

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2019. Т.17, №3

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 (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, РИНЦ, ВИНТИ и др. 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. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), В.Е. Громов (Россия),
Я. Грум (Словения), М. Дабала (Италия),
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), М. Пьетшик (Польша),
В.Ф. Рашников (Россия), Г.А. Роджерсон (Великобритания),
В.М. Счастливцев (Россия), О.Н. Тулупов (Россия),
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмин (Россия),
Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмин
Выпускающий редактор Г.С. Гун
Ответственный секретарь 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», 2019

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 25.09.2019. Заказ 280. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2019. Vol. 17, no. 3

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and Cand.Sci. dissertations. Information about the journals can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI (Russian Science Citation Index), VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

M. Dabala (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Fengm (China),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khamshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK), V.F. Rashnikov (Russia),
G.A. Rogerson (UK), V.M. Schastlivtsev (Russia),
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

A.G. Korchunov, O.S. Logunova,

V.R. Khamshin, N.N. Orekhova

Executive Editor G.S. Gun

Executive Secretary 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, 2019

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: 25.09.2019. Order 280. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В.</i>	
Изучение физико-химических и флотационных характеристик композиционных флотореагентов	4
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	12
<i>Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.</i>	
Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода	12
Литейное производство	19
<i>Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х.</i>	
Численное определение плотности теплового потока по экспериментальным данным процесса деформации стальной полосы на опытной установке непрерывного литья и деформации	19
<i>Вдовин К.Н., Точилкин Вас.В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В.</i>	
Конструкции и расчет металлоприемника промежуточного ковша симметричной многоручьевого МНЛЗ	25
Обработка металлов давлением	31
<i>Каменецкий Б.И., Комкова Д.А.</i>	
Метод создания и расчет противодавления в экспериментах по холодному обратному выдавливанию магния	31
Технологии обработки материалов	38
<i>Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р.</i>	
Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки	38
Материаловедение и термическая обработка металлов	46
<i>Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.</i>	
Исследование влияния режимов термической обработки с нагревом в среде водорода на свойства твердого сплава марки Т15К6	46
Стандартизация, сертификация и управление качеством	54
<i>Протасьев В.Б., Аникеева О.В., Исламова О.В., Червяков Л.М.</i>	
Система глубинных знаний Э. Деминга и возможности ее использования в России	54
<i>Ширяева Е.Н., Полякова М.А.</i>	
Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации	60
Надежность и долговечность металлургического оборудования	70
<i>Найгерт К.В., Целищев В.А.</i>	
Защита приводных систем от гидродара магнитореологическими устройствами	70
Сведения об авторах	78

CONTENTS

Mineral Mining	4
<i>Kenzhaliev B.K., Tusupbaev N.K., Medyanik N.L., Semushkina L.V.</i>	
Understanding the Physico-Chemical and Flotation Characteristics of Composite Flotation Reagents	4
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	12
<i>Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V.</i>	
Material Composition of Karabash Copper Smelter Slags	12
Metal Casting	19
<i>Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh.</i>	
Numerical Determination of the Heat Flux Density on the Basis of Experimental Data of a Steel Strip Deformed in a Pilot Continuous Casting and Deformation Unit	19
<i>Vdovin K.N., Tochilkin Vas.V., Dobrynin S.M., Melnichuk E.A., Tochilkin V.V.</i>	
Design and Calculation of the Impact Box for a Symmetrical Multi-Strand Tundish	25
Metal Forming	31
<i>Kamenetskiy B.I., Komkova D.A.</i>	
Creating and Calculating Backpressure During Experiments in Cold Backward Extrusion of Magnesium	31
Material Process Engineering	38
<i>Kartashev M.F., Permyakov G.L., Trushnikov D.N., Mindibaev M.R.</i>	
Understanding the Effect of Work Hardening on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy 5056 Specimens Produced by Multilayer Surfacing	38
Materials Science and Heat Treatment of Metals	46
<i>Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V.</i>	
Understanding the Effect of Heat Treatment Involving Heating in Hydrogen Medium on the Properties of T15K6 Grade Hard Alloy	46
Standardization, Certification and Quality Management	54
<i>Protasiev V.B., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Chervyakov L.M.</i>	
E. Deming's System of Profound Knowledge and the Possibility of its Use in Russia	54
<i>Shiriaeva E.N., Polyakova M.A.</i>	
Dependability Assessment of Manufacturing and Engineering Systems on the Basis of Applicable Standards	60
Reliability and Service Life of Metallurgical Facilities	70
<i>Naigert K.V., Tselishchev V.A.</i>	
Protection of Drive Systems from Hydraulic Impacts with the Help of Magnetorheological Devices	70
Information about Authors	78

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.765

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ФЛОТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ФЛОТОРЕАГЕНТОВ

Кенжалиев Б.К.¹, Тусупбаев Н.К.¹, Медяник Н.Л.², Семушкина Л.В.¹¹Satbayev University, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): повышение селективности реагентов режимов при флотации сульфидных минералов достигается за счет использования в качестве собирателей органических соединений сложной молекулярной структуры либо сочетаний собирателей. Исследование поверхностно-активных и флотационных свойств композиционного аэрофлота с учетом кинетики процесса адсорбции реагентов на границе раздела жидкость-газ и сопоставление его с базовыми реагентами является актуальной задачей.

Цель работы: разработка способа получения эффективных композиционных аэрофлотов из отходов спиртового производства, определение их физико-химических и флотационных характеристик. **Используемые методы:** пилотная установка для синтеза реагентов (R-620 Selecta, Испания), измерение поверхностного натяжения – метод Вильгельми, флотация. **Новизна** заключается в том, что в отличие от базовых собирателей, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые ксантогенаты и аэрофлоты), композиционные собиратели являются более поверхностно-активными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения. **Результат:** сырьем для получения композиционного аэрофлота является смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесьсивушных масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов). Показано, что за равные промежутки времени по наибольшему снижению величины поверхностного натяжения аэрофлоты располагаются в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, т.е. наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот. Механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с сульфидными минералами заключается в том, что на поверхности минералов происходит усиление гидрофобизации в результате перекрывания углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп. Проведены испытания по флотации золотосодержащей руды месторождения Бестобе с применением композиционного аэрофлота. При использовании нового композиционного аэрофлота на руде «Шахта Новая» месторождения Бестобе содержание золота в концентрате увеличивается на 15,07%, извлечение золота в концентрат – на 18,74% при полном исключении из процесса флотации базовых реагентов – бутилового ксантогената калия и пенообразователя Т-92. На золотосодержащей руде месторождения «Карабулак» применение нового композиционного аэрофлота позволило исключить из процесса флотации бутиловый ксантогенат калия и вспениватель Т-92, при этом повысить извлечение золота на 8,5 % и увеличить содержание золота в концентрате на 2,3 г/т. Результаты испытания показали, что применение композиционного аэрофлота взамен базовых значительно интенсифицирует технологический процесс флотации руд благородных металлов. **Практическая значимость:** результаты исследований рекомендуется использовать для интенсификации флотационного обогащения труднообогатимых руд.

Ключевые слова: композиционные флотореагенты, минералы, поверхностное натяжение, смачивание, адсорбция, флотация.

Введение

Современная практика применения собирателей при флотации сульфидных руд в большинстве случаев предусматривает совместное использование ксантогенатов и аэрофлотов. Дополнительное к ксантогенатам использование аэрофлотов дает возможность не только улуч-

шить качество получаемых сульфидных концентратов за счет более селективного действия аэрофлотов, но и повысить извлечение металлов за счет способности аэрофлотов эффективно флотировать тонкие частицы [1–3].

В работе [3] приводятся результаты испытаний по флотации сульфидных медных минералов с применением гексилового ксантогената фирмы «Хёхст» и его смесей с бутиловым и изопропиловым ксантогенатами. Показано, что при использовании смеси гексилового и бутилового

© Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В., 2019

ксантогенатов при снижении ее расхода с 70 до 50 г/т извлечение меди увеличивается на 0,4%.

Результаты экспериментальных исследований собирателей из класса диалкилдитиофосфатов (аэрофлотов) показывают, что их совместное применение с ксантогенатами во многих случаях обеспечивает повышение извлечения металлов на 1–2% [4]. При оптимальном их соотношении наблюдается эффективная флотация минералов, которые не обладают природной гидрофобностью [1]. При наличии на поверхности только одной из форм сорбции собирателя такие минералы плохо флотируются. Для эффективной флотации природно-гидрофобных минералов достаточно наличия на их поверхности одного физически адсорбированного собирателя [1]. Полученные результаты подтверждаются широким кругом исследований и позволяют объяснить практически все непонятные с позиций рассмотренных теорий и гипотез явления во флотации [1,5]. Они позволяют также считать, что сущностью методов повышения эффективности и интенсификации флотации, часто приписываемых синергизму действия реагентов, является обеспечение оптимального соотношения химически закрепившегося и физически адсорбированного собирателя на поверхности флотируемых минералов. Использование смесей собирателей является эффективным средством для получения необходимого соотношения количеств химически и физически сорбированного собирателя на поверхности флотируемого минерала. В случаях комбинаций анионного и катионного собирателей используется противоположная направленность их гидролиза с изменением pH, а при использовании смеси ксантогенатов – различная способность их низших и высших гомологов к окислению на минеральной поверхности до диксантогенида. При использовании во флотации композиций собирателей механизм их взаимодействия с поверхностью минералов определяется особенностями поверхности минералов и активностью каждого компонента собирателя. Технологические результаты флотации зависят от соотношения компонентов и от последовательности их дозирования [5]. Однако используемые на практике композиционные реагенты представляют собой физическую смесь известных флотореагентов в определенных массовых соотношениях. Но эти реагенты дают небольшой эффект повышения извлечения цветных и благородных металлов в концентрат – на 0,5–2%, зависящий от оптимального соотношения компонентов.

Существуют разные точки зрения на механизм действия сочетания слабого и сильного со-

бирателей. Но в основном многие ученые считают, что эффект действия связан с формированием адсорбционного слоя на поверхности разделяемых минералов [6–10]. Абрамов А.А. сформулировал принцип об оптимальном соотношении химической и физической форм сорбции собирателей на поверхности минералов для эффективной флотации. Установлено, что диксантогенид способствует флотации сростков сульфидных минералов крупных классов, наиболее хорошие результаты получены при массовой доле диксантогенида 15–40%. Тионокарбаматы (ИТК, Z-200 и др.) отличаются повышенной флотационной активностью к медным сульфидным минералам. А в сочетании с бутиловым ксантогенатом тионокарбаматы способствуют повышению флотируемости галенита из сульфидных полиметаллических руд.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Сырьем для получения композиционного аэрофлота является смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесь сивушных масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов).

Состав сивушного масла Талгарского спиртзавода в результате фракционной разгонки составил: этанол – 0–5%; н-пропанол – 5–11%; изопропанол – 0–6%; изобутанол – 14–24%; изоамиловый спирт – 50–68%, а сивушное масло Айдабульского спиртзавода имеет следующий состав: этанол – 0–6%; н-пропанол – 6–13%; изопропанол – 0–6%; изобутанол – 15–28%; изоамиловый спирт – 54–71%.

Отработаны оптимальные параметры синтеза композиционного аэрофлота на пилотной установке (R-620 Selecta, Испания).

Синтез композиционного аэрофлота осуществлялся следующим образом.

В реактор, снабженный механической мешалкой, термометром, обратным холодильником и воронкой для ввода сыпучих веществ, помещают 12,0 кг осушенного сивушного масла (14,7 л) и при перемешивании подогревают до 60°C, после чего загружают пятисернистый фосфор в реактор небольшими порциями в количестве 7,6 кг, со скоростью, рекомендуемой по температуре в реакторе 65–70°C. Реакционную смесь при перемешивании выдерживают при 70°C в течение 2 ч, после чего охлаждают и выгружают в промежуточный реактор. Во время реакции происходит выделение сероводорода. Получают 18,10 кг маслянистой коричневой жидкости, содержащей 0,31 кг примесей (в виде

непрореагировавшего P_2S_5), газообразный продукт 1,78 кг. Выход по стадии 91,10%. Образующийся при реакции сероводород через обратный холодильник, в котором происходит конденсация спирта, поступает на две последовательно сообщающиеся склянки Вульфа с раствором гидросульфата натрия ($NaHSO_4$) и гидроксида натрия ($NaHSO_4$ – 20 г/дм³, $NaOH$ – 40 г/дм³) для поглощения газа. Полученную реакционную массу 17,98 кг, содержащую непрореагировавший пентасернистый фосфор, фильтруют под вакуумом 100–200 мм рт. ст. в колбе Бунзена. Получают отфильтрованную реакционную массу, содержащую смесь диалкилдитиофосфорных кислот (ДАДТФК) и отдельно примеси. Масса фильтрата 16,12 кг, выход 86,92%.

В реактор с обратным холодильником, термометром, капельницей для подачи эфира помещают раствор едкого натра 5,06 л (раствора массовой концентрации 37%) с учетом 32% избытка щелочи. Нагревают до 40°C, при интенсивном перемешивании подают 12,95 л кислого эфира. Нейтрализацию проводят в течение 30–40 мин при температуре 25–30°C. Капля реакционной массы должна окрашивать 0,1%-ный водный раствор индикатора бромфенолового красного в красно-сиреневый цвет. Продукт при температуре 25°C густеет и при 30°C становится подвижным, но при комнатной температуре загустевает. Масса полученного аэрофлота 20,47 кг, выход – 95,39%, содержание основного вещества в пересчете на натриевую соль диизоамилдитиофосфорной кислоты 62,10%. Массовая доля гидроксида натрия 3,1%. При исследовании процесса нейтрализации установлено, что при определении необходимого для нейтрализации количества едкого натра нужно предусмотреть дополнительное его введение для обеспечения избыточной щелочности в готовом продукте в пределах 2,5–4%, с тем чтобы избежать возможности выделения сероводорода при хранении.

Для существенного удешевления и повышения эффективности реагентов при получении ксантогенатов и аэрофлотов в качестве исходного сырья было использовано специально подготовленное сивушное масло, являющееся отходом спиртового производства. Очищенное сивушное масло по данным хроматографического анализа включает пять спиртов (изопропиловый, изобутиловый, бутиловый, амиловый и изоамиловый), содержание изоамилового спирта в них колеблется в пределах 50–65%.

Композиционный аэрофлот, имеющий в своем составе углеводородные радикалы нормаль-

ного и изостроения на границе раздела фаз «вода–воздух», может образовывать уплотненные гидрофобные пленки за счет дисперсионного взаимодействия, т.е. более прочные пузырьки приблизительно одинакового размера, а полярная часть становится более доступной для взаимодействия с поверхностью сульфидных минералов. С другой стороны, плотной гидрофобной частью он может гидрофобизировать более крупные частицы и флокулировать тонкие гидрофобные шламы.

Важной физико-химической характеристикой различной структуры и смеси аэрофлотов является их поверхностная активность на границе раздела жидкость–газ. На наш взгляд, необходимо учитывать не только поверхностную активность реагента, но и кинетику процесса адсорбции соединения на границе раздела жидкость–газ.

Показано, что исследованные аэрофлоты обладают способностью снижать поверхностное натяжение на границе раздела вода–воздух аналогично поверхностно-активным веществам. Однако для них характерно медленное установление равновесия на границе раздела вода–воздух, особенно в области низких флотационных концентраций (рис. 1).

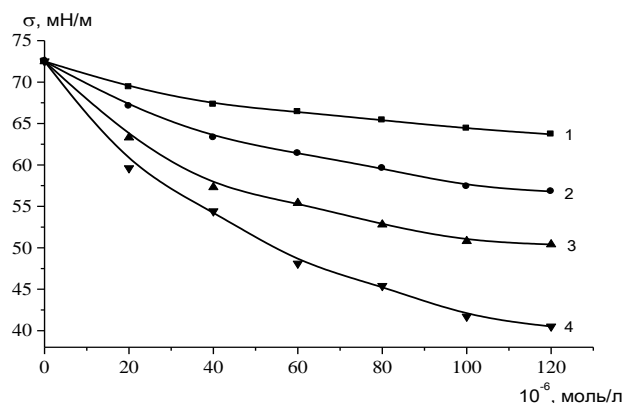


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения, измеренного после 4-часового выдерживания от концентрации различных аэрофлотов:

1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – смесь бутилового аэрофлота с изоамиловым аэрофлотом при соотношении = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

На рис. 2 приведены значения $\sigma_{ж-г}$, близкие к равновесным (статическим), измеренные после 4 ч. Из данных рис. 2 следует, что наиболее эффективным поверхностно-активным веществом является композиционный аэрофлот. Исследование кинетики процесса адсорбции на границе вода–воздух показало, что для растворов в области малых концентраций $(10\text{--}60) \cdot 10^{-6}$ моль/л наблюдалось уменьшение $\sigma_{ж-г}$ в течение 4–6 ч.

Результаты изучения зависимости $\sigma_{ж-г} = f(\tau)$, где τ – период времени от 1 мин до 1 ч, для растворов равной концентрации $60 \cdot 10^{-6}$ моль/л, при которой различие в поверхностно-активных свойствах аэрофлотов максимально (см. **рис. 1**), представлены на **рис. 2**. Из результатов измерений, приведенных на **рис. 2**, следует, что за равные промежутки времени наибольшее снижение величины располагается в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, то есть наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот.

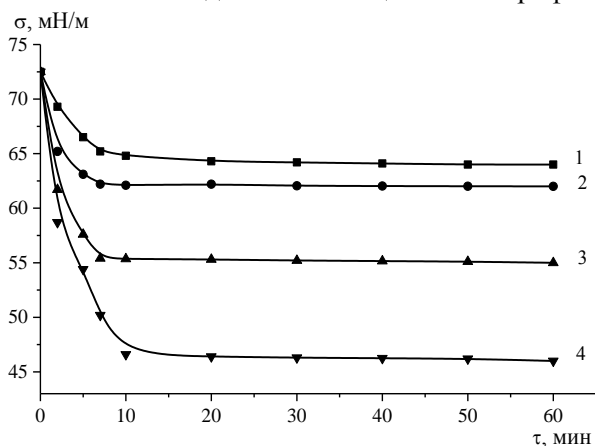


Рис. 2. Кинетические кривые изменения поверхностного натяжения различных аэрофлотов при их одинаковой концентрации равной $60 \cdot 10^{-6}$ моль/л: 1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – бутиловый аэрофлот: изоамиловый аэрофлот = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

Наиболее сильными собирательными свойствами по отношению к галениту, сфалериту из числа испытанных реагентов обладает композиционный аэрофлот. Результаты мономинеральной флотации сфалерита в зависимости от концентрации аэрофлотов приведены на **рис. 3**. Как следует из данных **рис. 3**, максимальная скорость флотации наблюдается также при подаче композиционного аэрофлота.

Результаты опытов флотации галенита различными аэрофлотами представлены на **рис. 4**.

Аналогично опытам со сфалеритом, наиболее высокое извлечение галенита достигается при использовании композиционного аэрофлота. Исследования поверхностной активности изучаемых продуктов показали, что композиционный аэрофлот обладает способностью снижать поверхностное натяжение на границе раздела жид-

кость–газ аналогично сильным поверхностно-активным веществам, а также обнаружено медленное установление равновесия на границе раздела жидкость–газ в области низких флотационных концентраций.

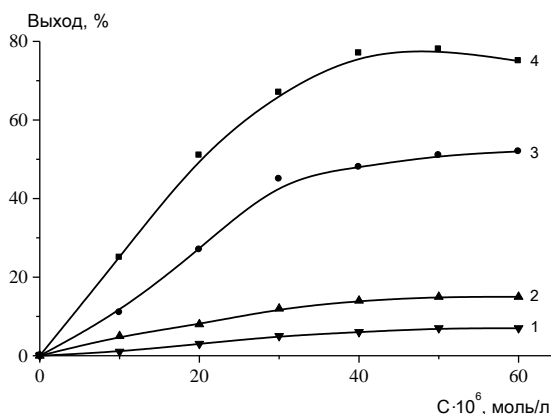


Рис. 3. Зависимость флотуемости сфалерита от концентрации различных аэрофлотов: 1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – смесь бутилового аэрофлота: изоамиловый аэрофлот = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

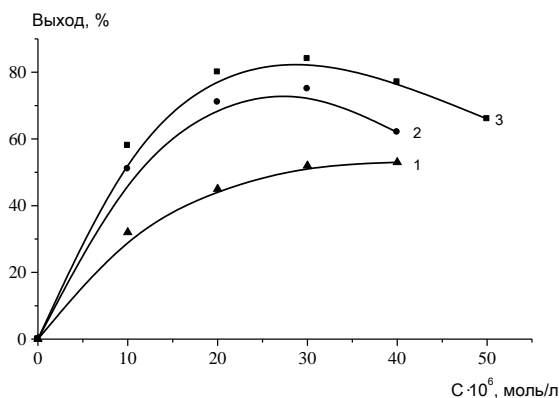


Рис. 4. Зависимость флотуемости галенита от концентрации различных аэрофлотов: 1 – изоамиловый аэрофлот; 2 – смесь бутилового аэрофлота: изоамиловый аэрофлот = 1:1; 3 – композиционный аэрофлот

В работе [11] высказано предположение, что на флотационные свойства высших аэрофлотов существенное влияние могут оказывать их сильные поверхностно-активные свойства. Этот факт установлен Г.В. Живанковым и В.И. Рябым [12] при изучении поверхностно-активных свойств в ряду диалкилдитиофосфатов с длиной углеводородной цепи C_4 – C_{12} . Было показано, что собирательная способность диалкилдитиофосфатов по отношению к сульфидам симбатна отношению $d\sigma/d\tau$ (где σ – величина поверхностной активно-

сти, мН/м; τ – время, с), т.е. скорости установления равновесия поверхностного натяжения водных растворов диалкилдитиофосфатов. Сначала скорость возрастает с увеличением длины радикала диалкилдитиофосфата до C_{10} , а затем начинает снижаться. Диалкилдитиофосфату C_{10} соответствуют максимум извлечения сульфидов и максимальная скорость установления равновесия на границе раздела жидкость–газ.

Сравнение результатов флотационных опытов и поверхностной активности показывает, что собирательная сила реагентов и скорость флотации симбатны динамическим, а не статическим значениям поверхностной активности исследованных различных аэрофлотов. Следовательно, чем с большей скоростью происходит установление равновесия на границе жидкость–газ в начальный момент времени, тем большей флотационной активностью обладает реагент.

Обнаружена зависимость между кинетической характеристикой реагентов и их флотационной способностью. Эта зависимость может быть использована в качестве критерия флотационной способности различной структуры и смеси аэрофлотов. Аналогичная зависимость, полученная в работе [12], показала, что выявленная симбатность между зависимостью $\Delta\sigma = f(\tau)$ при постоянной концентрации и собирательным действием реагентов будет сохраняться для гомологических рядов высших аэрофлотов. Данное предположение следует из рассмотрения элементарного флотационного акта. При взаимодействии гидрофобизированной частицы с пузырьком воздуха, имеющим динамическое значение величины $\sigma_{жг}$, возможен переход некоторой части ПАВ с границы раздела твердое–жидкость на границу раздела жидкость–газ. Переход и последующее растекание реагента по всей поверхности пузырька обуславливает уменьшение свободной энергии системы, и следовательно, чем выше поверхностная активность собирателя на границе раздела жидкость–газ, тем больше вероятность прилипания частицы. Однако, с другой стороны, с увеличением углеводородной цепи (что симбатно изменению поверхностно-активных свойств) возрастает дисперсионное взаимодействие молекул, в результате чего их переход с твердой поверхности на границу раздела жидкость–газ становится менее вероятным. Этим объясняется тот факт, что обладающий большей поверхностной активностью додециловый аэрофлот уступает по собирательной силе дециловому [12]. Изложенное позволяет наметить новый подход к определению оптимального углеводородного радикала собирателя на основе использования кинетической характеристики капиллярных свойств реагента. Мето-

дом радиоактивных изотопов был экспериментально подтвержден переход собирателя с границы раздела ж–т на границу ж–г. Предположение о возможности такого перехода ранее было высказано Сазерлендом и Уорком. В изучении механизма закрепления гидрофобизированной минеральной частицы на пузырьке воздуха это положение является фундаментальным и интенсивно исследуется за рубежом и в России [11, 13–15]. Согласно этим представлениям такой переход собирателя способствует повышению кинетики утоньшения пленки воды между пузырьком и частицей, что в отдельных случаях увеличивает скорость флотации и извлечение минералов. Влияние и следствия такого перехода с термодинамических позиций сформулированы Г.В. Живанковым [16]. Эти исследования явились базой для разработки более эффективных типов диалкилдитиофосфатных реагентов и составов на их основе.

Возможный механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с минералами цинка и свинца заключается в следующем: композиционный аэрофлот при адсорбции на поверхности минералов приводит к усилению гидрофобизации за счет перекрывания углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп.

Проведены испытания по флотации золотосодержащей руды месторождения Бестобе с применением композиционного аэрофлота. По результатам испытаний, в сравнении с действующим фабричным режимом, установлено, что при применении нового композиционного аэрофлота на руде «Шахта Новая» месторождения Бестобе содержание золота в концентрате увеличивается на 15,07%, извлечение золота в концентрат увеличивается на 18,74% при полном исключении из процесса флотации базовых реагентов – бутилового ксантогената калия и пенообразователя Т–92.

На золотоизвлекательной фабрике ТОО «ИНВЕСТ-РТ» проведены испытания по флотации сульфидной золотосодержащей руды месторождения «Карабулак» с применением нового композиционного аэрофлота, в ходе которых переработано порядка 840 т руды с содержанием золота 1,0–1,12 г/т.

Вещественный состав руды месторождения «Карабулак» характеризуется следующим образом: валовое содержание сульфидов в рудах от 3 до 7%, из них от 4 до 6% приходится на пирит, 1–1,5% на арсенопирит, остальные рудные минералы. Из нерудных минералов присутствуют кварц, слюдястые минералы, в т.ч. графитоид. Основные результаты работы по двум сравнительным режимам, приведены в **таблице**. По результатам промышленных испытаний установлено: в дей-

ствующем базовом (фабричном) режиме с применением бутилового ксантогената калия и вспенивателя Т-92 среднее извлечение золота в концентрат с содержанием 22,0 г/т составило 76,7%; при применении нового композиционного аэрофлота извлечение золота составило 85,2% при содержании в концентрате 24,3 г/т.

Результаты флотации золотосодержащих руд месторождения «Карабулак»

Наименование	Выход, %	Содержание, г/т	Извлечение, %	Реагентный режим
Флотационный концентрат	3,90	22,0	76,7	При действующем базовом (фабричном) реагентном режиме
Хвосты	96,10	0,27	23,3	
Исходная руда	100	1,12	100	
Флотационный концентрат	3,92	24,3	85,2	При применении в реагентном режиме нового композиционного собирателя-аэрофлота
Хвосты	96,08	0,17	14,8	
Исходная руда	100	1,12	100	

Применение нового композиционного аэрофлота позволило исключить из процесса флотации бутиловый ксантогенат калия и вспениватель Т-92, при этом повысить извлечение золота на 8,5% и увеличить содержание золота в концентрате на 2,3 г/т.

Заключение

Получены композиционные реагенты (композиционный аэрофлот и композиционный ксантогенат), сырьем для которых является композиционная смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесь сивушных масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов).

Отработаны оптимальные параметры синтеза композиционных реагентов на пилотной установке (R-620 Selecta, Испания).

Получения эффективных композиционных собирателей можно достичь путем регулирования углеводородных радикалов нормального и изостроения при их синтезе. В отличие от базовых собирателей, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые ксантогенаты и аэрофлоты), композиционные собиратели являются более поверхностно-активными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения. При перекрывании указанных углеводородных радикалов обнажаются полярные группы, и это приводит к усиле-

нию собирательных свойств. Композиционные собиратели, в отличие от своих аналогов, являются дешевыми, экономически выгодными реагентами. Для получения указанных собирателей исходным сырьем является специально подготовленное сивушное масло, являющееся отходом спиртового производства.

В качестве одного из существенных критериев оценки собирательной силы различной структуры и смеси аэрофлотов и их скорости флотации предложено использовать зависимость $\sigma_{жг} = f(\tau)$. На основании установленной зависимости в качестве сильного собирателя сульфидов предложено использовать композиционные аэрофлоты, полученные из сивушного масла.

Показано, что за равные промежутки времени по наибольшему снижению величины поверхностного натяжения аэрофлоты располагаются в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, т.е. наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот.

В отличие от базовых собирателей, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые аэрофлоты), композиционные собиратели являются более эффективными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения.

Механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с сульфидными минералами заключается в том, что на поверхности минералов происходит усиление гидрофобизации в результате перекрывания углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп.

Результаты испытаний показали, что применение указанных реагентов взамен базовых значительно интенсифицирует технологический процесс флотации руд благородных металлов.

Список литературы

1. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. 3-е изд. М.: МГУ, 2008. 670 с.
2. Рябой В.И. Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. 2011. №3. С.7–14.
3. Матвеева Т.Н. Современные реагентные режимы флотации платины и золотосодержащих руд // Проблемы освоения недр в XXI в. глазами молодых: материалы 5-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. Москва: Изд-во ИПКОН РАН, 2008. С.12–15.
4. Селективное повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов с использованием сочетаний

- сульфидрильных собирателей //Игнаткина В.А., Боcharov В.А., Милович Ф.О. и др. // Обогащение руд. 2015. №3. С.18–24. <https://doi.org/10.17580/or.2015.03.03>
5. Ignatkina V.A., Bocharov V.A. and B.T. Tubdenova (Puntsukova). Combinations of different-class collectors in selective sulphide-ore flotation // Journal of Mining Science, Springer New York. 2010. Vol. 46. № 1. P. 82–88.
6. Alan N. Buckley, Gregory A. Hope, Kenneth C. Lee, Eddie A. Petrovic, Ronald Woods Adsorption of O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate on Cu sulfide ore minerals // Minerals Engineering. 2014. Vol. 69. P. 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.002>
7. Bekturganov N.S., Tussupbayev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K. Application of multifunctional flotation reagents for processing of man-made raw materials // Materials 16th SGEM GeoConferences. Bulgaria. 2016. P.1035–1042.
8. Флотационная переработка техногенного минерального сырья с использованием композиционного реагента / Тусупбаев Н.К., Семушкина Л.В., Турысбеков Д.К., Сугурбекова А.К., Мухамедилова А.М. // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2016. С.214–216.
9. Влияние поверхностно-активных свойств реагентов, содержащих диалкилдитиофосфаты натрия, на флотацию сульфидов / Рябой В.И., Шепета Е.Д., Кретов В.П. и др. // Обогащение руд. 2015. № 2. С.18–22. <https://doi.org/10.17580/or.2015.02.04>
10. Коллоидно-химические и флотационные характеристики полифункциональных реагентов / Билялова С.М., Тусупбаев Н.К., Ержанова Ж.А. и др. // Комплексное использование минерального сырья. 2017. № 1. С.5–10. www.kims-imio.kz
11. Рябой В.И. Исследования ООО «Механобр-Оргсинтез-реагент» в области флотореагентов // Обогащение руд. 2016. № 5. С.67–74.
12. Живанков Г.В., Рябой В.И. Собирательные свойства и поверхностная активность высших аэрофлотов // Обогащение руд. 1985. № 3. С.48–55.
13. Pan Lei, Jung Sunghwan, Yoon Rol-Hoan. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction // Int. J. Miner. Process. 2012. Vol. 106–109. P. 37–41.
14. Karimian A., Rezaei B., Masoumi A. The effect of mixed collectors in the rougher flotation of sungun copper // Life Science Journal. 2013. No. 10. P. 268–272.
15. Nooshabadi A.J., Rao K.H. Formation of hydrogen peroxide by sulphide minerals // Hydrometallurgy. 2014. No. 141. P. 82–88.
16. Improvement of diamond recovery in froth of kimberlite ores with the help of flotation reagents / V.I. Ryaboy, G.V. Zhivankov, V.A. Shenderovich, M.N. Zlobin, M.V. Zaskevich // XX IMPC. Aachen, Germany, 1997. P. 81–84.

