная линия на снимке разделяет центральную (Ц) и сильно деформированную приповерхностную (П) области. Ширина сильно деформированной приповерхностной области в прутках данного сплава (с решёткой ГПУ) не превышает 25 мкм, что значительно ниже, чем в сплавах Ст. 10 и М1 с кубической решёткой (ОЦК и ГЦК). Вероятно, это обстоятельство обусловлено значительно меньшим числом систем скольжения N в сплаве с гексагональной плотноупакованной решёткой ($N=3$), по сравнению с кубическими решётками ($N=12$) сплавов Ст. 10 и М1, а также с более высокой пластичностью последних. Структура сплава ВТ1-0 после волочения со сдвигом также является градиентной.

Таким образом, немонотонная пластическая деформация волочением со сдвигом позволяет

сформировать градиентную структуру в длинномерных металлических изделиях с любым типом кристаллической структуры.

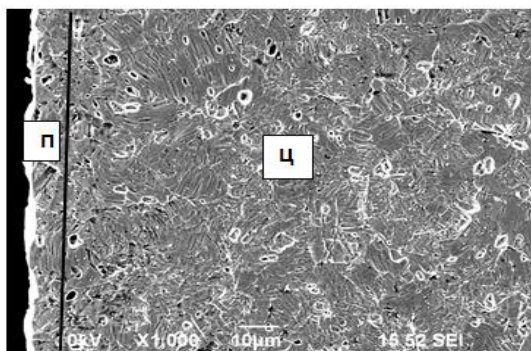


Рис. 6. Микроструктура поперечного сечения прутка титанового сплава BT1-0 после 1 прохода волочения со сдвигом: Ц – центральная область прутка, П – периферия (отделена условной линией). РЭМ

2. Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением

2.1. Компьютерное моделирование процесса кручения под высоким давлением

Для более полного выявления механизмов формирования градиентной структуры сплавов в условиях интенсивной сдвиговой деформации во всём объёме материала представляют интерес исследования особенностей формирования такой структуры в сплавах при ИПД кручением под высоким давлением.

На рис. 7 приведены результаты компьютерного моделирования процесса кручения под высоким давлением сплавов BT1-0 (ГПУ решётка), Ст. 10 (ОЦК решётка) и М1 (ГЦК решётка), т.е. картины распределения интенсивности накопленной пластической деформации в образцах-дисках после кручения на три оборота при комнатной температуре. Как видно из рисунка, градиентная структура в образцах-дисках, когда

интенсивность деформации в центральных областях значительно ниже, чем в периферийной области, формируется уже после трёх оборотов кручения под давлением во всех типах исследованных сплавов с различными кристаллическими решётками. В картинах распределения интенсивности пластической деформации наблюдаются некоторые различия в силу разных прочностных и пластических характеристик сплавов с разными кристаллическими структурами.

Для оценки результатов, полученных компьютерным моделированием, был проведён физический эксперимент по кручению под давлением с соблюдением режимов обработки, принятых в модели.

2.2. Физические эксперименты: сдвиговая деформация кручением под давлением плоских образцов-дисков низкоуглеродистой стали

Для более полного изучения процессов формирования градиентной структуры в сплавах при интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением были проведены исследования на примере низкоуглеродистой стали 10. Предварительные исследования показали, что наиболее эффективно градиентная структура в стали 10 формируется при интенсивной пластической деформации в интервале температур проявления эффекта динамического деформационного старения (ДДС) [13]. В соответствии с этим были проведены эксперименты по кручению стали под высоким давлением (6 ГПа) при различных температурах из интервала проявления эффекта ДДС – 20, 250 и 400°C. Для проведения деформационной обработки стали методом ИПДК были подготовлены образцы в виде дисков диаметром 10 мм, толщиной 0,5 мм. На рис. 8 приведена схема узла штамповой оснастки для осуществления процесса ИПД методом ИПДК [19, 20].

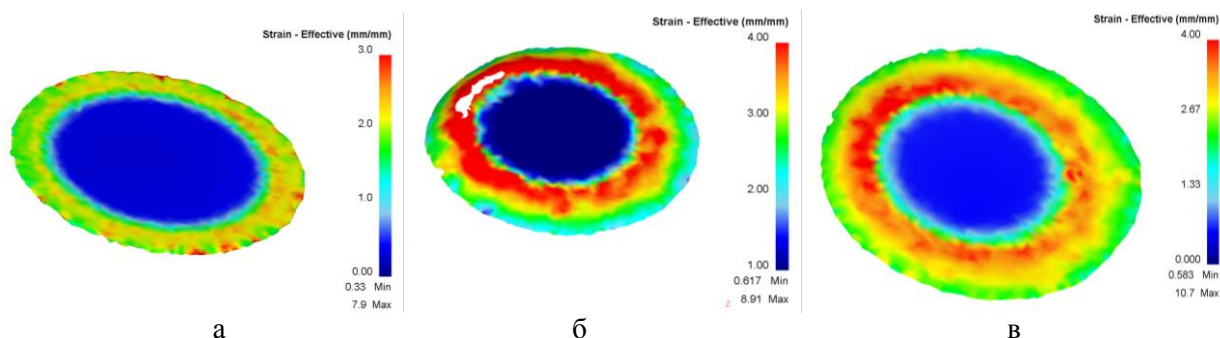


Рис. 7. Распределение интенсивности накопленной пластической деформации после ИПД методом ИПДК образцов-шайб сплавов: а – BT1-0; б – Ст. 10; в – М1

После деформации на этих образцах измеряли микротвёрдость, а также исследовали структуру на световом и электронном микроскопах. Степень деформации e определяли согласно [19, 20] выражению

$$e = \ln(\vartheta \cdot r / h), \quad (1)$$

где ϑ – угол вращения, рад; r и h – радиус и толщина диска соответственно.

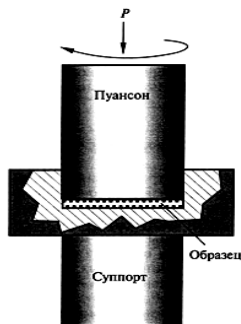


Рис. 8. Схема деформационного узла для интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением

На рис. 9 представлена микроструктура стали 10 в исходном состоянии и после 5 оборотов кручения под высоким давлением при температуре 20°C. Как видно из рисунка, зёрна перлита в центральной части образцов сохранили глобулярную форму, хотя пластины цементита в этих зёрнах раздроблены и хаотично развёрнуты друг относительно друга. В то же время в периферийных

областях образцов, где происходит наибольшее измельчение структуры, зёрна перлита и феррита сильно вытянуты вдоль полос скольжения. Пластины цементита в зёрнах перлита в периферийных областях образцов, как правило, также раздроблены, как и в центре образцов.

2.3. Интенсивная сдвиговая деформация равноканально угловым прессованием

Как было показано в работе [13], после интенсивной пластической деформации методом равноканально углового прессования (РКУП) в структуре стали 10 наблюдаются явные признаки действия ротационных мод деформации в зёрнах перлита. Так, если в исходном состоянии сплава пластины цементита в зёрнах перлита были относительно прямолинейными и взаимно параллельными (рис. 9, а), то уже после 4 проходов РКУП ($\varepsilon \approx 3,3$) при 250°C во многих зёрнах перлита наблюдаются сильно искривлённые пластины цементита (рис. 9, б). Это наглядно свидетельствует о развитии ротационных механизмов деформации в процессе РКУП в зёрнах перлита. Кроме того, поскольку в перлите ячеистая структура эволюционирует медленнее, и ее развитие существенно отстает от эволюции структуры в зёрнах феррита [21], развитие поворотных мод деформации в последних происходит значительно интенсивнее, что подтверждает наличие измельчённой ячеистой структуры в зёрнах феррита (рис. 9, в).

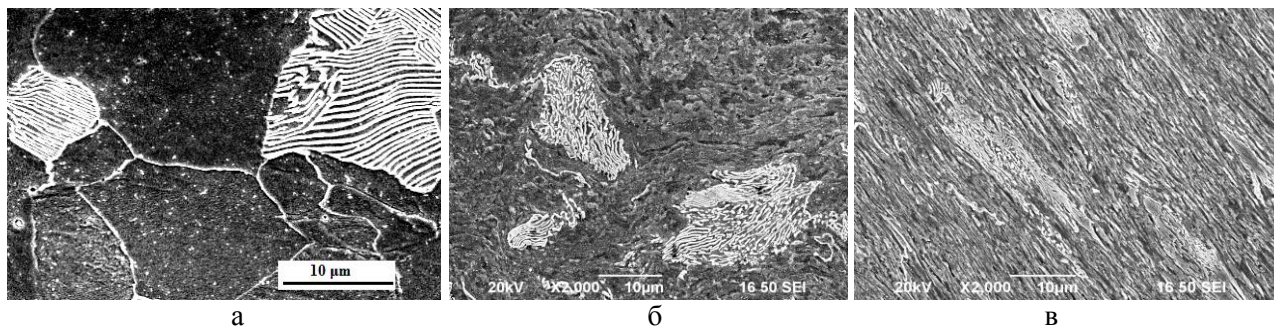


Рис. 9. Микроструктура стали 10: а – исходное состояние; б, в – 5 оборотов ИПДК при 20°C: б – центральная область; в – периферия. РЭМ

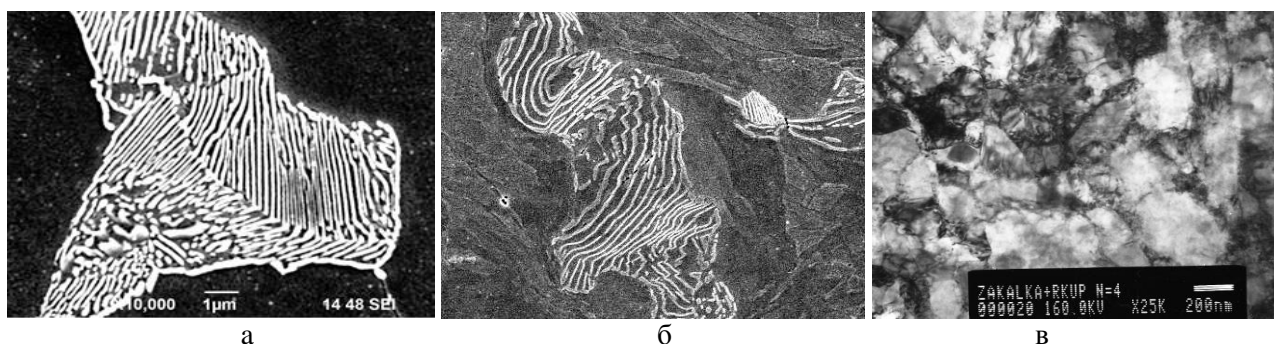


Рис. 10. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры стали 10 из статьи [14]: а – исходное состояние; б, в – РКУП при 250°C; $\varepsilon_4 \approx 3,3$; а, б – РЭМ; в – ПЭМ

Необходимо отметить следующий немаловажный факт: наблюдаемые в настоящей работе раздробленные и хаотично развёрнутые относительно друг друга пластины цементита после кручения под высоким давлением, так же как и после РКУП, свидетельствуют об активизации внутризёрненного дислокационного скольжения и развитии ротационных механизмов деформации даже при комнатной температуре. Выявляемые пластины цементита после кручения образцов стали под высоким давлением, по сути, можно рассматривать как маркеры, находящиеся в объёме стали и позволяющие оценивать характер структурных изменений, а также действующие механизмы деформации.

На рис. 10 приведены результаты определения микротвёрдости вдоль диаметра образцов-дисков стали 10 после ИПДК при различных температурах. Как следует из графиков, величина микротвёрдости стали после ИПДК при 20°C значительно ниже полученных на образцах после ИПДК при 250 и 400°C. В то же время необходимо отметить, что если значения HV в центральной области образцов после ИПДК при 250°C заметно ниже таковых после ИПДК при 400°C, то в периферийных частях образцов наблюдается обратная картина – после ИПДК при 400°C величина HV существенно ниже таковой по сравнению с ИПДК при 250°C.

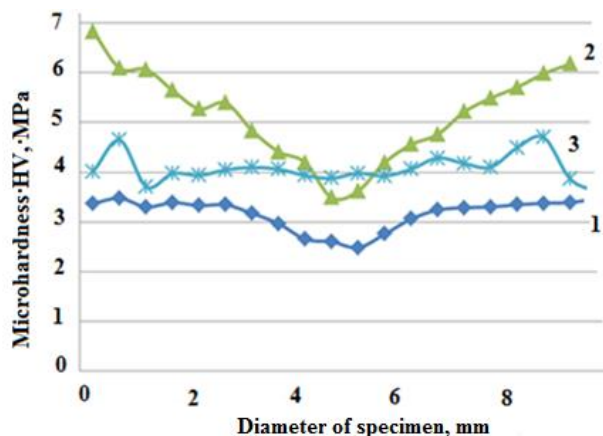


Рис. 11. Микротвёрдость стали 10 вдоль диаметра образцов-дисков после 5 оборотов ИПДК: 1 – 20°C; 2 – 250°C; 3 – 400°C

Наблюдаемое в исследованных образцах-дисках после деформации методом ИПДК сочетание ультрамелкозернистой структуры в периферийных областях образцов и сравнительно крупнозернистой структуры в центральной области, по сути, представляет собой градиентную структуру. Такая структура обладает также и градиентом ме-

ханических свойств, о чём свидетельствуют графики зависимости HV от радиуса образцов-дисков, полученные после ИПДК при различных температурах деформации – центральная область дисков является более «мягкой» (обладает меньшими значениями HV) в сравнении с периферийными областями (обладающими более высокими значениями микротвёрдости).

3. Обсуждение и анализ проведённых экспериментов по компьютерному моделированию и физического эксперимента по деформационной обработке сплавов

Таким образом, компьютерное моделирование показало, что градиентная структура в длинномерных металлических изделиях формируется уже после одного прохода волочения со сдвигом, соответственно, за один цикл обработки методом волочения со сдвигом возможно получение существенно больших значений интенсивности деформации и, следовательно, повышение производительности процесса изготовления высокопрочной длинномерной продукции. При этом наблюдается снижение сил волочения почти в 2 раза и нормальных сил на инструменте в 1,8 раза, по сравнению с традиционным волочением. В то же время интенсивность деформации в приповерхностной области возрастает и достигает величины $\Lambda_m > 2$. Столь интенсивная деформация металла при данной обработке связана с геометрией фильера и условиями их вращения относительно оси волочения.

В целом проведение физического эксперимента по волочению со сдвигом сплавов с различными типами кристаллической структуры подтвердило результаты компьютерного моделирования и градиентный характер сформировавшейся структуры.

То, что значения микротвёрдости стали после ИПДК при температурах проявления эффекта ДДС значительно превышают таковые после деформации при комнатной температуре, прямо подтверждает факт действия эффекта динамического деформационного старения [22–24] при интенсивной пластической деформации методом ИПДК и формировании градиентной структуры.

При этом необходимо отметить некоторые температурные особенности проявления эффекта ДДС в стали 10. При температуре 400°C действие эффекта ДДС уже заметно ослабевает. Вследствие чего значения микротвёрдости в периферийных частях образцов после ИПДК при 400°C ниже, чем после ИПДК при 250°C. Следовательно, после

ИПДК стали 10 при 250°C структура и характер распределения микротвёрдости более выражено соответствуют понятию «градиентности», по сравнению с ИПДК при 400°C.

Очевидно, в низкоуглеродистой стали 10 вследствие повышения температуры деформации до 400°C активизируются диффузионные процессы переползания дислокаций и, соответственно, существенно снижается роль динамического деформационного старения при ИПДК, а роль обычного разупрочнения возрастает. Полученные результаты во многом аналогичны данным работы [22], в которой в экспериментах по деформации тонких фольг *in situ* в колонне электронного микроскопа детально были исследованы особенности проявления эффекта ДДС в различных металлических материалах.

В целом наблюдаемое в настоящей работе более значительное увеличение прочностных характеристик стали после «тёплой» деформации является следствием как измельчения структуры, так и проявления эффекта ДДС. Если повышение прочности стали при измельчении структуры можно объяснить, главным образом, увеличением объёмной доли границ раздела, то повышение прочности вследствие проявления эффекта ДДС вызвано закреплением подвижных дислокаций атмосферами примесных атомов углерода и азота, а также образующимися мелкодисперсными частицами вторых фаз и, как следствие, увеличением плотности дислокаций. В свою очередь эти факторы способствуют также и дополнительному измельчению структуры стали и формированию градиентной структуры.

Известно, что интенсивная сдвиговая деформация характеризуется, в первую очередь, ускорением диффузионных процессов растворения цементита и перераспределения атомов углерода в сталях [7, 10, 21]. Этому активно способствует развитие ротационных мод деформации, явные признаки действия которых наблюдаются не только в зёрнах феррита, но также и в перлите [13].

Как было отмечено выше, в микроструктуре стали 10 наблюдаются раздробленные и хаотично развёрнутые друг относительно друга пластины цементита после ИПДК даже при комнатной температуре (см. рис. 9). Это наглядно свидетельствует как о действии внутризёрненного дислокационного скольжения, так и о развитии ротационных механизмов деформации при кручении под высоким давлением, так же как и после РКУП (см.

рис. 10) [13]. Таким образом, следует подчеркнуть немаловажный впервые отмеченный факт, что выявляемые пластины цементита после кручения образцов стали под высоким давлением, по сути, можно рассматривать как маркеры, находящиеся в объёме стали и позволяющие оценивать характер структурных изменений, а также действующие при ИПД механизмы деформации.