Поступила 03.06.19

Принята в печать 08.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

UNDERSTANDING THE PHYSICO-CHEMICAL AND FLOTATION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE FLOTATION REAGENTS

Bagdaulet K. Kenzhaliev – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector at Satbayev University, General Director Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Almaty, Kazakhstan

Nesipbay K. Tusupbaev - Dr.Sci. (Eng.), Head of Flotation Reagents and Beneficiation Laboratory Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: nesipbay@mail.ru

Nadezhda L. Medyanik - Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Chemistry Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: medyanikmagnitka@mail.ru

Larisa V. Semushkina – Cand.Sci. (Eng.), Lead Researcher at the Flotation Reagents and Beneficiation Laboratory Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: syomushkina.lara@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): Selectivity of reagents used in sulphide mineral flotation can be increased through the use of organic compounds with complex molecular structures or combinations of collecting reagents. It is an important task to look at the surface activity and flotation properties of composite aerofloat taking into account the kinetics of the reagent adsorption at the liquid-gas interface and to compare aerofloat with basic reagents. **Objectives:** To develop a method for obtaining effective composite aerofloats from waste alcohol and to determine their physico-chemical and flotation properties. **Methods Applied:** A pilot plant for synthesizing reagents (R-620 Selecta, Spain), surface tension measurements - Wilhelmy plate method, flotation. **Originality:** The originality of this research lies in the fact that, unlike basic collectors which contain normal hydrocarbon radicals (normal butyl xanthates and aerofloats), composite collectors are more surface-active due to the hydrophobic interaction of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. **Findings:** The material for the production of composite aerofloats includes a mixture of C₃H₇-C₆H₁₃-OH alcohols isolated from a dry alcohol fraction (a mixture of fusel oils from Talgar and Aydabulsky distilleries). It is shown that the aerofloats can be arranged in the following order in terms of the biggest drop in the surface tension over equal periods of time: composite aerofloat > a mixture of butyl and isoamyl aerofloat > isoamyl aerofloat > butyl aerofloat. It means that compo-

nalities: The originality of this research lies in the fact that, unlike basic collectors which contain normal hydrocarbon radicals (normal butyl xanthates and aerofloats), composite collectors are more surface-active due to the hydrophobic interaction of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. **Findings:** The material for the production of composite aerofloats includes a mixture of C₃H₇-C₆H₁₃-OH alcohols isolated from a dry alcohol fraction (a mixture of fusel oils from Talgar and Aydabulsky distilleries). It is shown that the aerofloats can be arranged in the following order in terms of the biggest drop in the surface tension over equal periods of time: composite aerofloat > a mixture of butyl and isoamyl aerofloat > isoamyl aerofloat > butyl aerofloat. It means that compo-

site aerofloats have the highest dynamic value of surface activity. The interaction of composite aerofloats with sulphide minerals takes place when the surface hydrophobization of the minerals becomes stronger as a result of overlapping of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. At the same time, its flotation activity improves due to the exposure of their polar groups. Tests have been carried out on the flotation of gold-bearing ore from the Bestobe deposit using composite aerofloat. When the new composite aerofloat was applied on the Shakhta Novaya ore of the Bestobe deposit, the concentration of gold in the concentrate increased by 15.07%. The recovery of gold into the concentrate increased by 18.74% when the basic reagents – i.e. potassium butyl xanthate and T-92 foaming agent – were completely excluded from the flotation process. Application of the new composite aerofloat at the Karabulak gold deposit saved the need for using potassium butyl xanthate and T-92 foaming agent in the flotation process. At the same time the gold recovery rose by 8.5% and the concentration of gold in the concentrate increased by 2.3 g/t. The test results indicate that composite aerofloats used instead of the basic reagents significantly intensify the flotation of noble metal ores. **Practical Relevance:** The results of this research can be used to intensify the flotation of refractory ores.

Keywords: Composite flotation reagents, minerals, surface tension, wetting, adsorption, flotation.

References

1. Abramov A.A. *Flotatsionnye metody obogashcheniya* [Flotation methods of mineral enrichment]. 3rd ed. Moscow: MSMU, 2008. 670 p. (In Russ.)
2. Ryaboy V.I. The problems of usage and development of new flotation reagents in Russia. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2011, no. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
3. Matveeva T.N. Modern reagent regimes for the flotation of platinum and gold-bearing ores. *Problemy osvoyeniya nedr v XXI v. glazami molodykh: materialy 5-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of subsoil development in the 21st century as viewed by the young: Proceedings of the 5th International Scientific School of Young Researchers and Experts]. Moscow: IPKON RAS, 2008, pp. 12–15. (In Russ.)
4. Ignatkina V.A., Bocharov V.A., Milovich F.O. et al. Selective increase in the flotation response of non-ferrous metal sulphides using combinations of sulphhydryl collectors. *Obo-gashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2015, no. 3, pp. 18–24. <https://doi.org/10.17580/or.2015.03.03> (In Russ.)
5. Ignatkina V.A., Bocharov V.A. and B.T. Tubdenova (Puntsukova). Combinations of different-class collectors in selective sulphide-ore flotation. *Journal of Mining Science*, Springer New York. 2010, vol. 46, no. 1, pp. 82–88.
6. Alan N. Buckley, Gregory A. Hope, Kenneth C. Lee, Eddie A. Petrovic, Ronald Woods Adsorption of O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate on Cu sulfide ore minerals. *Minerals Engineering*. 2014, vol. 69, pp. 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.002>
7. Bekturganov N.S., Tussupbayev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K. Application of multifunctional flotation reagents for processing of man-made raw materials. *Materials 16th SGEM GeoConferences*. Bulgaria. 2016, pp.1035–1042.
8. Tusupbaev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K., Sugurbekova A.K., Mukhamedilova A.M. Flotation processing of manmade mineral materials using a composite reagent. *Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific basis and the practice of processing ores and manmade raw materials: Proceedings of the International Conference]. Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2016, pp. 214–216. (In Russ.)
9. Ryaboy V.I., Shepeta E.D., Kretov V.P. et al. Effect of the surface-active properties of reagents containing sodium dialkyl dithiophosphates on the flotation of sulfides. *Obo-gashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2015, no. 2, pp. 18–22. <https://doi.org/10.17580/or.2015.02.04> (In Russ.)
10. Bilyalova S.M., Tusupbaev N.K., Erzhanova Zh.A. et al. Colloid-chemical and flotation properties of polyfunctional reagents. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syriya* [Comprehensive exploitation of mineral resources], 2017, no. 1, pp. 5–10. www.kims-imio.kz (In Russ.)
11. Ryaboy V.I. Research undertaken by Mekhanobr-Orgsintez-reagent in the field of flotation reagents. *Obo-gashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2016, no. 5, pp. 67–74. (In Russ.)
12. Zhivankov G.V., Ryaboy V.I. Collecting properties and surface activity of higher aerofloats. *Obo-gashchenie rud* [Beneficiation of ores], 1985, no. 3, pp. 48–55. (In Russ.)
13. Pan Lei, Jung Sunghwan, Yoon Rol-Hoan. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction. *International Journal of Mineral Processing*. 2012, vol. 106–109, pp. 37–41.
14. Karimian A., Rezaei B., Masoumi A. The effect of mixed collectors in the rougher flotation of sungun copper. *Life Science Journal*. 2013, no. 10, pp. 268–272.
15. Nooshabadi A.J., Rao K.H. Formation of hydrogen peroxide by sulphide minerals. *Hydrometallurgy*. 2014, no. 141, pp. 82–88.
16. V.I. Ryaboy, G.V. Zhivankov, V.A. Shenderovich, M.N. Zlobin, M.V. Zaskevich. Improvement of diamond recovery in froth of kimberlite ores with the help of flotation reagents. XX IMPC. Aachen, Germany, 1997, pp. 81–84.

Received 03/06/19

Accepted 08/07/19

Образец для цитирования

Изучение физико-химических и флотационных характеристик композиционных флотореагентов / Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

For citation

Kenzhaliev B.K., Tusupbaev N.K., Medyanik N.L., Semushkina L.V. Understanding the Physico-Chemical and Flotation Characteristics of Composite Flotation Reagents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 549.5:54.055

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Уральский регион уже более 300 лет является металлургическим центром России, и за столь продолжительный временной период здесь накопилось большое количество техногенных отходов (шлаков). Изучение вещественного состава шлаков является актуальной задачей, т.к. прежде чем их утилизировать, надо понять, с каким минеральным составом мы имеем дело. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать, некоторые являются техногенными огнеупорами и т.д. При этом шлаки медеплавильных производств наносят тяжелый урон окружающей экологии, т.к. они всегда содержат сульфидную составляющую, которая под действием атмосферных вод достаточно легко разлагается на серную кислоту и тяжелые металлы. **Цель работы:** изучение вещественного (минерального) состава черных шлаков Карабашского медеплавильного завода, складированных еще в советское время. **Используемые методы:** химический состав породообразующих и рудных минералов установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков черных шлаков. **Новизна:** изучение вещественного состава шлаков проводилось с точки зрения классической минералогии и с использованием современной обязательной номенклатуры Международной минералогической ассоциации. **Результат:** авторами вполне детально изучена минералогия черных шлаков Карабашского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены пижонит-оливиновым агрегатом с присутствием значительного количества стекла и редкой вкрапленности хромита, вюстита и различных сульфидных фаз. Они являются продуктами медеплавильного производства из советского периода, т.е. получены в шахтной печи в результате полупиритной окислительной плавки колчеданной руды. Температура образования данных шлаков определена по эвтектической (одновременной) кристаллизации вюстита с фаялитом и примерно равна 1170°C. **Практическая значимость:** полученные данные показывают резкое отличие черных шлаков Карабашского завода советского периода от современных шлаков этого же завода. Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, т.к. они содержат сульфиды и хромит.

Ключевые слова: пижонит, оливин, хромит, сульфиды, минералогия, шлаки, Карабашский медеплавильный завод.

Введение

В Кыштымском районе, в том числе и в пределах будущего города Карабаш, постоянно проходила интенсивная добыча медно-колчеданных руд и золота. Так получилось, что в долине г. Карабаш в разное время существовало аж три медеплавильных завода. Первый проработал всего 5 лет – с 1837 по 1842 гг., второй завод был построен в 1907 году Англо-Сибирской компанией во главе с Л.А. Урквартом, по всей видимости, как временный, т.к. совсем скоро, в 1910 году, у Золотой горы был запущен именно тот завод, кото-

рый мы все знаем. Летом 1909 года производительность Карабашского завода достигла пяти тысяч тонн меди в год [1]. К 1915 году завод уже был в числе ведущих в России по уровню технической оснащённости и объёмам производства. В годы Гражданской войны предприятие простаивало, и при Советской власти первую плавку меди провели в 1925 году. В 1989 г. завод из-за экологических проблем был остановлен и вновь запущен только в 1998 году. Ныне предприятие под названием АО «Карабашмедь» входит в крупный холдинг АО «Русская медная компания» и в настоящее время перерабатывает медный концентрат с колчеданных месторождений России и Ка-

© Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В., 2019

захстана. К сожалению, никаких данных по минеральному составу шлаков на сайте АО «Карабашмедь» не приведено, только упоминается, что они перерабатываются. По всей видимости, переработка заключается в дополнительном извлечении меди и последующем использовании полученного вторичного шлака в строительстве. По данным некоторых опубликованных источников [2–4], все шлаки Карабашского медеплавильного завода относятся к фаялитовым образованиям с небольшим количеством сульфидов (борнита, халькопирита), виллемита, вюстита, магнетита, ганита и меди, а также необычных соединений типа CaFe_5O_7 и $\text{CaFe}_7\text{O}_{11}$. Учитывая противоречивость приведенных данных, мы также решили изучить минералогию черных шлаков, производимых на Карабашском медеплавильном заводе.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Карабашского завода являются основным техногенным мусором в окрестностях города, практически вся северная окраина и центральная часть населенного пункта занята отвальными массами предприятия. Высота отвалов достигает 30–40 м, а площадь их отсыпки составляет несколько квадратных километров. Доступ к северным отвалам вполне открытый (они вплотную подступают к междугородней трассе Карабаш – Кыштым), т.к. их там складировали для заполнения подземных шахтных выработок, оставшихся после отработки медноколчеданной залежи. Этот северный отвал длинным языком тянется на 2 км вдоль шоссе, поэтому отбор проб для изучения не составил труда. Эти отвалы один из авторов статьи видел еще в 1995 году, поэтому очевидно, что они сформировались в советский период жизнедеятельности завода. Для исследования была собрана коллекция шлаков разной зернистости и стекловатости. Их окраска в основном черная до темно-серой с ксенолитами белой и серой породы, а также кусочков кварца. Образцы абсолютно немагнитные, что нас весьма удивило, т.к. фаялитовые шлаки СУМЗа [5] или Мариинского завода [6], наоборот, отличались сильной магнитностью. Размер изученных образцов не превышает 10 см, хотя мы и старались найти более крупные куски шлака; при этом сами отвалы сложены еще более мелкими фрагментами образцов. Данные образцы и были изучены на предмет минерального состава.

Химический состав породообразующих и рудных минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой

INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Л.В. Леонова). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков черных шлаков.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены преимущественно оливин-пироксеновым агрегатом с значительным содержанием стекла и постоянным присутствием хромита, вюстита и разных сульфидов систем Cu-Fe-S и Pb-Ni-S. Химический состав шлака следующий (в мас.%): SO_3 – 0,27; SiO_2 – 44,91; TiO_2 – 0,32; Cr_2O_3 – 0,40; Al_2O_3 – 8,15; $\text{FeO}_{\text{общ}}$ – 22,97; MgO – 12,89; MnO – 0,21; CuO – 0,36; ZnO – 0,25; BaO – 0,13; CaO – 8,05; K_2O – 0,77; Na_2O – 0,13. Σ 99,91. Он получен методом сканирования с поверхности всего полированного шлифа.

Пижонит является одним из главных породообразующих минералов зернистого черного шлака, и его содержание в зависимости от присутствия стекла и оливина варьирует от 20 до 40 об.% породы. Минерал образует короткопризматические и ромбовидные индивиды (рис. 1), размером до 0,1–0,2 мм. Минерал имеет переменный химический состав и определяется как пижонит (табл. 1). Пироксен содержит примеси Al_2O_3 (до 3,8 мас.%), Cr_2O_3 (до 0,7 мас.%), TiO_2 (до 0,4 мас.%), а также ZnO (до 0,9 мас.%). Содержание кальция в минерале варьирует очень значительно, от 5,5 до 11,3 мас.% CaO . Интересно, что наиболее кальциевый пижонит имеет состав $\text{En}_{48}\text{Wo}_{24}\text{Fs}_{27}$ и на диаграмме пироксенов располагается рядом с полем авгита. По данным кристаллохимического пересчета, пижонит является магнезиальным, хотя и достаточно высокожелезистым. В кристаллах пироксена достаточно четко проявлена химическая зональность, центральные и промежуточные зоны более магнезиальные, чем края индивидов. В природе пижонит – типичный минерал вулканических пород (особенно основного и ультраосновного состава), а также метеоритов [7].

Оливин в черном шлаке представлен как очень крупными игольчатыми кристаллами, размером до 1–2 мм, так и более мелкими, до 0,2–0,3 мм, короткопризматическими индивидами. Все кристаллы скелетные и зачастую футляровидные, крупные индивиды образуют структуру спинифекс, мелкие просто рассеяны по всей матрице породы. Содержание оливина в шлаке варьирует от 20–40 об.%. Кристаллы оливина ха-

рактируются резкой химической зональностью и сложены как форстеритом, так и фаялитом, что хорошо видно на BSE-снимках, где кайма индивидов более светлая (рис. 2–3).

Форстерит составляет основную массу скелетных кристаллов оливина, где занимает центральную и промежуточную часть индивидов. Форстерит относится к железистой разновидности (табл. 2, ан. 1–4). Минерал содержит примеси CaO (до 1,0 мас.%) и ZnO (до 1,8 мас.%). По данным пересчета, оливин изменяется от хризолита до гиалосидерита, т.к. содержит минал фаялита в пределах 26–43%. В природе железистый форстерит является типичным минералом вулканических пород [8 и др.].

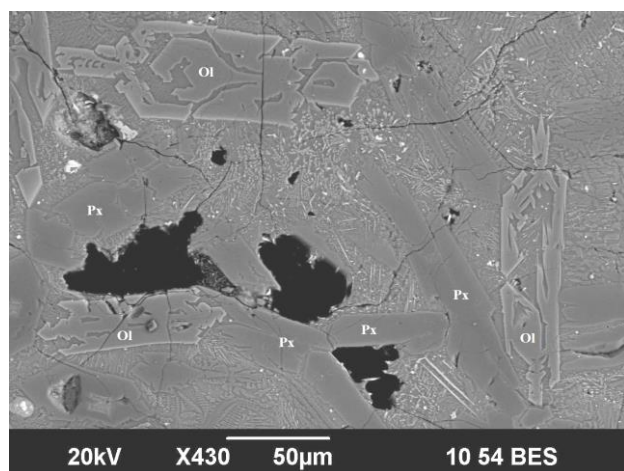


Рис. 1. Общий вид шлака Карабашского завода с кристаллами пижонита (Px) и оливина (Ol). BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

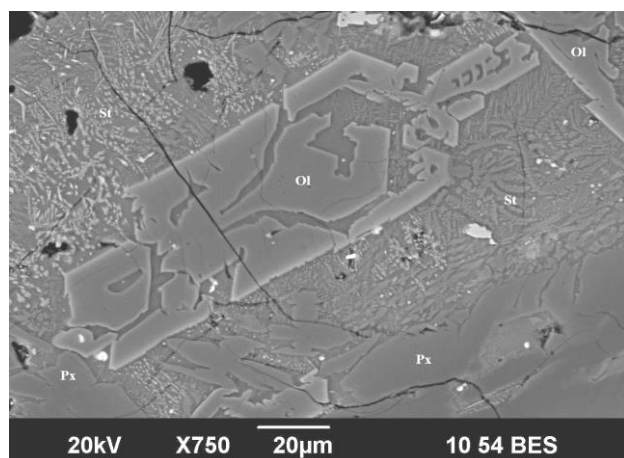


Рис. 2. Стекло (St) в интерстициях кристаллов пижонита (Px) и оливина (Ol) в матрице черного шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Фаялит в скелетных кристаллах оливина образует тонкие каймы мощностью до 10–20 мкм.

Никаких минеральных включений фаялит не содержит. Минерал достаточно уверенно относится к магнезиальному фаялиту (см. табл. 2, ан. 5–8). Он содержит примеси кальция (CaO до 1,3 мас.%), ZnO (до 2,6 мас.%), Al₂O₃ (до 2,2 мас.%) и K₂O (до 0,3 мас.%). По данным пересчета, оливин изменяется от гортонолита до феррогортонолита, т.к. содержит минал форстерита от 21 до 46%, т.е. в фаялите рассчитываются миналы форстерита (до 46%), виллемита (до 3%) и кирштейнита (до 2%). Интересно, что в медеплавильных шлаках СУМЗа фаялит содержит до 4% ZnO [5], а в никелевых шлаках Режевского завода имеет повышенный кальций, до 3% CaO [9].

Таблица 1

Химический состав пижонита из шлака Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
1	54,22	-	0,66	1,37	15,05	0,82	22,43	5,45	100
2	53,56	-	0,67	1,77	15,77	0,67	21,63	5,92	100
3	53,55	-	-	2,35	18,72	0,72	18,32	6,33	100
4	52,69	-	0,55	2,01	17,24	0,94	19,56	7,02	100
5	53,37	-	0,75	2,15	15,36	0,56	20,36	7,46	100
6	50,57	0,36	0,53	3,76	16,20	0,66	16,60	11,32	100

Примечание. Здесь и далее анализы сделаны на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с ЭДС-приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (ИГГ УрО РАН, аналитик Л.В. Леонова).

Таблица 2

Химический состав оливина в шлаках Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	K ₂ O	Сумма
форстерит								
1	39,33	-	23,79	1,03	35,22	0,63	-	100
2	38,61	-	26,36	1,14	33,47	0,42	-	100
3	38,32	-	30,10	1,19	29,44	0,95	-	100
4	37,30	-	35,94	1,77	24,28	0,69	-	100
фаялит								
5	37,16	-	38,84	1,49	21,32	0,96	0,23	100
6	35,54	-	44,68	1,76	17,16	0,86	-	100
7	34,60	-	47,30	1,97	15,35	0,77	-	100
8	33,05	2,20	51,58	2,58	9,00	1,26	0,33	100

В целом химический состав природных оливинов достаточно хорошо изучен, и они обычно содержат не более 1–2% CaO [10], хотя в одном из хондритов был установлен необычный оливин с повышенным CaO и Al₂O₃ [11]. Таким образом, оливин из Карабашских шлаков имеет свой характерный типоморфный признак в виде постоянной обогащенности кальцием и цинком.

Стекло в черных шлаках Карабашского завода имеет разную окраску – от серого и коричневого до черного цвета и слагает на 100% стекловатые разности шлаков, а в раскристаллизованных участках породы его содержание сильно варьирует – от 30 до 50 об.%. При этом стекло в интерстициях между кристаллами породообразующих минералов частично раскристаллизовано и содержит мелкие дендритовидные или скелетные индивиды, размером от 1 до 10 мкм, пижонита и фаялита (см. рис. 2). Причем местами преобладают микрокристаллы либо пироксена, либо оливина. Интересно, что между микрокристаллами двух минералов стекло не чистое, а содержит еще более мелкие скелетные наноиндивиды, размером менее 1 мкм, какого-то минерала. Стекло отличается переменчивым химическим составом и характеризуется присутствием заметных количеств К, Ва, Zn и S (табл. 3). Стекло содержит включения кварца (ксеногенного), хромита, вюстита и шарики сульфидов.

Хромит слагает слабую акцессорную вкрапленность в черных шлаках, содержанием до 1–2 об.%. Образует скопления относительно крупных ксеноморфных зерен (см. рис. 3) размером до 0,2 мм и хорошо образованных кристаллов размером до 10 мкм. Идидоморфные индивиды тяготеют к сульфидным шарикам. Минерал отличается разнородностью состава и относится к хромиту (табл. 4). Крупные ксеноморфные зерна хромшпинелида (табл. 4, ан. 1–3) имеют состав – хромит (42%), магнезиохромит (35%), цинкохромит (13%) и магнетит (10%). Идиоморфные кри-

сталлики (табл. 4, ан. 4–5) имеют другой состав – хромит (52%), магнезиоферрит (23%), магнезиохромит (10%), ганит (10%) и шпинель (5%). В хромшпинелиде постоянно присутствуют примеси ванадия и кальция. В целом хромит является обычным минералом ультраосновных пород и связанных с ними хромититах [12]. В магматической среде хромшпинелид встречается в базальтоидах, а также является обычным минералом метеоритов [13]. В шлаках уральских заводов хромит был установлен в отходах Мариинского передельного завода [6] и Режевского никелевого завода [9].

Вюстит достаточно редок в изученном шлаке, до 0,5 об.%, и встречается внутри сульфидных шариков или на их периферии. Размер индивидов не превышает 20–25 мкм, и они имеют изометричный облик. Оксид железа не содержит примесей. Вюстит является редким природным минералом, но в техногенных образованиях он встречается достаточно часто. Например, он отмечался в отвалах Челябинского угольного бассейна [14]. Включения вюстита находили в шлаках древних железоделательных производств на территории Европы [15] и Казахстана [16], а мы его описывали в шлаках Мариинского завода [6]. Исходя из общедоступных энциклопедических литературных источников, эвтектическая (одновременная) кристаллизация вюстита с фаялитом, который также встречается в данном шлаке, происходит при 1170°C и, по всей видимости, именно при этой температуре и формировались изученные нами черные шлаки.

Таблица 3

Химический состав стекла в шлаках Карабашского завода, % (масс)

№	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	CuO	ZnO	BaO	CaO	K ₂ O	Сумма
1	0,55	50,41	-	8,37	9,11	16,21	-	1,05	1,21	12,04	1,05	100
2	0,67	51,19	0,30	7,88	9,58	16,03	-	1,07	0,93	11,31	1,04	100
3	-	51,39	-	8,32	5,56	18,11	0,46	2,18	1,27	11,62	1,10	100
4	1,47	48,64	0,59	15,84	-	19,77	-	2,31	2,31	5,91	3,15	100
5	1,61	48,15	-	12,15	-	23,56	-	2,48	2,55	7,16	2,34	100

Таблица 4

Химический состав хромшпинелида в шлаках Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
1	1,20	0,71	0,86	64,22	-	5,01	18,18	4,82	5,60	0,57	101,17
2	1,18	0,74	0,94	63,85	-	5,21	17,45	4,82	6,03	0,48	100,70
3	0,95	0,74	1,03	62,32	-	7,15	15,94	4,86	6,63	0,49	100,11
4	-	0,49	-	46,13	8,04	18,41	15,93	3,88	7,69	0,29	100,85
5	-	0,48	-	45,89	7,79	18,03	16,17	3,86	7,35	0,21	99,78

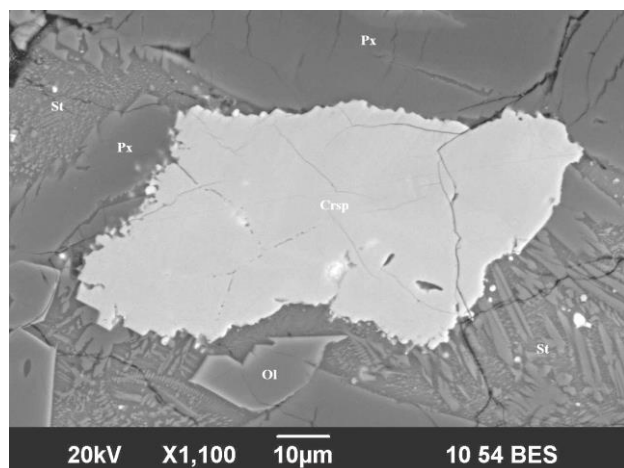


Рис. 3. Зерно хромшпинелида (Crsp) в агрегате стекла (St) в окружении кристаллов пиксонита (Px) и оливина (Ol) в матрице черного шлака BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

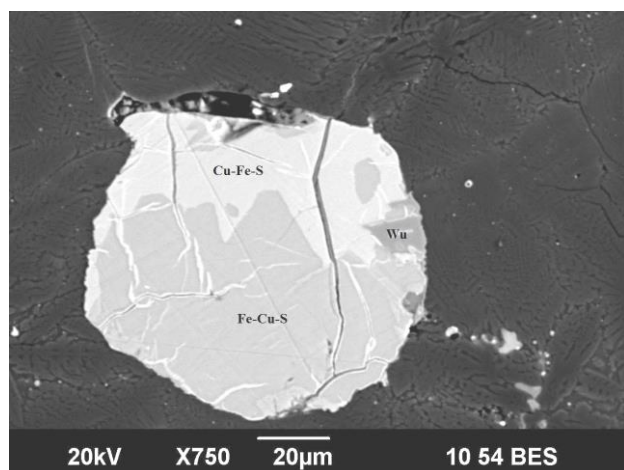


Рис. 4. Сульфидный шарик, состоящий из двух сульфидов и включения вюстита (Wu), в агрегате стекла в матрице черного шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Сульфиды в шлаке в основном сконцентрированы в стекловатой массе, где слагают округлые, по всей видимости, расплавленные включения, размером до 100-150 мкм, не более 5 об.%. Они обычно сложены двумя минеральными фазами (см. рис. 4), хотя иногда бывают и более сложные сращения из трех и более фаз сульфидов. Все сульфидные шарики сложены сульфидами из системы Cu-Fe-S, причем преобладают две фазы с составами (в мас.%): S – 43; Fe – 13,5; Cu – 43,5 и S – 50,5; Fe – 29,5; Cu – 19. Это наглядно видно на рис. 5, где верхняя часть шарика сложена более светлой медистой фазой, а нижняя часть – более железистым сульфидом (темное). Природных соединений с таким составом пока не обнаружено, а

вот «расплавные твердые растворы» системы $Cu_{1-x}Fe_{2+y}S_{2-z}$ в экспериментальных исследованиях освещены достаточно широко в диапазоне температур от 1012 до 325°C [17 и др.]. Есть сульфидные шарики, сложенные одной медистой фазой (в мас.%), – от S – 35,5; Fe – 5; Cu – 59,5 до S – 33,5; Fe – 1,5; Cu – 65, последняя фаза соответствует ковеллину, низкотемпературному сульфиду. Вероятно, это высокотемпературный аналог ковеллина, который в природе пока не обнаружен.

В некоторых сульфидных шариках отмечается тонкая вкрапленность или мелкие кубические кристаллики, размером до 3–5 мкм. Эта фаза резко выделяется своей яркой окраской на BSE-снимках и характеризуется другим химизмом (в мас.%): S – 22; Fe – 4,5; Pb – 47; Ni – 25; Zn – 1,5. Природных соединений с таким составом пока не обнаружено. В целом, сульфидная минерализация шлаков Карабашского завода отличается необычным минеральным составом и требует пристального изучения, а сами шлаки можно пускать в дополнительную переработку с извлечением сульфидов.

Заключение

При изучении черных шлаков Карабашского медеплавильного завода мы установили, что описанная нами техногенная минералогия совсем не соотносится с опубликованными данными других исследователей [2–4]. Такое противоречие, на наш взгляд, возникло в результате изучения разных шлаковых отвалов. Мы отбирали пробы в еще советском отвале, который расположен на северной окраине города и на большом расстоянии от завода. Где отбирали пробы наши коллеги из их статей – не совсем понятно, и хотя результаты их исследований достаточно сильно различаются между собой, в одном они сходятся, что изученные ими шлаки являются фаялитовыми образованиями. Судя по недавним годам публикаций, можно предположить, что наши коллеги отбирали шлаковый материал в современных вывалах в непосредственной близости от самого завода.

Таким образом, авторами изучена минералогия черных шлаков Карабашского завода. Установлено, что они сложены пиксонит-оливиновым агрегатом с присутствием стекла и редкой вкрапленности хромита, вюстита и различных сульфидных фаз. Они являются продуктами медеплавильного производства из советского периода, т.е. получены в шахтной печи в результате полупиритной окислительной плавки. Температура образования данных шлаков определена по эвтектической (одновременной) кристаллизации вюстита с фаялитом и примерно равна 1170°C.

Список литературы

1. Немцев М.С. Риддерская концессия Лесли Уркварта. Риддер: Терра, 2008. 170 с.
2. Глубокая переработка отходов металлургического производства / Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Живаева А.Б., Калинин Л.С. // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конференции. Красноярск: ИЦМиЗ СФУ. 2007. Вып. 5. С. 163–166.
3. Фазовые превращения при окислительном обжиге шлака сульфидной медной плавки / А.А. Лыкасов, А.Н. Матонин, И.Г. Вертий и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2012. Вып. 18. № 15. С. 97–99.
4. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И.В. Шадрюнова, Е.Г. Ожогина, Е.В. Колодежная и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.
5. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда) // Минералогия техногенеза – 2010. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 32–40.
6. Козлов П.С., Ерохин Ю.В., Козлова И.В. Фаялитовые шлаки Мариинского передельного завода // Минералогия техногенеза – 2011. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 39–50.
7. Rubin A.E. An American on Paris: Extent of aqueous alteration of a CM chondrite and the petrography of its refractory and amoeboid olivine inclusions // Meteoritics & Planetary Science. 2015. V. 50. P. 1595–1612. doi:10.1111/maps.12482
8. Wen D.-P., Wang Y.-F., Zhang J.-F., Jin Z.-M. Anisotropic growth of olivine during crystallization in basalts from Hawaii: Implications for olivine fabric development // American Mineralogist. 2018. V. 103. P. 735–741. doi:10.2138/am-2018-6174
9. Ерохин Ю.В. Минералогия шлаков Режевского никелевого завода // Минералогия техногенеза – 2012. Миасс: ИМин УрО РАН, 2012. С. 50–64.
10. Simkin T., Smiht J.V. Minor-element distribution in olivine // Journal of Geology. 1970. V. 78. P. 304–325.
11. Dodd R.T. Calc-aluminous inclusions in olivine of the Sharps chondrite // Mineralogical Magazine. 1971. V. 38. P. 451–458.
12. Castro A.I.L., Proenza J.A., Zaccarini F., Garuti G., Sarlabous M.S.C.P. Al- and Cr-rich chromitites from the Eastern Havana-Matanzas ophiolites (Western Cuba) // Episodes. 2015. V. 38. P. 334–343. doi:10.18814/epiugs/2015/v38i4/82429
13. Erokhin Yu.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Kleimenov D.A. The Severny Kolchim meteorite: new data on mineralogy // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 482. Part 1. P. 1189–1192. doi:10.1134/S1028334X18090118
14. Чесноков Б.В., Щербак Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
15. Buchwald V.F. Iron and steel in ancient times. Copenhagen: Royal Danish academy of sciences and letters. 2005. 372 p.
16. Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 Burial complex, Western Kazakhstan // Canadian Mineralogist. 2018. V. 56. № 6. P. 883–904. doi:10.3749/canmin.1800025
17. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe_2S_3 in the Cu-Fe-S system // Journal Thermal Analysis Calorimetry. 2014. V. 115. P. 511–516. doi:10.1007/s10973-013-3206-0

Поступила 16.05.19

Принята в печать 24.06.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

MATERIAL COMPOSITION OF KARABASH COPPER SMELTER SLAGS

Yury V. Erokhin – Cand.Sci. (Geology & Mineralogy), Lead Researcher

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Anatoly V. Zakharov – Research Fellow

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: zakharov-zav@yandex.ru

Lyubov V. Leonova – Cand.Sci. (Geology & Mineralogy), Senior Researcher

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: lvleonova@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): For over 300 years, the Ural region has been the metallurgical center of Russia, and over such a long period has accumulated a lot of man-made waste (i.e. slag). Understanding the material composition of slag poses an important problem, because before slags can be disposed of it is necessary to know their mineral composition. Many slags can potentially be used as ores suitable for further processing; some slags are man-made refractories, etc. At the same time, slags produced by copper smelters heavily affect the environment because they always contain sulphides, which, being exposed atmospheric waters, can easily decompose into sulfuric acid and heavy metals. **Objectives:** To un-

derstand the material (mineral) composition of the black slags of Karabash Copper Smelter that were produced and stored back in the Soviet period. **Methods Applied:** The chemical composition of the rock-forming and ore minerals was analysed with the help of a JSM-6390LV Scanning Electron Microscope by Jeol equipped with an INCA Energy 450 X-Max 80 system by Oxford Instruments (Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). Polished petrographic thin sections cut from the black slag were used for analysis. **Originality:** The study of the material composition of the slags was carried out from the point of view of classical mineralogy on the

basis of the modern compulsory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Findings:** The authors have undertaken quite a detailed study of the mineralogy of the Karabash Copper Smelter black slags. It has been established that the slags are composed of a pigeonite-olivine aggregate, a significant amount of glass and rarely impregnated chromites, wustites and various sulphide phases. They are the products of the Soviet copper smelting industry, i.e. they were produced in a shaft furnace as a result of partial pyritic process. The temperature at which these slags had formed was determined by the eutectic (simultaneous) crystallization of wustite and fayalite and it was around 1,170°C. **Practical Relevance:** The obtained data indicate a drastic difference between the black slags of Karabash Copper Smelter from the Soviet period versus the slags produced by the plant today. As the studied slags contain sulphides and chromites, they are acceptable for further processing.

Keywords: Pigeonite, olivine, chromite, sulphides, mineralogy, slags, Karabash Copper Smelter.

References

1. Nemtsev M.S. *Ridderskaya kontsessiya Lesli Urkvarta: monografiya* [Leslie Urquhart's Ridder Concession]. Ridder: Terra, 2008, 170 p. (In. Russ.)
2. Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Zhivaeva A.B., Kalinichenko L.S. Deep processing of metallurgical wastes. *Sovremennyye tekhnologii osvoyeniya mineralnykh resursov. Materialy 5-oy Mezhdun. nauch.-tekhn. konferentsii* [Modern mineral resources development technology: Proceedings of the 5th International Conference]. Krasnoyarsk: ITsMiZ SFU, 2007, vol. 5, pp. 163–166. (In. Russ.)
3. Lykasov A.A., Matonin A.N., Vertiy I.G., Kimyashev A.A. Phase transformations during oxidizing roasting of copper sulfide smelter slag. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2012, vol. 18, no. 15, pp. 97–99. (In. Russ.)
4. Shadrinova I.V., Ozhogina E.G., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Analysing the selectivity of smelter slag decomposition. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems in the development of mineral resources], 2013, no. 5. pp. 180–190. (In. Russ.)
5. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Fayalite from the Sredneuralsk Copper Smelter slags. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2010* [Mineralogy of technogenesis – 2010]. Miass: IMin UrBr RAS, 2010, pp. 32–40. (In. Russ.)
6. Kozlov P.S., Erokhin Yu.V., Kozlova I.V. Fayalite slags of Mariinsk Steel Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2011* [Mineralogy of technogenesis – 2011]. Miass: IMin UrBr RAS, 2011, pp. 39–50. (In. Russ.)
7. Rubin A.E. An American on Paris: Extent of aqueous alteration of a CM chondrite and the petrography of its refractory and amoeboid olivine inclusions. *Meteoritics & Planetary Science*. 50, 1595–1612 (2015). doi:10.1111/maps.12482
8. Wen D.-P., Wang Y.-F., Zhang J.-F., Jin Z.-M. Anisotropic growth of olivine during crystallization in basalts from Hawaii: Implications for olivine fabric development. *American Mineralogist*. 2018. V. 103. P. 735–741. doi:10.2138/am-2018-6174
9. Erokhin Yu.V. Mineralogy of slags from the Rezh Nickel Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2012* [Mineralogy of technogenesis – 2012]. Miass: IMin UrBr RAS, 2012, pp. 50–64. (In. Russ.)
10. Simkin T., Smiht J.V. Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology*. 78, 304–325 (1970).
11. Dodd R.T. Calc-aluminous inclusions in olivine of the Sharps chondrite. *Mineralogical Magazine*. 38, 451–458 (1971).
12. Castro A.I., Proenza J.A., Zaccarini F., Garuti G., Sarlabous M.S. Al- and Cr-rich chromitites from the Eastern Havana-Matanzas ophiolites (Western Cuba). *Episodes*. 38, 334–343 (2015). doi:10.18814/epiugs/2015/v38i4/82429
13. Erokhin Yu.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Kleimenov D.A. The Severny Kolchim meteorite: new data on mineralogy. *Doklady Earth Sciences*. 482, 1, 1189–1192 (2018). doi:10.1134/S1028334X18090118
14. Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. *Mineralogiya gorelykh otvalov Chelyabinskogo ugolnogo basseyna (opyt mineralogii tekhnogeneza): monografiya* [Mineralogy of the burned coal dumps of the Chelyabinsk coal basin (mineralogy of technogenesis): Monograph]. Moscow: Nauka, 1991, 152 p. (In. Russ.)
15. Buchwald V.F. Iron and steel in ancient times. Copenhagen: Royal Danish academy of sciences and letters. 2005. 372 p.
16. Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 Burial complex, Western Kazakhstan. *Canadian Mineralogist*. 56, 6, 883–904 (2018). doi:10.3749/canmin.1800025
17. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe₂S₃ in the Cu-Fe-S system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 115, 511–516 (2014). doi:10.1007/s10973-013-3206-0

Received 16/05/19

Accepted 24/06/19

Образец для цитирования

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 12–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

For citation

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Material Composition of Karabash Copper Smelter Slags. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 12–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74:536

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С.¹, Михалев А.В.¹, Шевелев М.М.², Билалов Д.Х.¹¹Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия²ЗАО «Центр тепловизионной диагностики», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Поставлена и решена задача определения плотности теплового потока, подводимого к контактной поверхности бойка, по экспериментально замеренным параметрам совмещенного процесса получения стальных полос на опытной установке непрерывного литья и деформации. Определение плотности теплового потока по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов в объемной постановке с использованием пакета ANSYS. Приведены начальные и граничные условия для решения задачи. В качестве начальных условий для решения задачи нестационарной теплопроводности приняты начальная температура бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, геометрические размеры получаемой полосы и марка стали, скорость вытягивания полосы из кристаллизатора установки и время обжатия сляба бойками установки. В качестве граничных условий при решении задачи нестационарной теплопроводности использованы плотность теплового потока, который подводится к контактной поверхности бойка во время обжатия сляба, и эффективный коэффициент теплоотдачи, величина которого определена по экспериментальным данным. Средняя температура контактной поверхности бойка после окончания обжатия слябов определена путем замеров температуры бойков при экспериментальном исследовании совмещенного процесса на опытной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод». По этой температуре бойка путем численного моделирования теплового режима работы бойка установки непрерывного литья и деформации определена величина плотности теплового потока. Результаты расчета температурных полей даны в четырех сечениях бойка и приведены для характерных точек. Установлены закономерности распределения температуры как по толщине бойка, так и по толщине его приконтактного слоя при получении стальных листов на установке непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: плотность теплового потока, коэффициент теплоотдачи, установка непрерывного литья, боек, деформация, температура, конечный элемент.

Введение

Для расчета температурных полей бойков установки непрерывного литья и деформации необходимо при решении задачи нестационарной теплопроводности задать ряд параметров, определяющих тепловой режим работы бойков при получении стальных листов. Наиболее важные из них – плотность теплового потока от металла очага деформации при обжатии непрерывнолитого сляба и эффективный коэффициент теплоотдачи при охлаждении водой рабочей поверхности бойка во время холостого хода – можно определить лишь путем численного моделирования теплового режима работы бойка с

различными значениями параметров и сравнить эти результаты с экспериментальными данными.

Методика численного эксперимента

Целью численного эксперимента являлось определение плотности теплового потока, подводимого к рабочей поверхности бойка, по экспериментально замеренным параметрам процесса получения полосы толщиной 10 мм и шириной 240 мм из стали 09Г2С на опытной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод» [1,2] (**рис. 1**).

Во время эксперимента после выхода полосы из бойков опытной установки непрерывного литья и деформации проводились замеры температуры контактной поверхности бойков. В результате установлена средняя температура контактной поверхности бойков, равная 300°C.



Рис. 1. Установка непрерывного литья и деформации:
1 – индукционная печь; 2 – электродвигатель постоянного тока;
3 – редуктор-синхронизатор; 4 – станина установки

Определение плотности теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности в объемной постановке методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [1–6].

Геометрия бойка для расчета и положение сечений приведены на **рис. 2**.

Время контакта бойков с полосой – 0,15 с.
Время паузы (холостого хода) – 0,45 с.

Во время обжатия сляба к контактной (рабочей) поверхности бойка прикладывается гранич-

ное условие в виде плотности теплового потока, величину которого и надо определить. Во время паузы контактная поверхность бойка охлаждается водой с температурой 35°C. К ней прикладывается граничное условие в виде эффективного коэффициента теплоотдачи α_1 . Значение этого коэффициента определено на основании опытных данных и для расчета принято $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Таким образом, для данного значения эффективного коэффициента теплоотдачи следует определить плотность теплового потока.

Что касается граничных условий во время контакта и паузы для боковых поверхностей бой-

ка, верха и низа бойка, а также задней поверхности бойка, то поскольку они охлаждаются воздухом, к ним прикладываются граничные условия в виде эффективного коэффициента теплоотдачи – $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ с температурой окружающего воздуха (температурой цеха) – 60°C .

В качестве начальных условий для бойка задается начальная температура бойка – 20°C .

Геометрические размеры получаемой полосы: толщина 10 мм, ширина 240 мм, длина 1600 мм.

Скорость вытягивания полосы – 1 м/мин.

При длине полосы 1,6 м, скорости вытягивания 1 м/мин полное время процесса – 96 с. При этом число оборотов эксцентрикового вала равно 160.

Для расчета температурного поля бойка необходимо также задать теплофизические свойства материала бойка, из которого он изготовлен (сталь 40Х) [1].

Определение плотности теплового потока по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности в объемной постановке методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [2–6].

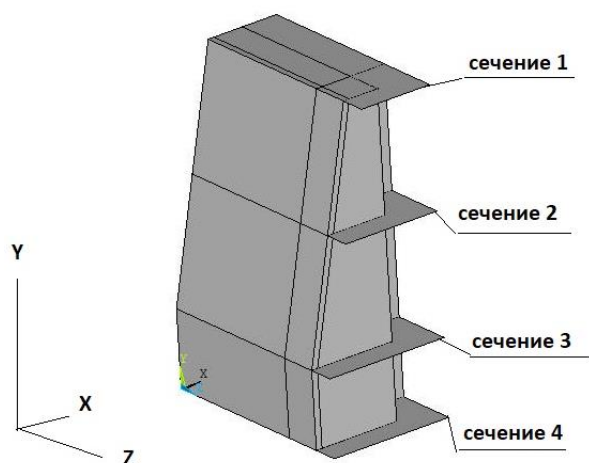


Рис. 2. Положение сечений, где приведены результаты расчета

Результаты расчета

Результаты расчета температур даны в четырех сечениях бойка, положение которых даны на рис. 2. При этом в каждом сечении температуры приведены для характерных линий P_1, P_2, P_3 и P_4, которые для каждого сечения проходят по оси симметрии бойка и в направлении оси ОХ. Также результаты расчета приведены для характерных точек, положение которых дано на рис. 3.

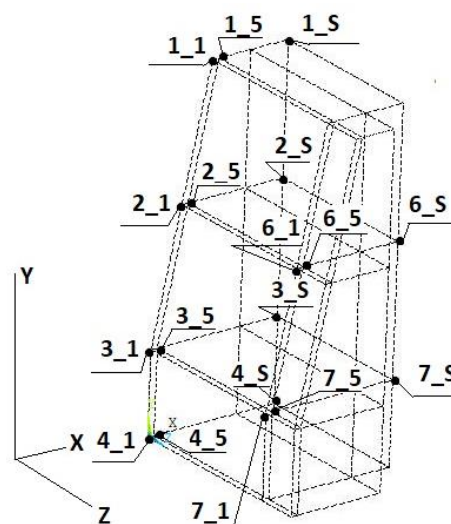


Рис. 3. Положение характерных точек

В результате многовариантных расчетов были определены значения плотности теплового потока для эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [7–11].

Так, для обеспечения через 96 с температуры в центре бойка на уровне 300°C при $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ значение плотности теплового потока получилось равным $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

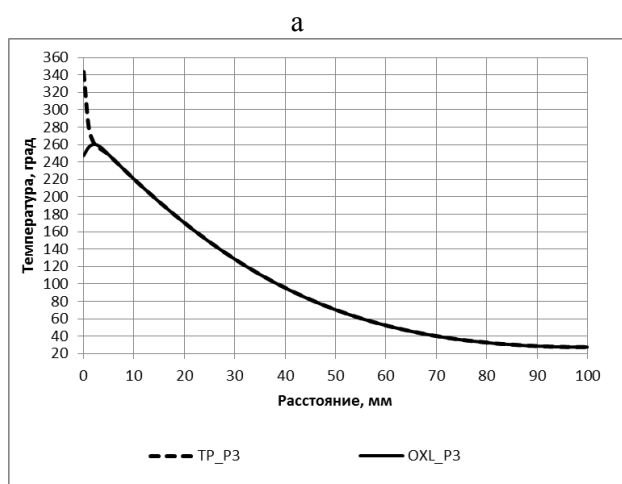
Результаты расчета температур с подобранными плотностями теплового потока для варианта охлаждения бойка при $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ даны на рис. 4.

В табл. 1 и 2 приведены значения температур в характерных точках бойка через 96 с.

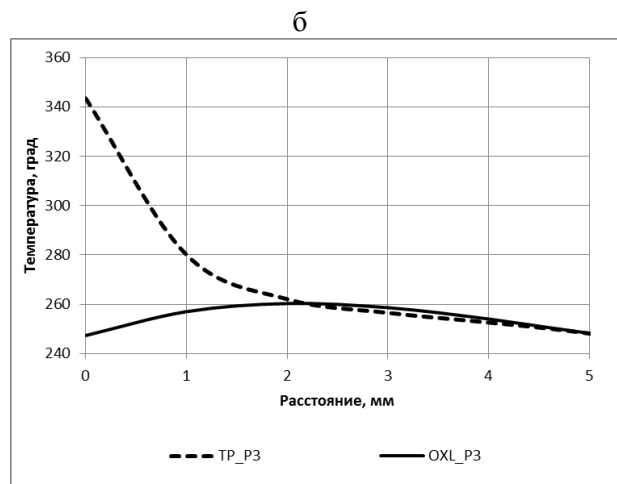
Табл. 1 характеризует распределение температуры бойка без каналов по толщине приконтактного слоя и длине бойка в конце обжата сляба и в конце паузы (см. рис. 3). Так, точки 1_1 и 1_5 показывают распределение температуры по толщине приконтактного слоя в сечении 1 и по оси симметрии бойка, а точки 6_1 и 6_5 – в сечении 2 на боковой поверхности бойка. Табл. 2 характеризует распределение температуры по длине бойка на его задней поверхности, причем она изменяется в диапазоне $27\text{--}61^\circ\text{C}$.

Рис. 4 и табл. 1 и 2 характеризуют закономерности распределения температуры в бойке без каналов при обжатии сляба и на холостом ходу при тепловом потоке $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$ и коэффициента теплоотдачи $2000 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Наибольшая температура, равная 343°C , возникает на контактной поверхности бойка при обжатии сляба в сечении 3 и далее по толщине приконтактного слоя она снижается до 248°C . Температура бойка в конце холостого хода равна 247°C (см. рис. 4, табл. 1).



По толщине бойка



От поверхности контакта вглубь на 5 мм

Рис. 4. Характер температур по толщине бойка (точки 3_1 и 3_5) (а) и приконтактного слоя (точки 3_1 и 3_5) (б) от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (OXL).
 $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, плотность теплового потока $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$

Таблица 1

Значения температур в точках, расположенных на рабочей поверхности бойка и на глубине 5 мм

Обозначение точки	Плотность теплового потока – $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
	ТР	OXL
1_1	313	221
1_5	215	215
2_1	333	238
2_5	237	237
3_1	343	247
3_5	248	248
4_1	332	238
4_5	236	236
6_1	183	135
6_5	135	135
7_1	188	139
7_5	140	140

Примечание. ТР – температура в конце контакта, а OXL – в конце паузы при охлаждении рабочей поверхности бойка водой.

Таблица 2

Значения температур в точках, расположенных на задней поверхности бойка

Обозначение точки	Плотность теплового потока $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
	ТР	OXL
1_S	61	61
2_S	41	41
3_S	28	27
4_S	27	27
6_S	37	37
7_S	27	27

Примечание. ТР – температура в конце контакта, а OXL – в конце паузы при охлаждении рабочей поверхности бойка водой.

Заключение

Таким образом, на основании расчетов установлено, что для обеспечения экспериментально замеренной температуры на контактной поверхности бойка без каналов на уровне 300°C значения плотности теплового потока следует принимать равным $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$, а эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результаты исследования могут быть использованы для расчета температурных полей бойков при проектировании промышленных установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Список литературы

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. 151 с.
2. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки-полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. 125 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
4. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://>
5. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel research international. 2011. Vol. 82. P. 1240–1247. doi:10.1002/srin.201100078
6. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // Journal of Materials Processing Technology 210. 2010. P. 336–362.
7. Nalawade R. S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling // Sadhana. 2016. № 1 (41). P. 111–124.

8. Laber K., Knapimsky M., Dyja H., Kavalek A. Influence of the cooling conditions after the rolling process of the temperature distribution on the plate cross section // *Hutnik – Wiadomosci Hutnicze*. 2012. № 5. P. 328–331.
9. Speicher K., Steinboeck A., Wild D., Kiefer T., Kugi A. An integrated thermal model of hot rolling // *Mathematical and computer modeling of dynamical systems*. 2014. № 1 (20). P. 66–86.
10. Phan T.H., Tieu A.K., Zhu H.T., Kosasih B.Y. A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling // *Mechanics and Materials*. 2016. № 846. P. 589–594.
11. Yu X., Jiang Z., Zhao J., Wei D. The role of oxide-scale microtexture on tribological behavior in the nanoparticle lubrication of hot rolling. *Tribology International*. 2016. № 93 (A). P. 190–201.

Поступила 27.06.19

Принята в печать 29.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

NUMERICAL DETERMINATION OF THE HEAT FLUX DENSITY ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA OF A STEEL STRIP DEFORMED IN A PILOT CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION UNIT

Oleg S. Lekhov – Dr.Sci. (Eng.), ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MXLehov38@yandex.ru**Aleksandr V. Mikhalev** – Assistant ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia**Maksim M. Shevelev** – Head of the Non-Destructive Testing Laboratory
Thermal Imaging Centre, Yekaterinburg, Russia**Damir Kh. Bilalov** – Cand.Sci. (Eng.), Associate ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. This research aimed to determine the density of the heat flux supplied to the contact surface of the anvil based on the experimentally measured parameters of the combined steel strip process implemented on a pilot continuous casting and deformation unit. The heat flux density was determined based on the experimentally measured anvil temperature through solving a dynamic heat conduction problem. The problem was solved with the help of the finite element method in a 3D formulation using the ANSYS package. The initial and boundary conditions for solving the problem are given. For solving the dynamic heat conduction problem, the following conditions were taken as initial conditions: the initial temperature of the anvils in the continuous casting and deformation machine, the dimensions of the resultant strip and the steel grade, the strip withdrawal rate and the slab reduction time. The conditions for solving the dynamic heat conduction problem taken as the boundary conditions include the density of the heat flux, which is supplied to the contact surface of the anvil during slab reduction, and the effective heat transfer coefficient, the value of which was determined through experimental data. The average temperature of the anvil contact surface after slab reduction was determined by measuring the temperature of the anvils during an experimental study conducted on a laboratory-scale continuous casting and deformation machine at Urals Pipe Works. The temperature data was used for numerical simulation of the temperature regimes of the anvil to determine the density of the heat flux. The calculated

temperature fields are given for four cross-sections of the anvil for the typical points. The authors established the regularities of temperature distribution across both the thickness of the anvil and the thickness of its contact layer when a continuous casting and deformation machine is used to produce steel sheets.

Keywords: Heat flux density, heat transfer coefficient, unit, continuous casting, anvil, deformation, temperature, finite element.

References

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka nepreryvnogo litia i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarykh trub. Teoriya i raschet* [A continuous casting and deformation unit designed to produce pipe steel sheets. Theory and design]. Yekaterinburg: Izdatelstvo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.)
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. *Napryazheniya v sisteme boyki-polosa pri poluchenii listov iz stali na ustanovke nepreryvnogo litia i deformatsii* [Stresses in the anvil-strip system when producing steel sheets in a continuous casting and deformation unit]. Yekaterinburg: Izdatelstvo UMTs UPI, 2018, 125 p. (In Russ.)
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)
4. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://>
5. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel research international*. 2011. Vol. 82. P. 1240–1247. doi:10.1002/srin.201100078

6. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology* 210. 2010. P. 336–362.
7. Nalawade R. S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling. *Sadhana*. 2016. No. 1 (41). P. 111–124.
8. Laber K., Knapimsky M., Dyja H., Kavalek A. Influence of the cooling conditions after the rolling process of the temperature distribution on the plate cross section. *Hutnik – Wiadomosci Hutnicze*. 2012. No. 5. P. 328–331.
9. Speicher K., Steinboeck A., Wild D., Kiefer T., Kugi A. An integrated thermal model of hot rolling. *Mathematical and computer modeling of dynamical systems*. 2014. No. 1 (20). P. 66–86.
10. Phan T.H., Tieu A.K., Zhu H.T., Kosasih B.Y. A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling. *Mechanics and Materials*. 2016. No. 846. P. 589–594.
11. Yu X., Jiang Z., Zhao J., Wei D. The role of oxide-scale microtexture on tribological behavior in the nanoparticle lubrication of hot rolling. *Tribology International*. 2016. No. 93 (A). P. 190–201.

Received 27/06/19

Accepted 29/07/19

Образец для цитирования

Численное определение плотности теплового потока по экспериментальным данным процесса деформации стальной полосы на опытной установке 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. 2019. Т.17. №3. С. 19–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

For citation

Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Numerical Determination of the Heat Flux Density on the Basis of Experimental Data of a Steel Strip Deformed in a Pilot Continuous Casting and Deformation Unit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 19–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СИММЕТРИЧНОЙ МНОГОРУЧЬЕВОЙ МНЛЗ

Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассматриваются конструкции огнеупорного оборудования, устанавливаемого в приемных камерах промежуточного ковша (ПК) машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Совершенствование оборудования ПК обеспечивает эффективное формирование потоков металла и создает условия для повышения его качества. **Цель работы:** совершенствование конструкций и методики расчета металлоприемника (М) приемной камеры ПК, используя представленные новые конструкции, методику расчета и результаты моделирования процесса разлива стали для повышения качества непрерывно-литой заготовки. **Используемые методы:** зависимости в области механики жидкости для условий металла, находящегося в жидком состоянии, при температуре, определяемой условиями разлива стали. **Новизна:** впервые приведена схема для определения параметров потоков жидкой стали при применении М с боковыми пространственно ориентированными отверстиями (ПОО). **Результат:** в статье даны расчетные зависимости для определения основных параметров конструкций М с боковыми отверстиями симметричных многоручьевых МНЛЗ. Проведено математическое моделирование конструкции М. **Практическая значимость:** представлена методика конструирования М симметричного ПК с учетом особенностей потоков стали, получена расчетная схема исходных данных для проектирования М.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), промежуточный ковш (ПК), потоки металла, моделирование.

Введение

В статье рассмотрены вопросы организации движения потоков стали в приемных камерах промежуточного ковша. Отмечены особенности компоновки приемных камер симметричных ПК при использовании специальных устройств, обеспечивающих прием струи стали, поступающей из сталеразливочного ковша, и последующее распределение потоков металла в объеме ПК. Данные устройства обеспечивают изменение параметров потоков стали, снижают их турбулентность, уменьшают скорости боковых и придонных течений, а также уменьшают число замкнутых контуров [4]. В работе рассматривается конструкция ПК МНЛЗ на базе М и порогов приемной и разливочной камер (рис. 1) [5].

Определение работоспособности металлоприемника включает расчеты: элементов конструкции М на стойкость; скоростей потоков жидкого металла в объеме промежуточного ковша; распределения потоков в структуре ковша [6].

Стойкость устройства к воздействию среды: жидкий металл, шлак, неметаллические включения и другие определяют эрозионной стойко-

стью и прочностью, т.е. способностью выдерживать приложенные нагрузки со стороны потоков жидкого металла без разрушения. Эрозионную стойкость определяют расчетом устройств на кавитацию [6]. Расчет элементов ПК на кавитацию в статье не рассматривается, поскольку он подробно изложен в работе [6].

Основная часть. Конструкции, расчет ковша и отдельных элементов

Представлена новая компоновка оборудования симметричного ПК четырех ручьевых МНЛЗ (см. рис. 1). Она выполнена на базе М с боковыми ПОО и четырех порогов, устанавливаемых около каждого из разливочных отверстий ковша. На рис. 2 представлены основные параметры конструкции М с ПОО. Компоновка конструкции М с ПОО дана на рис. 3.

Расчет работоспособности М включает определение скоростей потоков металла в объеме металлоприемника: входного (из сталеразливочного ковша); затопленных струй из отверстий на боковых гранях; обратного со дна М. На рис. 4 представлена расчетная схема металлоприемника с боковыми пространственно ориентированными отверстиями, установленного в приемной камере симметричного промежуточного ковша.

Определение скоростей в объеме промежуточного ковша необходима, поскольку кон-

структивные особенности применяемых металлоприемников и других устройств приемной камеры ковша, имеющих ПОО, могут при неправильной конструкции корпуса, боковых граней и расположении боковых отверстий: углов боковых ПОО, числу и расположению отверстий относительно дна ковша, способствовать образованию скоростных потоков на границе раздела жидкая сталь – покровный шлак, на дне ковша и в районе миделя стопора [4].