Следовательно, формирование градиентной структуры при интенсивной пластической деформации методом ИПДК происходит в условиях действия эффекта ДДС, что приводит к дополнительному увеличению плотности дислокаций в зёрнах феррита и перлита вследствие торможения их движения атмосферами атомов примесей и дислокациями леса, перемещение которых также затруднено вследствие взаимодействия с атмосферами примесных атомов согласно [10, 21–24]. Следует также отметить роль ДДС и наличие полезных примесей в границах раздела, которые способствуют дополнительному измельчению структуры сплава [13, 25–27] и повышению предела текучести и микротвёрдости.

Выводы

1. Промоделированы процессы немонотонной сдвиговой деформации волочением со сдвигом длинномерных прутков сплавов с различными кристаллическими решётками и кручением под давлением плоских образцов-дисков в среде DEFORM-3D для определения напряжённо-деформированного состояния деформированных образцов и выявления картины распределения накопленной деформации.
2. Проведена предварительная деформационная обработка опытных длинномерных образцов сплавов с различными кристаллическими решётками методом волочения со сдвигом. Установлен градиентный характер сформировавшейся в прутках сплавов с различными решётками гетерогенной структуры.
3. Проведена интенсивная сдвиговая деформация кручением под давлением плоских образцов-дисков низкоуглеродистой стали 10 и определён температурный интервал проявления эффекта ДДС, который составляет 200–400°C.
4. Определение параметров микротвёрдости (HV) в периферийной и центральной частях поперечного сечения вдоль радиуса цилиндрических образцов после интенсивной деформации кручением под давлением позволило установить характер сформировавшейся градиентной структуры и определяющую роль эффекта динамического деформационного старения.

5. Установлено, что интенсивная пластическая деформация методом ИПДК низкоуглеродистой стали в интервале температур динамического деформационного старения приводит к повышению параметров деформационного упрочнения, в первую очередь, благодаря уменьшению размеров структурных элементов, а также дополнительному влиянию частиц второй фазы. Это способствует формированию градиентной структуры и свойств исследованной стали.

6. Проведён анализ механизмов пластической деформации, приводящих к формированию градиентной структуры в процессе кручения под высоким давлением стали 10 – это сдвиговая деформация, приводящая к активизации дислокационного скольжения и взаимодействию дислокаций с атомами примесей, а также к развитию ротационных мод деформации и диффузионных процессов перераспределения атомов углерода.

Результаты настоящего исследования получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-08-00720.

Список литературы

1. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. Новокузнецк: СибГИУ, 2004. 224 с.
2. Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях / Ю.Ф. Иванов, В.В. Коваленко, Э.В. Козлов и др. Новосибирск: Наука, 2006. 280 с.
3. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов и др. Новокузнецк: Изд-во ООО «Полиграфист», 2009. 557 с.
4. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний на наномасштабном уровне в прокатных валках / Ю.Ф. Иванов, О.Ю. Ефимов, В.В. Коваленко и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2008. №4. С. 55–58.
5. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients // Science 19 Sep 2014: vol. 345, iss. 6203, pp. 1455–1456.
6. Fang T.H., Li W.L., Tao N.R., Lu K. Revealing Extraordinary Intrinsic Tensile Plasticity in Gradient Nano-Grained Copper. // Science 25 Mar 2011: vol. 331, iss. 6024, pp. 1587–1590.
7. Raab G.I., Simonova L.A., Aleshin G.N. Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear // Metalurgija 55 (2016) 2, 177–180.
8. Структурно-фазовый градиент, индуцированный усталостными испытаниями в условиях промежуточного электростимулирования / Ю.Ф. Иванов, В.В. Коваленко, М.П. Ивахин и др. // Физическая мезомеханика. 2004. Т.3, №7. С.29–34.
9. Raab A.G., Chukin M.V., Aleshin G.N., Raab G.I. Investigation of a new shear deformation method for the production of nanostructures in low-carbon steel // 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 63 012008 doi:10.1088/1757-899X/63/1/012008
10. Raab G.I., Gunderov D.V., Shafigullin L.N., Podrezov Yu.M., Danylenko M.I., Tsenev N.K., Bakhtizin R.N., Aleshin G.N., Raab A.G. Structural variations in low-carbon steel under severe plastic deformation by drawing, free torsion, and drawing with shear // Materials Physics and Mechanics. 2015. No. 3. Vol. 24, 242–252.
11. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320 с.
12. Попов К.В. Динамическое деформационное старение и хрупкость водородного типа. М., 1979. 98 с.
13. Aleshin G.N., Raab G.I., Kodirov I.S. Features of Dynamic Strain Aging of Low-Carbon Steels during Severe Plastic Deformation Processing // Key Engineering Materials. 2017, vol. 743, pp. 191–196.
14. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
15. Применение полного факторного эксперимента в процессе волочения со сдвигом / М.В. Чукин, А.Г. Рааб, В.И. Семенов, И.Р. Асланян, Г.И. Рааб // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4. С. 33–37.
16. Пат. 2347633 РФ. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом / Рааб Г.И., Рааб А.Г. 2007.
17. Рааб Г.И., Рааб А.Г. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом // Изобретатели – машиностроению. 2011. №3. С. 4.
18. Semenov V.I., Aleshin G.A., Raab A.G., Tontchev N., Kamburov V., Yankov E. Scheme of treatment and its effect on the strain heterogeneity and structural changes in billets of low-carbon steel // Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations, V. III/2017, pp. 87–91.
19. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. // Prog. Mater. Sci. 45 (2000) 103–189.
20. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications // Wiley STM, USA 2014, p. 440.
21. Raab G.I., Podrezov Y.M., Aleshin G.N. Structure Evolution during Plastic Deformation of Low-Carbon Steel, Materials Science Forum, 2016, vol. 870, pp. 253–258.
22. Caillard D. Dynamic strain ageing in iron alloys: The shielding effect of carbon // Acta Materialia 112 (2016) 273–284.
23. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: модели, основанные на физических теориях пластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 1. С. 134–163. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09
24. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 3. С. 186–232. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10
25. Danylenko N.I., Kovylayev V.V., Ponomaryov S.S., Firstov S.A. Растворение цементита в процессе интенсивной поверхностной пластической деформации. Lutsk: Inter-University Collection "NAUKOVY NOTATKI", 69–72. (2009).

26. Firstov S.O., Rogul T.H., Shut O.A. Transition from microstructures to nanostructures and ultimate hardening // Functional Materials. 2009. 16, №4. P. 364–373.
27. Firstov S.O., Rohul T.H., Svechnikov V.I., Dub S.M.

Concept of "useful" impurities and me-mechanical properties of nanostructured chromium and molybdenum films // Materials Science. 42 (1) (2006) 121–126.

Поступила 02.07.18

Принята в печать 19.10.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-64-75>

INFLUENCE OF SPECIAL FEATURES OF THE GRADIENT STRUCTURE FORMATION DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF ALLOYS WITH DIFFERENT TYPES OF A CRYSTALLINE LATTICE

Georgy I. Raab – DSc (Eng.)

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: giraab@mail.ru

Ilyas S. Kodirov – Master's student

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: ilyas-kodirov@mail.ru

Gennady N. Aleshin – PhD (Physics and Mathematics)

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: galioshin@mail.ru

Arseniy G. Raab – PhD (Eng.)

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: agraab@mail.ru

Nikolai K. Tsenev – PhD (Physics and Mathematics)

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia. E-mail: nktsenev@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes some features and prospective benefits of deformation by methods of drawing with shear (SD) and high pressure torsion (HPT) in a temperature range of dynamic strain aging (DSA) effect, which allow receiving a high complex of physical and mechanical properties.

Objectives: The study aims to investigate and analyze features of the structure formation with the combined application of severe plastic deformation (SPD) and the DSA effect during deformation by drawing with shear and high pressure torsion, to establish patterns of the gradient structure formation. **Methods Applied:** 1. Computer simulation in Deform 3D software to investigate the stress-strain state on materials with various types of a crystalline lattice: copper grade M1 (FCC), Steel 10 (BCC) and titanium VT1-0 (HCP) and a further comparison with experimental results. 2. Microhardness measurement 3. Scanning and transmission electron microscopy. **Originality:** This research resulted in investigation of the combined effect of the DSA effect and SPD on the gradient structure formation and mechanical properties of metals with various crystalline lattices. **Findings:** the paper presents the results of the study of the structure formation during non-monotonous plastic deformation of the alloys (steel 10, copper and titanium) with various crystalline lattice types by SD, as well as ECAP and HPT of low-carbon steel in the temperature range of the DSA effect. Deformation mechanisms and features of the deformation behavior on a mesoscopic scale under various deformation treatment modes are analyzed. The temperature range of the DSA effect in steel 10 under ECAP and the fact of the gradient structure formation under HPT are established. **Practical Relevance:** The study helped to obtain data that can be used to choose the optimal deformation treatment mode with the DSA effect.

mation treatment mode with the DSA effect.

Keywords: Severe plastic deformation, high pressure torsion, drawing with shear, dynamic strain aging, steel 10, copper M1, titanium VT1-0, computer simulation, stress-strain state, microstructure.

The results of the research were obtained with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research as part of Project No. 17-08-00720.

References

1. Kozlov E.V., Gromov V.E., Kovalenko V.V. et al. *Gradientnye struktury v perlitnoy stali* [Gradient structures in pearlitic steel]. Novokuznetsk: SibSIU, 2004, 224 p. (In Russ.)
2. Ivanov Yu.F., Kovalenko V.V., Kozlov E.V. et al. *Gradientnye strukturno-fazovye sostoyaniya v stalyakh* [Gradient structural and phase states in steels]. Novosibirsk: Nauka, 2006, 280 p. (In Russ.)
3. Kovalenko V.V., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F. et al. *Fizicheskaya priroda formirovaniya i evolyutsii gradientnykh strukturno-fazovykh sostoyaniy v stalyakh i splavakh* [A physical nature of the formation and evolution of gradient structural and phase states in steels and alloys]. Novokuznetsk: LLC Poligrafist Publishing House, 2009, 557 p. (In Russ.)
4. Ivanov Yu.F., Efimov O.Yu., Kovalenko V.V. et al. Forming structural and phase states at a nanoscale level in mill rolls. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Basic Problems of Material Science], 2008, no. 4, pp. 55–58. (In Russ.)
5. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients. *Science* 19 Sep 2014: vol. 345, no. 6203, pp. 1455–1456.
6. Fang T.H., Li W.L., Tao N.R., Lu K. Revealing extraordinary

- nary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper. *Science* 25 Mar 2011: vol. 331, no. 6024, pp. 1587–1590.
7. Raab G.I., Simonova L.A., Aleshin G.N. Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear. *Metalurgija* 55 (2016) 2, pp. 177–180.
 8. Ivanov Yu.F., Kovalenko V.V., Ivakhin M.P. et al. A structural and phase gradient induced by fatigue testing in the conditions of intermediate electrostimulation. *Fizicheskaya mezhmekhanika* [Physical mesomechanics], 2004, vol. 3, no. 7, pp. 29–34. (In Russ.)
 9. Raab A.G., Chukin M.V., Aleshin G.N., Raab G.I. Investigation of a new shear deformation method for the production of nanostructures in low-carbon steel. 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 63 012008. doi:10.1088/1757-899X/63/1/012008
 10. Raab G.I., Gunderov D.V., Shafigullin L.N., Podrezov Yu.M., Danylenko M.I., Tsenev N.K., Bakhtizin R.N., Aleshin G.N., Raab A.G. Structural variations in low-carbon steel under severe plastic deformation by drawing, free torsion, and drawing with shear. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, no. 3, vol. 24, pp. 242–252.
 11. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.E. *Deformatsionnoe starenie stali* [Dynamic strain aging]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 320 p. (In Russ.)
 12. Popov K.V. *Dinamicheskoe deformatsionnoe starenie i khrupkost vodorodnogo tipa* [Dynamic strain aging and hydrogen embrittlement]. Moscow, 1979, 98 p. (In Russ.)
 13. Aleshin G.N., Raab G.I., Kodirov I.S. Features of dynamic strain aging of low-carbon steels during severe plastic deformation processing. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 191–196.
 14. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. et al. *Marozhnik staley i splavov* [Database of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 640 p. (In Russ.)
 15. Chukin M.V., Raab A.G., Semenov V.I., Aslanyan I.R., Raab G.I. Applying full factorial experiment during drawing with shear. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of NMSTU], 2012, no. 4, pp. 33–37. (In Russ.)
 16. Raab G.I., Raab A.G. *Sposob polucheniya ultramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem so sdvigom* [Method for production of ultrafine-grained semi-finished products by drawing with shift]. Patent RF, no. 2347633, 2007.
 17. Raab G.I., Raab A.G. Method of producing ultrafine-grained semi-finished products by drawing with shear. *Izobretateli – mashinostroyeniye* [Inventors for the machine building industry], 2011, no. 3, p. 4. (In Russ.)
 18. Semenov V.I., Aleshin G.A., Raab A.G., Tontchev N., Kamburov V., Yankov E. Scheme of treatment and its effect on the strain heterogeneity and structural changes in billets of low-carbon steel. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*, vol. III/2017, pp. 87–91.
 19. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Prog. Mater. Sci.* 45 (2000), pp. 103–189.
 20. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications. Wiley STM, USA 2014, p. 440.
 21. Raab G.I., Podrezov Y.M., Aleshin G.N. Structure evolution during plastic deformation of low-carbon steel. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 253–258.
 22. Caillard D. Dynamic strain ageing in iron alloys: The shielding effect of carbon. *Acta Materialia*, 112 (2016), pp. 273–284.
 23. Trusov P.V., Chechulina E.A. Discontinuous yielding: models based on physical theories of plasticity. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2017, no. 1, pp. 134–163. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09 (In Russ.)
 24. Trusov P.V., Chechulina E.A. Discontinuous yielding: physical mechanisms, experimental data, macrophenomenological models. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2014, no. 3, pp. 186–232. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10 (In Russ.)
 25. Danylenko N.I., Kovylayev V.V., Ponomaryov S.S., Firstov S.A. Cementite dissolution during surface severe plastic deformation. Lutsk: Inter-University Collection "NAUKOVY NOTATKI", 2009, pp. 69–72. (In Russ.)
 26. Firstov S.O., Rogul T.H., Shut O.A. Transition from microstructures to nanostructures and ultimate hardening. *Functional Materials*, 2009, 16, no. 4, pp. 364–373.
 27. Firstov S.O., Rohul T.H., Svechnikov V.I., Dub S.M. Concept of "useful" impurities and mechanical properties of nanostructured chromium and molybdenum films. *Materials Science*, 2006, 42 (1), pp. 121–126.

Received 02/07/18

Accepted 19/10/18

Образец для цитирования

Влияние особенностей формирования градиентной структуры при интенсивной пластической деформации сплавов с различными типами кристаллической решётки / Рааб Г.И., Кодиров И.С., Алешин Г.Н., Рааб А.Г., Ценев Н.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 64–75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-64-75>

For citation

Raab G.I., Kodirov I.S., Aleshin G.N., Raab A.G., Tsenev N.K. Influence of special features of the gradient structure formation during severe plastic deformation of alloys with different types of a crystalline lattice. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 64–75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-64-75>

STUDY ON THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES ON MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF ROLLED SHEET PRODUCTS FROM A NEW ALUMINUM ALLOY, ECONOMICALLY ALLOYED WITH SCANDIUM

Baranov V.N.¹, Sidelnikov S.B.¹, Zenkin E.Yu.², Konstantinov I.L.¹, Lopatina E.S.¹, Yakiviyuk O.V.¹, Voroshilov D.S.¹, Belokonova I.N.¹, Frolov V.A.¹

¹ Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russia

² PJSC RUSAL Bratsk, Bratsk, Russia

Abstract. The paper presents the study on mechanical and corrosion properties of rolled sheet products from a new alloy of the Al-Mg-Sc system in a deformed and heat treated state. Its use and development of technologies for the production of relevant parts for automobile and shipbuilding industries are important today due to the tasks of downstream aluminum processing, which are solved by RUSAL, and confirmed by the state support of a comprehensive project aimed at creating a high-technology production division, being currently carried out by the Bratsk Aluminium Smelter and Siberian Federal University. To determine mechanical and corrosion properties, the authors used sheets and coils rolled on industrial reversing hot rolling mill Quarto 2800. The tensile test was used to study deformed samples after rolling and samples produced in five heat treatment modes with varying heating temperatures of 300, 350 and 380°C and a soaking time of 1 and 3 hours. The studies on samples of rolled products with various thicknesses showed that as compared to the initial state, steel strength properties after heat treatment decrease by 12–20% on average, and ductility properties (δ) increase by 50–65%. In this case, heat treatment modes 1–3 give a fairly good ratio of strength and ductility properties. The level of these properties is comparable to the properties of alloy 01570. It is noted that a trend in a decrease in strength properties and a growth of ductile properties with increasing heat treatment temperature is also observed for samples of rolled products produced by various methods of cold rolling (cut-to-length sheets and in coils). If sheet thickness is similar, strength properties are higher, when sheets are cut-to-length rather than in coils. The corrosion tests of sheets with different thicknesses showed that the heat treatment modes under study do not have a significant influence on alloy resistance to intergranular corrosion.

Keywords: aluminum alloys, magnalium, scandium, hot rolling, heat treatment, mechanical properties.