Основной параметр работоспособности принятой конструкции металлоприемника и связанной с ним компоновкой оборудования внутреннего объема промежуточного ковша – скорость стали на границе раздела металл-шлак не должна превышать допустимой скорости, т.е.

$$u_n \leq [u_n],$$

где u_n – скорость стали на границе раздела металл-шлак, м/с; $[u_n]$ – допустимая скорость на границе раздела металл-шлак, м/с.

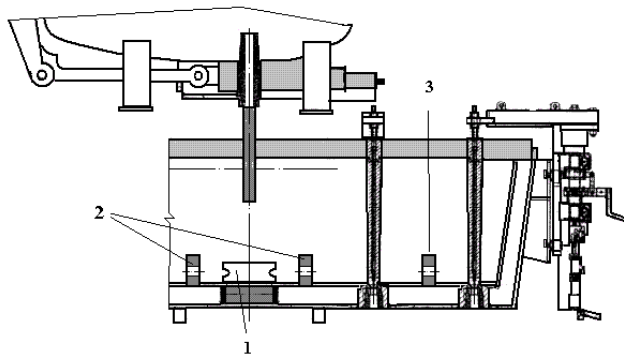


Рис. 1. Компоновка ПК четырехручьевого МНЛЗ:
1 – донный М с ПОО;
2 – пороги приемной камеры с ПОО;
3 – пороги разливочных камер с ПОО

Специфика движения потоков стали в промежуточном ковше [6], определяемая взаимодействием потоков жидкой стали у поверхности раздела сталь – покровный шлак, позволила определить допустимые скорости потоков. Они приняты в диапазоне $[u_n] = 0,13 \dots 0,2$ м/с. Значение $[u_n] = 0,2$ м/с выбирается в случае использования симметричных машин, имеющих два ручья и небольшие по длине промежуточные ковши. Величины, равные $[u_n] = 0,13$ м/с, принимаются для ковшей симметричных машин, имеющих шесть и более ручьев. Промежуточные значения допустимых скоростей равные

$[u_n] = 0,15$ м/с необходимо использовать при расчете параметров ПК четырехручьевого машины.

Определение скоростей потоков стали из металлоприемника с боковыми пространственно-ориентированными отверстиями, установленного в приемной камере симметричного промежуточного ковша, необходимо для оценки скоростей на границе раздела жидкий металл – покровный шлак при установке металлоприемника с ПОО [6].

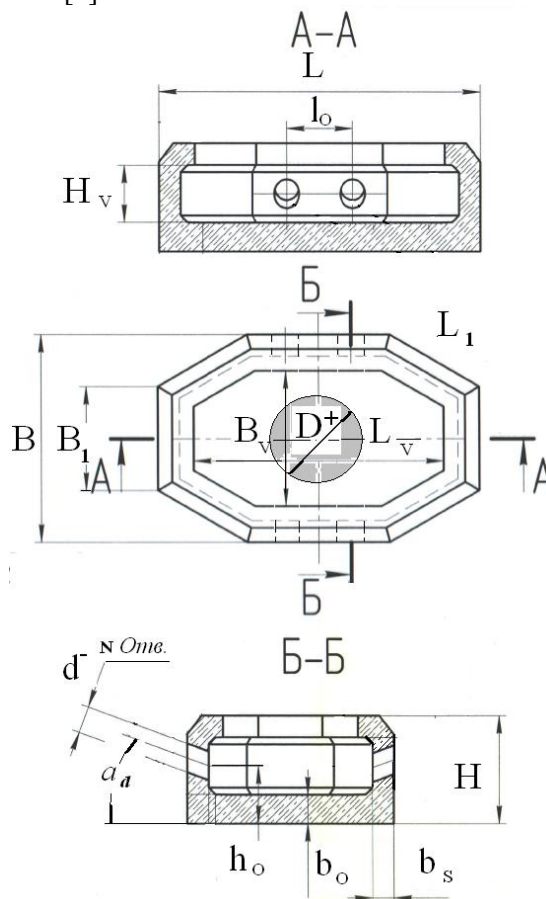


Рис. 2. Основные параметры конструкции М с пространственно ориентированными отверстиями: L – длина; B – ширина; H – высота; B₁ – ширина грани; l₀ – расстояние между боковыми отверстиями; h₀ – высота расположения оси отверстий; b₀ – толщина дна; b_s – толщина боковой поверхности; d – диаметры боковых ПОО; L_v, B_v, H_v – габариты приемного отверстия; D⁺ – диаметр поперечного сечения струи металла, поступающего в М

Затопленные струи жидкого металла из отверстий на боковых гранях формируют структуру с повышенными скоростями в средней части реакционных камер промежуточного ковша

(см. **рис. 4**). Формирование данных структур способствует перемещению крупных частиц размером >20 мкм в поверхностные слои объема ПК. Параметры скорости жидкой стали в этой структуре потоков можно определить по зависимости [6]

$$\vec{u} = \sum_{i=1}^m \vec{u}_i, \quad (1)$$

где \vec{u} – суммарный вектор скорости стали, м/с;
 \vec{u}_i – вектор скорости металла в затопленной струе, создаваемой i -м отверстием, м/с.

Боковые движения затопленных струй жидкой стали в результате применения комплекса устройств в приемной камере промежуточного ковша минимальные [6].

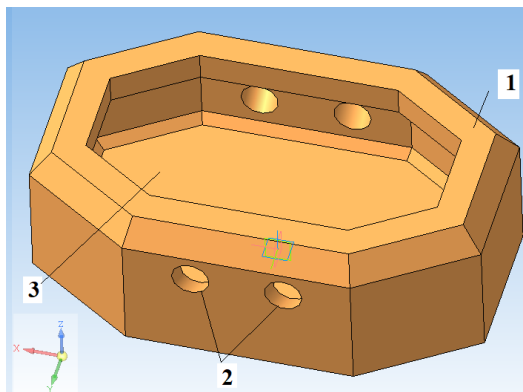


Рис. 3. Компоновка М с ПОО ПК МНЛЗ:
 1 – донный М; 2 – отверстия; 3 – дно М

Для формирования скоростных структур с затопленными струями в средней части ПК необходимо поток из отверстий в М сориентировать под некоторым углом α к зеркалу металла. Величина данного угла определяется с учетом уровня стали в промежуточном ковше при номинальных условиях разливки и скоростей разливки стали из разливочных отверстий ковша.

Зависимость (1) определяет осевую скорость струи u_{1S} в системе координат $x_{1S}x_2x_{3S}$, повернутой также под углом α к принятой за основную системе координат $x_1x_2x_3$. Необходимо осуществить преобразование

$$\begin{bmatrix} x_{1S} \\ x_{2S} \\ x_{3S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x_{1S} \\ x_{2S} \\ x_{3S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \cos \alpha + x_3 \sin \alpha \\ x_2 \\ -x_1 \sin \alpha + x_3 \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Скорость потока в осевом направлении развития структуры определяется по зависимости [6]

$$u_{1S} = \sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{x_{3Si}^2}{8v_{\varepsilon i} \cdot x_{1Si}}\right)^2},$$

где $u_{\max i}$ – осевая скорость стали затопленной струи, истекающей из i -го отверстия металлоприемника, м/с; $v_{\varepsilon i}$ – вихревая вязкость затопленной струи, истекающей из i -го отверстия металлоприемника, $\text{м}^2/\text{с}$.

С учетом преобразования координат скорость u_{1S} равна

$$u_{1S} = \sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{x_{3Si}^2}{8v_{\varepsilon i} \cdot x_{1Si}}\right)^2}.$$

Скорость на границе раздела находим при условии $x_{3i} = h_{\varepsilon i}$ и равна

$$u = \max \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{(h_{\varepsilon i} \cos \alpha - l \sin \alpha)^2}{8v_{\varepsilon i} \cdot (l \cos \alpha + h_{\varepsilon i} \sin \alpha)}\right)^2} \right\} \leq [u].$$

Максимальное значение скорости определяем в интервале

$$x_1 \in \left(\min \left(\frac{h_{\varepsilon i}}{\operatorname{tg}(\alpha + 0,5 \cdot \alpha_p)} \right); l \right),$$

где α_p – угол раскрытия турбулентной струи, град. Он равен 22° – 26° [6]; l – длина пути затопленной струи, м (см. **рис. 4**).

Вихревую вязкость $v_{\varepsilon i}$ и скорость на оси затопленной струи рассчитываем по формулам

$$v_{\varepsilon i} = 0,013u_{0i}d_{0i},$$

$$\frac{u_{\max i}}{u_{0i}} = \frac{6,4d_{0i}}{x_1 \cos \alpha + h_{0i} \sin \alpha},$$

где u_{0i} – начальная скорость струи истекающей из i -го отверстия М, м/с; d_{0i} – диаметр i -го отверстия М, м.

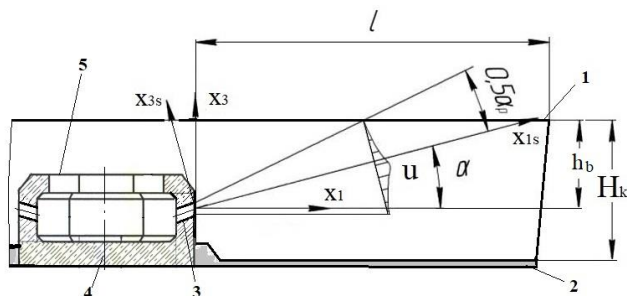


Рис. 4. Расчетная схема металлоприемника с боковыми пространственно-ориентированными отверстиями, установленного в приемной камере симметричного промежуточного ковша:
1 – уровень стали в ПК; 2 – торкрет-масса;
3 – пространственно ориентированные отверстия М; 4 – дно М; 5 – входное отверстие М;
 H_k – высота уровня металла в КП; h_b – высота расположения оси отверстий относительно уровня металла ПК

Моделирование работы конструкций М приемной камеры

Задачи решали численным методом путем математического моделирования [7], при этом был описан и смоделирован процесс движения потоков стали в объеме системы: струя металла из СЛК – М с ПОО – затопленные струи жидкой стали в пространстве ПК.

Составляется система дифференциальных уравнений: неразрывности, движения. При этом учитывается турбулентность потока и составляются уравнения турбулентности. Для постановки задачи нужны: параметры скорости у входного отверстия (скорость потока из сталеразливочного ковша); давление у выходного отверстия [6, 7].

Система уравнений может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0. \end{cases}$$

где \vec{u} – вектор скорости жидкости; \vec{F} – вектор объёмных сил; p – давление жидкости; ∇p – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ – лапласиан \vec{u} ; ρ –

плотность жидкого металла.

В математической модели были сделаны допущения [6]:

1. Плотность каждой фазы (металла и НВ) в модели постоянна.
2. Жидкий металл и НВ имеют одни и те же поля давлений.
3. Объем сталеразливочного ковша изначально заполнен сталью полностью.
4. Объем ПК изначально заполнен сталью.
5. Жидкость – сталь, является вязкой и несжимаемой.

Провели математическое моделирование потоков жидкого металла с целью оценки влияния потоков металла на конструкцию М приемной камеры ПК [5]. Результаты математического моделирования работы М в приемной камере ПК представлены на рис. 5.

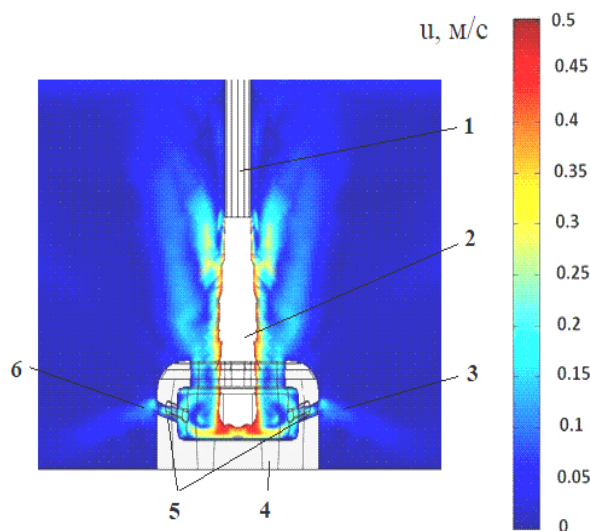


Рис. 5. Результаты математического моделирования работы М в приемной камере ПК: 1 – защитная труба; 2 – струя стали из сталеразливочного ковша; 3 – М; 4 – дно М; 5 – боковые отверстия; 6 – струя стали из бокового отверстия

По результатам анализа результатов моделирования оценивали параметры скоростей в объеме приемной камеры ПК, оснащенной М [6, 8].

Выбранная организация затопленных струй жидкой стали, движущихся из ПОО М, расположенных на боковых гранях, способствует смещению основных потоков жидкого металла в среднюю часть пространства реакционных и разливочных камер ПК [8], что позволит уменьшить скорости стали вдоль поверхности дна ПК, и правильной организации движения стали относительно миделя стопора ПК. Это упорядочивает движение потоков металла в структуре их перемещения в разливочное

отверстие ПК, а также и уменьшает число НВ в металле, движущемся затем в разливочное отверстие ПК и далее в кристаллизатор машины [9].

Таким образом, правильно выбранная конструкция М приемной камеры и расположение ПОО М способствуют рациональной организации потоков металла в объеме ПК и соответственно способствуют качеству металла при разливке, а также в изделиях последующих переделов [10].

Заключение

Рассмотрено новое оборудование промежуточного ковша – металлоприемник с боковыми ПОО. Применение нового М обеспечит уменьшение скоростей потоков стали в приемной камере ковша и далее в объеме реакционных и разливочных камер.

Разработаны положения по определению конструктивных параметров металлоприемников для симметричных ПК, оснащенных отверстиями, выполненными на боковых поверхностях М. Представлена обобщенная компоновка М для симметричных ПК и основные параметры конструкции М с пространственно ориентированными отверстиями. Созданная компоновка М может быть использована в пространстве приемных камер всех типов симметричных машин с четным числом ручьев – сортовых и слябовых.

Проведено моделирование поведения потоков стали в приемной камере ПК. Моделирование показало, что рациональное перемещение потоков металла из боковых ПОО М в среднюю часть реакционных и разливочных камер ПК позволяет уменьшить образование вихрей в разливочных камерах ковша и соответственно возможность затягивания НВ в кристаллизатор МНЛЗ.

Список литературы

1. Гуцин В. Н., Ульянов В. А. Совершенствование технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // *Сталь*. 2017. № 5. С. 16–20.
2. Numerical Modelling of Dissipation Phenomena inside a New Ladle Shroud for Fluidynamic Control and its Effect on Inclusion Removal in a Slab Tundish / G. Solorio-Diaz, R.D. Morales, J. de J. Barreto-Sandoval [et al.] // *Steel Research International*. 2014. Vol. 85. № 5. P. 863–874.
3. Design engineering of refractory components for use in refining continuous-cast steel / V.V. Chislavlev, S.V. Feiler, D.V. Boikov [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 58. № 6. P. 603–607.
4. Mathematical Modeling of Inclusions Deposition at the Upper Tundish Nozzle and the Submerged Entry Nozzle / Enif Gutiérrez, Saul Garcia-Hernandez, José de Jesús Barreto [et al.] // *Steel research international*. 2016. Vol. 87. № 11. P. 1406–1416.
5. Рафинирование металла в промежуточном ковше / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, М.В. Семенов [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2007. № 1 (17). С. 43–46.
6. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 348 с.
7. Multiphase flow modeling of slag entrainment during ladle change-over operation / Rodolfo D. Morales, Saul Garcia-Hernandez, Jose de Jesus Barreto [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. № 4. P. 2595–2606.
8. Modeling Study of Turbulent Flow in a Continuous Casting Slab Mold Comparing Three Ports SEN Designs / Ismael Calderón-Ramos, Rumualdo Servín-Castañeda, Alejandro Pérez-Alvarado [et al.] // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. № 1. P. 76–85.
9. Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНПС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, Ю.М. Айзин [и др.] // *Металлург*. 2004. № 4. С. 47–49.
10. Особенности структурообразования в тонкой проволоке / А.Б. Сычков, А.Ю. Столяров, Г.Я. Камалова и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2017. Т. 15. № 2. С. 75–83.

Поступила 30.05.19

Принята в печать 28.06.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-25-30>

DESIGN AND CALCULATION OF THE IMPACT BOX FOR A SYMMETRICAL MULTI-STRAND TUNDISH

Konstantin N. Vdovin – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Casting and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vdovin@magtu.ru

Vasily V. Tochilkin – Postgraduate Student

Department of Casting and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tochilkin.vas@mail.ru

Sergey M. Dobrynin – Postgraduate Student

Department of Casting and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vdovin@magtu.ru

Evgeny A. Melnichuk – Postgraduate Student

Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: melnichuk.EA@mmk.ru

Viktor V. Tochilkin – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: toch56@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): This paper examines the design of refractory equipment used in impact boxes of a tundish in a continuous casting machine (CCM). Optimised components of the tundish ensure effective formation of metal flows and help achieve better metal quality. **Objectives:** The objective is to use the design procedure described, as well as the casting simulation data to optimize the design of the impact pad and the corresponding calculation procedure aimed at improved quality of continuously cast billets. **Methods Applied:** Calculated dependencies in the area of machine design which are based on the fundamental mass and energy conservation laws, equations of mathematical physics, as well as known and proven mathematical techniques. **Originality:** This is the first paper that describes how to calculate metal velocity at the metal-slag boundary when using the impact box with space-oriented side holes. **Findings:** This paper describes calculated dependencies that can be used to determine the key design parameters of impact boxes with side holes designed for symmetrical multi-strand CCMs. The authors also simulated the design of such impact box. **Practical Relevance:** The authors describe a design technique for designing symmetrical tundish impact boxes allowing for the metal flows. They also came up with an initial data calculation scheme for impact box design.

Keywords: Continuous casting machine (CCM), tundish, metal flows, modelling.

References

1. Gushchin V.N., Ulianov V.A. Optimised tundish steel refining process. *Stal* [Steel], 2017, vol. 47, no. 5, pp. 320–324. (In Russ.)
2. V. V. Chislavlev, S. V. Feiler, D. V. Boikov [et al.] Design engineering of refractory components for use in refining continuous-cast steel. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2018, vol. 58, no. 6, pp. 603–607.
3. Enif Gutiérrez, Saul Garcia-Hernandez, José de Jesús Barreto [et al.] Mathematical Modeling of Inclusions Deposition at the Upper Tundish Nozzle and the Submerged Entry Nozzle. *Steel research international*, 2016, vol. 87, no. 11, pp. 1406–1416.
4. K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, M. V. Semenov [et al.] Tundish refining of metal. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 1, pp. 43–46. (In Russ.)
5. Vdovin K. N., Tochilkin V. V., Yachikov I. M. *Neprieryvnaya razlivka stali. Gidromekhanika mashin nepriernogo litia zagotovok: monografiya* [Continuous casting of steel. Hydrodynamics of continuous casting machines: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 348 p. (In Russ.)
6. Rodolfo D. Morales, Saul Garcia-Hernandez, Jose de Jesus Barreto [et al.] Multiphase flow modeling of slag entrainment during ladle change-over operation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, vol. 47, no. 4, pp. 2595–2606.
7. Ismael Calderón-Ramos, Rumualdo Servín-Castañeda, Alejandro Pérez-Alvarado [et al.] Modeling Study of Turbulent Flow in a Continuous Casting Slab Mold Comparing Three Ports SEN Designs. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 76–85.
8. A. V. Kuklev, V. V. Tinyakov, Yu. M. Ayzin [et al.] Optimization of the hydrodynamic characteristics of continuous casting tundishes aimed at removing exogenous nonmetallic inclusions. *Metallurg* [Metallurgist], 2004, no. 4, pp. 47–49. (In Russ.)
9. A.B. Sychkov, A.Yu. Stolyarov, G.Ya. Kamalova [et al.] Structure formation in thin wires. – *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 75–83. (In Russ.)

Received 30/05/19

Accepted 28/06/19

Образец для цитирования

Конструкции и расчет металлоприемника промежуточного ковша симметричной многоручьевой МНЛЗ / Вдовин К.Н., Точилкин Вас.В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 25–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-25-30>

For citation

Vdovin K.N., Tochilkin Vas.V., Dobrynin S.M., Melnichuk E.A., Tochilkin V.V. Design and Calculation of the Impact Box for a Symmetrical Multi-Strand Tundish. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 25–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-25-30>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 669.721:539.89

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-31-37>

МЕТОД СОЗДАНИЯ И РАСЧЕТ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ХОЛОДНОМУ ОБРАТНОМУ ВЫДАВЛИВАНИЮ МАГНИЯ

Каменецкий Б.И., Комкова Д.А.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Магний и его сплавы являются перспективными материалами для различных практических приложений. Однако из-за низкой пластичности при низких температурах применение данных материалов во многом ограничено. По сравнению с «горячими» методами обработки, «холодная» деформация при комнатной температуре или ниже способствует формированию мелкозернистой структуры и улучшению механических свойств. Всё чаще разрабатываются новые методы холодной деформации магния и совершенствуются уже известные. Одним из таких методов является метод обратного выдавливания. В данной работе предложен оригинальный метод создания противодавления в процессе обратного выдавливания с целью предотвращения растрескивания магния и успешной деформации металла при комнатной температуре. В эксперименте магниевая заготовка помещается в стальной контейнер, на торец заготовки устанавливается медная трубка. При опускании пуансона сначала происходит дорнование медной трубки, затем пуансон внедряется в материал заготовки и происходит формирование стенок стаканчика. Медная трубка прижимается пуансоном к контейнеру, возникающая при этом сила трения обеспечивает противодавление растущей в процессе деформации стенки стаканчика. Использование медной трубки приводит к созданию дополнительных сжимающих напряжений, что препятствует растрескиванию материала. В работе также приведена оценка величины противодавления. Результаты расчёта подтверждены экспериментально. В результате деформации методом обратного выдавливания с противодавлением при комнатной температуре из магния и его сплавов удалось получить стаканы с цельной стенкой толщиной от 1 до 4 мм в зависимости от толщины медной трубки. Средний размер зерна магния после такой деформации 5 мкм. Предложенный метод обратного выдавливания с противодавлением представляет научный и практический интерес, поскольку может быть использован для изготовления тонкостенных магниевых трубок, листов и фольг с мелкозернистой структурой.

Ключевые слова: магний, обратное выдавливание, противодавление, интенсивная пластическая деформация, структура.

Введение

Одним из основных путей улучшения свойств металлов и сплавов является формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структуры. По сравнению с обычными крупнокристаллическими материалами, такие материалы демонстрируют высокую прочность в сочетании с хорошей пластичностью, обладают повышенной коррозионной стойкостью [1]. Для получения объёмных УМЗ материалов активно применяются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), например равноканальное угловое прессование (РКУП) [2] или кручение под высоким давлением [3].

Методы ИПД могут применяться для обработки различных, в том числе малопластичных,

материалов, таких как магниевые сплавы [4, 5]. Магний и его сплавы демонстрируют хорошее сочетание высокой прочности и малой плотности, что является несомненным преимуществом для широкого использования в различных областях науки и техники. Тем не менее применение магния и его сплавов ограничено по причине низкой пластичности этого металла при комнатной температуре. Магний обладает ГПУ-решёткой, поэтому его деформация при комнатной температуре осуществляется в основном за счёт скольжения по плоскостям базиса (0001) [6]. Для активации дополнительных систем скольжения требуются повышенные температуры деформирования. Однако горячая пластическая деформация приводит к дополнительным затратам энергии на нагрев заготовок, увеличению длительности технологического цикла,

окислению поверхности полуфабрикатов и необходимости удаления окисленного слоя с использованием механической обработки. Обработка магния методами ИПД при температурах ниже 150°C зачастую приводит к разрушению образцов [7]. Разработка новых методов деформации, которые позволили бы осуществлять деформацию магния при комнатной температуре, является интересной и непростой задачей.

Как правило [8, 9], деформация в условиях высоких сжимающих напряжений предотвращает появление и развитие трещин в образце. Дополнительные сжимающие напряжения могут быть созданы сжатой жидкостью, пластичным твердым телом и механическим воздействием на деформируемое изделие. Например, в работах [10, 11] показано, что использование металлической оболочки при холодной осадке магния создаёт боковой подпор, приводя к дополнительному обжатию, что способствует увеличению степени деформации без разрушения образца.

В последние годы появился ряд работ, посвящённых деформации магния методом обратного выдавливания с использованием различных технических усовершенствований, к примеру, метод накопительного обратного выдавливания. В данном методе используется два пуансона: один – внутренний – для внедрения в образец и формирования стенки стаканчика, а второй – внешний – для вдавливания стенки обратно [12]. Многократное применение такой процедуры обработки позволило достичь больших степеней деформации и сформировать мелкозернистую структуру в образцах. Однако и в этом случае деформационная обработка проводилась при повышенных температурах от 80 до 380°C [13].

В работах [14, 15] в качестве способа деформации металла с ГПУ-решёткой на примере бериллия описан метод обратного выдавливания с реализацией противодействия. Эта технология позволила деформировать бериллий при комнатной температуре. Процесс осуществляли на гидравлическом прессе с двумя независимыми концентричными ползунами. От внутреннего ползуна усилие передается пуансону для выдавливания, а от наружного ползуна – кольцевому пуансону для создания противодействия на стенку полого изделия. Однако в работе [15] нет информации о величинах противодействия и удельных давлениях на пуансоне в конце процесса обратного выдавливания.

Целью данной работы является разработка методик создания и расчета противодействия для проведения экспериментов по холодному обратному выдавливанию полых образцов из магния марки Mg 90.

1. Материалы и методы

Предлагается усовершенствованный метод холодного обратного выдавливания магния и его сплавов с применением противодействия. Нами было разработано устройство для холодного обратного выдавливания с противодействием полых изделий из магния. Схема устройства представлена на рис. 1, где 1 – верхняя плита; 2 – пуансон; 3 – контейнер; 4 – трубка для создания противодействия; 5 – заготовка; 6 – выталкиватель; 7 – нижняя плита; 8 – деформированная трубка; 9 – полое изделие.

Для осуществления метода обратного холодного выдавливания с противодействием заготовку 5 из магния покрывают смазкой и помещают на выталкиватель 6. На торец заготовки устанавливают медную трубку 4 для создания противодействия. В нашем случае использовали трубку из технической меди диаметром 30 мм, толщиной стенки 2,8 мм и высотой 15 мм. Наружная и внутренняя поверхности трубки покрыты смазкой.

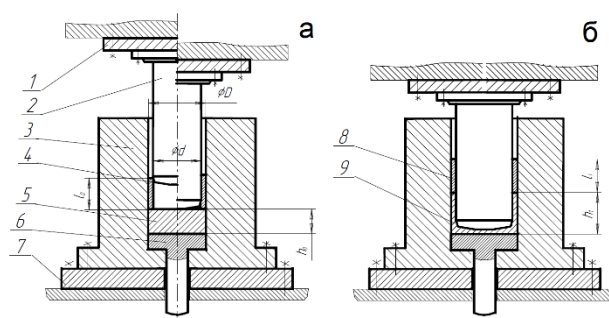


Рис. 1. Схема устройства для холодного обратного выдавливания с противодействием: а – в позициях до деформации и при дорновании трубки; б – после окончания процесса деформации

Процесс дорнования трубки 4 и последующего обратного выдавливания заготовки 5 выполняют за один цикл деформирования. В процессе дорнования наружная поверхность трубки плотно прижимается к стенке контейнера 3, а её внутренняя поверхность плотно зажата пуансоном 2. При дорновании стенка трубки утоняется до толщины 2,5 мм, длина трубки увеличивается до 16,6 мм, а предел текучести меди возрастает со 100 до 200 МПа. По окончании дорнования пуансон 2 внедряется в заготовку 5, и начинается следующая стадия: процесс обратного холодного выдавливания с противодействием, при котором стенка полого магниевого образца перемещает деформированную трубку 8 (рис. 1, а). На рис. 1, б показана схема обратного выдавливания с полученным в результате деформации полым

образцом магния со степенью деформации 81%.

После окончания процесса деформации пуансон 2 поднимают в верхнюю позицию. Затем включают выталкиватель пресса, который удаляет из канала контейнера 3 полое изделие 9 и деформированную трубку 8. В конце эксперимента выталкиватель опускают в нижнее положение, тем самым подготавливая устройство к следующему циклу деформирования.

В качестве исходного материала для экспериментов по обратному выдавливанию был взят слиток крупнозернистого магния марки Мг90 (чистота 99,90%). Из слитка были вырезаны образцы цилиндрической формы диаметром 30 мм и высотой 12 мм. Образцы помещались в устройство для холодного обратного выдавливания. Устройство устанавливается на гидравлический пресс марки ДБ 2240 усилием 10 МН. Все эксперименты по деформации магния осуществлялись при комнатной температуре.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Холодное обратное выдавливание магния без противодействия

Первые эксперименты по обратному холодному выдавливанию магния были выполнены без использования противодействия. Процесс обратного холодного выдавливания осуществлялся с непрерывным ростом усилия, в конечной стадии оно достигло значения 260 кН, а удельное давление на пуансоне составило 530 МПа. В результате такой деформации у полого образца на верхней части стенки высотой ~ 20 мм наблюдались мелкие трещины небольшой глубины. В нижней части стенки трещин не было. Из этого, в целом, неудачного эксперимента можно заключить, что при перемещении стенки на длину более 20 мм за счет сил трения создается противодействие, величина которого достаточна для предотвращения растрескивания. Был сделан вывод, что для получения образцов без трещин обратное холодное выдавливание необходимо выполнять только с использованием противодействия, что позволит избежать растрескивания за счет все возрастающих сил трения.

2.2. Холодное обратное выдавливание магния с противодействием

На **рис. 2** представлены полые образцы, полученные в результате деформации магния методом холодного обратного выдавливания с противодействием. Процесс обратного холодного выдавливания с противодействием осуществ-

лялся с непрерывным ростом усилия, в конечной стадии оно достигло значения 390 кН.



Рис. 2. Полые образцы со стенкой разной толщины – стаканы, полученные в результате деформации магния методом обратного выдавливания с противодействием при комнатной температуре

При этом удельное давление на пуансоне составляло 800 МПа, что соответствует примерно 7 значениям предела прочности литой заготовки (113 МПа) и 4 значениям предела прочности деформированного магния (196 МПа) [16]. Следовательно, процесс обратного холодного выдавливания литых заготовок магния марки Мг 90 выполняется при высоком уровне сжимающих напряжений, благодаря чему предотвращается возникновение пор и микротрещин, а также обеспечивается пластическое течение магния при пониженных температурах.

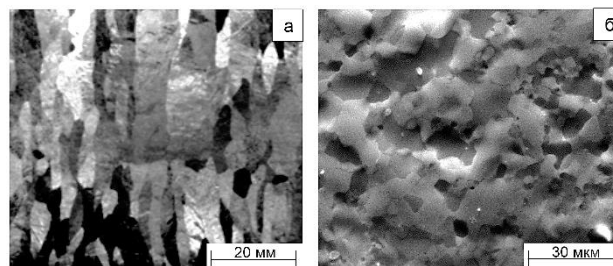


Рис. 3. Структура магния: а – исходная структура (до деформации); б – микроструктура магния, сформированная в результате деформации методом обратного выдавливания с противодействием при комнатной температуре

В результате обратного выдавливания с противодействием при комнатной температуре происходит существенное измельчение структуры исходной крупнозернистой заготовки магния. На **рис. 3** представлена структура магния до и после деформации. В исходном состоянии магниевая заготовка имела столбчатую структуру с зёрнами вытянутой формы длиной до 30 мм и шири-

ной до 5 мм (рис. 3, а). После обратного выдавливания формируется бимодальная структура со средним размером зерна 5 мкм (рис. 3, б). Подробное изучение структуры, текстуры и механических свойств полученных стенок является предметом текущих исследований.

2.3. Расчет величины противодействия при обратном холодном выдавливании

Для расчета величины противодействия в процессе холодного обратного выдавливания необходимо вычислить усилие перемещения деформированной трубки $P_{\text{пер}}$. На рис. 4 показана схема напряжений и сил трения, возникающих при перемещении деформированной трубки в промежуточной стадии процесса обратного холодного выдавливания. После окончания дорнования наружная поверхность трубки плотно прижимается к стенке контейнера, а её внутренняя поверхность плотно зажата пуансоном, поэтому на поверхностях действуют радиальные напряжения σ_{rr} . При перемещении деформированной трубки на наружной поверхности возникает сила трения f_1 , а на внутренней поверхности сила трения f_2 . Силы трения f_1 и f_2 действуют на единицах длины поверхностей.

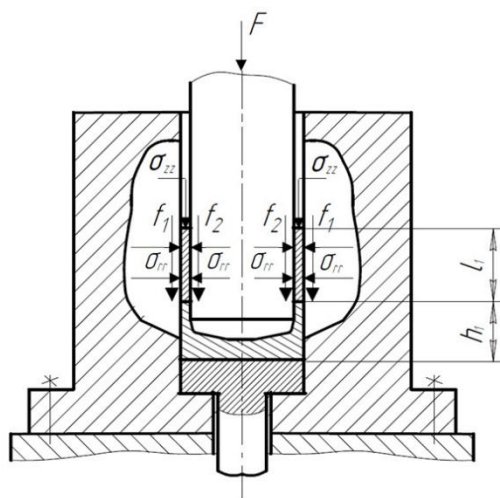


Рис. 4. Схема напряжений и сил трения, возникающих при перемещении деформированной трубки в процессе обратного холодного выдавливания

В литературе [17] приводятся формулы для расчёта усилия выталкивания стержневых деталей после высадки. Основными факторами, от которых зависит усилие выталкивания, являются: схема деформации, материал и размеры заготовки, коэффициент трения между отштампованной заготовкой и стенками матрицы и давление, действующее со стороны отштампованной

заготовки на стенки матрицы. Усилие выталкивания $P_{\text{выт}}$ рассчитывается по формуле

$$P_{\text{выт}} = p\mu\pi dl, \quad (1)$$

где p – давление, действующее со стороны отштампованной заготовки на стенки матрицы, определяется как $p = (0,8 - 1,0)\sigma_m$, σ_m – предел текучести материала деформированной заготовки, μ – коэффициент трения между отштампованной заготовкой и стенками матрицы, d – диаметр стержня отштампованной заготовки, l – длина стержня отштампованной заготовки.

Используя формулу (1) [17], рассчитаем усилие перемещения деформированной медной трубки $P_{\text{пер}}$. При выполнении расчёта примем допущение, что коэффициент трения μ имеет одинаковые значения на наружной и внутренней поверхностях при перемещении деформированной трубки. Усилие перемещения деформированной трубки определяется по формуле

$$P_{\text{пер}} = F_1 + F_2. \quad (2)$$

где F_1 – сила трения, возникающая при перемещении наружной поверхности деформированной трубки по стенке контейнера, F_2 – сила трения, возникающая при перемещении внутренней поверхности деформированной трубки по пуансону. Сила трения F_1 определяется по формуле

$$F_1 = \sigma_{rr}\mu\pi Dl, \quad (3)$$

где σ_{rr} – напряжение, действующее со стороны стенки контейнера на наружную поверхность деформированной трубки, $\sigma_{rr} = (0,8 - 1,0)\sigma_m$, σ_m – предел текучести технической меди, деформированной со степенью 10% ($\sigma_m = 200$ МПа) [18]; μ – коэффициент трения, $\mu = 0,1$; D – внешний диаметр медной трубки, $D = 30$ мм; l – длина трубки, $l = 16,6$ мм.

Аналогичным образом рассчитывается сила трения F_2 , возникающая при перемещении внутренней поверхности деформированной трубки по пуансону. В этом случае σ_{rr} – это напряжение, действующее со стороны пуансона на внутреннюю поверхность деформированной трубки, а внутренний диаметр трубки d равен 25 мм.

$$F_2 = \sigma_{rr}\mu\pi dl. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем, что формула для определения усилия перемещения деформированной трубки $P_{\text{пер}}$

$$P_{\text{пер}} = \sigma_{rr}\mu\pi l(D + d). \quad (5)$$

Используя (5), находим, что усилие перемещения деформированной медной трубки со степенью деформации при дорновании 10% равно 57 336,4 Н.

Величина противодавления, которое создаётся в стенке полого изделия при обратном выдавливании, определяется как напряжение σ_{zz} :

$$\sigma_{zz} = \frac{P_{\text{пер}}}{S}, \quad (6)$$

где S – площадь поперечного сечения стенки медной трубки, $S = \frac{\pi}{4} D^2 - d^2 = 215,9 \text{ мм}^2$.

Подставляя в (6) значения $P_{\text{пер}}$ и S , получаем, что величина напряжения противодавления σ_{zz} составляет 265,6 МПа. Из (5) и (6) видно, что σ_{zz} линейно зависит от длины деформированной трубки, а также от прочностных характеристик материала трубки.

Таким образом, проведенные выше расчеты позволяют оценить значение величины противодавления, при котором в эксперименте по обратному холодному выдавливанию со степенью деформации 81% удалось предотвратить растрескивание магния. Оказалось, что для этого достаточно создать противодавление $\sigma_{zz} = 266 \text{ МПа}$, равное примерно двум пределам прочности литого магния марки Mg90 [19].

Заключение

В работе предложен усовершенствованный метод холодного обратного выдавливания с использованием противодавления, который позволяет осуществить деформацию магниевой заготовки при комнатной температуре. Противодавление создается медной трубкой, которая деформируется в ходе эксперимента и давит на стенки формирующегося магниевого стаканчика. Благодаря созданию противодавления в деформируемом магниевом образце удаётся реализовать условия всестороннего сжатия, что предотвращает возникновение пор и микротрещин в материале и позволяет получить изделие с цельной стенкой необходимой толщины. Структурное исследование стенки полученного магниевого стаканчика показало, что после одного цикла деформации методом обратного выдавливания с противодавлением происходит существенное измельчение зерна по сравнению с исходной литой заготовкой. Проведенная теоретическая оценка показала, что для предотвращения растрескивания магния в ходе деформации методом обратного выдавливания достаточно создать противодавление, равное 266 МПа. Полученная величина противодавления хорошо соответствует результатам натурных экспериментов по деформации магния без противодавления.

Разработанный метод деформации магниевых сплавов путем обратного выдавливания с

противодавлением при комнатной температуре может найти применение на практике. По сравнению с типовыми технологиями горячего прессования предлагаемый метод позволяет устранить нагрев заготовок, окисление поверхности полых изделий, применение операций по удалению окисленного слоя и сократить срок изготовления продукции. Магниевые стаканчики, получаемые в результате предложенного метода, могут быть использованы в качестве корпусов магниевых батареек. Более того, такой стаканчик при отрезании дна может выступать как трубчатая заготовка, пригодная для получения тонкостенных магниевых трубок большой длины.

Таким образом, полученные в данной работе результаты представляют как научный, так и практический интерес.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» №АААА-А18-118020190104-3 при частичном финансировании по проекту УрО РАН №18-10-2-24.

Список литературы

1. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, MinSong, Yuntian Zhu. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. Mater. Sci. and Eng. R: Reports. 113, 1–59 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
2. Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы после наноструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №3 (27). С. 45–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12860920>.
3. Структурно-фазовые превращения, происходящие в псевдомонокристаллическом цирконии при тепловой деформации в камере бриджмена / Егорова Л.А., Хлебникова Ю.В., Пацелов А.М., Пилюгин В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3 (16). С. 120–128. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35682097>.
4. F.-D. Dumitru, O.F. Higuera-Cobos, J.M. Cabrera. ZK60 alloy processed by ECAP: Microstructural, physical and mechanical characterization. Mater. Sci. and Eng. A. 594, 32–39 (2014). DOI: 10.1016/j.msea.2013.11.050
5. Satyam Suwas, G. Gottstein, R. Kumara. Evolution of crystallographic texture during equal channel angular extrusion (ECAE) and its effects on secondary processing of magnesium. Mater. Sci. and Eng. A. 471, 1–14 (2007). DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.030.
6. M.R. Barnett. Forming of magnesium and its alloys. Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 357 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=55RwAgAAQBAJ&pg=P1&ots=ed2Aokumvk&dq=%20Forming%20of%20magnesium%20and%20its%20alloys%20Fundamentals%20of%20%20magnesium%20alloy%20metallurgy&lr&hl=ru&pg=PA6>

- 2#v=onepage&q=Forming%20of%20magnesium%20and%20its%20alloys%20Fundamentals%20of%20%20magnesium%20alloy%20metallurgy&f=false
7. N. Bayat Tork, N. Pardis, R. Ebrahimi Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process. *Mater. Sci. and Eng. A.* 560, 34–39 (2013). DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.085.
 8. Xiao Guang Qiao, Ya Wei Zhao, Wei Min Gan et al. Hardening mechanism of commercially pure Mg processed by high pressure torsion at room temperature. *Mater. Sci. and Eng. A.* 619, 95–106 (2014). DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.068.
 9. A.Yu. Volkov, I.V. Kliukin. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Mater. Sci. and Eng. A.* 624, 56–60 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.104>.
 10. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке // *Технология легких сплавов.* 2012. №1. С. 86–92. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18772347>.
 11. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Волков А.Ю. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором // *Заготовительные производства в машиностроении.* 2013. №9. С. 15–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20314375>.
 12. S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki. Accumulative back extrusion (ABE) processing as a novel bulk deformation method. *Mater. Sci. and Eng. A.* 504, 104–106 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.10.027>.
 13. S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki, H. Paul. Characterization of ultrafine and nanogained magnesium alloy processed by severe plastic deformation. *Mater. Character.* 87, 27–35 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.10.024>.
 14. Гурьева И.И., Чухрова М.В. Магниево-алюминиевые сплавы. Ч.2.: Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов. М.: Металлургия, 1978. 296 с.
 15. Механические свойства материалов под высоким давлением: пер. с англ. / ред. Х.Л. Пью. М.: Мир, 1973. 370 с.
 16. Эйдензон М.А. Магний. М.: Металлургия, 1969. 352 с.
 17. Навроцкий Г.А. Холодная объемная штамповка: справ. Т. 3. М.: Машиностроение, 1987. 384 с.
 18. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справ. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
 19. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Возможности нового метода повышения пластичности магния при холодной осадке // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2017. № 1. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-53-60>.

Поступила 20.06.19

Принята в печать 23.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-31-37>

CREATING AND CALCULATING BACKPRESSURE DURING EXPERIMENTS IN COLD BACKWARD EXTRUSION OF MAGNESIUM

Boris I. Kamenetskiy – Cand.Sci. (Eng.), Lead Researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: kamenetski@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-6306-6590

Daria A. Komkova – Postgraduate Student, Lead Engineer

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913

Abstract. Magnesium and its alloys are of interest because they can potentially have various practical applications. However, due to poor ductility at low temperatures the use of magnesium is largely limited. Unlike “hot” deformation methods, “cold” deformation at room temperature or lower temperatures leads to the formation of a fine-grained structure and improved mechanical properties. Development of new methods for cold deformation of magnesium and optimization of the existing techniques is an increasingly growing trend. Backward extrusion is one of such existing techniques. This paper describes an original method that involves creating a backpressure during backward extrusion to prevent cracking of magnesium and ensure successful deformation of metal at room temperature. As part of the experiment, a magnesium workpiece is placed in a steel container, with a copper tube attached to its end. When the punch goes down, it first burnishes the copper tube and then it penetrates the workpiece material forming cup walls. The

punch presses the copper tube to the container. The resultant friction serves as a backpressure counteracting the growing Mg-wall. The copper tube creates additional compressive stresses which help prevent material cracking. The paper also calculates the level of backpressure, and the calculated data are confirmed through experiment. Depending on the copper tube thickness, cups of magnesium and magnesium alloys were obtained through deformation by backward extrusion with backpressure at room temperature with solid 1 to 4 mm thick walls. After such deformation, the average grain size of magnesium is 5 μm . The described method of back extrusion with backpressure is of scientific and practical interest as it can be used for fabrication of thin-walled magnesium tubes, as well as sheets and foils with a fine-grained structure.

Keywords: Magnesium, backward extrusion, backpressure, severe plastic deformation, structure.

This research was carried out as part of the Governmental Assignment No.AAAA-A18-118020190104-3 entitled "Pressure" and was partially funded under the Project of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No.18-10-2-24.

References

1. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, MinSong, Yuntian Zhu. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: Reports*. 113, 1–59 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
2. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Nikitenko O.A. Investigation of the state of the carbide phase after nanostructuring and subsequent drawing of low carbon steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 3 (27), pp. 45–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12860920>. (In Russ.)
3. Egorova L.A., Khlebnikova Yu.V., Patselov A.M., Pilyugin V.P. Structural phase transformations in zirconium pseudo-single crystals subjected to thermal deformation in the Bridgman 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35682097>. (In Russ.)
4. F.-D. Dumitru, O.F. Higuera-Cobos, J.M. Cabrera. ZK60 alloy processed by ECAP: Microstructural, physical and mechanical characterization. *Materials Science and Engineering: A*. 594, 32–39 (2014). DOI: 10.1016/j.msea.2013.11.050
5. Satyam Suwas, G. Gottsteina, R. Kumara. Evolution of crystallographic texture during equal channel angular extrusion (ECAE) and its effects on secondary processing of magnesium. *Materials Science and Engineering: A*. 471, 1–14 (2007). DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.030.
6. M.R. Barnett. Forming of magnesium and its alloys. Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 357 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=55RwAgAAQBAJ&lpg=P1&ots=ed2Aokumvk&dq=%20Forming%20of%20magnesium%20and%20its%20alloys%20Fundamentals%20of%20magnesium%20alloy%20metallurgy&hl=ru&pg=PA62#v=onepage&q=Forming%20of%20magnesium%20and%20its%20alloys%20Fundamentals%20of%20magnesium%20alloy%20metallurgy&f=false>
7. N. Bayat Tork, N. Pardis, R. Ebrahimi. Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*. 560, 34–39 (2013). DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.085.
8. Xiao Guang Qiao, Ya Wei Zhao, Wei Min Gan et al. Hardening mechanism of commercially pure Mg processed by high pressure torsion at room temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 619, 95–106 (2014). DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.068.
9. A.Yu. Volkov, I.V. Kliukin. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Materials Science and Engineering: A*. 624, 56–60 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.104>.
10. Kamenetskiy B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. The effect of lateral backpressure conditions on magnesium plasticity during cold upsetting. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2012, no. 1, pp. 86–92. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18772347>. (In Russ.)
11. Kamenetskiy B.I., Loginov Yu.N., Volkov A.Yu. Methods and apparatuses for improving the plasticity of brittle materials under cold upsetting with lateral backpressure. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Production of blanks in machine building], 2013, no. 9, pp. 15–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20314375>. (In Russ.)
12. S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki. Accumulative back extrusion (ABE) processing as a novel bulk deformation method. *Materials Science and Engineering: A*. 504, 104–106 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.10.027>.
13. S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki, H. Paul. Characterization of ultrafine and nanograind magnesium alloy processed by severe plastic deformation. *Materials Characterization*. 87, 27–35 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.10.024>.
14. Gurieva I.I., Chukhrova M.V. *Magnievye splavy. Chast 2. Spravochnik: Tekhnologiya proizvodstva i svoystva otlivok i deformirovannykh polufabrikatov* [Magnesium alloys. Part II. Reference book: Production technology and properties of castings and deformed semi-finished products]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 296 p. (In Russ.)
15. *Mekhanicheskie svoystva materialov pod vysokim davleniyem: per. s angl.* [Mechanical properties of materials under high pressure: Translated from English]. Ed. by H.L. Pew. Moscow: Mir, 1973, 370 p. (In Russ.)
16. Eydenzon M.A. *Magniy* [Magnesium]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 352 p. (In Russ.)
17. Navrotsky G.A. *Kholodnaya obiemnaya shtampovka. Spravochnik: tom 3* [Cold forging. Reference book: Volume III]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 384 p. (In Russ.)
18. Tretiakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniyem. Spravochnik* [Mechanical properties of metals and alloys under forming. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)
19. Kamenetskiy B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. The capabilities of a new cold upsetting method for magnesium plasticity. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of Russian universities. Nonferrous metallurgy], 2017, no. 1, pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-53-60>. (In Russ.)

Received 20/06/19
Accepted 23/07/19

Образец для цитирования

Каменецкий Б.И., Комкова Д.А. Метод создания и расчет противодавления в экспериментах по холодному обратному выдавливанию магния // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 31–37. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-311-37>

For citation

Kamenetskiy B.I., Komkova D.A. Creating and Calculating Backpressure During Experiments in Cold Backward Extrusion of Magnesium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 31–37. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-31-37>

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА АМг5, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ

Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Аддитивные технологии быстро развиваются, но промышленности требуется производство крупногабаритных деталей, а самые распространённые процессы, такие как селективное лазерное плавление и лазерная наплавка, не могут удовлетворить данному требованию. В этом направлении проволочно-дуговая многослойная наплавка позволяет производить крупногабаритные детали, к примеру, для аэрокосмической отрасли. Однако металл, полученный с помощью процесса дуговой наплавки, имеет большие остаточные напряжения из-за высоких скоростей наплавки и чрезмерного тепловложения. К тому же наплавленный металл имеет низкие механические свойства из-за влияния пористости и неблагоприятной микроструктуры. Деформационное упрочнение во время процесса наплавки, к примеру поверхностное деформационное упрочнение высокоскоростным ударным воздействием, может улучшить структуру, снизить пористость и остаточные напряжения, тем самым улучшив свойства металла, полученного с помощью дуговой наплавки. В статье описано экспериментальное исследование механических свойств алюминиевых образцов, полученных методом многослойной наплавки при различных температурных циклах, с применением деформационного упрочнения и без применения деформационного упрочнения. Представлены результаты механических испытаний образцов. Обнаружено влияние деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5.

Ключевые слова: аддитивные технологии, многослойная наплавка, cold metal transfer, СМТ, алюминий, АМг5, деформационное упрочнение, ударное воздействие, механические свойства, прочность при растяжении, ударная вязкость, проволочно-дуговая послойная наплавка, WAAM, дуговая сварка.

Введение

Процесс проволочно-дуговой многослойной наплавки подразумевает наплавку детали слой за слоем с подачей проволоки в качестве присадочного материала [1]. Данный процесс набирает всё большую популярность благодаря высокой скорости наплавки изделий и простоте используемого оборудования. Многослойная наплавка имеет большие перспективы в аэрокосмической и судостроительной отраслях, в частности, для алюминиевых сплавов, которые являются одними из самых востребованных в данных отраслях [2]. При применении дуговой наплавки возможно производить крупногабаритные детали с высокими механическими свойствами, с гораздо более высокими скоростями наплавки, чем при лазерной многослойной наплавке: процессом дуговой наплавки можно получать до 6 кг/ч, тогда как при лазерной многослойной наплавке – до 1 кг/ч [3].

Также в процессе дуговой наплавки возможно производить заготовки, практически совпадающие по геометрическим параметрам с конечной деталью, что требует незначительной механической обработки и приводит к значительной экономии металла [4]. Однако известны исследования, в которых описываются факторы, негативно влияющие на механические свойства получаемых изделий. Основными из них считаются пористость, остаточные напряжения и дендритная структура наплавленного металла [5–10]. От этих характеристик зависят такие механические свойства, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость [11]. Также металл, полученный методом многослойной наплавки, имеет ряд недостатков: неблагоприятная дендритная структура, пористость и, как следствие, низкие механические свойства [12]. Решением этих проблем может стать послойное деформационное упрочнение. Известно исследование, в котором улучшение механических свойств и структуры производилось с помощью деформации роликом [13]. Деформация роликом

© Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р., 2019

преимущественно улучшает внутреннюю структуру. Принято решение использовать поверхностное деформационное упрочнение. Удары производятся бойком после наплавки каждого слоя. Предполагается, что деформационное упрочнение поможет повысить плотность наплавляемого материала, измельчить структуру и в результате получить более высокие механические свойства. Известна работа [14], в которой для снижения остаточных сварочных напряжений и деформаций коробления предложен метод повторного локального глубокого пластического деформирования притупленным индентором, основанный на закономерностях возникновения благоприятных остаточных напряжений при контактом воздействии.

Методы исследования

Для подтверждения гипотезы проведены сравнительные эксперименты по многослойной наплавке образцов с применением и без применения послыйного деформационного упрочнения, а также с паузой между слоями, равной паузе, необходимой для проведения операции деформационного упрочнения. Паузы также используются для имитации наплавки крупногабаритных деталей.

Многослойная наплавка производится с помощью процесса СМТ (холодный перенос металла). Процесс СМТ выбран по причине того, что обеспечивает высокую скорость наплавки относительно всех методов дуговой наплавки, и тепловложение в основной металл во время этого процесса минимально по сравнению с другими методами наплавки [15]. В качестве источника питания используется Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ.

Эксперименты по многослойной наплавке производились с применением робота Fanuc Arc Mate 100iC. Благодаря специальному программному обеспечению ARC TOOL контроллеры роботов серии ARC Mate подготовлены для взаимодействия со сварочными источниками многих известных производителей, в том числе с используемым нами источником Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ. Специальные функции данного программного обеспечения позволяют в разы уменьшить время, необходимое для подготовки программы и задания траектории наплавки.

Управление роботом осуществляется с помощью системного контроллера Fanuc R-30iA. Этот контроллер имеет простую архитектуру и способен выполнять задачи различной сложности, что играет достаточно важную роль при последующем внедрении технологии в производство.

Для послыйного деформационного упрочне-

ния образцов используется ручной пневматический молоток Sumake ST-M3009/Н. Благодаря его небольшому весу и габаритам деформационное упрочнение можно производить с минимальной задержкой после наплавки.

Используемое оборудование приведено на **рис. 1**.

В качестве материала использовалась проволока из сплава АМг5 диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа применялся аргон газообразный, высшего сорта по (99,993%), расход защитного газа 10 л/мин. Режимы наплавки приведены в **табл. 1**. В таблице: $V_{св}$ – скорость наплавки, $V_{пп}$ – скорость подачи проволоки, $Q_{защ}$ – расход защитного газа, $I_{св}$ – ток наплавки, $U_{дуги}$ – напряжение дуги. Параметры процесса для образцов указаны в **табл. 2**.

Таблица 1

Режимы наплавки

Параметр	Значение
$V_{св}$, м/мин	0,4
$V_{пп}$, м/мин	5
$Q_{защ}$, л/мин	10
$I_{св}$, А	45
$U_{дуги}$, В	17

При наплавке всех образцов использовалась одна и та же стратегия заполнения (**рис. 2**): зигзагообразное продольное заполнение, последующие слои находятся прямо над предыдущими, начало последующего слоя находится в месте окончания предыдущего слоя. Согласно работам [16] и [17] подобная стратегия заполнения обеспечивает наиболее высокие механические свойства наплавленного материала.

Образцы наплавлены с разными геометрическими характеристиками (**табл. 3 и 4**): 3 образца высотой 21 мм для испытаний на разрыв перпендикулярно направлению выращивания и 3 образца высотой 75 мм для испытаний на разрыв вдоль направления выращивания. Деформационное упрочнение на каждый слой образцов производилась сразу после наплавки слоя, пока наплавленный материал еще не остыл ниже 300°C и легко подвергался деформированию. Внешний вид образцов, полученных при многослойной наплавке, показан на **рис. 3, 4**. Для уменьшения статистического разброса каждый образец наплавлен в количестве трёх штук.

Далее из наплавленных образцов были изготовлены образцы под механические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84), тип образца – 7. На **рис. 5** представлена схема испытаний на разрыв и чертеж образца.



а



б



в



г

Рис. 1. Оборудование, используемое для проведения экспериментов по многослойной наплавке с послойным деформационным упрочнением: а – робот Fanuc Arc Mate 100iC; б – системный контроллер Fanuc R-30iA; в – источник питания Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT; г – пневматический молоток Sumake ST-M3009/H

Таблица 2

Параметры процесса для образцов

Номер образца	Количество слоёв	Деформационное упрочнение	Время деформационного упрочнения, с	Сила удара, Дж	Количество ударов в минуту	Паузы, с
1	5	-	-	-	-	0
2	5	+	60	7,1	3200	60
3	5	-	-	-	-	60
4	25	-	-	-	-	0
5	25	+	60	7,1	3200	60
6	25	-	-	-	-	60

Таблица 3

Геометрические характеристики образцов №1, 2, 3

Геометрическая характеристика	Размер, мм
Высота	21
Ширина	17
Длина	120

Таблица 4

Геометрические характеристики образцов №4, 5, 6

Геометрическая характеристика	Размер, мм
Высота	75
Ширина	20
Длина	70

Также были проведены испытания образцов на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78), тип образцов - 1. При испытаниях образцов на ударный изгиб удар производился в двух направлениях: перпендикулярно направлению выращивания (KCU_1) и вдоль направления выращивания (KCU_2). На **рис. 6** представлена схема испытаний на ударный изгиб и чертеж образцов.

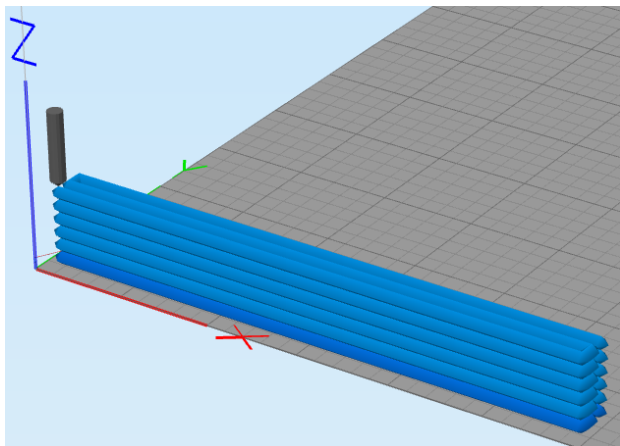


Рис. 2. Стратегия заполнения при наплавке образцов

Результаты исследования

Результаты испытаний наплавленных образцов из сплава АМг5 систематизированы в виде **табл. 5**. В таблице приведены усреднённые результаты механических испытаний наплавленных образцов. Для сравнения механических свойств наплавленных образцов с механическими свойствами стандартных изделий в **табл. 5** также приведены механические свойства листа по ГОСТ 21631-76 и плиты по ГОСТ 17232-99 из сплава АМг5.

Полученные результаты механических испытаний на **рис. 7** представлены в виде диаграмм. Из диаграмм видно, что механические свойства образцов различаются в зависимости от температурного цикла наплавки, использования деформационного упрочнения и наличия пауз между слоями. Стоит заметить, что относительно-

ное удлинение у образцов высотой 21 мм, подвергнутых разрыву перпендикулярно направлению выращивания, больше, чем у образцов высотой 75 мм, подвергнутых разрыву вдоль направления выращивания.

Также из результатов видно, что образцы, полученные при непрерывной наплавке, имеют механические свойства равные либо превышающие механические свойства стандартных изделий. Но при наплавке крупногабаритных изделий всегда будет присутствовать пауза между слоями, то есть непрерывная наплавка невозможна. Непрерывную наплавку можно использовать при мелком ремонте.