Introduction

At present, there is a need for high-quality aluminum alloys for parts of transport engineering, including for the automotive and shipbuilding industries. The main requirements for these alloys are corrosion resistance, weldability in combination with strength and high processability in pressure treatment, especially during rolling, as the main type of semi-finished products for these industries is sheet metal. This complex of properties is supported by the alloys of the aluminum-magnesium system. However, the resource of the strength characteristics of traditional magnalicides, belonging to the class of thermally unsupported alloys, is limited. In this regard, the urgent task facing the domestic metallurgical industry is the development of compositions of new alloys that would allow them to be used to improve the strength, plastic and corrosion properties of deformed semi-finished

products [1, 2]. A promising direction in solving these problems is the creation of alloys based on the Al-Mg system complexly doped with transition metals that combine high mechanical and operational characteristics. An effective modifier of the cast grain structure of aluminum alloys is scandium, which makes it possible to obtain ingots by the method of continuous casting, which have a non-dendrite structure. In this connection, magnanes doped with scandium are considered to be the most promising alloys capable of providing the above complex of properties [3–15]. From the alloys used in industrial production, it is possible to identify alloy 01570, in which the scandium content reaches 0.35% [3, 4]. Complex alloying of alloys with transition metals will reduce the content of expensive scandium without affecting the properties. The production of deformed semi-finished products from such alloys by classical methods of metal processing (rolling, extruding, forging, etc.) will reduce the mass and cost of products without loss of strength and corrosion resistance.

© Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Frolov V.A., 2019

Technology for production of rolled semi-finished products from economically alloyed with scandium aluminum alloys are currently no. This is especially true for the hot rolling process of an ingot, the initial structure of which does not allow heating above the critical temperatures, which can lead to a drop in the strength properties of rolled products. Moreover, the subsequent cold rolling of the hot-rolled billet, accompanied by intermediate annealing, usually presents no difficulties, since it has been worked on conventional magnitudes.

As part of the implementation of a joint integrated project 03.G25.31.0265 «Development of economically alloyed high-strength Al-Sc alloys for use in road transport and navigation» together with the Bratsk Aluminum Smelter, studies were carried out on the rolling regimes as well as on the properties of deformed semi-finished products obtained by hot and cold rolling from a new alloy [16–20]. However, the task of obtaining the required complex of mechanical properties of rolled products from a new alloy after the final heat treatment has not yet been solved.

Therefore, the aim of this work was to search for such heat treatment regimes for deformed semi-finished products that would provide a combination of high strength and plastic characteristics of rolled products from the P-1580 alloy of the Al-Mg system doped with scandium within the range 0.10–0.12%.

Methods of carrying out researches

To achieve this goal, we evaluated the mechanical and corrosion properties of rolled products of various thicknesses and species obtained on an industrial reversible hot rolling mill Quarto 2800.

Studies mechanical properties of metal after rolling and annealing were carried out by tensile testing machines Zwick Z 250 and LFM400. From the obtained strips, flat samples were cut, which were subjected to tensile tests at room temperature and a specified deformation rate.

In determining the strength and plastic properties of the samples, the change in the length of the working part of the sample was recorded each time, and also the value of the tensile force corresponding to this change.

To evaluate the effect of heat treatment on the parameters of mechanical properties, used 5 modes.

1. Temperature 300 °C, holding time 1 h.
2. Temperature 300 °C, holding time 3 h.
3. Temperature 350 °C, holding time 1 h.
4. Temperature 350 °C, holding time 3 h.
5. Temperature 380 °C, holding time 1 h.

The results of the research and analysis

Tables 1 and 2 show the mechanical properties of samples of the P-1580 alloy from 8.8 mm and 6 mm thick sheets obtained by hot rolling and cut in the transverse direction.

Table 1

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from sheet thickness of 8.8 mm in hot-rolled and heat-treated conditions

Condition, heat treatment regime	R _m , MPa	R _p , MPa	A, %	Estimated length, mm
hot-rolled	396	281	19.7	50
1	394	275	20.6	50
3	388	272	19.0	50
5	388	264	18.9	50

Table 2

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from sheet thickness of 6 mm in hot-rolled and heat-treated conditions

Condition, heat treatment regime	R _m , MPa	R _p , MPa	A, %	Estimated length, mm
hot-rolled	453	386	6.1	130
1	396	299	13.4	130
2	394	297	14.6	130
3	390	292	12.3	130
4	390	290	13.6	130
5	389	288	17.2	130

Analysis of mechanical properties shows that, in comparison with the initial state, the strength characteristics (R_m) of samples after heat treatment are reduced by 12–20%, and the plastic (A) increases by 50–65%. In this case, the heat treatment regimes 1–3 give a fairly good ratio of strength and plastic properties, comparable to those of alloy 01570, doped with scandium within the range 0.17–0.35% [3].

According to the test results, it can be seen that the above-mentioned patterns of changes in mechanical properties are also characteristic for sheets of smaller dimensions. At the same time, as the thickness of the hot-rolled sheet decreases, the strength characteristics increase, while the plastic characteristics decrease, which is associated with an increase in the degree of total deformation during rolling.

Similar studies were carried out for the samples of the investigated alloy P-1580, cut from cold-rolled sheets with dimensions 4,5×300×300 mm and 1,5×300×300 mm. The results of the tests are given in **Table 3** and **Table 4**.

Table 3

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from a sheet of dimensions 4.5×300×300 mm in cold-rolled and heat-treated conditions

Condition, heat treatment regime	R _m , MPa	R _p , MPa	A, %	Estimated length, mm
cold-rolled	458	402	5.4	110
1	401	314	15.4	110
2	404	314	15.7	110
3	398	307	14.6	110
4	397	305	14.4	110
5	399	311	13.7	110

Table 4

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from a sheet with dimensions of 1.5×300×300 mm in cold-rolled and heat-treated conditions

Condition, heat treatment regime	R _m , MPa	R _p , MPa	A, %	Estimated length, mm
cold-rolled	432	371	8.4	60
1	386	280	21.1	60
2	389	279	18.3	60
3	378	273	21.8	60
4	381	270	20.0	60
5	380	270	21.8	60

According to the results of the research, it can also be concluded that heat treatment regimes 1-3 provide an optimal combination of strength and

plastic properties. The use of regimes 4 and 5 gives relatively low values of the yield strength of the metal (**Tables 1 and 4**), so their use is not recommended.

To assess the effect of heat treatment regimes on the mechanical properties of cold-rolled samples of alloy P-1580, obtained by card and rolled rolling, the above-mentioned modes of tensile tests. The results of research the mechanical properties of samples of alloy P-1580 from sheets with dimensions of 6×300×300 mm in different states are shown in table 5. The tests were carried out on LFM400 testing machines with a force of 400 kN and Instron 5982 with a force of 100 kN (laboratory tests) and a Zwick Z 250 testing machine with a force of 250 kN (industrial tests).

The results of tests on the LFM400 test machine of the mechanical properties of the samples of the P-1580 alloy from sheets of 6×300×300 mm, produced by roll rolling, in a different state, are given in **Table 6**.

Analysis of the data given in **Table 5 and 6**, shows that the level of mechanical properties of the obtained samples is high enough. The tendency to decrease strength properties and plastic growth with increasing heat treatment temperature is observed for rolled products, regardless of the rolling method. However, the strength parameters at the same thickness of the sheet are slightly higher for card rolling, which, apparently, can be explained by the greater degree of hardening of the metal during card rolling due to the more rigid treatment scheme.

Table 5

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from sheets with dimensions 6×300×300 mm, received by card rolling in the deformed and heat-treated conditions

№ of sample	R _m , MPa		R _p , MPa		A, %		Condition, heat treatment regime
	Lab tests	Industrial tests	Lab tests	Industrial tests	Lab tests	Industrial tests	
1	449	453	398	386	9.1	6.1*	cold-rolled
2	443	-	362	-	8.9	-	cold-rolled
1	391	396	296	299	18.5	13.4	300 °C, 1 h
2	383	-	286	-	19.6	-	310 °C, 1 h
1	388	394	292	297	22.2	14.6	300 °C, 3 h
2	383	-	280	-	22.4	-	310 °C, 3 h
1	-	390	-	292	-	12.3*	350 °C, 1 h
2	370	-	267	-	21.0	-	360 °C, 1 h
1	-	390	-	290	21.8	13.6*	350 °C, 3 h
2	374	-	262	-	22.0	-	360 °C, 3 h
1	-	389	-	288	-	17.2	380 °C, 1 h
2	369	-	257	-	23.3	-	390 °C, 1 h

* - the sample broken by 1/8 of the initial length

Table 6

Mechanical properties of samples of alloy P-1580 from sheets of with dimensions 6×300×300 mm in deformed and heat-treated conditions obtained by roll rolling

№ of sample	R _m , MPa	R _p , MPa	A, %	Condition, heat treatment regime
1	431	309	8.9	cold-rolled
2	428	306	8.2	cold-rolled
3	410	322	8.2	cold-rolled
average	423	312	8.5	cold-rolled
1	388	287	17.5	300 °C, 1 h
2	329	282	18.5	300 °C, 1 h
3	389	299	14.6	300 °C, 1 h
average	389	289	16.9	300 °C, 1 h
1	388	288	18.7	300 °C, 3 h
2	392	270	18.7	300 °C, 3 h
3	389	276	17.3	300 °C, 3 h
average	389	278	18.2	300 °C, 3 h
1	380	270	18.7	350 °C, 1 h
2	380	273	19.1	350 °C, 1 h
3	387	272	21.0	350 °C, 1 h
average	382	272	19.6	350 °C, 1 h
1	384	275	19.8	350 °C, 3 h
2	384	266	19.5	350 °C, 3 h
3	381	250	19.4	350 °C, 3 h
average	382	264	19.6	350 °C, 3 h
1	384	254	21.8	380 °C, 1 h
2	382	264	22.5	380 °C, 1 h
3	385	259	21.2	380 °C, 1 h
average	384	259	21.8	380 °C, 1 h

Table 7

Results of corrosion tests of alloy samples P-1580

Condition, heat treatment regime	Thickness, mm	Testing time, h	Results, mm	Testing time, h	Results, mg/cm ²
		State standard 9.021-74, solution №1	ASTM G 67		
cold-rolled	4.5	24	0.0	24	5.51
1	4.5	24	0.0	24	2.26
2	4.5	24	0.0	24	2.07
3	4.5	24	0.0	24	2.15
4	4.5	24	0.0	24	1.90
5	4.5	24	0.0	24	1.64
cold-rolled	1.5	24	0.0	24	2.75
1	1.5	24	0.0	24	1.90
2	1.5	24	0.1	24	1.82
3	1.5	24	0.0	24	1.92
4	1.5	24	0.0	24	1.95
5	1.5	24	0.0	24	1.97

The results of corrosion tests of sheets tested in accordance with the requirements of State standard 9.021-74 and ASTM G67 (**Table 7**) for samples of different thickness subjected to thermal treatment in the above modes showed that the investigated heat treatment conditions practically do not affect the alloy's resistance to intergranular corrosion.

Conclusion

Thus, the conducted studies allow us to recommend heat treatment regimes 1-3, which are characterized by an optimal combination of mechanical properties and the absence of intergranular corrosion. The choice of a particular regime should be specified by the requirements of the consumer of the product to its mechanical **properties**.

The article was prepared using the results of the project 03.G25.31.0265 «Development of economically alloyed high-strength Al-Sc alloys for use in road transport and navigation» within the framework of the Program for the implementation of comprehensive projects for the creation of high-tech production, approved by Resolution of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218.

References

1. Gorbunov Yu.A. The role and prospects of rare earth metals in the development of physical and mechanical characteristics and applications of deformable aluminum alloys. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2015, vol. 8, no.5, pp. 636–645. (In Russ.)
2. Gorbunov Yu.A. Application of products from aluminum alloys in manufacturing and repairing land and water transport in the Russian Federation. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys], 2015, no. 1, pp. 87–92. (In Russ.)
3. Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskiy A.G. Alloy 1570C – material for pressurized structures of advanced reusable vehicles of RSC Energia. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space engineering and technology], 2014, no. 4, pp. 62–67. (In Russ.)
4. Filatov Yu.A., Plotnikov A.D. Structure and properties of deformed semi-finished products from aluminum alloy 01570C of the Al-Mg-Sc system for the RSC Energia product. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys], 2011, no. 2, pp. 15–26. (In Russ.)
5. Belov N.A. A phase composition of industrial and advanced aluminum alloys. Moscow: MISiS, 2010, 511 p. (In Russ.)
6. Zhemchuzhnikova D. A., Mogucheva A., Kaibyshev R. Mechanical properties and fracture behavior of an Al-Mg-Sc-Zr alloy at ambient and subzero temperatures. *Materials Science & Engineering A*, 2013, vol. 565, pp. 132–141.
7. Zhemchuzhnikova D., Kaibyshev R. Effect of rolling on mechanical properties and fatigue behavior of an Al-Mg-Sc-Zr alloy. *Materials Science Forum*, 2014, vols. 794-796, pp. 331–336.

8. Zhemchuzhnikova D. Kaibyshev R. Effect of grain size on cryogenic mechanical properties of an Al-Mg-Sc alloy. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 922, pp. 862–867.
9. Malopheyev S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Sc-Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 698, pp. 957–966.
10. W. Kang, H.Y. Li, S.X. Zhao, Y. Han, C.L. Yang, G. Ma. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Er alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 704, pp. 683–692.
11. Anthony De Luca, David C. Dunand, David N. Seidman. Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al-Sc-Er-Zr-Si alloy with a high Zr/Sc ratio. *Acta Materialia*, 2016, vol. 119, pp. 35–42.
12. Pedro Henrique R. Pereira, Ying Chun Wang, Yi Huang, Terence G. Langdon. Influence of grain size on the flow properties of an Al-Mg-Sc alloy over seven orders of magnitude of strain rate. *Materials Science & Engineering*, 2017, vol. 685, pp. 367–376.
13. S. Mondol, T. Alamb, R. Banerjee, S. Kumar, K. Chattopadhyay. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy. *Materials Science & Engineering*, 2017, vol. 687, pp. 221–231.
14. M. Li, Q. Pan, Y. Shi, X. Sun, H. Xiang. High strain rate superplasticity in an Al-Mg-Sc-Zr alloy processed via simple rolling. *Materials Science & Engineering*, 2017, vol. 687, pp. 298–305.
15. Buranova Yu., Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S.V., Wilde G. Al₃(Sc, Zr)-based precipitates in Al-Mg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Materialia*, 2017, vol. 124, pp. 210–224.
16. Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Bezrukikh A.I., Zenkin E.Yu. Research of rolling regimes and mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from experimental alloys of Al-Mg system, economically alloyed by scandium. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2017, no. 9, pp. 91–96. (In Russ.)
17. Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Bezrukikh A.I., Sokolov R.E., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Yakivuk O.V. Research on mechanical properties of semi-finished products from an aluminum-scandium alloy. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences.], no. 11, part 1. Tula: TUGU, 2017, pp. 147–153. (In Russ.)
18. Vladimir Baranov, Sergey Sidelnikov, Evgeny Zenkin, Viktor Frolov, Denis Voroshilov, Olga Yakivuk, Igor Konstantinov, Ruslan Sokolov, Irina Belokonova. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding. *Open Engineering*, no. 8, 2018, pp. 69–76.
19. Vladimir Baranov, Sergey Sidelnikov, Evgeniy Zenkin, Olga Yakivuk. Physical modeling technological regimes of production deformed semi-finished products from experimental aluminium alloys alloyed by scandium. *Materials Science Forum*, 2018, pp. 54–62.
20. Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Voroshilov D.S. Developing modes to produce deformed semi-finished products from experimental scandium-containing aluminum alloy and studying their mechanical properties. *Tsvetnaya metallurgiya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Nonferrous metallurgy. Universities' proceedings], 2018, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.)

Received 02/08/18

Accepted 26/10/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 621.777

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-76-81>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ НОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Баранов В.Н., Сидельников С.Б., Зенкин Е.Ю., Константинов И.Л., Лопатина Е.С., Якивчук О.В., Ворошилов Д.С., Белоконова И.Н., Фролов В.А.

Сибирский федеральный университет (СФУ), Красноярск, Россия
ПАО «РУСАЛ Братск», Братск, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследований механических и коррозионных свойств листового проката из нового сплава системы Al–Mg–Sc в деформированном и термообработанном состоянии. Актуальность использования и разработки технологий производства из него деталей для автомобиле- и судостроения обоснована задачами глубокой переработки алюминия, решаемыми компанией «РУСАЛ», и подтверждается государственной поддержкой ком-

плексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого в настоящее время Братским алюминиевым заводом и Сибирским федеральным университетом. В качестве материалов для определения механических и коррозионных свойств использовали листы и рулоны, полученные прокаткой на промышленном реверсивном стане Кварто 2800. Методом испытаний на разрыв исследовали деформированные образцы после прокатки и образцы, по-

лученные по пяти режимам термообработки с варьированием температур нагрева 300, 350 и 380°C и времени выдержки в печи 1 и 3 ч. Результаты исследований на образцах из проката различной толщины показали, что по сравнению с исходным состоянием прочностные характеристики металла после термообработки снижаются в среднем на 12–20%, а пластические (δ) увеличиваются на 50–65%. При этом режимы термообработки 1–3 дают достаточно хорошее соотношение прочностных и пластических свойств. Уровень этих свойств сопоставим со свойствами сплава 01570. Отмечено, что тенденция снижения прочностных свойств и роста пластических с увеличением

температуры термообработки наблюдается и для образцов проката, полученного различными способами холодной прокатки (карточным и рулонным). При этом прочностные показатели при одинаковой толщине листа несколько выше при карточной прокатке по сравнению с рулонной. Результаты коррозионных испытаний листов различной толщины показали, что исследованные режимы термообработки практически не влияют на стойкость сплава к межкристаллитной коррозии.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, магналии, скандий, горячая прокатка, термообработка, механические свойства

Поступила 02.08.18

Принята в печать 26.10.18

Образец для цитирования

Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Frolov V.A. Study on the influence of heat treatment modes on mechanical and corrosion properties of rolled sheet products from a new aluminum alloy, economically alloyed with scandium // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 76–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-76-81>

For citation

Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Voroshilov D.S., Belokonova I.N., Frolov V.A. Study on the influence of heat treatment modes on mechanical and corrosion properties of rolled sheet products from a new aluminum alloy, economically alloyed with scandium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 76–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-76-81>

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

UDC 621.771.014

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-82-85>

DETERMINATION OF THE STRESS STATE AND THE SPECIFIC FORCE DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION IN A CLOSED DIE

Ashkeyev Zh.A.¹, Andreyachshenko V.A.², Abdiramanov S.T.¹¹Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan²Satpayev Ekibastuz Technical and Engineering Institute, Ekibastuz, Kazakhstan

Abstract. This article describes the results of a study that looked at the stress state and the specific force or contact pressure through the application of the slip line method and computer simulation (i.e. using the Deform 3D software package) when a workpiece was subjected to severe plastic deformation (SPD) in a special closed die. SPD is achieved when a flat punch is embedded in a round workpiece enclosed in the die and alternately compressed by a ring-shaped punch. Analysis of the results shows that compressive stresses prevail in the deformation zone resulting in the production of blanks with ultrafine-grained and/or nanostructure, as well as high mechanical properties. The relative discrepancy between the results obtained through the slip line method and those obtained through modelling in Deform 3D was about 1.3% indicating that the results can be considered reliable. It should be noted that this closed-die technique can be used to produce such products as gears, i.e. heavy-duty parts.