Кроме того, при анализе результатов механических испытаний наплавленных образцов из сплава АМг5 замечено, что деформационное упрочнение улучшает их механические свойства. Это хорошо видно на примере сравнения образцов №6 и 5, №3 и 2. Образцы №2 и 5, полученные наплавкой с применением послойного деформационного упрочнения, имеют лучшие механические свойства, чем образцы №3 и 6, наплавленные с паузами между слоями, но без применения послойного деформационного упрочнения.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов и стандартных материалов

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	KCU_1 , кДж/м ²	KCU_2 , кДж/м ²
Лист, ГОСТ 21631-76	275	130	12-15	-	-
Плита, ГОСТ 17232-99	255-265	110-120	12-13	300	
Образец № 1	263,8	170,8	40,0	311	-
Образец № 2	243	192,9	33,4	335	-
Образец № 3	259,4	182,5	31,7	316	-
Образец № 4	259	230	24	342	607
Образец № 5	196	131	10	293	609
Образец № 6	156	111	8	243	550



Образец №1



Образец №2



Образец №3

Рис. 3. Внешний вид образцов для испытаний поперек направления выращивания, полученных при многослойной наплавке



Образец №4

Образец №5

Образец №6

Рис.4. Внешний вид образцов для испытаний вдоль направления выращивания, полученных при многослойной наплавке

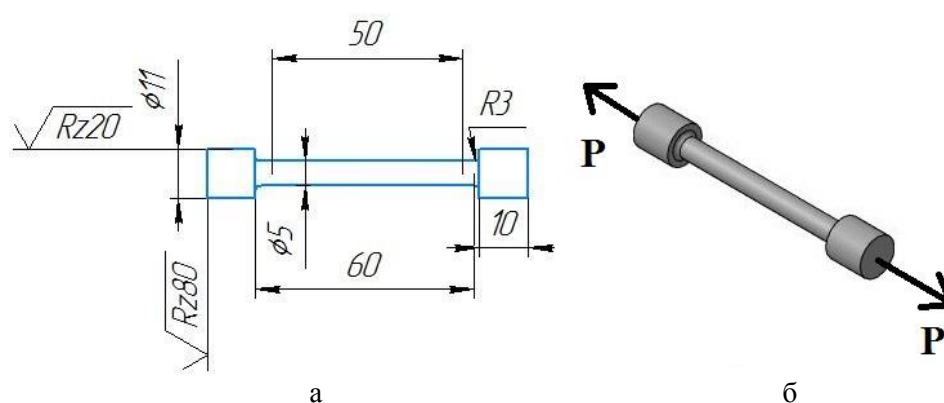


Рис. 5. Чертеж образца (а) и схема механического испытания на растяжение (б)

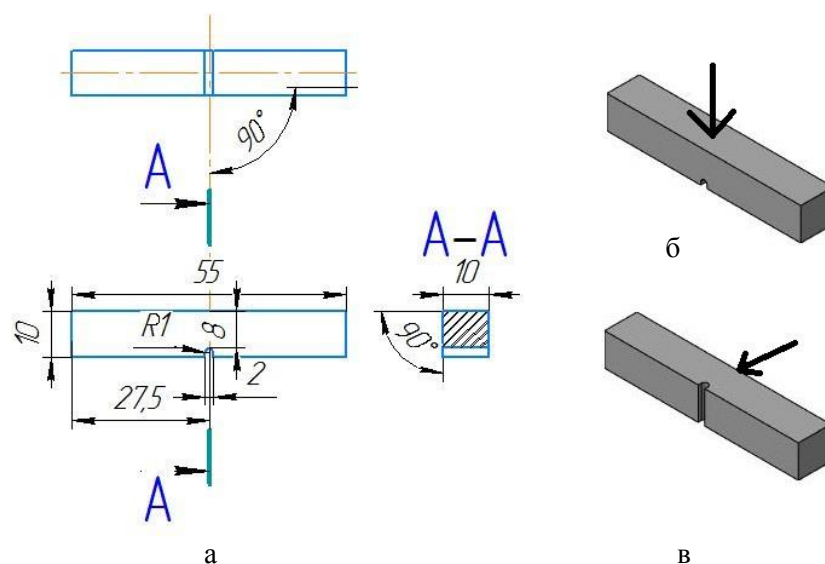


Рис. 6. Чертеж образца и схема механического испытания на ударный изгиб:
а – чертеж образца для испытания; б – схема испытания при ударе вдоль направления выращивания;
в – схема испытания при ударе поперек направления выращивания

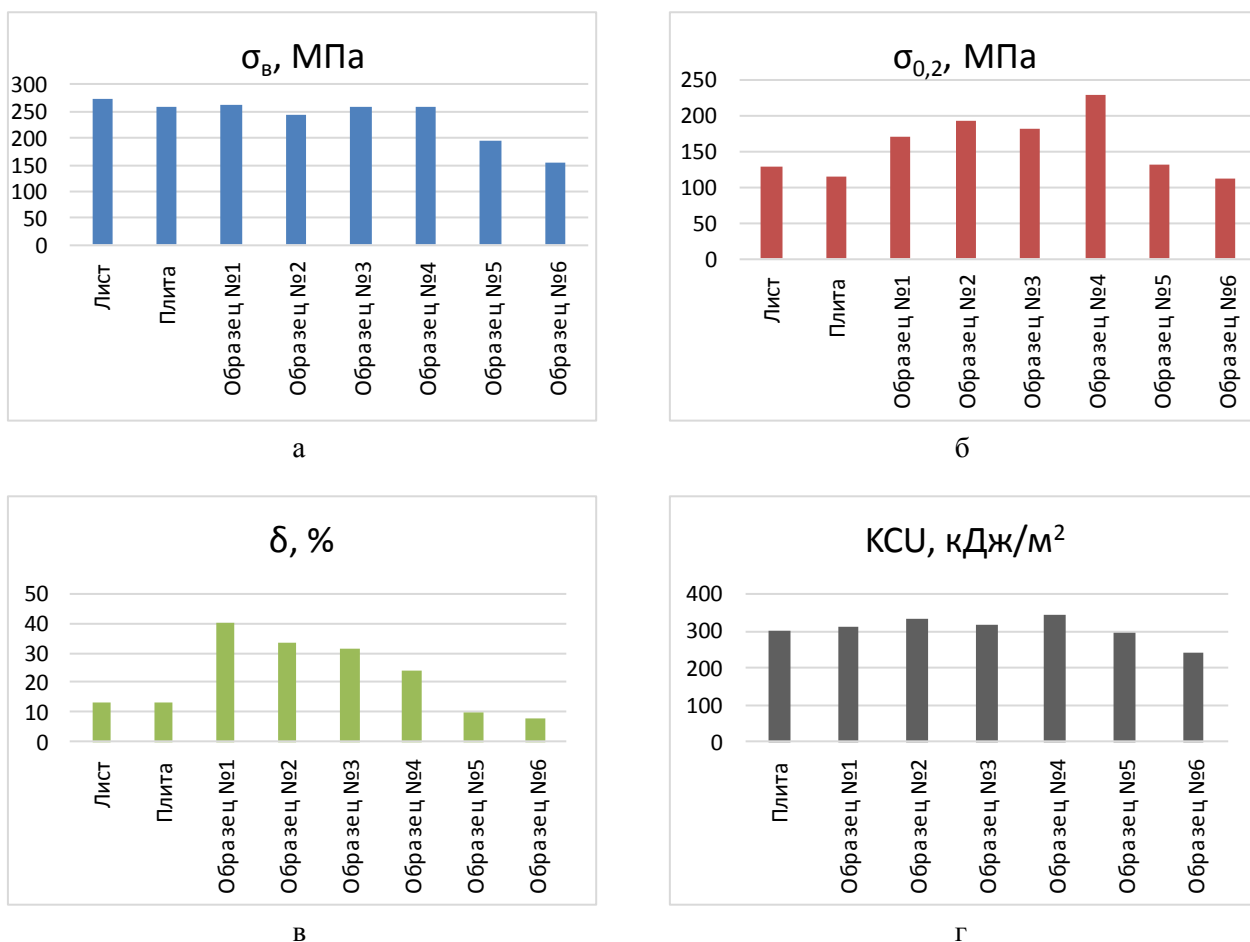


Рис. 7. Диаграммы механических свойств наплавленного сплава АМг5 и стандартных изделий из сплава АМг5: а – предел прочности; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – ударная вязкость

Заключение

Проведены предварительные исследования повышения механических свойств образцов из алюминиевого сплава АМг5, полученных с помощью дуговой наплавки путем применения послойного деформационного упрочнения. Установлено, что применение послойного поверхностного деформационного упрочнения повышает механические свойства наплаваемых изделий на 25%. При механических испытаниях наплавленных образцов наблюдается анизотропия механических свойств. В частности, ударная вязкость в направлении выращивания образца более чем в два раза превышает ударную вязкость перпендикулярно направлению выращивания.

В дальнейших работах планируется приведение результатов металлографии образцов с целью выявления влияния деформационного упрочнения на структуру и пористость наплавленного материала. Также планируется проведение экспериментальных работ по подбору параметров режима

наплавки и режима деформационного упрочнения с точки зрения достижения наилучших механических свойств наплаваемых образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках соглашения С-26/787 от 21.12.2017 (изучение современного состояния вопроса) и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта №18-08-01016 А (проведение экспериментальных исследований).

Список литературы

1. Wu Bintaο; Pan Zengxi; Ding Donghong; Cuiuri Dominic; Li Huijun; Xu Jing; Norrish John, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES 35, 2018, pp. 127–139.
2. Donghong Ding, Zengxi Pan *, Stephen van Duin, Huijun Li and Chen Shen, Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing. Materials 2016, 9, 652.
3. Iván Tabernero, Amagoia Paskual, Pedro Álvarez, Alfredo Suárez, Study on Arc Welding processes for High Deposi-

- tion Rate Additive Manufacturing, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. Eng. 68, 2018, pp. 358–362.
4. Lockett, Helen; Ding, Jialuo; Williams, Stewart and Martina, Filomeno (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacturing: design rules and build orientation selection. *Journal of Engineering Design*, 28(7-9) pp. 568–598.
5. E.M. Ryan, T.J. Sabin, J.F. Watts, M.J. Whiting, The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319, *Journal of Materials Processing Tech.* 262, 2018, pp. 577–584.
6. Zeqi Hu, Xunpeng Qin, Tan Shao, Welding Thermal Simulation and Metallurgical Characteristics Analysis in WAAM for 5CrNiMo Hot Forging Die, *International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017*, 17–22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, vol 207, 2017, pp 2203–2208.
7. J Bai et al, Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 167 012045.
8. Markus Hirtler, Angelika Jedynak, Benjamin Sydow, Alexander Sviridov, and Markus Bambach, Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences* 190, 02005, 2018, ICNFT 2018.
9. Zhizhuang Hao, Sansan Ao, Yangchuan Cai, Wei Zhang and Zhen Luo, Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals* 2018, 8, 595.
10. Z D Ni, B L Dong, S B Lin, C L Yang, C L Fan, J X Shi, Numerical Analysis on Stress Evolution During GTA-Additive Manufacturing of Thin-Walled Aluminum Alloys. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1063, 2018 012083.
11. Qianru Wu, Jiping Lu, Changmeng Liu *, Hongli Fan, Xuezh Shi, Jie Fu and Shuyuan Ma, Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials* 2017, 10, 749.
12. Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter, Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing* 21, 2018, 340–349.
13. J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell, The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, *Materials Characterization*, 2016, vol. 114, pp. 103–114.
14. Сапожников С.Б., Заребельный С.С., Шакиров А.А. Релаксация сварочных напряжений при помощи глубокого пластического деформирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2013. 13 (2). 81–86.
15. Baoqiang Cong, Zewu Qi, Bojin Qi, Hongye Sun, Gang Zhao and Jialuo Ding, A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. *Appl. Sci.* 2017, 7, 275.
16. Jie Fu, Kun Qiu, Lin Gong, Changmeng Liu, Qianru Wu, Jiping Lu, Hongli Fan. Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. *MATEC Web of Conferences* 128, 05009, 2017, EITCE 2017.
17. X Zhang, F Martina, J Ding, X Wang and SW Williams, Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Fract Engng Mater Struct*, 2017, 40, 790–803.

Поступила 27.06.19

Принята в печать 29.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

UNDERSTANDING THE EFFECT OF WORK HARDENING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY 5056 SPECIMENS PRODUCED BY MULTILAYER SURFACING

Maksim F. Kartashev – Postgraduate Student, Engineer

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: gonchark@mail.ru

Gleb L. Permyakov – Junior Research Fellow

Laboratory “Processing of Materials with Highly Concentrated Energy Sources”, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Dmitry N. Trushnikov – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: trdimitr@yandex.ru

Maksim R. Mindibaev – Bachelor’s Degree Student

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: max.mindibaev@gmail.com

Abstract. In spite of the rapid development of additive manufacturing technology, the industry has a demand for large parts and the most common processes, such as Selective Laser Melting or Laser Cladding, cannot satisfy this demand. In this regard, Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) enables to produce large components,

such as those finding application in the aerospace industry. However, WAAM processes usually cause high residual stresses due to high deposition rates and excessive heat input. In addition, the mechanical properties of the clad metal are significantly affected by porosity and poor microstructure. In-process work hardening, such as sur-

face work hardening through highly dynamic impacts (also known as forging), can help refine the structure, lower the porosity and residual stresses thus benefiting the properties of clad metal. This paper describes an experimental study that looked at the mechanical properties of aluminium specimens produced by multilayer surfacing in different temperature cycles with or without forging. The results of the mechanical tests are also presented. It was found that forging had an impact on the mechanical properties of the aluminum alloy 5056 specimens.

Keywords: Additive manufacturing, multilayer surfacing, cold metal transfer, CMT, aluminium, aluminum alloy 5056, work hardening, impact, mechanical properties, tensile properties, toughness, wire arc additive manufacturing, WAAM, arc welding.

This research was funded by the Government of the Perm Territory under the Agreement S-26/787 dated 21/12/2017 (Understanding the current status of the problem) and by the Russian Foundation for Basic Research under the Project No. 18-08-01016 A (Carrying out experimental studies).

References

1. Wu Binta; Pan Zengxi; Ding Donghong; Cuiuri Dominic; Li Huijun; Xu Jing; Norrish John, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES 35, 2018, pp. 127–139.
2. Donghong Ding, Zengxi Pan *, Stephen van Duin, Huijun Li and Chen Shen. Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing. Materials 2016, 9, 652.
3. Iván Tabernero, Amagoia Paskual, Pedro Álvarez, Alfredo Suárez. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. Eng. 68, 2018, pp. 358–362.
4. Lockett, Helen; Ding, Jialuo; Williams, Stewart and Martina, Filomeno (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacturing: design rules and build orientation selection. Journal of Engineering Design, 28(7-9) pp. 568–598.
5. E.M. Ryan, T.J. Sabin, J.F. Watts, M.J. Whiting. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. Journal of Materials Processing Technology. 262, 2018, pp. 577–584.
6. Zeqi Hu, Xunpeng Qin, Tan Shao. Welding Thermal Simulation and Metallurgical Characteristics Analysis in WAAM for 5CrNiMo Hot Forging Die. International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17–22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, vol 207, 2017, pp 2203–2208.
7. J Bai et al. Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure. 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 167 012045.
8. Markus Hirtler, Angelika Jedynak, Benjamin Sydow, Alexander Sviridov, and Markus Bambach. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. MATEC Web of Conferences 190, 02005, 2018, ICNFT 2018.
9. Zhizhuang Hao, Sansan Ao, Yangchuan Cai, Wei Zhang and Zhen Luo. Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. Metals 2018, 8, 595.
10. Z D Ni, B L Dong, S B Lin, C L Yang, C L Fan, J X Shi. Numerical Analysis on Stress Evolution During GTA-Additive Manufacturing of Thin-Walled Aluminum Alloys. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series 1063, 2018 012083.
11. Qianru Wu, Jiping Lu, Changmeng Liu *, Hongli Fan, Xuezh Shi, Jie Fu and Shuyuan Ma. Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy. Materials 2017, 10, 749.
12. Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement. Additive Manufacturing 21, 2018, 340–349.
13. J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V. Materials Characterization, 2016, vol. 114, pp. 103–114.
14. Sapozhnikov S.B., Zagrebelnyi S.S., Shakirov A.A. Relaxation of welding stresses through severe plastic deformation. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry], 2013, no. 13 (2), pp. 81–86. (In Russ.)
15. Baoqiang Cong, Zewu Qi, Bojin Qi, Hongye Sun, Gang Zhao and Jialuo Ding. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. Applied Sciences. 2017, 7, 275.
16. Jie Fu, Kun Qiu, Lin Gong, Changmeng Liu, Qianru Wu, Jiping Lu, Hongli Fan. Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. MATEC Web of Conferences 128, 05009, 2017, EITCE 2017.
17. X Zhang, F Martina, J Ding, X Wang and SW Williams. Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40, 790–803.

Received 27/06/19
Accepted 29/07/19

Образец для цитирования

Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки / Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 38–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

For citation

Kartashev M.F., Permyakov G.L., Trushnikov D.N., Mindibaev M.R. Understanding the Effect of Work Hardening on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy 5056 Specimens Produced by Multilayer Surfacing. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 38–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.78

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С НАГРЕВОМ В СРЕДЕ ВОДОРОДА НА СВОЙСТВА ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ T15K6

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. В работе исследовали влияние различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства (твёрдость и величина износа по задней поверхности) изделий из порошкового твердого сплава. Исследования проводили на пятигранных неперетачиваемых пластинах ГОСТ 19065-80 из двойного твердого сплава марки T15K6 с механическим креплением, причем параметры определяли как без снятия поверхностного слоя, так и после его снятия. При нагреве под закалку в хлорбариевых ваннах изменение массы образцов практически отсутствует. При закалке и отпуске в селитровых ваннах может происходить частичное растворение твердых сплавов, в связи с чем произвели измерения потери массы образцов. Производили закалку образцов в одном охладителе и изотермическую закалку в соляных ваннах. Для закалки в одном охладителе варьировали: температура нагрева под закалку – от 950 до 1150 °С; скорость охлаждения – от 10°С/с (воздух) до 110°С/с (масло); температура отпуска – от 200 до 600°С; кратность отпуска – от 1 до 3 раз со временем одного крата 15 мин. Анализ приведенных результатов термообработанных пластин показал, что в них происходят структурные изменения, наблюдается наличие η-фазы при нагреве до температур 1300 и 1450°С. Режущие свойства пластин определяли путем резания на вертикально-фрезерном станке модели 6Н11. В качестве инструмента использовали торцовую фрезу диаметром 100 мм с механическим креплением испытываемых пластин. Экспериментально установленное изменение свойств твердых сплавов при термической обработке связано либо с изменением фазового состава сплава, состава связующей фазы, либо с более тонкими изменениями структуры карбидной фазы, отвечающей за износостойкость.

Ключевые слова: термическая обработка, микротвёрдость, теплостойкость, прочность, твердый сплав марки T15K6.

Введение

Наиболее применимыми методами повышения стойкости твердых сплавов является алмазная обработка, нанесение износостойких плёнок и покрытий.

Наряду с преимуществами, такие методы упрочнения инструмента имеют и недостатки, основные из которых их высокая себестоимость и нестабильность получаемых свойств.

Механические (эксплуатационные) свойства инструмента определяют твёрдость, микротвёрдость, прочность, теплостойкость, теплопроводность, ударная вязкость, стойкость против окисления при повышенных температурах, коррозионная стойкость, и от этих свойств зависят режущие свойства инструментов [1–10].

В связи с этим поиск новых методов и режимов нагрева твердых сплавов в защитных средах,

сокращение длительности термической обработки и уход от специального оборудования представляется весьма целесообразным, на что и направлена наша работа.

Целью работы является исследование влияния различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства твердых сплавов.

Материалы и методы исследования

В данной работе исследовали влияние различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства (твёрдость и величина износа по задней поверхности) изделий из порошкового твердого сплава. Исследования проводили на пятигранных неперетачиваемых пластинах ГОСТ 19065-80 из двойного твердого сплава марки T15K6 (рис. 1) с механическим креплением, причем параметры определяли как без снятия поверхностного слоя, так и после его снятия. Пластины, прошедшие терми-

ческую обработку, и пластины в исходном состоянии подвергались стойкостным испытаниям на токарно-винторезном станке модели 16K20 и 1A616 путем торцевого точения заготовки из стали марки ОС (близкой по структуре и свойствам к Ст45), заготовка осевая 210х1650, НЛЗ ГОСТ 4728-2010. Заготовку вытачивали из вагонной оси марки ОС, наружный \varnothing 160 мм, внутренний \varnothing 20 мм, длина 200 мм. Точение осуществлялось от центра к периферии без применения смазочной охлаждающей жидкости (СОЖ). Резец с неперетачиваемой пластиной устанавливался на линии центров станка, вылет его из резцедержателя принимался 40 мм. Геометрические параметры резца следующие: передний угол 15° , задний 12° , радиус при вершине 0,5 мм. Режимы резания: глубина резания $t = 1$; подача – $S=0,1$ мм; частота вращения шпинделя станка $n = 400$ и 355 мин^{-1} . Скорость резания при этом изменялась от 25 (22) до 200 (178) м/мин. Резание производилось методом поперечного точения твердосплавными пластинами по 5 и 10 проходов. После то-

чения на пластинах измеряли величину износа по передней и задней поверхностям.

Результаты исследования приведены в табл. 1.

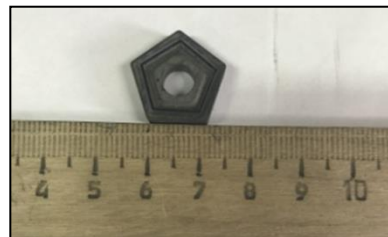


Рис. 1. Внешний вид пластины из твердого сплава TI5K6

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из табл. 1, после снятия верхнего слоя (окисленный слой), величина которого составила 0,01–0,02 мм; как правило, твердость повышается на 2–4 ед. HRA за счет дробления конгломератов карбидов, установленного методом рентгеноструктурного анализа.

Таблица 1

Значения исследованных параметров пластин TI5K6 после термической обработки (режим охлаждения: в масле при 20°C)

Температура нагрева, °С		Твердость пластин, HRA		Величина износа по задней поверхности при резании, мм					
				без заточки			после заточки		
под закалку	для отпуска	без снятия поверхностного слоя	после снятия поверхностного слоя	Испытание					
				1	2	Сред. знач.	1	2	Сред. знач.
1450	Без отпуска	88,5	90	слом	-	-	Не испытывали		
	200	82,5	93	0,89	1,25	1,07			
	400	87	93,5	0,70	слом	-			
	600	84	92	слом	-	-			
	800	87,5	92,7	0,97	слом	-			
1300	Без отпуска	90	92,7	Слом	0,63	-	Не испытывали		
	200	90	94	0,44	0,49	0,465			
	400	93	91,5	0,34	0,46	0,40			
	600	89,5	93	0,44	0,47	0,455			
	800	91,5	91,5	0,53	0,51	0,52			
1150	Без отпуска	85	89	0,25	0,20	0,225	0,13	0,15	0,14
	200	93	95	0,46	0,36	0,41	0,23	слом	-
	400	93	93	0,53	0,33	0,43	0,13	выкр	-
	600	95	95	0,42	0,40	0,41	0,12	0,15	0,135
	800	93	94	0,81	0,67	0,74	0,17	0,15	0,16
1000	Без отпуска	93,7	93,7	слом	0,7	-	Не испытывали		
	200	94,2	94	слом	-	-			
	400	92,5	93,7	0,65	0,58	0,615			
	600	93	93	0,27	0,44	0,355			
	800	94	94,5	0,76	слом	-			
800	Без отпуска	92	93	-	-	-			

Результаты макро- и микроанализа показали, что резкое охлаждение в 10% водном растворе NaCl и в воде при температуре 20°C в ряде случаев приводит к снижению механических свойств в результате образования микротрещин [11–25]. Результаты микроанализа, фрактографии и рентгеноструктурного анализа приведены на **рис. 2, 3** и в **табл. 2**.

Таблица 2

Характеристики тонкой структуры
твердого сплава T15K6

Режим термической обработки		Структурные характеристики		
Закалка	Отпуск	Фазовый состав; тип кристаллической решетки	Микронапряжения $\frac{\Delta a}{a} \times 10^{-3}$	Размер блоков $D \times 10^{-5}$ см
Температура нагрева, °C				
Исходный		WC; TiC; Co – ГПУ	0,64	0,93
1150	600	WC; TiC; Co – ГПУ	0,84	0,47
1150	400	WC; TiC; Co – ГПУ	0,80	0,37

Анализ приведенных результатов термообработанных пластин показал, что в них происходят структурные изменения, наблюдается дробление конгломератов карбидов, наличие η -фазы при нагреве до температур 1300 и 1450 °C, а при охлаждении в воде, на воздухе (спокойном и при обдуве) и при обдуве азотом наблюдается наличие дефектного слоя.

Испытаниям на износостойкость при резании подвергали пластины:

- без термообработки (исходные);
- после термообработки;
- после снятия верхнего слоя (заточки).

Режущие свойства пластин определяли путем резания на вертикально-фрезерном станке модели 6Н11. В качестве инструмента использовали торцовую фрезу диаметром 100 мм с механическим креплением испытываемых пластин.

Анализ показал повышенный износ по задней поверхности для пластин, закаленных с температур 1300 и 1450°C, причем в процессе резания часть пластин треснула и из дальнейших исследований они были исключены.

Пониженный износ пластин по задней поверхности (до 40%) при резании можно объяс-

нить образованием упрочненного слоя и за счет увеличения микронапряжений до 20% и уменьшения размера блоков до 60%. При пониженных температурах закалки от 1150 до 800°C наблюдается снижение износа по сравнению с исходным. Отпуск незначительно влияет на износ. Анализ результатов показал, что наилучшие результаты получены при температурах отпуска 400°C, наименьший износ после термообработки без снятия поверхностного слоя составил 0,18–0,21 мм, а после удаления верхнего слоя составил 0,1–0,12 мм. Износ при резании по задней поверхности для исходных пластин соответственно 0,43 и 0,21 мм (при времени испытания $t_{\text{исп}}=10$ мин).

Таким образом, приведенные результаты исследования показали возможность снижения износа неперетачиваемых пластин из твердого сплава T15K6. Для проверки и уточнения режимов были проведены дополнительные более длительные испытания. При резании с большей продолжительностью (30 мин) было установлено, что величина износа практически прямо пропорциональна длительности резания, и при 30 мин резания для исходных пластин (без снятия поверхностного слоя) износ по задней поверхности составил 1,15–1,0 мм. Все режимы резания были приняты, как и в предыдущих испытаниях. Результаты стойкостных испытаний приведены в **табл. 3**.

Таким образом, термообработка твердосплавных пластин из сплава T15K6 возможна, и при этом закалка пластин от температур 800–1150°C при различной скорости охлаждения (в масле с начальной температурой 60–80°C, воде) приводит к повышению их стойкости в 1,5–2 раза.

Из **табл. 3** видно, что пластины из твердого сплава T15K6, подвергнутые термической обработке, характеризуются стабильным уменьшением износа, что обеспечивает повышение стойкости режущего инструмента.

На основании экспериментальных исследований износа неперетачиваемых пластин T15K6 при фрезеровании определены режимы термической обработки (закалка в масле), повышающие стойкость в 1,5–2 раза.

Экспериментально установленное изменение свойств твердых сплавов при термической обработке связано либо с изменением фазового состава сплава, состава связующей фазы, либо с более

тонкими изменениями структуры карбидной фазы, отвечающей за износостойкость. Значительный объем информации о тонкой структуре твердых сплавов возможно получить, используя методы рентгеноструктурного анализа, что позволяет определять структурно чувствительные параметры, оказывающие существенное влияние на прочность сплава. Это такие параметры как величина микронапряжений, размер блоков когерентного

рассеяния, плотность дислокаций, которые могут изменяться в зависимости от режимов проведения термической обработки.

Установлено, что термическая обработка не способствует изменению фазового состава твердых сплавов. Так дифрактограмма отожженного твердого сплава Т5К10, сплава в состоянии поставки и после термической обработки не изменяются.

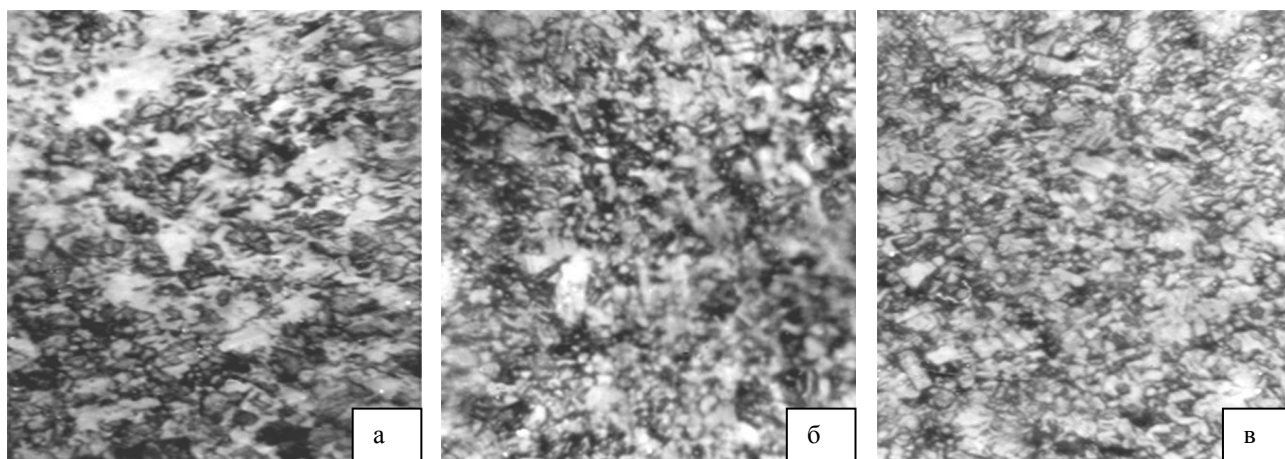


Рис. 2. Микроструктура твердого сплава Т15К6, х 1000: а – исходная; б – после закалки с выдержкой при температуре 1150°C – 20 мин в масле 60°C и отпуска 600°C – 60 мин; в – после закалки с выдержкой при температуре 1150°C – 20 мин в масле 60 °C, без отпуска

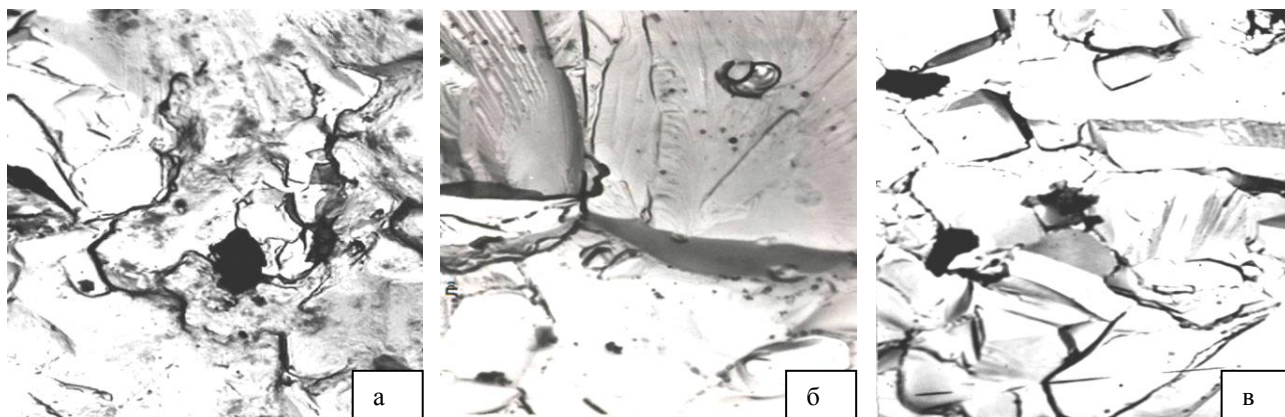


Рис. 3. Фрактографии изломов твердого сплава Т15К6, ×15500:

а – исходный, без термообработки. Излом: смешанное хрупко-вязкое разрушение; б – после закалки при температуре 1150°C с выдержкой 20 мин, закалка в масло; отпуска при температуре 400°C с выдержкой 60 мин. Излом: смешанное хрупко-вязкое разрушение; в – после закалки при температуре 1150°C с выдержкой 20 мин, закалка в масло; отпуск при температуре 600°C с выдержкой 60 мин.

Излом: хрупкое разрушение по межкристаллитным границам

Таблица 3

Результаты стойкостных испытаний пластин Т15К6 после термообработки
(режим резания $V = 385$ м/мин, $t = 1,5$ мм, $S = 125$ мм/мин, $T = 30$ мин)

Режим термообработки			Твердость, HRA		Износ по задней поверхности, мм
Температура нагрева под закалку, °C	Закалочная среда	Температура отпуска, °C	после закалки	после отпуска	
1300		400	92,5	94	0,95
1150	Вода, 40°C	Без отпуска	93,5	-	0,85
"	"	800	92,5	93,5	1,07
"	"	600	92,5	94,5	1,01
"	"	400	92	94	1,01
"	"	200	92,5	93	0,74
"	Масло, 80°C	200	92,5	93	1,08
"	Масло, 100°C	600	92	93	1,39
"	"	400	92,5	94	0,90
"	"	200	92,5	-	1,00
"	Сж. воздух	600	92,5	94,5	1,41
"	"	600	92	94	0,70
"	"	200	92	93	0,81
"	На воздухе	Без отпуска	92	-	0,70
1000	Вода, 20°C	"		-	1,06
"	"	600	92	92,5	0,62
"	"	400	92	93	0,87
"	"	200	92	95	0,84
"	Вода, 40°C	600	92,5	93,5	0,87
"	"	400	92,5	94	0,93
"	"	200	92	94	1,02
"	50%масла + + 50% воды	Без отпуска	91	-	1,01
"	Масло, 80°C	Без отпуска	92,5	-	1,15
"	"	400	92,5	93,5	0,86
"	"	200	92,5	-	1,00
"	На воздухе	Без отпуска	90,5	-	0,75
"	"	600	91	93	1,25
"	"	400	91	94	0,99
"	"	200	91	93	1,08
800	Вода + 10% NaCl	Без отпуска	95	-	1,13
"	На воздухе	Без отпуска	91	-	0,96
Исходные, без термообработки			89–91	90 - 91	1,3–1,5

Заключение

В результате проведенной научно-исследовательской работы по упрочнению изделий из твердых сплавов с использованием нагрева в водородной среде до различных температур и охлаждением в различных закалочных средах с применением отпуска от 200 до 800°C и без отпуска установлено, что:

- твердость термообработанных изделий повышается 2–3 ед. по сравнению с исходными в состоянии поставки;

- пониженный износ пластин по задней поверхности (до 40%) при резании можно объяснить образованием упрочненного слоя и за счет

увеличения микронапряжений до 20%, уменьшения размера блоков до 60%;

- проведено исследование тонкой структуры твердых сплавов с использованием просвечивающей электронной микроскопии и методов рентгеноструктурного анализа, позволяющее установить дробление конгломератов карбидов и изменение микронапряжений карбидной фазы после проведения термической обработки с нагревом в водородной среде;

- на основании экспериментальных исследований износа неперетачиваемых пластин Т15К6 при фрезеровании определены оптимальные режимы термической обработки (закалка в масле), позволяющие понизить износ до 40%.

Список литературы

1. Методы повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента / Богодухов С.И., Гарипов С.И., Калмыков Е.В., Шейнин Б.М.; ГОУ ОГУ. Оренбург, 2004. 27 с. Деп. в ВИНТИ 11.10.04 № 1583-B2004.
2. Третьяков В.И., Клячко Л.И. Твердые сплавы, тугоплавкие металлы, сверхтвердые материалы. М.: ГУП Издательство Руда и металлы, 1999. 264 с.
3. Пат. 2113532 Российская Федерация, МПК С 22 С 29/08. Твердый сплав / Гнусов С.Ф.; заявитель и патентообладатель Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. №96113793/02; заявл. 08.07.1996; опубл. 20.06.1998.
4. Пат. 2294261 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/00. Способ закалки твердого сплава / Осколкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2005118570/02; заявл. 15.06.2005; опубл. 27.02.2007.
5. Пат. 2355513 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/08. Способ закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама / Осколкова Т.Н., Щеглова А.Б.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2007133961/02; заявл. 11.09.2007; опубл. 20.05.2009.
6. Пат. 2356693 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/00. Способ закалки твердого сплава / Осколкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2007139225/02; заявл. 22.10.2007; опубл. 27.05.2009.
7. Пат. 2392342 Российская Федерация, МПК С 22 С 29/00, В 22 F 3/24. Способ закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама / Осколкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». № 2009116915/02; заявл. 04.05.2009; опубл. 04.05.2009.
8. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров. Киев: Высшая школа, 1985. 144 с.
9. Клебанов Ю.Д., Григорьев С.Н. Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологиях обработки материалов. М.: Машиностроение, 2005. 220 с.
10. Коваленко В.С. Упрочнение деталей лучом лазера. Киев: Техника, 1981. 131 с.
11. Осколкова Т. Н., Каськова Н.К. Изменение структуры и свойств твердого сплава после закалки // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2005. №14.
12. Смольников, Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 312 с.
13. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали. М.: Металлургия, 1991. 451 с.
14. Анциферов В.Н. Термохимическая обработка порошковых сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 421 с.
15. Смирнова А.В., Кокорин Г.А. Электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1985. 192 с.
16. Хаэт Г.Л., Гах В.М., Громаков К.Г. Сборный твердосплавный инструмент. Издательство: Машиностроение, 1989. 360 с.
17. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность. Киев: Наукова думка, 1984. 148 с.
18. Чапорова И.Н., Щетилина Е.А., Сереброва О.И. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1961. № 7. С. 44–46.
19. Хрущев М.М., Бабишев М.А. Исследование изнашивания материалов. М.: Изд-во Ан СССР, 1960. 350 с.
20. Кан Р.У., Хаазен П.Т. Физическое металловедение, физико-механические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. 663 с.
21. Li Zhang, Yuan-Jie Wang., Yu Xian-wang., Shu. Chen, Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-CO cemented carbide. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 26 (2008) 295–300.
22. L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Figueira. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 35 (2012) 228–234.
23. J. Hell, M. Chirtoc, C. Eisenmenger-Sittner, H. Hutter, N. Kornfeind, P. Kijamnajsuk, M. Kitzmantel, E. Neubauer, K. Zellhofer. Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. Surf. Coat. Technol. 208 (2012) 24–31.
24. W.Q. Qiu, Z.W. Liu, L.X. He, D.C. Zeng, Y.-W. Mai. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. Mater. Lett. 81 (2012) 155–157.
25. E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, A.A. Zaytsev. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles. Materials. 3 (2010) 97–109.
26. A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupasov, P.V. Sevast'yanov. Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. J. Superhard Mater. 34 (2010) 423–431.

Поступила 22.05.19

Принята в печать 25.06.19

UNDERSTANDING THE EFFECT OF HEAT TREATMENT INVOLVING HEATING IN HYDROGEN MEDIUM ON THE PROPERTIES OF T15K6 GRADE HARD ALLOY

Stanislav I. Bogodukhov – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ogu@mailgate.ru

Elena S. Kozik – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ele57670823@yandex.ru

Ekaterina V. Svidenko – Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Abstract. This research examined the effect of different cooling media applied during heat treatment on the physico-mechanical properties and performance (hardness and back side wear) of parts made of hard powder alloy. The study looked at clamp-on five-sided indexable inserts per GOST 19065-80 made of T15K6 grade double hard alloy. Characterization was done with the surface layer on and after it had been removed. Heat treatment in chlorine-barium baths had almost no effect on the weight of the specimens. Quenching and tempering in nitre baths may lead to partial dissolution of hard alloys. For this reason, measurements were taken to determine the weight loss in the specimens. The specimens were subjected to single-step hardening and salt-bath isothermal quenching. The following variation ranges were applied in the case of single-step hardening: heating temperature – from 950 to 1,150°C; cooling rate – from 10°C/sec (air) to 110°C/sec (oil); tempering temperature – from 200 to 600°C; tempering cycles – from 1 to 3, the time of each cycle being 15 min. Analysis of the heat-treated inserts indicate that structural changes take place in them during heat treatment. When the inserts were heated to 1,300 and 1,450°C, the η -phase was observed in them. The cutting properties of the inserts were determined by cutting on a 6H11 vertical milling machine. A 100 mm face cutter was used, and the test inserts were clamped. The heat treatment induced changes in the properties of hard alloys established through the above experiments can be linked to either the changing phase composition of the alloy or the composition of the binding phase or some finer changes in the structure of the carbide phase responsible for wear resistance.

Keywords: Heat treatment, microhardness, heat resistance, strength, T15K6 grade hard alloy.

References

1. Bogodukhov S.I., Garipov S.I., Kalmykov E.V., Sheynin B.M. *Metody povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv tverdospalnogo rezhushchego instrumenta* [Raising the performance of hard-alloy cutting tools]. Orenburg State University. Orenburg, 2004, 27 p. (In Russ.)
2. Tretiakov V.I., Kiyachko L.I. *Tverdye splavy, tugoplavkie metally, sverkhverdye materialy* [Hard alloys, refractory metals, ultra-hard materials]. Moscow: "Ore and Metals" Publishing House, 1999, 264 p. (In Russ.)
3. Gnyusov S.F. *Tverdyi splav* [Hard alloy]. Patent RF, No. 2113532. Applied: 08.07.1996. Published: 20.06.1998.
4. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo splava* [A method for quenching hard alloys]. Patent RF, No. 2294261. Applied: 15.06.2005. Published: 27.02.2007.
5. Oskolkova T.N., Shcheglova A.B. *Sposob zakalki tverdogo splava na osnove karbida volframa* [A method for quenching hard tungsten carbide alloys]. Patent RF, No. 2355513. Applied: 11.09.2007. Published: 20.05.2009.
6. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo splava* [A method for quenching hard alloys]. Patent RF, No. 2356693. Applied: 22.10.2007. Published: 27.05.2009.
7. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo splava na osnove karbida volframa* [A method for quenching hard tungsten carbide alloys]. Patent RF, No. 2392342. Applied: 04.05.2009. Published: 04.05.2009.
8. Kovalenko V.S. *Obrabotka materialov impulsnym izlucheniem lazerov* [Pulsed laser materials processing]. Kiev: Vysshaya shkola, 1985, 144 p. (In Russ.)
9. Klebanov Yu.D., Grigoriev S.N. *Fizicheskie osnovy primeneniya kontsentrirrovannykh potokov energii v tekhnologiyakh obrabotki materialov* [The physical basis behind the application of concentrated energy streams in materials processing]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 220 p. (In Russ.)
10. Kovalenko V.S. *Uprochnenie detaley luchom lazera* [Laser beam hardening of parts]. Kiev: Tekhnika, 1981, 131 p. (In Russ.)
11. Oskolkova T.N., Kaskova N.K. The structure and properties of hard alloy changed by quenching. *Vestnik gornometallurgicheskoy sekti RAEN. Otdelenie metallurgii* [Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy], 2005, No. 14. (In Russ.)
12. Smolnikov E.A. *Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka instrumentov v solyanykh vannakh* [Thermal and thermochemical processing of tools in salt baths]. 2nd revised edition. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 312 p. (In Russ.)
13. Bernshteyn M.L., Rakhshadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali* [Science of metals and heat treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 451 p. (In Russ.)
14. Antsiferov V.N. *Termokhimicheskaya obrabotka poroshkovykh staley* [Thermochemical processing of powder steels]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Acade-

- my of Sciences, 1997, 421 p. (In Russ.)
15. Smirnova A.V., Kokorin G.A. *Elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* [Electron microscopy in metals science]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 192 p. (In Russ.)
 16. Khaet G.L., Gakh V.M., Gromakov K.G. *Sbornyy tverdospлавный instrument* [Split-design carbide tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 360 p. (In Russ.)
 17. Loshak M.G. *Prochnost i dolgovechnost* [Strength and durability]. Kiev: Naukova dumka, 1984, 148 p. (In Russ.)
 18. Chaporova I.N., Shchetilina E.A., Serebrova O.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metals science and heat treatment of metals]. 1961, no. 7, pp. 44–46. (In Russ.)
 19. Khrushchev M.M., Babichev M.A. *Issledovanie iznashivaniya materialov* [Understanding wear of materials]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960, 350 p. (In Russ.)
 20. Kan R.U., Khaazen P.T. *Fizicheskoe metallovedenie, fiziko-mekhanicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical metallurgy, physico-mechanical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 663 p. (In Russ.)
 21. Li Zhang, Yuan-Jie Wang., Yu Xian-wang., Shu. Chen, Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-CO cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 26 (2008) 295–300.
 22. L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Filgueira. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 35 (2012) 228–234.
 23. J. Hell, M. Chirtoc, C. Eisenmenger-Sittner, H. Hutter, N. Kornfeind, P. Kijamnajsuk, M. Kitzmantel, E. Neubauer, K. Zellhofer. Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. *Surface and Coatings Technology*. 208 (2012) 24–31.
 24. W.Q. Qiu, Z.W. Liu, L.X. He, D.C. Zeng, Y.-W. Mai. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. *Materials Letters*. 81 (2012) 155–157.
 25. E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, A.A. Zaytsev. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles. *Materials*. 3 (2010) 97–109.
 26. A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupasov, P.V. Sevastyanov. Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *Journal of Superhard Materials*. 34 (2010) 423–431.

Received 22/05/19

Accepted 25/06/19

Образец для цитирования

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния режимов термической обработки с нагревом в среде водорода на свойства твердого сплава марки Т15К6 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 46–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

For citation

Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Understanding the Effect of Heat Treatment Involving Heating in Hydrogen Medium on the Properties of T15K6 Grade Hard Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nostov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 46–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 658.562

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-54-59>

СИСТЕМА ГЛУБИННЫХ ЗНАНИЙ Э. ДЕМИНГА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИИ

Протасьев В.Б.¹, Анисеева О.В.², Исламова О.В.³, Червяков Л.М.²

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

³ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассмотрена актуальная для России проблема производства качественной продукции. Обоснована необходимость изучения выявленных причин снижения надежности отечественной промышленной продукции. **Цель работы:** изучение причин использования в обратном направлении системы глубинных знаний Э. Деминга, изначально направленной на повышение качества промышленной продукции. **Используемые методы:** применялись положения системы глубинных знаний Э. Деминга. Геометрическое моделирование составляющих системы глубинных знаний осуществлялось с помощью диаграмм Венна, методов и аспектов теорий познания и вариабельности. Для исследования функционирования производственных систем и выпускаемой продукции была реализована методика оценки их состояния по критерию сигнал/шум. Для оценки качества производственных систем использовались методы Тагути. **Новизна:** изучены причины обратного использования системы глубинных знаний Э. Деминга. Предложен подход к оценке надежности технической продукции по T -критерию Тагути. **Результат:** рассмотрена структура системы глубинных знаний, содержание ее составляющих и их возможности. Найдены причины снижения надежности современной техники, приведены примеры умышленного снижения показателей этого свойства. Показано, что при несомненных достоинствах системы в задачах повышения качества ее используют и в обратном направлении. Отмечено, что система глубинных знаний может использоваться для оценки технического совершенства продукции и качества ее изготовления. **Практическая значимость:** в результате интерпретации критерия сигнал/шум предложен подход к оценке продукции, при котором необходимо учитывать не только уровень ее проектных значений показателей, но и следующие характеристики: переход параметров продукции из постоянных в переменные, увеличение или снижение общего числа используемых параметров. Такой подход позволит не допускать как недооценку качества продукции, так и завышение ее показателей.

Ключевые слова: надежность техники, система глубинных знаний, оценка качества, «сигнал/шум».

Введение

Проблема производства качественной продукции в РФ приобрела актуальность не только потому, что советскую и российскую технику с помощью западной идеологии и попустительства отечественных политологов оценивали как отсталую и ненадежную, но и по причине того, что зарубежная техника, в массовом порядке поступившая на рынки нашей страны, не оправдала ожидания потребителей, так же как и продукция современных российских предприятий.

В первую очередь, потребителей не удовлетворяют надежность и долговечность техники. Не секрет, что советская бытовая техника, холодильники, стиральные машины, легковые и грузовые

автомобили и многие другие образцы отличались поразительной живучестью, ремонтоспособностью и долговечностью.

Советская военная техника по этим параметрам практически не имела конкурентов, и даже новые образцы, изготавливаемые в период Великой Отечественной войны в условиях дефицита времени и средств, быстро достигали необходимых параметров надежности.

Использование положений системы глубинных знаний Э. Деминга

Причину беспокойства потребителей следует рассматривать, используя положения системы глубинных знаний Э. Деминга [1,2], графическая интерпретация которой показана с помощью диаграммы Венна на рис. 1.

Область системы ограничивается криволинейным четырехугольником $a-b-c-d$, в котором

© Протасьев В.Б., Анисеева О.В., Исламова О.В., Червяков Л.М., 2019

выполняется логическая взаимосвязь четырех базовых параметров:

- понимание системы;
- знания в области психологии;
- понимание теории вариабельности;
- основы теории познания.

Вначале рассмотрим психологические аспекты, с помощью которых, по нашему мнению, формируются требования к параметрам качества продукции. В зависимости от финансовых возможностей потребители приобретают либо более надежную продукцию, которая в полном объеме соответствует функциональному назначению, либо более дорогую за счет повышения ее эргономических характеристик и технического дизайна.

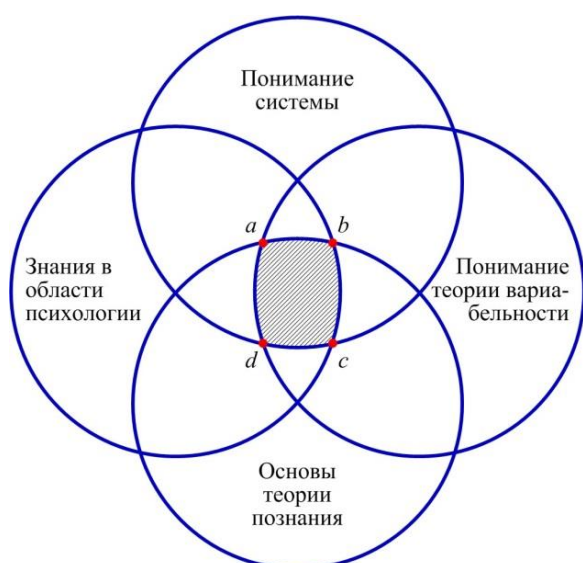


Рис. 1. Диаграмма Венна: система глубинных знаний Э. Деминга

В СССР, особенно в послевоенное время, стремились, в первую очередь, наполнить рынок самой необходимой техникой, и эргономические характеристики не имели решающего значения. По мере насыщения рынка внимание уделялось более эксклюзивной продукции, но никогда не ставились задачи умышленного снижения ее надежности.

Такие задачи, судя по фактическому пополнению дел, возникают в настоящее время, когда самая современная стиральная машина работает около трех лет, автомобили стремятся продать тоже года через два, три с тем, чтобы приобрести новые.

Таких примеров множество, но приведем один из них, проанализировав конструкцию бытовой мясорубки фирмы «Milnes».

Дизайн, эргономика, цена этой продукции,

конструктивная схема нареканий не вызывают, но рассмотрим некоторые очень важные узлы.

Устройство мясорубки с электроприводом пояснений не требует, поэтому проанализируем исполнительный узел – соединение вращающегося четырехперого ножа с транспортирующим размельчаемым сырьем шнеком (рис. 2).

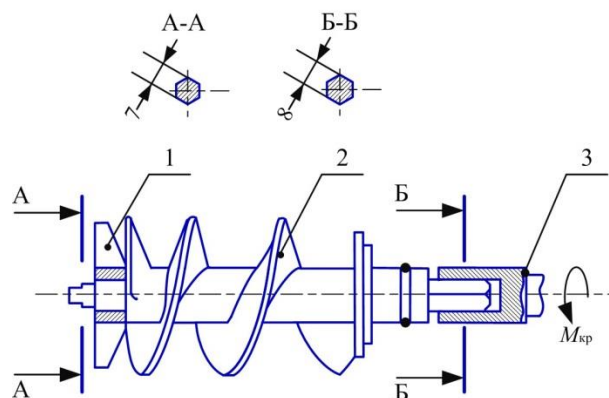


Рис. 2. Шнек с установленным ножом и муфтой

Крутящий момент $M_{кр}$ передается путем контакта внутреннего шестигранника ножа (поз.1) с наружным шестигранником шнека (поз. 2).

Нож выполнен из инструментальной стали типа отечественной марки ХВГ, а шнек – из высокопрочного алюминиевого сплава, отечественным аналогом которого можно принять сплав Д16Т.

Максимальные нагрузки возникают в сечениях А-А и Б-Б, которые показаны без охватывающих элементов, т.е. ножа (поз.1) и муфты (поз.3), соединенной с электромотором через редуктор.

Разница в пределах прочности стали ($\delta_{1В}=590...690$ МПа) и сплава Д16Т ($\delta_{1В}=450...480$ МПа) весьма существенная, и можно ожидать, что шестигранники на шнеке (сечения А-А и Б-Б на рис. 1) потеряют работоспособность в первую очередь, и потребуются замена самой сложной детали – шнека.

С позиции здравого смысла совершенно непонятно, почему размеры шестигранника в сечении А-А занижены в сравнении с сечением Б-Б.

С учетом возможностей современного точно литого [3–5] и невысоких требований к соосности шестигранников и винтовой поверхности шнека, напрашивается использование шестигранника с постоянным сечением из нержавеющей стали (рис. 3), который обеспечит практически неограниченный ресурс эксплуатации.

Ослабление сечения А-А вызвано только желанием снизить срок эксплуатации с тем, чтобы потребители постоянно приобретали такую тех-

нику, обеспечивая заказами фирму-изготовителя.

Такая политика противоестественна, но, к сожалению, она реализуется в технических устройствах самого различного назначения.

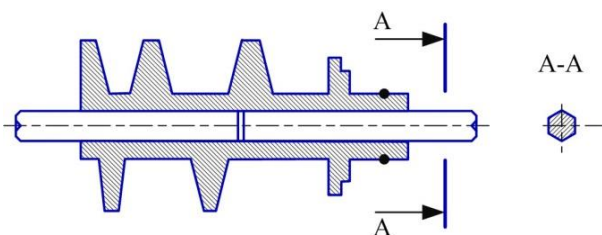


Рис. 3. Шнек с использованием шестигранного сердечника

Возвращаясь к диаграмме Венна (см. рис. 1), можно заключить, что психологическая установка в приведенном примере дала явный перекося. Конструктор без внешнего давления такое решение предложить не мог.

Приведенный негативный пример не одинок, – повсюду наблюдается увлечение дизайном в ущерб функциональным характеристикам. Резюмируя, отметим, что система глубинных знаний, направленная на повышение качества, используется в обратном направлении.

Разработка подхода к оценке качества продукции

Теория вариабельности получила развитие в работах «мастера качества» Г. Тагути. Предложенный им критерий сигнал/шум наиболее эффективен и универсален для оценки качества функционирования производственных систем и выпускаемой продукции [6].

Подробная методика оценки по этому критерию изложена в работах [7, 8]. В данной статье сделаем акцент на производственный смысл параметров «сигнал» и «шум».

Сигнал, по-нашему мнению, оценивает возможность операции, продукции, процессов или производственной системы в целом. Это возможности, которые может реализовать производство. В значительной степени высокое значение сигнала свидетельствует о правильности объекта, т.е. его конструктивного или технологического совершенства.

Этот параметр в работах [7, 8] определяется сравнением единичных показателей качества (ЕПК) у конкурирующих производителей, причем при этом учитываются весовые коэффициенты ЕПК. Отметим, что при сравнении умышленно не рассматриваются технологические аспекты, – они используются при определении параметра «шум».

Шум оценивает вариабельность выходных данных по каждому ЕПК, и далее эти значения обобщаются. В итоге, критерий сигнал/шум приобретает тот же самый смысл, что и качества в системе допусков и посадок, – с его помощью оценивается точность, обеспечиваемая при изготовлении.

Поясним это сравнение на примере. Сравним допуски (вариабельности) отверстий шестого и девятого квалитетов точности при одном и том же номинальном значении, например $\varnothing 20H6$ и $\varnothing 20H9$. Номинальные значения будем использовать как значения сигнала, а допуски как значения шума.

Полученные данные интерпретированы графически на рис. 4, где умышленно увеличен масштаб по оси «шум».

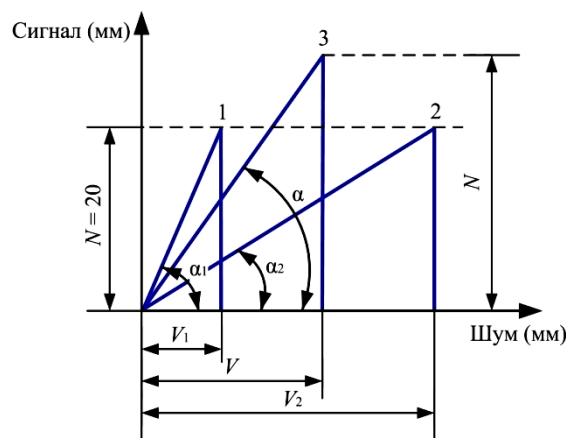


Рис. 4. Графическая интерпретация критерия сигнал/шум

Номерами 1 и 2 отмечена продукция с одним номинальным значением и различной вариабельностью, а номером 3 – произвольное сочетание сигнал/шум.

Условно обозначив вариацию номинальных значений как V , запишем для рассматриваемых номинальных значений $N=20$ и произвольного значения N формулы для расчета критерия сигнал/шум:

$$T = \frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{N}{V}; \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{20}{V_1} = \frac{20}{0,013} \approx 1538 \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{20}{V_2} = \frac{20}{0,043} \approx 465, \quad (3)$$

где $V_1=0,013$ и $V_2=0,043$ – допуски на шестой и девятый квалитеты при $N=20$.

Судя по графикам (см. **рис. 4**), T -критерий (обозначается так по первой букве фамилии Г. Тагути) является тангенсами углов α_1 ; α_2 и α .

Продукция 1 лучше, чем 2, т.к. при одном значении $N = 20$ вариабельность $V_1 > V_2$, продукция 3 занимает промежуточное положение.

T -критерий – величина безразмерная, поэтому сигнал и шум измеряются в одинаковых единицах. Сравнимая продукция должна быть однородной. Идеология вариабельности является основой робастного проектирования [9,10], для реализации которого в РФ разработан проект национального стандарта [11].

В предложенной интерпретации T -критерий является отношением правильности и точности:

$$T = \frac{\text{правильность}}{\text{точность}}. \quad (4)$$

T -критерий является универсальным, поскольку всесторонне оценивает объекты анализа, он может использоваться, не изменяя своей сути при экспертных и аналитических оценках [12]. По мнению Г. Тагути, его достаточно для анализа качества, и этот критерий должны определять в СМК, а не плодить многочисленные и бессмысленные количественные показатели.

Возвращаясь к примеру (см. **рис. 1**), отметим, что при оценке надежности по T -критерию сразу выявится низкий уровень сигнала, даже в сравнении с советской довоенной продукцией.

Оценка по T -критерию не позволяет продвигать на рынок продукцию сомнительного качества и обеспечить производство заказами, которые, по справедливости, оно не заслуживает.

Теория познания, по нашему мнению, базируется на принципе научного обобщения [13], в основе которого заложены следующие условия.

Например, теория проектирования произвольного объекта содержит n постоянных и m переменных параметров при сумме параметров $N=n+m$. Такой вариант показан в строке 1 **таблицы**.

Если в результате исследований несколько постоянных величин K перешло в разряд переменных, при сохранении общего числа параметров n , то это более высокий уровень обобщения, признаки которого приведены в строке 2 **таблицы**.

Сочетание количества постоянных и переменных параметров в теории познания

Параметры		
Постоянные	Переменные	Сумма параметров
n_1	m_1	$n_1 + m_1$
$n_1 - k = n_2$	$m_1 + k = m_2$	$n_1 + m_1 = n_2 + m_2$
$n_2 + p$	$m_2 + t$	$n_2 + m_2 + p + t$

Если во втором варианте число постоянных величин возросло на P единиц, а число переменных выросло на t единиц, то это в данном случае наивысший уровень научного познания. Этот вариант показан в строке 3 **таблицы**.

Схема приведения третьего варианта к первому имеет вид

$$n_1 + m_1 + p + t \rightarrow (p = 0; t = 0) \rightarrow n_2 + m_2 \rightarrow \rightarrow (K = 0) = n_1 + m_1. \quad (5)$$

Оценивая продукцию, необходимо учитывать, на каком уровне находится теория проектирования продукции, характеризуется ли она переходом параметров из постоянных в переменные или увеличением общего числа используемых параметров. Такой подход позволит не допускать как недооценку продукции, так и преувеличение ее возможностей. По нашему мнению, такие данные следует использовать в рекламной информации, поскольку это данные анализа уровня правильности, возможностей продукции, а не пиар-ходов, над которыми грамотные потребители просто смеются.

В данных авиационной военной техники давно используют градацию: 3, 4, 4+, 5. При рекламе бытовой и ей подобной техники такой подход тоже необходим.

Понимание системы по уровню значимости не менее, а, скорее, более важно, чем рассмотренные ранее составляющие диаграммы Венна (см. **рис. 1**). Их можно изучать и понимать, но без интегрирования их в систему положительный эффект в области качества будет минимален.

Признаками системного подхода должны быть: справедливая для внешних и внутренних потребителей цель, понимание и восприятие этой цели обществом, оценка взаимосвязей системы не только на «своей» фирме, но и в решении государственных социальных, оборонных и иных задач.

Заключение

В последнее время базовым признаком наличия системы является техническая совместимость составляющих ее параметров [14], и решение этой задачи заслуживает самого пристального внимания.

Приведенный пример с мясорубкой, когда система умышленно работает в негативную сторону, показывает, что в любых задачах, а особенно в области обеспечения качества, есть два варианта, – это получение справедливой и незаконной прибыли.

Считаем, что второй вариант должен пресе-

каться государственными органами на всех уровнях. Рыночными отношениями нужно управлять квалифицированно.