Keywords: Die, punch, container, specimens, workpieces, deformation, stress.

Introduction

The process of intensification and plastic deformation in the processing of metals by pressure is one of the main task at the present stage of the development of science and technology, in particular, in the processing of materials. Widely known methods such as ECAP, comprehensive forging, high pressure twisting and other advanced methods and tools for the implementation of severe plastic deformations (SPD), which for the N-th number of passes, ensure the production of nanostructured materials with high mechanical properties [1].

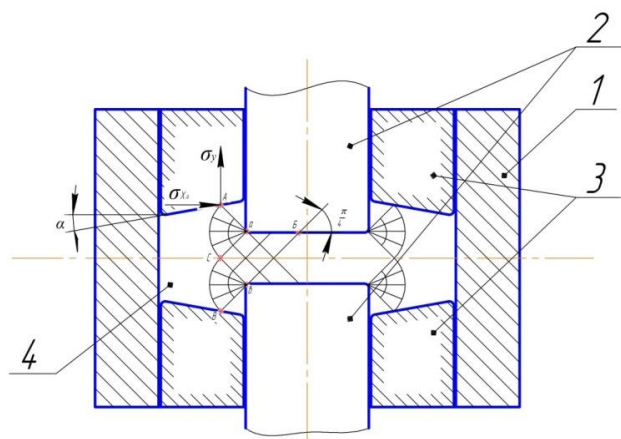
Therefore the creation and development of new ways and means for the implementation of SPD remain today for one of the most urgent tasks. In this article, we present the results of an investigation of the stressed state and the determination of the contact pressure (specific force) of the deformation of the circular billet in a closed matrix (Fig. 1).

Section I. Determination of the stress state and specific deformation force of blanks in a closed matrix by the method of slip lines

The SPD process in a closed matrix [2, 3] is performed by alternately compressing the blank 4 with punch punches with a beveled working surface 3

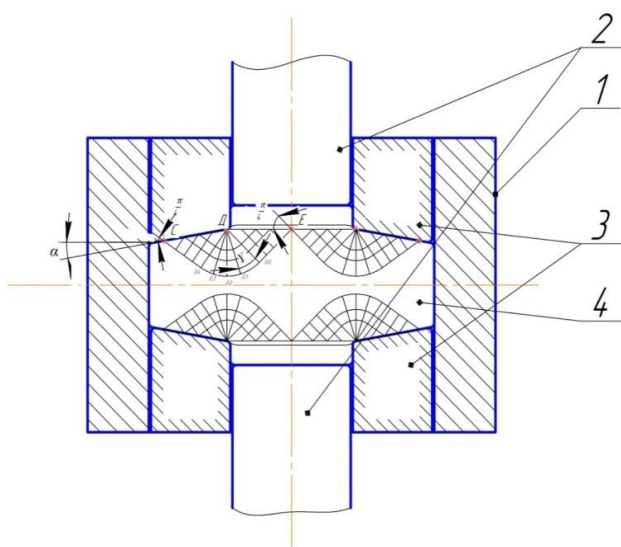
and inserting central flat punches 2 (Fig. 1). When compressed with ring punches, the metal flows into the central hole of the side punches, the central punches are moved back: one up, the second down. In this case, the die tooling (punches enclosed in the container 1) is mounted on a ring-shaped stand, which, after compression by ring punches, is removed and the blank is deformed by the central flat punches 2, while lateral punches are moved back by the flow of metal in the opposite direction. Then the cycle is repeated until the alignment and ensuring the uniformity of the stress-strain state of the billet and the obtaining of a nanostructure with high mechanical properties. The most common method of slip lines (s.l.) was used to determine the stress state and specific deformation force, which is based on a physical phenomenon, often encountered in practice: the Chernov-Luders lines, which are clearly visible when the punch is pressed against a surface of sheet metal covered with scale, on the surface of a cylindrical specimen under tension, etc. Slip lines have a number of important properties that allow them to be used to determine stresses throughout the volume of the blank and knowing the stresses at any point in the body, contact stresses and specific deformation forces can be determined.

To determine the specific force and stress state, when the flat central and annular punches are inserted into the blank, a field of slip lines is constructed (Fig. 1 and 2).



1 – container; 2 – central cylindrical punch;
3 – ring punch; 4 – workpiece

Fig. 1. Scheme of the introduction of a flat punch into the blank and the field of slip lines



1 – container; 2 – central cylindrical punch;
3 – ring punch; 4 – workpiece

Fig. 2. Compression by ring punches and the field of s.l.

It is known that in the absence of friction on the contact surface (when using a process lubricant) hp come out on the contact surface at an angle of 45° or $\pi/4$ radians (Fig. 1). At the same time, it is believed that the field of hp. The surfaces adjacent to the flat surface of the central punch and the surface of the annular punches are uniform. It should be noted that the beveled surfaces of the ring punches only touch the blank and these surfaces can be considered free, and accordingly, these surfaces are hp. also come out at an angle of about $50-45^\circ$. Combining homogeneous fields from points a and b with radii $aC = bC$, we obtain centered fields of s.l., as well as the boundaries of the plastic region of ACB (Fig. 1). It should be noted that the field of hp. constructed according to

the method proposed by L. Prandtl.

We now turn to the determination of the stressed state and the specific force when introducing a flat punch into the central part of the billet. From the constructed field of s.l. it can be seen that the angle of rotation of the HP. when passing from the point A (on the free surface) to the point C or B, because, as already noted, the stress state under the punch is homogeneous, 90° or $\varphi_{AB} = \pi/2$ radians. We assume that in the annular zone of the workpiece (on the free surface), for example, at point A, the metal undergoes compression, and along the Y axis, the stress is zero, i.e. $\sigma_{yA} = 0$, and from the plasticity condition we can write the following: $\sigma_{yA} - \sigma_{xA} = 2k$, then at point A the average stress $\sigma_{averA} = -k$, where k is the plasticity constant or the shear yield strength. The Henka equation [2], taking into account that $\sigma_{averA} > \sigma_{averB}$, can be represented as follows:

$$\begin{aligned}\sigma_{averA} - \sigma_{averB} &= 2k\varphi_{AB} \\ -\sigma_{averB} &= 2k\varphi_{AB} - \sigma_{cpA} \\ -\sigma_{averB} &= 2k\varphi_{AB} + k \\ \sigma_{averB} &= -2k\varphi_{AB} - k\end{aligned}\quad (1)$$

Hence average stress at points C or B:

$$\sigma_{averB} = -k(1 + 2\varphi_{AB}). \quad (2)$$

Similarly, we can write for the point C (B), that is:

$$p_{y\partial} = -\sigma_{yB}, \text{ отсюда,} \quad (4)$$

$$p_{y\partial. \text{BH.}} = 2k(1 + \varphi_{AB}) = 2k\left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = 2.57\sigma_T^* \quad (5)$$

Here: σ_T^* – is the deformation resistance of the deformable material, which we take as a function of the temperature-velocity parameters of the deformation. It should be noted that the plasticity constant is related to the deformation resistance by the following dependence $k = \frac{\sigma_T^*}{\sqrt{3}}$ or approximately

$$\sigma_T^* = 2k \quad [4].$$

For example, if the aluminum blank is deformed, then from the reference literature the strain resistance value is $\sigma_T^* = 58,8$ MPa, then the specific force or voltage on the contact surface will be:

$$p_{sp.int.} = 2,57 \cdot 58,8 = 151,116 \text{ MPa.}$$

Field s.l. when compressed with ring punches with a sloping working surface is shown in Figure 2.

It should be noted that the greater the angle of

slope α , the greater the IPD. At the considered stage of deformation, the metal flows into the hole of the ring punch, i.e. the metal flows in the opposite direction, relative to the previous stage of treatment. In the zone of the matrix hole (between the points E and F) σ_x is compressive, and $\sigma_y=0$ and from the plasticity condition we can write $\sigma_x = -2k$. The average stress at this point is k , i.e. $\sigma_E = \sigma_{0,0} = -k$.

The average stresses at the node points 0.1–0.4 and on the contact annular surface are determined by the above procedure, i.e. from the Henka:

$$\sigma_{aver0,0} - \sigma_{aver0,4} = 2k \left(4 * \frac{\pi}{9} \right); \quad (6)$$

Where: $\pi / 9 = \gamma$ is the angle of rotation of the s.l., for example, from point 0.0 to point 0.1.

Then at the point 0.4 or at the point E on the contact surface, the average voltage will be: $\sigma_{aver,0.4} = \sigma_{aver,E} = -2k \left(0,5 + 4 * \frac{\pi}{9} \right) \approx -2k * 1,90$. Hence the specific force on the contact annular surface will be:

$$P_{sp.} = -\sigma_{yE},$$

or

$$p_{sp.} = 2k \left(1 + 4 * \frac{\pi}{9} \right) = 2,40 * \sigma_T^*; \quad (7)$$

Then, assuming that an aluminum blank with a deformation resistance $\sigma_T^* = 58,8$ MPa is processed, the specific force will be:

$$p_{sp.comp.} = 2,40 * 58,8 = 141,12 \text{ МПа.}$$

An analysis of the results of calculating the stress state obtained by the s.l. method shows that compressive stresses act mainly in the deformation region, which contributes to the intensification of plastic deformation, which facilitates the closing or "healing" of internal defects of the billet and the obtaining of a nanostructure [5].

Section II. Determination of stress state and specific deformation force of blanks in a closed matrix by computer simulation

In recent years, software complexes, such as Deform 3D, based on the finite element method are widely used, in particular in metal pressure machining, which accurately provides information on stresses and deformations in the volume of the deformed body. We use this method to determine the stress state and the specific deformation force in the SPD of the blank in a closed matrix. After calculating the stress with the help of the Deform 3D program, pressure changes were obtained

when the blank was compressed with a ring punch (Fig. 3) [6].

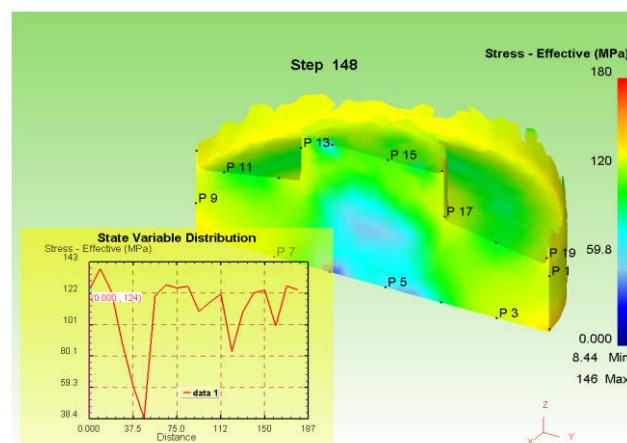


Fig.3. Pressure variation during blank compression by ring punches

Analysis of the results of computer simulation shows that the specific force of compression of the blank by ring punches was 143 MPa (Fig. 3), hence the relative difference of values with the previously obtained result, i.e. value obtained by the s.l. method (141.12 MPa) was 1.5–1.3%. It should be noted that in computer simulation, aluminum billet was also used to calculate the stress state.

Conclusions: The slip lines method and computer simulation using the Deform 3D software package determine the stress state and the specific deformation force for the blank PPD in a closed matrix. Analysis of the results of the study shows that in the core of the deformation the compressive stresses predominate, which intensify plastic deformations that help to close internal defects and to obtain nanostructured materials with high mechanical properties. In this case the relative difference in the results of the study, obtained by the hp method and simulation in the software complex Deform 3D was about 1.3%, which allows to judge the reliability of the results of the study.

References

1. Karavaeva M.V., Abramova M.M., Enikeev N.A., Raab G.I., Valiev R.Z. Strengthening the strength of austenitic steel by combined loading. Letters on Materials 7 (1), 2017, pp. 29–33.
2. Ashkeyev Zh.A., Andreyachshenko V.A. Device for obtaining nanostructural materials. Patent RK, no. 32499, 2017.
3. Andreyachshenko V., Ashkeyev Zh., Kocich R. Stress state of workpieces due several plastic deformation by close matrix. Conference proceedings. 27th International Conference on Metallurgy and Materials Metal-2018, edited by Tanger (Brno Czech Republic, 2018).
4. Chukin M.V. et al. Application of the deformation

- nanostructuring method to the technological process of wire production. *Technology of Mechanical Engineering*, 2013, no. 4, pp. 5–9.
5. Nikitenko O.A., Efimova Yu.Yu., Zherebtsov M.S., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Selivanova E.S. Formation of the ultrafine-grained structure of carbon steel in the processes of hot plastic deformation. *Vestnik PNIIP*, no. 1 (17), 2015, pp.31–41.
6. Polyakova M.A., Gulina A.E. Using the combination of various types of plastic deformation to produce an ultrafine-grained structure in a carbon wire. *Izvestiya TulGU. Engineering science*, vol. 10, part 2, 2014, pp. 143–150.
7. Gromov N.P. Theory of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1978, 360 p.

Received 12/02/18

Accepted 08/04/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 621.771.014

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-82-85>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И УДЕЛЬНОГО УСИЛИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАКРЫТОЙ МАТРИЦЕ

Ашкеев Ж.А.¹, Андреященко В.А.², Абдираманов С.Т.¹¹Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казанстан²Экибастузский инженерно-технический институт им. академика К.Сатпаева, Экибастуз, Казахстан

Аннотация. В работе приведены результаты исследования напряженного состояния и удельного усилия (контактного давления), полученные методом линий скольжения (л.с.) и компьютерным моделированием, с использованием программного комплекса Deform 3D при интенсивной пластической деформации (ИПД) заготовки в специальной закрытой матрице. ИПД осуществляется попеременным внедрением плоского пуансона и сжатием кольцевым пуансоном заготовки круглой формы, заключенной в матрице. Анализ результатов исследования показывает, что в очаге деформации преобладают сжимающие напряжения, что способствует получению заготовок с

ультрамелкозернистой и/или наноструктурой и высокими показателями механических свойств. При этом относительная разница результатов исследования, полученных методом л.с. и моделированием в программном комплексе Deform 3D составила около 1,3%, что позволяет судить о достоверности результатов исследования. Следует отметить, что данным способом в закрытой матрице можно получать такие изделия как, например, зубчатые шестерни, которые работают в тяжелых условиях и к ним предъявляют высокие требования.

Ключевые слова: матрица, пуансон, контейнер, образцы, заготовки, деформация, напряжение.

Поступила 12.02.18

Принята в печать 08.04.18

Образец для цитирования

Ashkeyev Zh.A., Andreyachenko V.A., Abdiramanov S.T. Determination of the stress state and the specific force during severe plastic deformation in a closed die // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 82–85. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-82-85>

For citation

Ashkeyev Zh.A., Andreyachenko V.A., Abdiramanov S.T. Determination of the stress state and the specific force during severe plastic deformation in a closed die. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 82–85. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-82-85>

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 006.013:621.778

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТА НА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИЮ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Снимщиков С.В.¹, Полякова М.А.², Лимарев А.С.², Харитонов В.А.²

¹ Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. **Постановка задачи (актуальность работы):** В статье показано, что одной из актуальных проблем стандартизации на современном этапе является гармонизация требований стандартов с зарубежными нормами. Это обусловлено необходимостью повышения конкурентоспособности продукции на внешнем рынке. Однако национальная практика работ в области стандартизации, наличие большого количества действующих стандартов на один и тот же вид продукции, а также существующая структура стандартов не позволяют в полной мере гармонизировать показатели качества к продукции, содержащиеся в национальных стандартах, с соответствующими показателями лучших мировых аналогов. **Цель работы:** разработка новой концепции структуры стандарта, в котором возможно сочетание требований как действующих национальных, так и зарубежных стандартов. **Используемые методы:** При разработке новой концепции структуры стандарта применялись универсальные методы научного познания: анализ и синтез, дедукция, аналогия, экстраполирование, абстрагирование. **Новизна:** Новизна предлагаемого подхода заключается в разработке новой процедуры подготовки стандарта с учетом существующей практики нормирования показателей качества продукции, уровня показателей качества мировых аналогов, а также экономических факторов. **Результат:** В статье приведен пример использования разработанной концепции построения стандарта на примере разработки межгосударственного стандарта на прокат арматурный. Показано основное отличие структуры стандарта, которая заключается в том, что он содержит два раздела. В первом разделе приведены нормы, действующие в отменяемых национальных стандартах. Второй раздел содержит требования, гармонизированные с международными стандартами. Это позволяет производителю самостоятельно выбирать такой процесс производства проката арматурного, который в полной мере соответствует имеющимся производственным возможностям. **Практическая значимость:** Предлагаемая концепция построения структуры стандарта позволяет учитывать в стандартах имеющийся национальный опыт в области нормирования показателей качества продукции, которые в максимальной степени гармонизированы с уровнем свойств мировых аналогов.

Ключевые слова: стандартизация, национальный стандарт, евроноормы, показатели качества, нормирование, гармонизация, прокат арматурный.

Введение

В соответствии с законом Российской Федерации «О стандартизации в Российской Федерации» стандартизация определяется как вид деятельности, основной целью которой является достижение упорядоченности в отношении объектов стандартизации путем разработки и применения документов по стандартизации [1]. Данный закон регулирует отношения между производителями и потребителями, основываясь на принципах стандартизации, которые являются инструментарием для развития экономики страны на базе нормирования

передовых достижений науки, техники и технологий, а также защиты интересов государства. Необходимым условием инновационного развития производства является проведение комплекса работ по актуализации нормативной базы, при этом разработка новых и обновление действующих стандартов должны являться основой для внедрения достижений науки и техники в действующее промышленное производство. На современном этапе развития техники и технологий разработка стандартов и нормирование требований в них должны строиться на основе сбалансированности интересов сторон, обеспечивая динамичность и опережающее развитие объекта стандартизации.

Одной из актуальных проблем отечественной стандартизации является гармонизация содер-

© Снимщиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А., 2019

жащихся в них требований с зарубежными нормами и правилами. Переход на рыночную экономику, повышение конкурентоспособности продукции на внешнем рынке, вступление России во Всемирную торговую организацию обусловили поиск новых подходов к нормированию свойств продукции в отечественных стандартах [2, 3]. Существующие в настоящее время проблемы стандартизации обусловлены переходным периодом реформирования в области технического регулирования и являются сдерживающим фактором в достижении поставленных перед стандартизацией стратегических целей [4]. Это относится к низкой эффективности стандартов из-за отставания научно-технического уровня стандартов от современных достижений науки и техники и замедления темпов гармонизации национальных стандартов с международными стандартами [5–7].

Преобладающее число международных стандартов, действующих в настоящее время на территории Российской Федерации, является точной копией соответствующих международных и европейских стандартов. При этом любое отклонение от требований соответствующих зарубежных норм оценивается европейскими компаниями как препятствие от продвижения производимой ими продукции. С этой точки зрения принятая в западных странах практика разработки стандартов отдельными фирмами является своеобразной защитой их внутреннего рынка. Следует также отметить различия и в структуре отечественных и зарубежных стандартов, использование различных методов контроля и проведения анализа, что также является во многих случаях основой для появления разногласий. Кроме того, каждый международный или европейский стандарт ссылается на стандарты своей системы, большинство из которых в России не только не гармонизированы, но и не переведены на русский язык [7].

В работах [8, 9] рассматривается основная технико-экономическая закономерность стандартизации, сущность которой заключается в необходимости обеспечения преемственности требований действующих нормативных документов при изменении уровня качества объекта стандартизации. Это обеспечивает взаимосвязь постоянно повышающихся требований потребителя с уровнем значений показателей качества продукции, которые регламентируются в соответствующих стандартах. Если главный регулятивный принцип стандартизации не выполняется, это может привести к тому, что деятельность данной области не будет эффективной. Иными

словами, требования, содержащиеся в стандартах, могут либо отставать от существующего уровня развития техники и технологий, либо, наоборот, намного превышать темпы развития промышленности. С этой точки зрения работа над разработкой стандартов и актуализацией требований в них должна вестись постоянно.

При анализе деятельности в области стандартизации следует учитывать национальные особенности того или иного государства, а также имеющийся опыт практической работы по разработке и утверждению стандартов. Стандартизация как процесс разработки и принятия стандартов предполагает определенный набор законодательно закрепленных действий: выбор или разработка оптимальных решений, их узаконивание и оформление по установленному порядку, их практическое применение в практике [10–12]. Согласно закону Российской Федерации «О стандартизации в Российской Федерации» основным условием утверждения стандарта является достижение консенсуса между членами технического комитета [13–18]. Кроме того, регулирующими документами является ряд стандартов государственной системы стандартизации, в которых нормируется процедура отдельных этапов осуществления работ по разработке и утверждению стандартов, в которых также нормируются сроки проведения того или иного этапа. Поэтому в ряде работ отмечается, что обязательным и существенным фактором достижения консенсуса является наличие необходимого времени для согласования перечня и значений нормируемых параметров продукции [19–22].

Немаловажное значение в практической деятельности применения нормативных документов имеет структура построения стандарта, а также система нормирования требований в нем. Используемая структура отечественных стандартов в значительной степени отличается от структуры зарубежных норм, что также создает определенные проблемы при проведении работ по гармонизации нормативных документов на один и тот же вид продукции. Кроме того, следует отметить и различия в подходах к нормированию свойств продукции, используемые в разных странах.

Среди имеющихся проблем российской системы стандартизации специалисты также отмечают отсутствие упорядочения и систематизации требований на один и тот же вид продукции, одновременное действие неоправданно большого количества различных видов нормативных документов, негармонизированных с зарубежными нормами и правилами, низкий уровень требований к продукции, не отражающий достижения

науки и техники. Эти и многие другие факторы являются основанием для поиска новых решений и обуславливают необходимость разработки новой концепции построения структуры стандарта, который мог объединить как действующие требования к продукции, так и отразить существующие тенденции развития объекта стандартизации [23, 24].

Предпосылки разработки новой структуры стандарта на металлопродукцию

Потребитель, являясь мерилем ценности продукции на рынке, заинтересован в удовлетворении своих потребностей за счет выполнения продукцией определенного набора полезных функций. Другим участником отношений является производитель, который в своей деятельности не только создает продукцию, но также производит анализ рынка, т.е. оценивает конкурентоспособность и востребованность продукции. Это и является ориентиром для производителя степени удовлетворения потребностей потребителя (рис. 1).

Поскольку любой нормативный документ регулирует отношения между потребителем и изготовителем, его структура должна обеспечивать гармонизацию нормируемых к продукции требований. В работе [25] условно выделяются два направления гармонизации стандартов: горизонтальное и вертикальное. Под горизонтальной гармонизацией понимается согласование требований стандартов на продукцию, которая имеет единый уровень качества. Такой уровень гармонизации используется в промышленно развитых странах: США, Япония, страны Евросоюза. Вер-

тикальная стандартизация требований стандартов характерна для стран, уровень промышленного развития которых соответственно ниже. Это в значительной степени затрудняет процесс согласования требований национальных стандартов со стандартами ведущих стран, поскольку уровень развития промышленности развивающихся стран не может обеспечить производство продукции в соответствии с требованиями стандартов развивающихся стран. По мнению авторов, данное направление сводится к адаптации требований стандартов развитых стран к возможностям собственных производителей [25]. С другой стороны, такой подход открывает широкие возможности для поиска новых технических решений и внедрения инновационных идей в промышленные технологии развивающихся стран. Кроме того, это является стимулом для развития и совершенствования системы стандартизации этих стран, а также поиска новых альтернативных путей в рамках гармонизации требований стандартов.

Залогом прогрессивного развития работ в области стандартизации является принцип опережающей стандартизации при нормировании свойств продукции. Это позволяет разработать и реализовать эффективные этапы проведения работ по гармонизации с учетом специфики развития производственных отношений в стране, учитывать особенности национальных систем по стандартизации, а также закладывать в стандарты такие нормы, которые являются перспективными и стимулирующими модернизацию производства с целью производства продукции лучшего качества (рис. 2).



Рис. 1. Схема учета требований потребителя при производстве продукции с заданным уровнем качества



Рис. 2. Гармонизация требований как основа нормирования требований к продукции в нормативных документах различного уровня

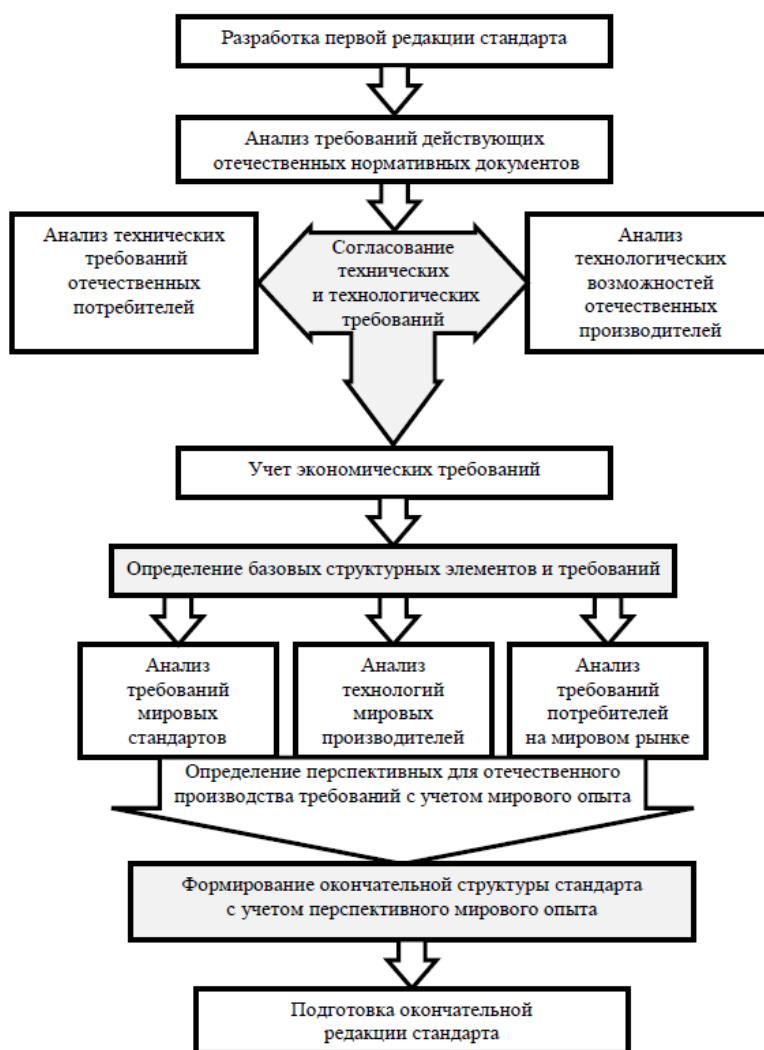


Рис. 3. Модель разработки стандарта с учетом требований потребителя, производителя и мирового опыта

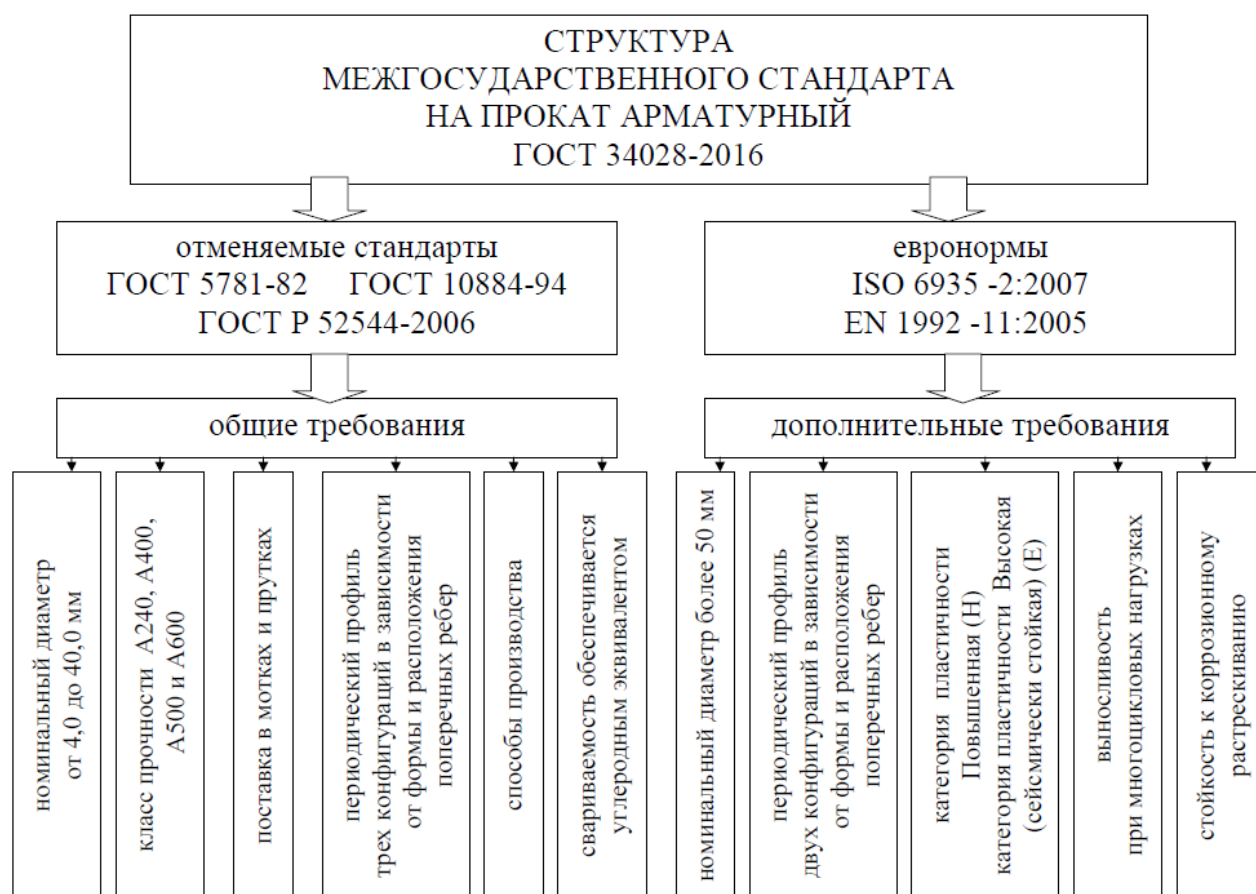


Рис. 4. Структура межгосударственного стандарта ГОСТ 34028-2016
«Прокат арматурный. Технические требования»

Современный этап производства требует использования принципиально новых решений при разработке структуры и содержания стандартов [26, 27]. Прежде всего, стандарт должен быть нацелен на практическое применение как производителем, так и потребителем, т.е., иными словами, все требования к продукции должны быть понятны и очевидны каждой их заинтересованных сторон. Стандарт должен содержать не только требования к продукции, которые обеспечивают выполнение ее потребительских функций, но также безопасность ее функционирования с учетом экономических требований. Это является отражением основных принципов стандартизации, которые сформулированы в законе Российской Федерации «О стандартизации в Российской Федерации». Использование такого подхода требует разработки новой модели построения стандарта, которая отражает как существующую практику разработки стандартов, так и позволяет использовать лучшие мировые аналоги как базы для определения уровня значений показателей качества продукции. Исходя из

изложенного, разработка стандарта должна базироваться на определении перспективных требований с учетом мирового опыта (рис. 3).

Рассмотрим применение предлагаемой модели на примере разработки межгосударственного стандарта на прокат арматурный. В рамках Плана межгосударственной стандартизации в 2014 г. начались работы по разработке единого межгосударственного стандарта на прокат арматурный. Это было обусловлено целым рядом причин, связанных с необходимостью регулирования доступа и адаптации строительных материалов и изделий, инженерных и проектных работ отечественного производства на единый европейский рынок. Следует также отметить, что требования на прокат арматурный для железобетонных конструкций действовали различные национальные стандарты, требования в которых во многом дублировали друг друга.

При разработке межгосударственного стандарта необходимым условием было нахождение разумного баланса между отменяемыми стандартами на прокат арматурный ГОСТ 5781-82

«Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия» [28] и ГОСТ 10884-90 «Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций. Технические условия» [29] и требованиями Регламента ЕС № 305/2011 «Конструкционные и строительные материалы». Для этого предложена новая структура стандарта, в котором предусмотрено деление норм по двум разделам. Первый раздел содержит нормы, которые есть в отменяемых стандартах, во второй раздел включены нормы, гармонизированные с мировыми аналогами (рис. 4).

По сравнению с отменяемыми стандартами межгосударственный стандарт на прокат арматурный обеспечивает как предоставление выбора способа производства проката изготовителю, так и в значительной степени расширяет границы нормирования показателей качества данного вида металлопродукции: в размерный ряд проката включены дополнительные размеры от 4 до 10 мм с интервалом через 0,5 мм, от 10 до 20 мм с интервалом 1 мм, введены три базовые формы периодического профиля, установлены две группы предельных отклонений по массе 1 м длины проката, при этом одна из них в минусовом поле допуска. Для учета требований строительных норм и правил прочностные свойства проката приведены в соответствие с актуализированным СНиП (СП 63.13330.2012). Среди мероприятий по гармонизации уровня требований к прокату арматурному можно отметить введение двух уровней пластичности проката для классов A400, A500 и A600, соответствующих Euro norm (EN 1992 1-1:2005) и ISO 6953-2:2007, а также гарантированное обеспечение стойкости проката против коррозионного растрескивания и выносливость при многоцикловых нагрузках.

Отличительной особенностью такого построения стандарта является обеспечение возможности производителю выбирать технологический процесс производства проката арматурного с учетом его технико-технологических возможностей. Если производитель обладает производственными возможностями выпускать прокат арматурный в соответствии с дополнительными нормами, содержащимися в стандарте, это обеспечивает ему явные конкурентные преимущества на рынке металлопродукции.

Заключение

Разработанная структура стандарта позволяет учитывать существующие возможности производства, обеспечивающие соответствие пока-

зателей качества действующим в течение многих лет стандартам. С другой стороны, такое построение стандарта позволяет включать в его содержание нормы, гармонизированные с евро нормами на данный вид металлопродукции.

Список литературы

1. Федеральный закон от 29 июня 2015 г. N 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». М., 2015.
2. Сорокин Е.П. Нужны ли России межгосударственные стандарты // Стандарты и качество. 2006. № 5. С. 28–33.
3. Зажигалкин А.В., Панкратова Н.П. Промышленности нужна международная стандартизация // Стандарты и качество. 2009. № 6. С. 36–39.
4. Концепция развития национальной системы стандартизации Российской Федерации на период до 2020 года. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2012 г. № 1762-р. М., 2012.
5. Терентьева Р.П. Гармонизированные стандарты на продукцию сырьевых отраслей промышленности // Стандарты и качество. 2004. № 10. С. 26–29.
6. Брод Б.Э. Определение уровня гармонизации национальных стандартов // Стандарты и качество. 2010. № 4. С. 36–39.
7. Тарасьев Ю.А., Дунаевский С.Н. Гармонизация стандартов и технических регламентов: какой она должна быть? // Стандарты и качество. 2014. № 3. С. 34–37.
8. Сергеев А.Г., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник. М.: Юрайт, 2011. 820 с.
9. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2004. 330 с.
10. ГОСТ Р 1.2-2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.
11. Рубин Г.Ш. Квалиметрия метизного производства: монография. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. 167 с.
12. Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 97 – 102.
13. Сорокин Е.П. О достижении консенсуса при проведении работ по стандартизации // Стандарты и качество. 2015. № 10. С. 50–55.
14. Аронов И.З., Зажигалкин А.В. О консенсусе в свете ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» // Стандарты и качество. 2016. №2. С. 24–27.
15. Ефанова И.Б. Кто должен разрабатывать стандарты? // Стандарты и качество. 2016. № 1. С. 32–36.
16. Розенталь О.М. Принцип консенсуса – фактор развития или торможения инноваций? // Стандарты и качество. 2016. № 3. С. 40–42.
17. Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Поиск консенсуса между потребителем и производителем – важный этап при разработке нормативных документов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2(50). С. 79–84.
18. Адлер Ю.П. Дашь консенсус! // Стандарты и качество.

2016. № 6. С. 86–88.
19. Аронов И.З., Максимова О.В., Зажигалкин А.В. Исследование времени достижения консенсуса в работе технических комитетов по стандартизации на основе регулярных Марковских цепей // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 4. С. 941–950.
20. Зажигалкин А.В., Аронов И.З., Максимова О.В. Модель управления временем достижения консенсуса в технических комитетах // Компетентность. 2015. № 6. Т. 127. С. 17–23.
21. Аронов И.З., Зажигалкин А.В. Управление работой технических комитетов по стандартизации с целью достижения консенсуса // Сертификация. 2014. № 3. С. 11–14.
22. Аронов И.З., Зажигалкин А.В., Толстунова Т.В. Математические модели обеспечения консенсуса в работах ТК по стандартизации // Стандарты и качество. 2014. № 7. С. 28–33.
23. Полякова М.А., Телегин В.Е., Голубчик Э.М. Анализ требований стандартов на ленту стальную холоднокатаную // Черные металлы. 2010. № 7. С. 20–26.
24. Данилова Ю.В., Полякова М.А. Проблемы актуализации действующих стандартов на машиностроительный крепеж // Качество в обработке материалов. 2015. № 1(3). С. 34–38.
25. Пугачев С.В., Самков В.М. О программе гармонизации национальных стандартов в научно-технической и производственной сферах на период до 2012 года // Стандарты и качество. 2008. № 10. С. 18–20.
26. Брод Б.Э., Бодрова М.И. О порядке разработки и применения межгосударственных стандартов // Стандарты и качество. 2009. № 11. С. 76–77.
27. Полякова М.А. Необходимость разработки концепции стандартов нового поколения в металлургии // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. Ч. 1. С. 233–236.
28. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. 10 с.
29. ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2009. 14 с.

Поступила 25.01.19

Принята в печать 04.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>

DEVELOPMENT OF A STRUCTURE OF NORMS FOR STEEL PRODUCTS BASED ON A PRINCIPLE OF ADVANCED STANDARDIZATION

Sergey V. Snimshchikov – Head of the Institute of Advanced Training and Personnel Certification
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: s.snimshchikov@mstuca.aero

Marina A. Polyakova – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Aleksandr S. Limarev – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.limarev@magtu.ru

Veniamin A. Kharitonov – PhD (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.kharitonov@magtu.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): It is shown in the paper that at present one of the important problems in standardization is to harmonize requirements in standards with international norms. It is caused by the necessity to increase the product competitiveness in the external market conditions. At the same time, national practice in standardization, a variety of valid standards on the same product as well as the existing structure of standards do not make it possible to fully harmonize product quality indexes which are normalized in national standards with the relevant indexes of the best world similar standards.

Objectives: Development of a new concept for a standard structure which allows combining requirements of both valid national standards and international norms.

Methods Applied: When developing a new concept for the standard structure, the authors used universal methods of scientific cognition: analysis and synthesis, deduction, analogy, extrapolation, abstraction. **Originality:** Novelty of the proposed approach is based on the development of a new procedure for creating standards taking into consideration the existing practice in the product quality indexes setting, the level of similar world quality indexes, and economical factors. **Findings:** The paper presents the

application of the developed concept for a standard structure by the example of an interstate standard for reinforcing bars. It was shown that a basic difference in the standard structure is that the standard had two sections. The first section contains norms valid in revoked national standards. The second section includes the requirements which were harmonized with the international standards. This makes it possible for a manufacturer to choose independently such kind of a technological process for reinforcing bar production which fully corresponds with the existing process facilities. **Practical Relevance:** The proposed concept for arrangement of the standard structure makes it possible to take into consideration the existing national experience in the area of setting norms for product quality indexes which are to the maximum extent harmonized with the level of similar world properties.

Keywords: Standardization, national standard, Euro-norms, quality indexes, setting norms, harmonization, reinforcing bars.

References

1. Federal Law No. 162-FZ dated 29 June 2015 "On standardization in the Russian Federation". Moscow, 2015.

2. Sorokin E.P. Does Russia need interstate standards developed by other countries? *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2006, no. 5, pp. 28–33. (in Russ.)
3. Zazhigalkin A.V., Pankratova N.P. Industry needs international standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2009, no. 6, pp. 36–39. (in Russ.)
4. A concept of development of the national standardization system of the Russian Federation till 2020. Approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 1762-r dated 24 September 2012. Moscow, 2012.
5. Terentyeva R.P. Harmonized standards for products of resource-based industrial sectors. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2004, no. 10, pp. 26–29. (in Russ.)
6. Brod B.E. Estimation of the national standard harmonization level. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2010, no. 4, pp. 36–39. (in Russ.)
7. Tarasyev Yu.A., Dunaevskiy S.N. Harmonization of standards and technical regulations: what is this to be? *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2014, no. 3, pp. 34–37. (in Russ.)
8. Sergeev A.G., Teregerya V.V. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification: textbook]. Moscow: Yurait Publishing House, 2011, 820 p. (in Russ.)
9. Lifits I.M. *Standartizatsiya, metrologiya i sertifikatsiya* [Standardization, metrology and certification: textbook]. 3rd ed., updated and revised. Moscow: Yurait Publishing House, 2004, 330 p. (in Russ.)
10. GOST R 1.2-2004. Standardization in the Russian Federation. National standards of the Russian Federation. Rules for development, taking over, reform and cancellation. Moscow: Standartinform, 2007, 16 p.
11. Rubin G.Sh. *Kvalimetriya metiznogo proizvodstva* [Qualimetry of metalware manufacturing: monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2012, 167 p. (in Russ.)
12. Rubin G.Sh., Polyakova M.A. Development of the standardization scientific basics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 97–102. (in Russ.)
13. Sorokin E.P. On achieving a consensus, when performing activities in standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2015, no. 10, pp. 50–55. (in Russ.)
14. Aronov I.Z., Zazhigalkin A.V. About a consensus in the framework of the Federal Law "On standardization in the Russian Federation". *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2016, no. 2, pp. 24–27. (in Russ.)
15. Efanova I.B. Who should develop standards? *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2016, no. 1, pp. 32–36. (in Russ.)
16. Rozental O.M. Principle of consensus: is it a factor of development or deceleration of innovations? *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2016, no. 3, pp. 40–42. (in Russ.)
17. Danilova Yu.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. Reaching a consensus between consumers and manufacturers is an important stage when developing regulatory documents. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2 (50), pp. 79–84. (in Russ.)
18. Adler Yu.P. Consensus now! *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2016, no. 6, pp. 86–88. (in Russ.)
19. Aronov I.Z., Maksimova O.V., Zazhigalkin A.V. Research on the time necessary for consensus achievement during operation of technical committees on standardization based on regular Markov chains. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and simulation], 2015, vol. 7, no. 4, pp. 941–950. (in Russ.)
20. Zazhigalkin A.V., Aronov I.Z., Maksimova O.V. A model of consensus achievement time management in technical committees. *Kompetentnost* [Competence], 2015, no. 6, vol. 127, pp. 17–23. (in Russ.)
21. Aronov I.Z., Zazhigalkin A.V. Management of technical committees on standardization to achieve a consensus. *Sertifikatsiya* [Certification], 2014, no. 3, pp. 11–14. (in Russ.)
22. Aronov I.Z., Zazhigalkin A.V., Tolstunova T.V. Mathematical models for consensus achievement during activities of technical committees on standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2014, no. 7, pp. 28–33. (in Russ.)
23. Polyakova M.A., Telegin V.E., Golubchik E.M. Analysis of requirements of standards on cold rolled steel narrow strips. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2010, no. 7, pp. 20–26. (in Russ.)
24. Danilova Yu.V., Polyakova M.A. Problems of updating existing standards on engineering fasteners. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in Materials Processing], 2015, no. 1 (3), pp. 34–38. (in Russ.)
25. Pugachev S.V., Samkov V.M. About the 2012 Program on harmonization of national standards in scientific/technical and industrial areas. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2008, no. 10, pp. 18–20. (in Russ.)
26. Brod B.E., Bodrova M.I. About the procedure for development and application of interstate standards. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2009, no. 11, pp. 76–77. (in Russ.)
27. Polyakova M.A. Need for development of the concept of standards of a new generation in metallurgy. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technologies, innovations, quality]. Proceedings of the 19th International Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk: SibSIU Publishing House, 2015, Part 1, pp. 233–236. (in Russ.)
28. GOST 5781-82. Hot rolled steel for reinforcement of ferro-concrete structures. Specifications. Moscow: Standartinform, 2006. 10 p.
29. GOST 10884-94. Thermomechanically hardened steel bars for reinforced concrete constructions. Specifications. Moscow: Standartinform, 2009. 14 p.

Received 25/01/19

Accepted 04/02/19

Образец для цитирования

Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации / Снимщиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>

For citation

Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A. Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.311.004.12

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-94-103>

СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ШЕСТИПОЛЮСНИКА С ДВУМЯ ВХОДНЫМИ И ЧЕТЫРЬМЯ ВЫХОДНЫМИ ВЫВОДАМИ

Большанин Г.А.¹, Скулина Е.Г.²¹Братский государственный университет, Братск, Россия²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье представлен один из возможных вариантов количественной связи коэффициентов уравнений В-формы с уравнениями иных форм, оценивающих состояние пассивного шестиполосника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Таким шестиполосником могут быть замещены устройства, элементы и части электрических цепей или электроэнергетических систем. Коэффициенты уравнений В-формы, так же как и коэффициенты уравнений А-формы, могут быть определены экспериментально. В принципе, экспериментально могут быть определены и коэффициенты уравнений иных форм. Но это, как правило, связано с существенными трудностями организационного и технического характера. Целесообразнее определить эти коэффициенты из установленной их количественной связи с предварительно выясненными коэффициентами В-формы. **Цель работы:** формирование количественной связи коэффициентов уравнений В-формы, описывающих состояние шестиполосника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, с коэффициентами уравнений G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы, описывающих состояние этого же шестиполосника. **Используемые методы:** применялись методы математического моделирования с использованием элементов теории многополосников. **Новизна:** элементами новизны обладает предлагаемая методика формирования количественной связи коэффициентов уравнений А-формы с уравнениями иных форм, оценивающих состояние пассивного шестиполосника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. **Результат:** в статье рассмотрен один из возможных вариантов количественной связи коэффициентов уравнений В-формы с коэффициентами уравнений G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы, оценивающих состояние пассивного шестиполосника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Представлены математические формулировки, с помощью которых такая связь может быть реализована. **Практическая значимость:** предлагаемая количественная связь между коэффициентами уравнений различных форм позволит при наличии сведений о численных значениях коэффициентов уравнений В-формы формировать уравнения других форм и установить зависимости различных типов между входными и выходными характеристиками электрической энергии у объекта электроэнергетики, который может быть замещен шестиполосником с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Подобная методика может быть использована для формирования количественной связи коэффициентов уравнений G-формы, H-формы, Y-формы или Z-формы с коэффициентами уравнений иных форм, описывающих состояние пассивных шестиполосников различных модификаций.

Ключевые слова: уравнения, коэффициенты, напряжения, токи, А-форма, В-форма, G-форма, H-форма, Y-форма, Z-форма.

Введение

Идея замещения электротехнических объектов многополосниками возникла давно [1, 2]. Но до недавнего времени основное внимание уделялось теории четырехполосников. Теория многополосников рассматривалась, в основном, применительно к устройствам связи [3–8]. Позже возможность применения теории многополосников стали рассматривать при синтезе и анализе электрических цепей [9, 10], в силовой энергетике [11–15], в электронике [16], в системах автоматического управ-

ления промышленными технологиями [17–19] и даже в механике [20, 21]. Анализ состояния многополосников посвящено множество научно-исследовательских разработок [22–25].

Шестиполосником следует называть часть электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы с шестью выводами. Эти выводы могут служить либо для входа (входные), либо для выхода (выходные) электрических сигналов. Причем количество входных и выходных выводов может быть не менее двух и не более четырех. В данном случае интерес вызывает шестиполосник с двумя входными и четырьмя выходными выводами (рис. 1).

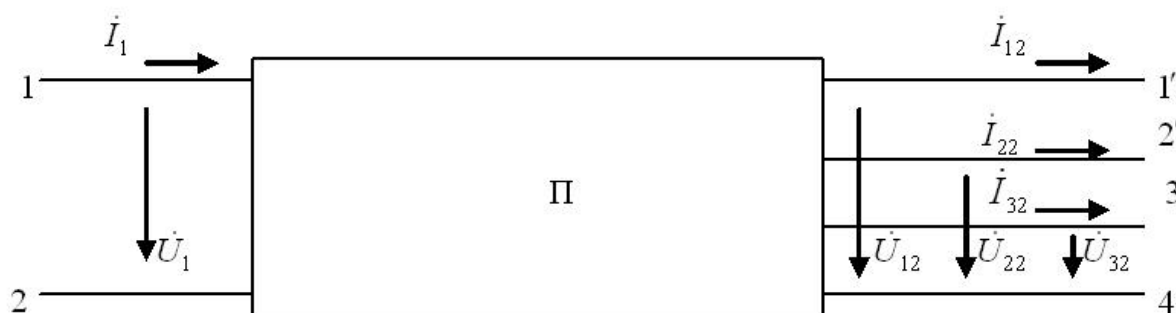


Рис. 1. Пассивный шестиполюсник с двумя входными и четырьмя выходными выводами

Состояние энергетического объекта, замещаемого таким шестиполюсником, может быть описано уравнениями различных форм. Состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами в силовой электроэнергетике принято описывать уравнениями А-формы. Но это мнение может оказаться субъективным. В ряде отраслей электротехники и электроэнергетики может оказаться целесообразным использование уравнений иных форм: уравнения В-формы, Y-формы, H-формы, G-формы Z-формы. В уравнениях каждой формы используются свои специфические коэффициенты. Их численные значения можно определить экспериментально по методике, аналогичной изложенной в [26]. Получается, что при использовании для анализа состояния одного и того же шестиполюсника уравнений различных форм необходимо неоднократно выполнить серию экспериментов с последующей аналитической обработкой полученных таким образом данных. Это достаточно громоздкая процедура. Гораздо проще было бы установить количественную связь коэффициентов одной формы с коэффициентами уравнений иных форм. Этому и посвящена предлагаемая статья.

Методы исследования

В качестве основных уравнений, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, рекомендованы уравнения А-формы, устанавливающие количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии [26]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_{12} + B\dot{I}_{12} + E\dot{U}_{22} + F\dot{I}_{22} + K\dot{U}_{32} + L\dot{I}_{32}; \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_{12} + D\dot{I}_{12} + G\dot{U}_{22} + H\dot{I}_{22} + M\dot{U}_{32} + N\dot{I}_{32}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M$ и N – коэффициенты уравнений А-формы шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Численные значения коэффициентов, входящих в состав этих уравнений, определяются экспериментально по методике, изложенной в [26].

Тем не менее существует реальная возможность описания состояния анализируемого шестиполюсника уравнениями любых форм: В-формы, G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы. Но, чтобы воспользоваться ими, необходимо уметь определять численные значения соответствующих коэффициентов. В таком случае самым оптимальным решением поставленной задачи является попытка выявления количественной связи этих коэффициентов с коэффициентами уравнений А-формы, численные значения которых могут быть определены экспериментально.

Связь между уравнениями различных форм предполагает количественную связь между соответствующими коэффициентами.

Связь между уравнениями различных форм, описывающими состояние анализируемого шестиполюсника, и уравнениями А-формы устанавливается следующим образом: уравнения А-формы преобразуются так, чтобы они приобрели структуру уравнений той или иной формы, что создает возможность формирования равенств для вычисления искомых коэффициентов через коэффициенты уравнений А-формы. Именно так была установлена связь между уравнениями различных форм, описывающими состояние шестиполюсника с тремя входными и тремя выходными выводами.

Но уравнения (1), в принципе, не могут приобрести структуру уравнений (2): невозможно из двух

уравнений определить шесть неизвестных. Формирование четырех дополнительных уравнений здесь неперспективно.

Уравнения В-формы устанавливают количественную связь выходных и входных напряжений и токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{12} &= B_{11}\dot{U}_1 + B_{12}\dot{I}_1; \\ \dot{U}_{22} &= B_{21}\dot{U}_1 + B_{22}\dot{I}_1; \\ \dot{U}_{32} &= B_{31}\dot{U}_1 + B_{32}\dot{I}_1; \\ \dot{I}_{12} &= B_{41}\dot{U}_1 + B_{42}\dot{I}_1; \\ \dot{I}_{22} &= B_{51}\dot{U}_1 + B_{52}\dot{I}_1; \\ \dot{I}_{32} &= B_{61}\dot{U}_1 + B_{62}\dot{I}_1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}, B_{31}, B_{32}, B_{41}, B_{42}, B_{51}, B_{52}, B_{61}, B_{62}$ – коэффициенты уравнений В-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Получается, что определение численных значений коэффициентов уравнений В-формы через коэффициенты уравнений А-формы практически невозможно.

Численные значения коэффициентов уравнений В-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, можно лишь экспериментально. Методика экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений В-формы похожа на методику экспериментального определения численных значений коэффициентов А-формы, изложенную в [26]. Серия опытов, выполняемых в процессе исполнения экспериментов по определению коэффициентов уравнений В-формы, может полностью совпадать с опытами по определению коэффициентов уравнений А-формы, но для аналитической обработки экспериментальных данных за основу вместо уравнений (1) следует взять уравнения (2).

Уравнения G-формы устанавливают количественную связь между входным током, выходными напряжениями и входным напряжением, выходными токами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= G_{11}\dot{U}_1 + G_{12}\dot{I}_{12} + G_{13}\dot{I}_{22} + G_{14}\dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{12} &= G_{21}\dot{U}_1 + G_{22}\dot{I}_{12} + G_{23}\dot{I}_{22} + G_{24}\dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{22} &= G_{31}\dot{U}_1 + G_{32}\dot{I}_{12} + G_{33}\dot{I}_{22} + G_{34}\dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{32} &= G_{41}\dot{U}_1 + G_{42}\dot{I}_{12} + G_{43}\dot{I}_{22} + G_{44}\dot{I}_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{24}, G_{31}, G_{32}, G_{33}, G_{34}, G_{41}, G_{42}, G_{43}, G_{44}$ – коэффициенты уравнений G-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Задача формирования равенств для вычисления коэффициентов этих уравнений через коэффициенты уравнений А-формы оказывается тоже невыполнимой, так как два уравнения (1), в принципе, не могут без дополнительных условий приобрести структуру уравнений (3).

А вот формирование равенств, позволяющих вычисление коэффициентов уравнений G-формы анализируемого шестиполюсника через коэффициенты уравнений В-формы этого же шестиполюсника, вполне возможно. При условии, что численные значения коэффициенты уравнений В-формы заранее определены экспериментально.

После ряда преобразований уравнения (2) могут приобрести структуру уравнений (3):

$$\dot{I}_1 = -\frac{B_{61}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}}\dot{I}_{12} + \frac{B_{51}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}}\dot{I}_{32};$$

$$\dot{U}_{12} = \frac{B_{11}B_{32}B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}) + B_{12}(B_{31}B_{42}B_{52}B_{61} - B_{32}B_{41}B_{51}B_{62})}{B_{32}B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61})} \dot{U}_1 + \frac{B_{12}}{B_{42}} \dot{I}_{12};$$

$$\dot{U}_{22} = \frac{B_{21}B_{42} - B_{22}B_{41}}{B_{42}} \dot{U}_1 + \frac{B_{22}}{B_{42}} \dot{I}_{12}; \quad \dot{U}_{32} = \frac{B_{32}B_{41} - B_{31}B_{42}}{B_{42}} \dot{U}_1 + \frac{B_{32}}{B_{42}} \dot{I}_{12}.$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (3) позволит сформировать равенства для вычисления коэффициентов уравнений G-формы анализируемого шестиполюсника:

$$G_{11} = G_{13} = G_{23} = G_{24} = G_{33} = G_{34} = G_{43} = G_{44} = 0;$$

$$G_{12} = -\frac{B_{61}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}}; \quad G_{14} = \frac{B_{51}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}};$$

$$G_{21} = \frac{B_{11}B_{32}B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}) + B_{12}(B_{31}B_{42}B_{52}B_{61} - B_{32}B_{41}B_{51}B_{62})}{B_{32}B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61})};$$

$$G_{22} = \frac{B_{12}}{B_{42}}; \quad G_{31} = \frac{B_{21}B_{42} - B_{22}B_{41}}{B_{42}}; \quad G_{32} = \frac{B_{22}}{B_{42}};$$

$$G_{41} = \frac{B_{32}B_{41} - B_{31}B_{42}}{B_{42}}; \quad G_{42} = \frac{B_{32}}{B_{42}}.$$

Так определяются численные значения коэффициентов уравнений G-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, через коэффициенты В-формы того же шестиполюсника.

Количественная связь входного напряжения и выходных токов с входным током и выходными напряжениями устанавливается уравнениями Н-формы анализируемого шестиполюсника:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_{12} + H_{13}\dot{U}_{22} + H_{14}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{12} &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_{12} + H_{23}\dot{U}_{22} + H_{24}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{22} &= H_{31}\dot{I}_1 + H_{32}\dot{U}_{12} + H_{33}\dot{U}_{22} + H_{34}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{32} &= H_{41}\dot{I}_1 + H_{42}\dot{U}_{12} + H_{43}\dot{U}_{22} + H_{44}\dot{U}_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{14}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{24}, H_{31}, H_{32}, H_{33}, H_{34}, H_{41}, H_{42}, H_{43}$ и H_{44} – коэффициенты уравнений Н-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Для практического использования этих уравнений необходимо иметь сведения о численных значениях коэффициентов, входящих в состав этих уравнений.

Известна методика экспериментального определения численных значений уравнений А-формы анализируемого шестиполюсника [26]. Но уравнения А-формы не могут без дополнительных условий принять структуру уравнений Н-формы. Поэтому численные значения коэффициентов уравнений (4) не могут быть определены через коэффициенты уравнений А-формы.

Численные значения коэффициентов уравнений Н-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, можно определить через коэффициенты уравнений В-формы этого же шестиполюсника. Методика экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений В-формы во многом похожа на методику экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений А-формы.

В результате ряда преобразований уравнения В-формы (2) могут принять структуру уравнений Н-формы (4):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{B_{62}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62} + B_{21}B_{62} - B_{22}B_{61}} \dot{U}_{22}; \\ \dot{I}_{12} &= \frac{(B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21})(B_{31}B_{42} - B_{32}B_{41})B_{62}}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{I}_1 + \frac{B_{41}B_{61}(B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{22} &= \frac{(B_{11}B_{22}B_{62} - 2B_{12}B_{22}B_{61} + B_{12}B_{21}B_{62})(B_{31}B_{52} - B_{32}B_{51})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{I}_1 + \\ &+ \frac{B_{51}(B_{11}B_{22}B_{62} - 2B_{12}B_{22}B_{61} + B_{12}B_{21}B_{62})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{32} &= \frac{B_{21}B_{62}(B_{22}B_{61} - B_{21}B_{62})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{U}_{12} + \frac{B_{62}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61})}{B_{22}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})} \dot{U}_{22}. \end{aligned} \right\}$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (4) позволит сформировать равенства для вычисления коэффициентов уравнений Н-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами:

$$H_{11} = H_{12} = H_{14} = H_{22} = H_{23} = H_{32} = H_{33} = H_{41} = H_{44} = 0;$$

$$H_{13} = \frac{B_{62}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62} + B_{21}B_{62} - B_{22}B_{61}};$$

$$H_{21} = \frac{(B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21})(B_{31}B_{42} - B_{32}B_{41})B_{62}}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})};$$

$$H_{24} = \frac{B_{41}B_{61}(B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})};$$

$$H_{31} = \frac{(B_{11}B_{22}B_{62} - 2B_{12}B_{22}B_{61} + B_{12}B_{21}B_{62})(B_{31}B_{52} - B_{32}B_{51})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})};$$

$$H_{34} = \frac{B_{51}(B_{11}B_{22}B_{62} - 2B_{12}B_{22}B_{61} + B_{12}B_{21}B_{62})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})};$$

$$H_{42} = \frac{B_{21}B_{62}(B_{22}B_{61} - B_{21}B_{62})}{B_{22}B_{31}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})};$$

$$H_{43} = \frac{B_{62}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61})}{B_{22}(B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61} - B_{21}B_{62} + B_{22}B_{61})}.$$

Так определяются численные значения коэффициентов уравнений Н-формы анализируемого шестиполюсника через коэффициенты уравнений В-формы этого же шестиполюсника.

Количественная связь входных и выходных токов с входными и выходными напряжениями шестиполюсника с двумя входными и выходными выводами устанавливается уравнениями Y-формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_{12} + Y_{13}\dot{U}_{22} + Y_{14}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{12} &= Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_{12} + Y_{23}\dot{U}_{22} + Y_{24}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{22} &= Y_{31}\dot{U}_1 + Y_{32}\dot{U}_{12} + Y_{33}\dot{U}_{22} + Y_{34}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{32} &= Y_{41}\dot{U}_1 + Y_{42}\dot{U}_{12} + Y_{43}\dot{U}_{22} + Y_{44}\dot{U}_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}, Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}, Y_{31}, Y_{32}, Y_{33}, Y_{34}, Y_{41}, Y_{42}, Y_{43}$ и Y_{44} – коэффициенты уравнений Y-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Численные значения коэффициентов этих уравнений неизвестны, что ограничивает возможность их практического использования. Здесь описаны методика экспериментального определения коэффициентов уравнений лишь А-формы и В-формы анализируемого шестиполюсника.

Связь коэффициентов уравнений А-формы (1) с коэффициентами уравнений Y-формы (5) устанавливается весьма сложно, поскольку уравнения А-формы не могут без дополнительных условий принять структуру уравнений Y-формы.

А вот связь коэффициентов уравнений В-формы с коэффициентами уравнений Y-формы вполне возможна. Для ее установления уравнения (2) следует преобразовать так, чтобы они приняли структуру уравнений (5):

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{B_{31}}{B_{22}B_{31} - B_{21}B_{32}}\dot{U}_{22} + \frac{B_{21}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{12} &= \frac{B_{32}B_{41} - B_{31}B_{42}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}\dot{U}_{22} + \frac{B_{21}B_{42} - B_{22}B_{41}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{22} &= \frac{B_{31}B_{52} - B_{32}B_{51}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}\dot{U}_{22} + \frac{B_{22}B_{51} - B_{21}B_{52}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}\dot{U}_{32}; \\ \dot{I}_{32} &= \frac{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}}{B_{12}}\dot{U}_1 + \frac{B_{62}}{B_{12}}\dot{U}_{12}. \end{aligned}$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (5) дает возможность формирования равенств для вычисления коэффициентов уравнений Y-формы анализируемого шестиполюсника через коэффициенты уравнений В-формы этого же шестиполюсника:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{12} = Y_{21} = Y_{22} = Y_{31} = Y_{32} = Y_{43} = Y_{44} = 0; \\ Y_{13} &= \frac{B_{31}}{B_{22}B_{31} - B_{21}B_{32}}; \quad Y_{14} = \frac{B_{21}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}; \quad Y_{23} = \frac{B_{32}B_{41} - B_{31}B_{42}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}; \\ Y_{24} &= \frac{B_{21}B_{42} - B_{22}B_{41}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}; \quad Y_{33} = \frac{B_{31}B_{52} - B_{32}B_{51}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}; \quad Y_{34} = \frac{B_{22}B_{51} - B_{21}B_{52}}{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}; \\ Y_{41} &= \frac{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}}{B_{12}}; \quad Y_{42} = \frac{B_{62}}{B_{12}}. \end{aligned}$$

Количественную связь входных и выходных напряжений с входными и выходными токами шестиполюсника с двумя входными и выходными выводами устанавливают уравнения Z-формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_{12} + Z_{13} \dot{I}_{22} + Z_{14} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{12} &= Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_{12} + Z_{23} \dot{I}_{22} + Z_{24} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{22} &= Z_{31} \dot{I}_1 + Z_{32} \dot{I}_{12} + Z_{33} \dot{I}_{22} + Z_{34} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{32} &= Z_{41} \dot{I}_1 + Z_{42} \dot{I}_{12} + Z_{43} \dot{I}_{22} + Z_{44} \dot{I}_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{24}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{33}, Z_{34}, Z_{41}, Z_{42}, Z_{43}$ и Z_{44} – коэффициенты уравнений Z-формы, описывающих состояние шестиполусника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Практическое использование этих уравнений возможно лишь при известных численных значениях коэффициентов $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{24}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{33}, Z_{34}, Z_{41}, Z_{42}, Z_{43}$ и Z_{44} . Их можно определить через коэффициенты уравнений А-формы или В-формы, методика экспериментального определения которых оговорена ранее.

Использование коэффициентов уравнений А-формы анализируемого шестиполусника для определения численных значений коэффициентов уравнений Z-формы того же шестиполусника весьма проблематично: невозможно без дополнительных условий из двух уравнений (1) получить четыре уравнения типа (6).

Зато использование коэффициентов уравнений В-формы для определения численных значений коэффициентов уравнений Z-формы, описывающих состояние шестиполусника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, вполне допустимо. Для этого нужно уравнения (2) преобразовать так, чтобы они приняли структуру уравнений (6):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{B_{62}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}} \dot{I}_{22} + \frac{B_{52}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{12} &= \frac{B_{12}}{B_{42}} \dot{I}_{12} + \frac{B_{62}(B_{12}B_{41} - B_{11}B_{42})}{B_{42}(B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62})} \dot{I}_{22} + \frac{B_{52}(B_{11}B_{42} - B_{12}B_{41})}{B_{42}(B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62})} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{22} &= -B_{22} \dot{I}_1 + \frac{B_{21}B_{52}B_{62}}{B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61})} \dot{I}_{22} + \frac{B_{21}B_{52}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}} \dot{I}_{32}; \\ \dot{U}_{32} &= B_{32} \dot{I}_1 + \frac{B_{31}B_{62}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}} \dot{I}_{22} + \frac{B_{31}B_{52}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}} \dot{I}_{32}. \end{aligned} \right\}$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (6) обеспечивает возможность формирования равенств для вычисления коэффициентов уравнений Z-формы, описывающих состояние шестиполусника с двумя входными и четырьмя выходными выводами через коэффициенты уравнений В-формы:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{12} = Z_{21} = Z_{32} = Z_{42} = 0; \\ Z_{13} &= \frac{B_{62}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}}; \quad Z_{14} = \frac{B_{52}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}}; \quad Z_{22} = \frac{B_{12}}{B_{42}}; \\ Z_{23} &= \frac{B_{62}(B_{12}B_{41} - B_{11}B_{42})}{B_{42}(B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62})}; \quad Z_{24} = \frac{B_{52}(B_{11}B_{42} - B_{12}B_{41})}{B_{42}(B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62})}; \quad Z_{31} = -B_{22}; \\ Z_{33} &= \frac{B_{21}B_{52}B_{62}}{B_{42}(B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61})}; \quad Z_{34} = \frac{B_{21}B_{52}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}}; \quad Z_{41} = B_{32}; \\ Z_{43} &= \frac{B_{31}B_{62}}{B_{51}B_{62} - B_{52}B_{61}}; \quad Z_{44} = \frac{B_{31}B_{52}}{B_{52}B_{61} - B_{51}B_{62}}. \end{aligned}$$

Здесь представлен лишь один из вариантов равенств для вычисления коэффициентов уравнений G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы. Существует множество других вариантов преобразования уравнений (2) с целью придания им структуры уравнений (3), (4), (5) или (6) и, соответственно, множество вариантов равенств для вычисления коэффициентов уравнений G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы, описывающих состояние шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, через коэффициенты уравнений В-формы того же шестиполюсника.

При использовании приведенных уравнений следует иметь в виду, что условно положительные направления напряжений и токов должны быть приняты такими, как их принято использовать для уравнений В-формы.

Заключение

Таким образом, установлена количественная связь между коэффициентами уравнений различных форм, описывающих состояние электроэнергетического объекта, замещенного пассивным шестиполюсником с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Теперь исследователь может не ограничивать себя в выборе уравнений той или иной формы. Но, тем не менее, процессу исследования должно предшествовать экспериментальное определение коэффициентов уравнений хотя бы одной формы.

Выявление количественной связи между коэффициентами шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами представляет собой один из путей дальнейшего развития теории многополюсников, что позволит дать объективный анализ электротехнического оборудования. Разработанные здесь элементы теории шестиполюсников могут быть образцом для формирования подобных методик для пяти-, восьми-, десяти-, двенадцати-, четырнадцатиполюсников, которыми в условиях пониженного качества электрической энергии могут быть замещены, например, трехфазные линии электропередачи трехпроводного и четырехпроводного исполнений, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка подобных элементов теории многополюсников и иных исполнений. Теория многополюсников, в частности теория шестиполюсников, может оказать существенную помощь в определении параметров электротехнических устройств.

Список литературы

1. Воронов Р.А. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951. 192 с.
2. Зевеке Г.В. Многополюсники. М.: МЭИ, 1971. 23 с.
3. Попов Н.М., Олин Д.М., Кирилин А.А. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестник КрасГАУ. 2017. №2. С. 88–97.
4. Барабанов Е.А., Мальцева И.С., Барабанов И.О. Алгоритм параллельной обработки данных в оптических сетях // Научный вестник НГТУ. 2004. Т.56. №3 С. 88–95.
5. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
6. Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными диаграммами направленности М.: Физматлит, 2016. 320 с.
7. Фаняев И.А., Кудин В.П. Распределительная матрица для питания восьмизлементной антенной решетки // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2012. №4. С. 52–57.
8. Шауэрман А.А. Исследование зависимости неопределенности измерения комплексного коэффициента отражения оконечных устройств от параметров измерительного преобразователя // Вестник СибГУТИ. 2013. №3. С. 20–28.
9. Салимоненко Д.А. Применение методов линейного программирования для определения параметров электрических цепей. Часть 1 // Вестник Башкирского ун-та. 2015. Т.20 №4. С. 1155–1163.
10. Селиванов В.Н. Исследование программ расчета электромагнитных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. 2009. Т.12. №1. С. 107–112.
11. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып.5. С. 16–21.
12. Китаев А.В., Агбомассу В.Л., Глухова В.И. Схемы замещения электрических двигателей переменного тока // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. №11(87). С. 59–65.
13. Беляков Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Часть 2. М.: НТФ Энергопрогресс, 2013. 92. с.
14. Сарапулов, Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Радионов И.Е. Моделирование тепловых режимов тягового линейного асинхронного двигателя // ЭПТТ. 2015. С.141–144.
15. Беляков Ю.С. Расчет режимов электрических систем, представленных многополюсниками. М.: Спутник, 2008. 124 с.
16. Федотов Ю.Б., Нестеров С.А., Мустафа Г.М. Повышение эффективности программ моделирования устройств силовой электроники // Apriori. Серия: естественные и технические науки. 2015. №6. С. 1–14.
17. Тлустенко С.Ф., Коптев А.Н. Разработка и исследование методологии информационного обеспечения технологических систем агрегатно-сборочного производства летательных аппаратов // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т.17. №6(2). С. 491–497.
18. Мусаева У.А. Автоматизированное проектирование СВЧ фазовращателя // Молодой ученый. 2013. №3. С. 83–88.

19. Львов А.А., Львов П.А. Применение комбинированного многополюсного рефлектометра для измерения расстояния до плоской поверхности // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ. М., 2014. С. 7044–7055.
20. Методика проектирования и перспективная конструкция средств снижения шумов судовых трубопроводов / А.Н. Крюков, Е.В. Шахматов, В.Н. Самсонов, А.Н. Дружин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т.7. №3. С. 67–79.
21. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network // European Researcher. 2013. Vol. 40. №2–1. P. 259–267.
22. Поплавский В.Б. Формула Крамера для систем линейных уравнений и неравенств над булевой алгеброй // Известия Саратовского ун-та. Серия: Математика. Информатика. 2011. Вып.5. Ч.2. С. 43–46.
23. Аюпджанян Г.Д., Сафарян В.С. Синтез пассивного линейного многополюсника из одной пары зажимов // Известия НАН РА и ГИУА. Серия: Технические науки. 2002. Т. LV. №2. С. 258–262.
24. Попов С.А., Корчагин А.Ф. Оценка параметров эквивалентной схемы многополюсников с помощью многооткликовых моделей // Вестник Новгородского гос. ун-та. 2004. №28. С. 150–155.
25. Бессонов А.В., Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т. Определение окрестностей многополюсников // Известия СПбГЭТУ. 2015. №5. С. 20–23.
26. Большанин Г.А. Многополюсники. Братск: Изд-во БрГУ, 2017. 337 с.

Поступила 04.09.18

Принята в печать 10.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-94-103>

RELATIONSHIP BETWEEN THE COEFFICIENTS OF A SIX-TERMINAL NETWORK WITH TWO INPUT AND FOUR OUTPUT TERMINALS

Georgiy A. Bolshanin – PhD (Eng.), Professor
Bratsk State University, Bratsk, Russia. E-mail: bolshaning@mail.ru

Elena G. Skulina – Undergraduate Student at the Faculty of Radio Engineering and Electronics
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: dream.len@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): This paper describes one of the possible variants of the quantitative relationship between the coefficients of the B-form equations and the equations of other forms that evaluate the state of a passive six-terminal network with two input and four output terminals. Such six-terminal network can replace devices, elements or parts of electrical circuits or electric power systems. The coefficients of the B-form equations, as well as the coefficients of the A-form equations, can be determined experimentally. In principle, the coefficients of equations of other forms can also be determined experimentally. However, such experiments are usually difficult to set up and conduct. Thus, it seems to be more reasonable to determine these coefficients from the established quantitative relationship with the previously determined coefficients of the B-form. **Objectives:** To establish a quantitative relationship between the coefficients of the B-form equations describing the state of the six-terminal network with two input and four output terminals and the coefficients of the G-, H-, Y- and Z-form equations describing the state of the same six-terminal network. **Methods Applied:** Mathematical modelling and some elements of the theory of multi-terminal networks. **Originality:** The originality of this research lies in the proposed method of establishing a quantitative relationship between the coefficients of the A-form equations and the equations of other forms describing the state of the passive six-terminal network with two input and four output terminals. **Findings:** This paper examines one

of the possible variants of the quantitative relationship between the coefficients of the B-form equations and the coefficients of the G-, H-, Y- and Z-form equations describing the state of the passive six-terminal network with two input and four output terminals. Some mathematical statements are presented which can help establish such relationship. **Practical Relevance:** If one knows the values of the B-form equation coefficients, the proposed quantitative relationship between the coefficients of various forms of equations will help build equations of other forms and establish various types of dependencies between the input and output characteristics of an electric power unit, which can be replaced with a six-terminal network with two input and four output terminals. This technique can be used to establish a quantitative relationship between the coefficients of the G-, H-, Y- or Z-form equations and the coefficients of equations of other forms describing the state of different modifications of passive six-terminal networks.

Keywords: Equations, coefficients, stresses, currents, A-form, B-form, G-form, H-form, Y-form, Z-form.

References

1. Voronov R.A. *Obshchaya teoriya chetyrekhpolysnikov i mnogopolysnikov* [The general theory of four- and multi-terminal networks]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1951, 192 p. (In Russ.)
2. Zeveke G.V. *Mnogopolysniki* [Multipoles]. Moscow: MEI, 1971, 23 p. (In Russ.)

3. Popov N.M., Olin D.M., Kirilin A.A. Signal transmission over 0.38 kV rural distribution networks. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2017, no. 2, pp. 88–97. (In Russ.)
4. Barabanov E.A., Maltseva I.S., Barabanov I.O. Algorithm of parallel data processing in optical networks. *Nauchnyy vestnik NGTU* [Science bulletin of NSTU], 2004, vol. 56, no. 3, pp. 88–95. (In Russ.)
5. Hansen R.C. *Fazirovannye antennnye reshetki* [Phased array antennas]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 560 p. (In Russ.)
6. Skobelev S.P. *Fazirovannye antennnye reshetki s sektornymi diagrammami napravlenosti* [Phased array antennas with sector-shaped patterns]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 320 p. (In Russ.)
7. Fanyaev I.A., Kudin V.P. Distribution power matrix for an eight-element antenna array. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], 2012, no. 4, pp. 52–57. (In Russ.)
8. Shauerman A.A. Understanding how the uncertainty of measuring the complex reflection coefficient of terminal devices depends on the parameters of the measuring transducer. *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibSUTIS], 2013, no. 3, pp. 20–28. (In Russ.)
9. Salimonenko D.A. Application of linear programming methods for determining the parameters of electrical circuits Part 1. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2015, vol. 20, no. 4, pp. 1155–1163.
10. Selivanov V.N. Exploring the programmes for calculating the ATR-EMTR electromagnetic processes in the educational process. *Vestnik MGTU* [Vestnik of MSTU], 2009, vol. 12, no. 1, pp. 107–112. (In Russ.)
11. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Location of faults in power transmission lines based on the instantaneous values of the alarm oscillograms. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2016, Issue 5, pp. 16–21. (In Russ.)
12. Kitaev A.V., Agbomassu V.L., Glukhova V.I. Equivalent circuits for AC motors. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy* [Electrical and computer systems], 2013, no. 11 (87), pp. 59–65. (In Russ.)
13. Belyakov Yu.S. *Mnogopolyusnik kak model elektricheskikh sistem* [Multipole network as a model electrical system]. Part 2. Moscow: NTF Energoprogress, 2013, 92 p. (In Russ.)
14. Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Radionov I.E. Modelling of temperature regimes of a traction linear induction motor. *Elektroprivody peremennogo toka* [Alternating current drives], 2015, pp. 141–144. (In Russ.)
15. Belyakov Yu.S. *Raschet rezhimov elektricheskikh sistem, predstavlennykh mnogopolyusnikami* [Calculation of the modes of electrical systems represented by multipoles]. Moscow: Sputnik, 2008, 124 p. (In Russ.)
16. Fedotov Yu.B., Nesterov S.A., Mustafa G.M. Optimized programs for modelling power electronics devices. *Apriori. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Apriori. Series: Natural and technical sciences], 2015, no. 6, pp. 1–14. (In Russ.)
17. Tlustenko S.F., Koptev A.N. Developing and understanding the ways to ensure information support of aircraft assembly line systems. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 6 (2), pp. 491–497. (In Russ.)
18. Musaeva U.A. Computer-aided design of microwave phase shifter. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2013, no. 3, pp. 83–88. (In Russ.)
19. Lvov A.A., Lvov P.A. Application of an integrated multipole reflectometer for measuring the distance to a flat surface. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya* [12th National Conference on Control Problems], 2014. Moscow, 2014, pp. 7044–7055. (In Russ.)
20. Kryukov A.N., Shakhmatov E.V., Samsonov V.N., Druzhin A.N. Design methodology and advanced design of noise reduction means for ship pipelines. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2014, vol. 7, no. 3, pp. 67–79. (In Russ.)
21. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of the Compound Ventilating Network. *European Researcher*, 2013, vol. (40), no. 2–1, pp. 259–267.
22. Poplavskiy V.B. Cramer's formula for systems of linear equations and inequalities over Boolean algebra. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya: Matematika. Informatika* [Bulletin of Saratov University. Series: Mathematics. Informatics], 2011, iss. 5, part 2, pp. 43–46. (In Russ.)
23. Akopjanyan G.D., Safaryan V.S. Synthesizing a passive linear multi-terminal network from one pair of terminals. *Izvestiya NAN RA i GIUA. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia and the State Engineering University of Armenia. Series: Engineering], 2002, T.LV., no. 2, pp. 258–262. (In Russ.)
24. Popov S.A., Korchagin A.F. Evaluating the parameters of the equivalent circuit of multipoles with the help of multiresponse models. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Novgorod State University], 2004, no. 28, pp. 150–155. (In Russ.)
25. Bessonov A.V., Luzin S.Yu., Lyachek Yu.T. Definition of the multi-terminal network neighborhood. *Izvestiya SPbGETU* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2015, no. 5, pp. 20–23. (In Russ.)
26. Bolshaniin G.A. *Mnogopolyusniki* [Multipoles]. Bratsk: Publishing House of Bratsk State University, 2017, 337 p. (In Russ.)

Received 04/09/18

Accepted 10/01/19

Образец для цитирования

Большанин Г.А., Скулина Е.Г. Связь коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 94–103. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-94-103>

For citation

Bolshaniin G.A., Skulina E.G. Relationship between the coefficients of a six-terminal network with two input and four output terminals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 94–103. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-94-103>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдираманов Серикбол Турлыбекулы – магистр техники и технологии, Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: vip.saiko@bk.ru

Алешин Геннадий Николаевич – канд. физ.-мат. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: galioshin@mail.ru

Ангольд Каролина Владимировна – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: angoldk@bk.ru

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: atp@magtu.ru

Андреященко Виолетта Александровна – доц., PhD, Экибастузский инженерно-технический институт им. академика К.Сатпаева, Экибастуз, Казахстан. E-mail: vi-ta.z@mail.ru

Анитуа Агустин – менеджер по продажам, LANBI S.A., Эльгойбар, Страна Басков, Испания. E-mail: agustin.anitua@lanbi.com

Ашкеев Жасулан Аманжолович – канд. техн. наук, доц., Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: jashkeev@mail.ru

Баранов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, директор института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. E-mail: vnbar79@mail.ru

Белоконова Ирина Николаевна – студентка магистратуры института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Большанин Георгий Анатольевич – канд. техн. наук, проф., Братский государственный университет, Братск, Россия. E-mail: bolshaning@mail.ru

Брунелли Катя – кафедра промышленного инжиниринга, Падуанский университет, Падуа, Италия.

Вахитов Александр Рафаельевич – аспирант, ведущий инженер-конструктор, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия. E-mail: vakhitov@belmag.ru

Вдовин Константин Николаевич – д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3244-3327>

Вильчинский Владислав Борисович – канд. техн. наук, зав. горной лабораторией, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: VilchinskiyVB@nornik.ru

Ворошилов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Гималетдинов Радий Халимович – д-р техн. наук, директор по производству и перспективному развитию

ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков», Кушва, Россия. ORCID: orcid.org/0000-0002-1388-9748

Гоун Танг – проф., директор института перспективных материалов университета Цинхуа, Шэньчжэнь, Китай.

Громов Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета, Новокузнецк, Россия. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Гулаков Андрей Анатольевич – главный металлург ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков», Кушва, Россия. E-mail: gulakov@kzpv.ru. ORCID: orcid.org/0000-0002-6519-282X

Гун Геннадий Семенович – д-р техн. наук, проф., советник ректора, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: goun@magtu.ru

Гун Евгений Игоревич – канд. техн. наук, зам. технического директора по конструкторским разработкам и испытаниям, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия. E-mail: e_goun@belmag.ru

Гун Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, генеральный директор, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия. E-mail: goun@belmag.ru

Гуолин Сонг – доцент института перспективных материалов университета Цинхуа, Шэньчжэнь, Китай.

Дабала Мануэле – кафедра промышленного инжиниринга, Падуанский университет, Падуа, Италия

Зенкин Евгений Юрьевич – управляющий директор ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», Братск, Россия. E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com

Иванов Юрий Федорович – д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотрудник, Институт Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия. E-mail: yufi55@mail.ru

Клопотов Анатолий Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, проф., Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия.

Кодиров Ильяс Сабиржонович – магистрант, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: ilyas-kodirov@mail.ru

Колокольцев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, проф., президент МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: kwm@magtu.ru

Константинов Игорь Лазаревич – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID 0000-0002-2451-3850

Корнилов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный

технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: kornilov_sn@mail.ru

Корчунов Алексей Георгиевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, проректор по международной деятельности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: international@magtu.ru. ORCID 0000-0002-2844-8283

Лимарев Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: a.limarev@magtu.ru

Лопатина Екатерина Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры металловедения и термической обработки металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Минотто Алессандро – кафедра промышленного инжиниринга, Падуанской университет, Падуа, Италия.

Монтянова Антонина Николаевна – д-р техн. наук, генеральный директор, ООО «Технологии закладки выработанного пространства», Москва, Россия. E-mail: 22fill56@bk.ru

Наговицин Юрий Николаевич – главный инженер Центра геодинамической безопасности Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия. E-mail: NagovitsinYuN@normik.ru

Ортуэта Хон – президент, LANBI S.A., Эльгойбар, Страна Басков, Испания. E-mail: jon.ortueta@lanbi.com

Петрикова Елизавета Алексеевна – мл. науч. сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Пеццато Лука – кафедра промышленного инжиниринга, Падуанской университет, Падуа, Италия. E-mail: luca.pezzato@unipd.it

Полякова Марина Андреевна – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Рааб Арсений Георгиевич – канд. техн. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: agraab@mail.ru

Рааб Георгий Иосифович – д-р техн. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: giraab@mail.ru

Румянцев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: rumyantsevAE@normik.ru, ORCID: 0000-0002-2204-961X

Савинов Александр Сергеевич – д-р техн. наук, доц., директор института металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru

Сальников Виталий Владимирович – канд. техн. наук, зам. технического директора по технологическим

разработкам, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия. E-mail: salnikov@belmag.ru

Сидельников Сергей Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. E-mail: sbs270359@yandex.ru

Скулина Елена Георгиевна – студентка, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. E-mail: dream.len@yandex.ru

Снимщиков Сергей Валентинович – начальник Института повышения квалификации и аттестации кадров, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: s.snimshikov@mstuca.aero

Тересов Антон Дмитриевич – науч. сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Трофимов Андрей Викторович – канд. техн. наук, зав. центром физико-механических исследований, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: trofimovav@normik.ru, ORCID: 0000-0001-7557-9801

Тухватулин Ильдар Халитович – канд. техн. наук, заместитель главного металлурга ЗАО «Кушвинский завод прокатных валков», Кушва, Россия. E-mail: ildar@kzpv.ru. ORCID: orcid.org/0000-0002-8309-4326

Феоктистов Николай Александрович – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6091-7983

Фролов Владимир Алексеевич – студент магистратуры института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Хабибуллин Шамиль Маратович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID: 0000-0002-1543-3015

Харитонов Вениамин Александрович – канд. техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: v.kharitonov@magtu.ru

Ценев Николай Кузьмич – канд. физ.-мат. наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия. E-mail: nktsenev@yandex.ru

Шугуров Владимир Викторович – Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Якимвук Ольга Викторовна – аспирантка института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

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 СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

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

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@magtu.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 не редактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_{\text{н}}/I_{\text{н0}}$ 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.