Список литературы

1. Деминг У.Э. Выход из кризиса. Тверь: Альба, 1994. 498 с.
2. Haughey B. Linking Design Reviews with FMEA to Quickly Mitigate the Risk of Change ... Design Review Based on Failure Modes. Annual reliability and maintainability symposium (RAMS), Orlando, FL (2017).
3. Dil E.J., Ben Dhieb F., Aiji A. Modeling the effect of nanoplatelets orientation on gas permeability of polymer nanocomposites // *Polymer*. 2019, vol. 168, pp. 126–130. doi: 10.1016/j.polymer.2019.02.024.
4. Chen S.H., Ho Y.L. Lifespan of super-alloy Waspaloy cutting tools // *Heliyon*. 2019, vol. 5, no. 4. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01388.
5. Lei Z.F., Su W.B. Research and Application of a Rolling Gap Prediction Model in Continuous Casting // *Metals*. 2019, vol. 9, no. 3. doi: 10.3390/met9030380.
6. Rajyalakshmi K., Nageswara Rao Boggarapu. Expected range of the output response for the optimum input parameters utilizing the modified Taguchi approach // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 15 (2): 508–522 (2019).
7. Протасьев В.Б., Плахотникова Е.В., Истоцкий В.В. Пример реализации методики оценки состояния производственных систем по критерию сигнал/шум при производстве твердосплавных борфрез // *Вестник БГТУ*. 2019. № 1 (74). С. 15–19.
8. Протасьев В.Б., Плахотникова Е.В., Литвинова И.В. Методика оценки состояния производственных систем по критерию «сигнал/шум» на примере технологических процессов изготовления продукции из прутковых заготовок // *Черные металлы*. 2018. № 6. С. 20–25.
9. Nejadseyfi O., Geijselaers, H.J.M., van den Boogaard A.H. Evaluation and assessment of non-normal output during robust optimization // *Structural and multidisciplinary optimization*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 2063–2076. doi: 10.1007/s00158-018-2173-2.
10. Havinga J., van den Boogaard A.H., Klaseboer G. Sequential improvement for robust optimization using an uncertainty measure for radial basis functions // *Struct Multidiscip Optim* 55(4): 1345–1363 (2017).
11. ПНСТ 144-2016. Применение статистических методов к новым технологиям и процессам изготовления продукции. Робастные параметры продукции. Введ. 01.01.2017. М.: Стандартинформ, 2016. 42 с.
12. Kolahan F., Moghaddam M. Azadi. The use of Taguchi method with grey relational analysis to optimize the EDM process parameters with multiple quality characteristics // *Scientia Iranica* 22 (2): 530–538 (2015).
13. Большая советская энциклопедия. Т. 18. 3-е изд./ гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1978. С. 201.
14. Носенков А.А., Ковель А.А., Медведев В.И. Некоторые вопросы теоретического и инженерного обеспечения совместимости современной техники // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2003. № 4. С. 130.

Поступила 10.05.19

Принята в печать 17.06.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-54-59>

E. DEMING'S SYSTEM OF PROFOUND KNOWLEDGE AND THE POSSIBILITY OF ITS USE IN RUSSIA

Viktor B. Protasiev – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Tooling and Metrology Systems, Tula State University, Tula, Russia.

Olesya V. Anikeeva – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor

Department of Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design; Southwest State University, Kursk, Russia. E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

Oksana V. Islamova – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department

Department of Quality Management, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia.

Leonid M. Chervyakov – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design; Southwest State University, Kursk, Russia.

Abstract. Problem Statement (Relevance): This paper examines the problem of quality in manufacturing, which is of relevance in the Russian Federation. It also substantiates why it is necessary to look into the causes identified of reduced reliability of domestic industrial products.

Objectives: To understand the reasons for reverse application of Deming's system of profound knowledge originally aimed at improving the quality of industrial products. **Methods Applied:** The provisions of Deming's system of profound knowledge were applied. Geometric

modelling of the system components was carried out using Venn diagrams, as well as methods and aspects of the knowledge and variability theories. To understand how production systems and products function, a method of assessing their state on the basis of the signal-to-noise criterion was implemented. Taguchi methods were used to analyse the quality of production systems. **Originality:** The authors looked at the causes for reverse application of Deming's system of profound knowledge. They also proposed an approach to assessing the reliability of tech-

nical products using the Taguchi *T*-criterion. **Findings:** This paper examines the system of profound knowledge, its structure, components and their capabilities. It identifies the causes of reduced reliability of modern machinery, and examples are given of the cases when reliability was deliberately lowered. It is shown that even though the system proves to be an effective quality improvement tool, it can have reverse application. It is noted that the system of profound knowledge can be used to assess the products and their quality. **Practical Relevance:** As a result of interpretation of the signal-to-noise criterion, an approach is proposed to assessing the products, according to which not only the level of the design values but also the following characteristics should be considered: transition of the product parameters from being constant to being variable, increase or decrease in the total number of parameters used. Such approach will help prevent both under- or overestimation of the product quality.

Keywords: Reliability of equipment, system of profound knowledge, quality assessment, signal-to-noise.

References

1. Deming W.E. *Vykhod iz krizisa* [Out of the crisis]. Tver: Alba, 1994, 498 p. (In Russ.)
2. Haughey B. Linking Design Reviews with FMEA to Quickly Mitigate the Risk of Change ... Design Review Based on Failure Modes. Annual reliability and maintainability symposium (RAMS), Orlando, FL (2017).
3. Dil E.J., Ben Dhieb F., Ajji A. Modeling the effect of nanoplatelets orientation on gas permeability of polymer nanocomposites. *Polymer*. 2019, vol. 168, pp. 126–130. doi: 10.1016/j.polymer.2019.02.024.
4. Chen S.H., Ho Y.L. Lifespan of super-alloy Waspaloy cutting tools. *Heliyon*. 2019, vol. 5, no. 4. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01388.
5. Lei Z.F., Su W.B. Research and Application of a Rolling Gap Prediction Model in Continuous Casting. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 3. doi: 10.3390/met9030380.
6. Rajyalakshmi K., Nageswara Rao Boggarapu. Expected range of the output response for the optimum input parameters utilizing the modified Taguchi approach. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 15 (2): 508–522 (2019).
7. Protasiev V.B., Plakhotnikova E.V., Istotskiy V.V. A method for analyzing the status of production systems based on the "signal-noise" criterion in carbide burr manufacturing: An example of practical implementation. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2019, no. 1(74), pp. 15–19. (In Russ.)
8. Protasiev V.B., Plakhotnikova E.V., Litvinova I.V. Analysing the status of production systems based on the "signal-noise" criterion: A case study of the processes involved in the manufacture of products from bar stock. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2018, no. 6, pp. 20–25. (In Russ.)
9. Nejadseyfi O., Geijselaers, H.J.M., van den Boogaard A.H. Evaluation and assessment of non-normal output during robust optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 2063–2076. doi: 10.1007/s00158-018-2173-2.
10. Havinga J., van den Boogaard A.H., Klaseboer G. Sequential improvement for robust optimization using an uncertainty measure for radial basis functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 55(4): 1345–1363 (2017).
11. PNST 144-2016. *Primenenie statisticheskikh metodov k novim tehnologiyam i processam izgotovleniya produktsii. Robastnie parametri produktsii* [Applications of statistical and related methods to new technologies and product development processes. Robust parameters of products]. Introduced: 01.01.2017. Moscow: Standartinform, 2016. 42 p. (In Russ.)
12. Kolahan F., Moghaddam M. Azadi. The use of Taguchi method with grey relational analysis to optimize the EDM process parameters with multiple quality characteristics. *Scientia Iranica* 22 (2): 530–538 (2015).
13. *Bolshaya sovetskaya entsiklopediya* [Great Soviet Encyclopedia]. Vol. 18. 3rd ed. Ed. by A.M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1978, p. 201. (In Russ.)
14. Nosenkov A.A., Kovel A.A., Medvedev V.I. Some issues of theoretical and engineering support to ensure compatibility of modern technology. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Reshetnev Siberian State Aerospace University], 2003, no. 4, pp. 130. (In Russ.)

Received 10/05/19

Accepted 17/06/19

Образец для цитирования

Система глубинных знаний Э. Деминга и возможности ее использования в России / Протасьев В.Б., Аникеева О.В., Исламова О.В., Червяков Л.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 54–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-54-59>

For citation

Protasiev V.B., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Chervyakov L.M. E. Deming's System of Profound Knowledge and the Possibility of its Use in Russia. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 54–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-54-59>

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Ширяева Е.Н., Полякова М.А.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье приведены общие сведения о системном анализе как методе, который широко применяется для характеристики технологических и технических систем. На примере технологического процесса горячей прокатки стальной полосы приведена схема, объединяющая систему входных и выходных параметров вещества и существующих потоков энергии и информации. Обозначены основные проблемы для разработки адекватных математических моделей, формализующих оценку надежности действующих технологических процессов производства металлопродукции. **Цель работы:** провести анализ существующих методов оценки надежности технологических и технических систем для обоснования выбора соответствующего метода при решении производственных задач. **Используемые методы:** проведен анализ системы действующих стандартов, регламентирующих надежность в технике. Рассмотрены существующие методы оценки надежности. **Новизна:** новизна проведенного исследования заключается в анализе технологического процесса горячей прокатки на основе системного анализа, что позволяет показать существующие связи между потоками вещества, энергии и информации. Приведена классификация технологических и технических систем, что является основой для научного обоснования выбора метода расчета их надежности. Обозначены области применения существующих методов оценки надежности технологических и технических систем. **Результат:** в статье приведены результаты системного анализа технологического процесса горячей прокатки, что позволяет установить взаимосвязь между требованиями к исходной заготовке и требованиями к готовому стальному прокату. Это является необходимым условием для выбора соответствующих режимов технологического процесса с целью получения готовой продукции с требуемыми свойствами. Представлена характеристика существующих методов оценки надежности технологических и технических систем. **Практическая значимость:** предложенный подход позволяет сделать научно обоснованный выбор необходимого метода оценки надежности с учетом специфических особенностей технологической или технической системы.

Ключевые слова: надежность, системный анализ, горячая прокатка стальной полосы, технологическая система, техническая система, метод оценки, стандарт.

Введение

Современный этап технического развития общества характеризуется интенсивным развитием производительных сил, особое место среди которых занимают средства производства. Усложнение структуры технических объектов, появление новых и совершенствование существующих технологических процессов, повышение требований потребителей к уровню свойств и качеству продукции являются стимулом для использования системного анализа как самих существующих систем, так и их взаимодействий друг с другом.

Как известно, системный анализ представляет совокупность научных методов познания по установлению структурных связей между отдельными элементами исследуемой системы [1–4]. Использование системного анализа эффективно для решения сложных производственных задач, когда процесс принятия решений зависит от

множества факторов в условиях неопределенности [5, 6]. Применение системного анализа позволяет формализовать структуру исследуемого технического объекта, определить связи с другими окружающими его объектами, что во многих случаях позволяет выявить «узкие» места и сформулировать решения по их устранению. Кроме того, формализация структуры технического объекта в виде построения его структурной схемы является эффективным инструментом для разработки математических моделей, учитывающих информацию о внешних воздействующих на систему факторах, что позволяет прогнозировать ее поведение при их изменении [7–11].

В настоящее время производственные процессы представляют сложный комплекс технологических процессов и связанных с ними технических систем (оборудования) с многочисленными связями на различных иерархических уровнях организации. С другой стороны, износ эксплуатируемого оборудования является системной проблемой практически всех отраслей промышленности. В совокупности это приводит

к увеличению вероятности отказов агрегатов, узлов и механизмов, что выдвигает на первый план необходимость решения вопросов надежности технологических и технических систем. В Техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» установлены минимально необходимые требования безопасности машин и (или) оборудования при разработке (проектировании), изготовлении, монтаже, наладке, эксплуатации, хранении, транспортировании, реализации и утилизации в целях защиты жизни или здоровья человека, имущества, охраны окружающей среды, жизни и здоровья животных, предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей [12].

Наука о надёжности является комплексной наукой и развивается в тесном взаимодействии с другими точными и прикладными науками, такими как физика, химия, математика, материаловедение и др. При изучении вопросов надёжности рассматривают самые разнообразные объекты: изделия, здания и сооружения, агрегаты, оборудование и т.д. Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2008 определение термина «надежность» (dependability) является собирательным и применяется для описания свойств готовности, а также влияющих на него свойств безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта. В стандарте отмечается, что термин «надежность» применяется только для общего не количественного описания свойства. Надежность является частью более обобщенного понятия – качества (quality), которое определяется в данном стандарте как степень соответствия совокупности присущих характеристик некоторым требованиям.

Однако необходимость количественной оценки степени надежности технических объектов с учетом особенностей их конструкций и взаимосвязи с другими системами – актуальная задача [13–18]. С этой точки зрения перспективным направлением является использование системного анализа технического объекта, позволяющего установить связи между отдельными элементами данной системы, что может быть использовано в качестве основы для выбора метода оценки надежности системы.

Методы исследования

Проектирование новых и совершенствование существующих технологических процессов неизбежно требует использования различных приемов моделирования. Представление технологического процесса в виде модели может с различной сте-

пенью точности описывать происходящие с веществом преобразования, происходящие в ходе технологических операций. При этом построение модели требует применения различных приемов формализации. Так, математическая модель представляет систему уравнений, которая описывает протекание физических явлений или процессов и определяет их зависимости от технологических параметров. Следует учитывать, что для построения математических моделей, с высокой степенью точности описывающих технологические процессы, необходимым условием является учет большого количества внешних и внутренних факторов. Во многих случаях это в значительной мере усложняет процесс моделирования. Логические модели представляют собой описание технологического процесса, однако, такое описание порой бывает избыточным и достаточно трудно поддается формализации. При использовании системного анализа технологический процесс представляется в виде условных обозначений операций, системы входных и выходных параметров, а также существующих потоков вещества, энергии и информации [3–5]. При этом, как правило, не рассматривается взаимодействие и взаимообусловленность предшествующих и последующих операций технологии, что, в свою очередь, усложняет процесс разработки технических и принятия эффективных управленческих решений. Системный подход позволяет рассмотреть технологический процесс как сложную систему, которая в свою очередь является подсистемой в рамках действующего промышленного предприятия.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим применение системного анализа к процессу производства горячекатаного листа с заданными свойствами [19–22]. На **рис. 1** представлена условная схема технологического процесса горячей прокатки стальной полосы.

К входным параметрам процесса относятся характеристики заготовки (сляба), химический состав стали, которые регламентируются в нормативной или технической документации. Требования заказчика к готовой продукции являются выходными параметрами данной технологической системы. При этом следует учитывать, что горячекатаная полоса может быть как полупродуктом в случае ее дальнейшей переработки холодной прокаткой, так и использоваться в виде конечной продукции, например, если ее свойства аналогичны свойствам холоднокатаного листа [23–25]. С этой точки зрения требования к свойствам производимой горячекатаной полосы

могут быть различными. К потокам энергии при горячей прокатке относятся механическая, электрическая и тепловая. Потоки информации составляют различные требования к заготовке, нормируемые документацией, действующей на предприятии, а на выходе из технологического процесса – соответствующие требования, предъявляемые к готовой продукции. Кроме того, к потокам информации следует отнести требования экологической и промышленной безопасности, охраны труда и сведения, получаемые при различных видах контроля.

При производстве горячекатаной полосы принятие решений поставленных задач осуществляется путем выбора в условиях неопределенности, возникающей из-за наличия множества факторов, не поддающихся строгой количественной оценке [26]. С этой точки зрения использование системного анализа является эффективным инструментом, позволяющим установить взаимосвязь различных элементов данной технологической системы. На основании установленных таким образом значимых факторов формулируются конкретные актуальные задачи листопрокатного производства, которые формализуются в виде обобщенной модели, отображающей все взаимосвязи между потребительскими функциями изделия и контролируемые параметры процесса.

С другой стороны, использование системного анализа позволяет определить «узкие» места технологического процесса. Поскольку для эффективного функционирования технологической системы с целью обеспечения производства продукции с заданными свойствами необходимым условием является обеспечение сквозного прохождения потоков вещества, энергии и информации через все структурные составляющие (технологические операции), то построение структурной схемы процесса позволяет наглядно представить все существующие взаимосвязи в системе. Кроме того, такого вида моделирование может быть использовано и для определения надежности системы.

Понятие «надежность» применяется как для технологических, так и для технических систем. Согласно ГОСТ 27.004-85 технологической системой считается совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций [27]. К предметам производства относятся материал, заготовка, полуфабрикат и изделие, находящиеся в соответ-

ствии с выполняемым технологическим процессом в стадии хранения, транспортирования, формообразования, обработки, сборки, ремонта, контроля и испытаний. Технологические системы существуют на различных иерархических уровнях производства (рис. 2).

В зависимости от уровня иерархии технологические системы отличаются степенью сложности. Тем не менее любая технологическая система неразрывно связана с техническими системами, которые обеспечивают ее функционирование. Например, функционирование технологической системы «процесс производства стальной горячекатаной полосы» обусловлено существованием и работоспособностью таких технических систем, как нагревательная печь, прокатный стан, прокатная клеть и др.

Под технической системой по ГОСТ Р 57194.1-2016 понимается целостная совокупность конечного числа взаимосвязанных материальных объектов, имеющая последовательно взаимодействующие сенсорную и исполнительную функциональные части, модель их predetermined поведения в пространстве равновесных устойчивых состояний и способная при нахождении хотя бы в одном из них (целевом состоянии) самостоятельно в штатных условиях выполнять предусмотренные ее конструкцией потребительские функции [28]. Таким образом, основным назначением технической системы является выполнение ею потребительских функций. С этой точки зрения эффективность технической системы определяется показателями надежности, экономичности и безопасности (рис. 3).

В настоящее время существует множество стандартов, регламентирующих различные аспекты надежности. Терминологические особенности в описании надежности различными стандартами, вызванные одновременным использованием терминов международных и российских стандартов, существенно усложняют задачу решения анализа надежности и выбора методов ее оценки. С 1 сентября 2017 г. введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 27.003-2016 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности». Согласно данному стандарту все объекты (машины, оборудование, изделия) характеризуются определенным уровнем надежности [29]. Показатели надежности, выбираемые для нормативных документов и конструкторской документации, должны быть связаны с видом и назначением изделий, предусмотренным применением и важностью требуемых функций.

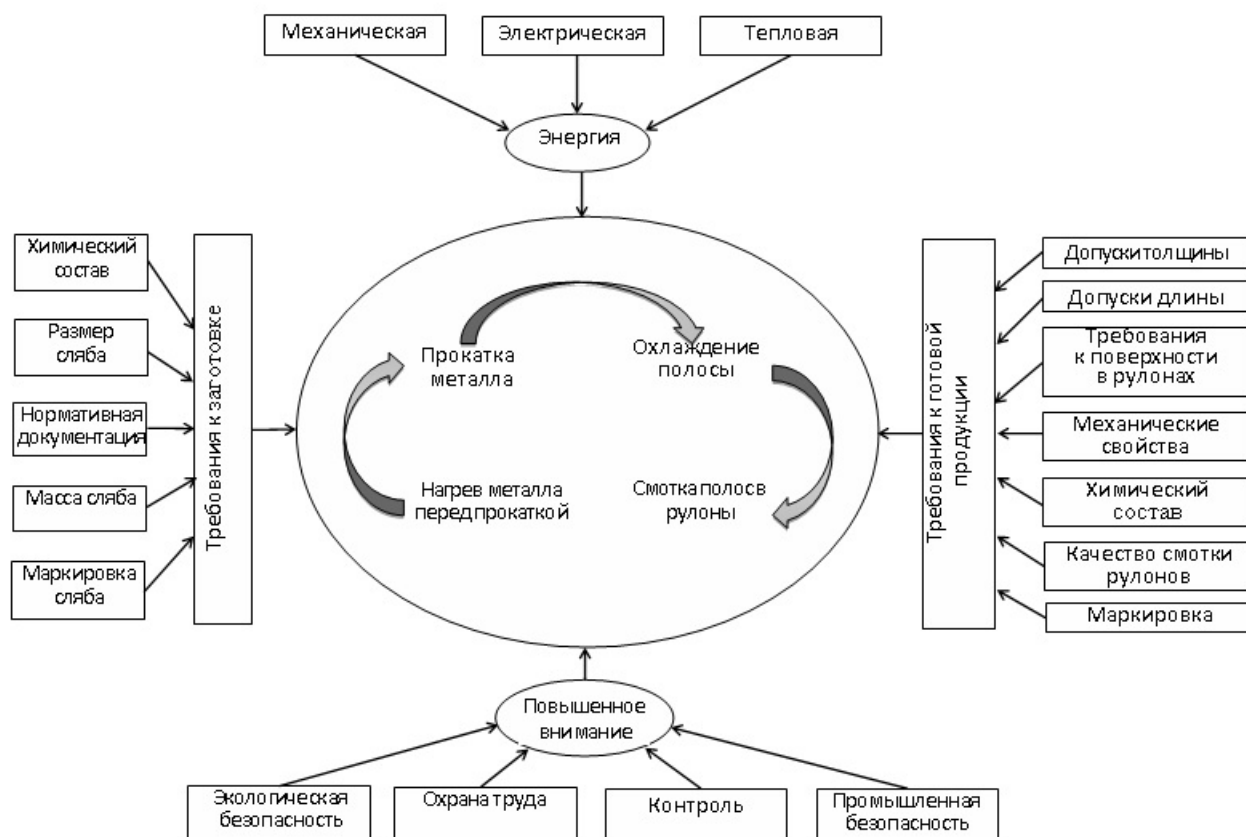


Рис. 1. Структурная схема технологического процесса производства стальной горячекатаной полосы

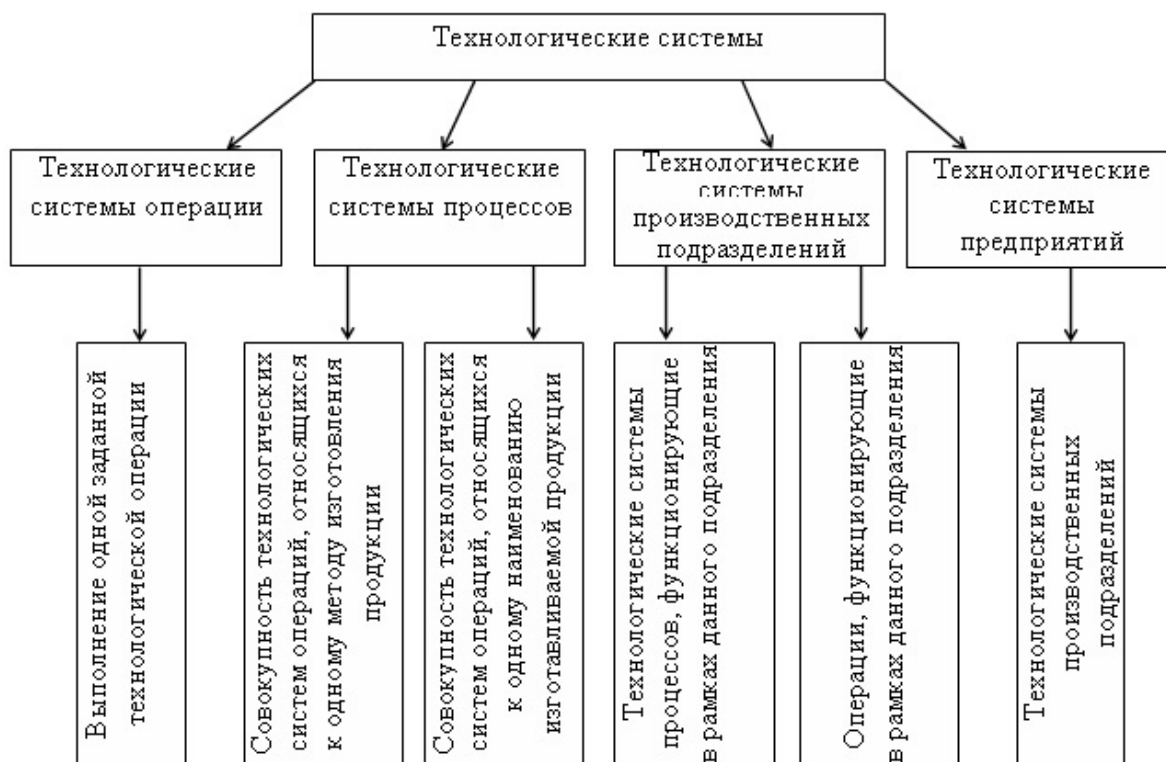


Рис. 2. Виды технологических систем

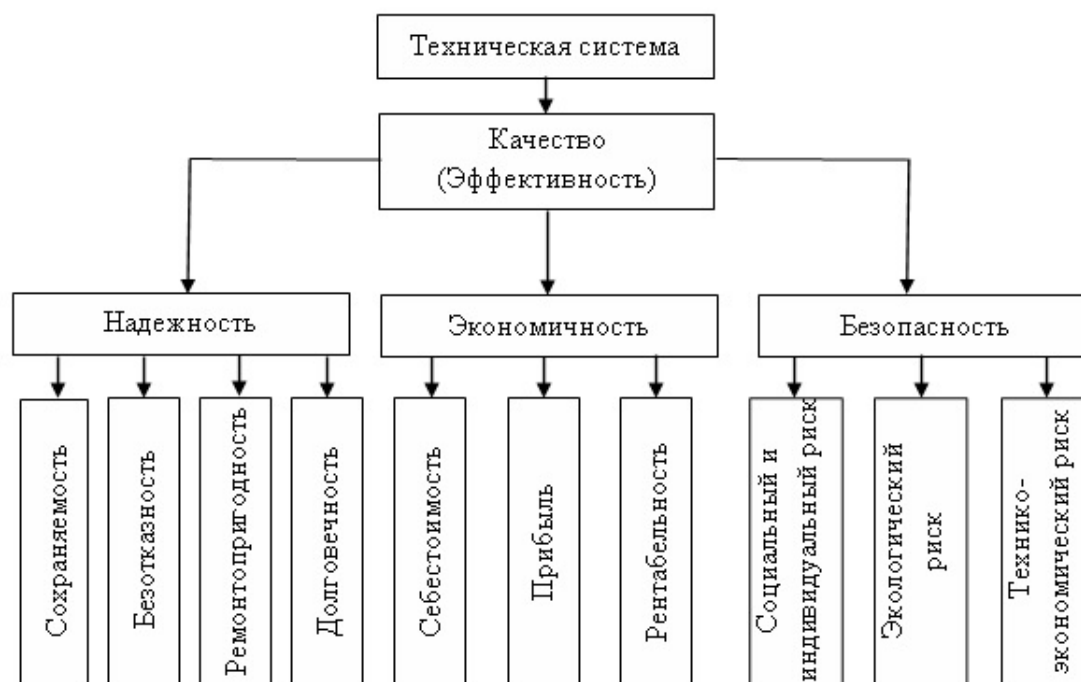


Рис. 3. Показатели эффективности технической системы

Процедура оценки надежности регламентирована в ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003) «Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности» и заключается в следующей последовательности действий [30]:

- определение исследуемой системы, режимов и условий ее работы, функциональных связей, включая интерфейсы или процессы;
- определение всех требований или целей надежности и работоспособности системы, а также характеристик и особенностей системы, режимов ее эксплуатации, условий окружающей среды и требований обслуживания; определение отказа системы, критериев отказов и условий, основанных на функциональной спецификации системы, ожидаемой продолжительности и условий эксплуатации;
- анализ системы на основе методов надежности и соответствующих данных эффективности;
- проведение качественного анализа надежности для определения режимов неисправностей системы и компонентов, механизмов отказов, причин и последствий отказов, путей отказа/неисправности, ремонтнопригодности, возможностей предотвращения неисправностей, разработки стратегий технического обслуживания и ремонта;
- количественный анализ уровня надежности системы;

- анализ выполнения целей требований надежности для рассматриваемой системы.

Сложность и разнообразие технологических систем, а также важность определения уровня их надежности обусловили существование различных методов, позволяющих качественно и/или количественно получить оценку надежности. При этом в зависимости от вида анализируемой информации методы оценки надежности можно условно разделить на следующие группы:

- методы, основанные на оценке количества отказов, неисправностей, а также причин их возникновения. К данной группе относятся следующие методы: «прогнозирование интенсивности отказов», «анализ дерева неисправностей (FTA)», «анализ режимов и последствий (критичности) отказов FME(C)A», «таблица истинности (анализ функциональной структуры)», «анализ прочности и напряжений». Эти методы применяются на начальных стадиях проектирования для оценки интенсивности отказов оборудования и системы в целом, для определения надежности или эквивалентной интенсивности отказов компонентов, либо как способы идентификации причины существующего отказа и как методы анализа режима отказа, прогнозирования и моделирования надежности.



Рис. 4. Методы оценки надежности технологических систем

- методы, основанные на анализе системы в целом, существующих событий и связей между ними. К данной группе можно отнести следующие методы: «анализ дерева событий (ETA)», «анализ структурной схемы надежности (RBD)», «Марковский анализ (Markov Analysis)», «анализ сети Петри», «исследование опасности и работоспособности HAZOP», «анализ человеческого фактора (HRA)», «статистические методы надежности (Monte-Carlo)». Применение этих методов целесообразно при необходимости исследовать все возможные пути формирования событий, последовательность их появления и наиболее вероятные результаты или последствия, когда должны быть учтены сложные логические взаимодействия между элементами системы, для рассмотрения системы в целом и взаимодействия отдельных работников при эксплуатации системы и в других аналогичных случаях.

Следует отметить, что существуют и другие подходы для оценки надежности технологических систем (рис. 4).

Так, оценку надежности технологических систем можно осуществлять по регламентированному в стандартах параметрам качества и производительности, а также на основе критериального подхода. При этом следует отметить, что сущность методов оценки надежности по параметрам качества и параметрам производительности различается: для соответствующих расчетов используются либо показатели качества производимого изделия в результате функционирования

технологической системы, либо показатели ее производительности. Использование критериального подхода требует разработки системы критериев, по которым будет оцениваться надежность технологической системы. Несмотря на определенную субъективность данного метода, он широко применяется благодаря возможности разработки системы критериев в зависимости от сложности и функционального назначения исследуемой технологической системы, а также от вида решаемых задач [31–36].

Закключение

При выборе показателей надежности технологических и технических систем следует руководствоваться тем, что эти показатели должны достаточно полно описывать свойства системы, учитывать их характерные особенности, быть удобными для аналитического расчета и экспериментальной проверки по результатам испытаний, должны иметь разумный физический смысл и допускать возможность перехода к показателям качества и эффективности. Вид технологической или технической системы является определяющим признаком для выбора критериев отказов и предельных состояний, показателей надежности и методов их оценки. Развитие техники и технологий, сложность взаимосвязей технических объектов вызывают необходимость разработки научно обоснованных принципов и единых подходов для выбора метода оценки надежности технологических и технических систем.

Список литературы

1. Аверьянов А.М. Системное познание мира: монография. М.: Политиздат, 1985. 263 с.
2. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1973. С. 20–37.
3. Хубка В. Теория технических систем: монография: пер. с нем. М.: Мир, 1987. 208 с.
4. Винограй Э.Г. Основы общей теории систем: монография. Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. 1993. 339 с.
5. Могилевский В.Д. Основы теории систем. В 2 ч. М.: МИРЭА, 1997. 190 с.
6. Проблемы методологии системного исследования: монография. М.: Мысль, 1970. 435 с.
7. Месарович М., Такахара И. Общая теория систем: математические основы: монография. М.: Мир, 1978. 311 с.
8. Арбиб М., Мейнс Э.Дж. Основания теории систем: разложимые системы // Математические методы в теории систем. М.: Мир. 1979. С. 7–49.
9. Бондаренко Н.И. Методология системного подхода к решению проблем: история, теория, практика: монография. СПб: СПбУЭФ, 1997. 388 с.
10. Голубков Е.П. Использование системного анализа в отраслевом планировании: монография. М.: Экономика, 1977. 160 с.
11. Исследования по общей теории систем: монография / под ред. В.Н. Садовского, Э.Б. Юдина. М.: Прогресс, 1969. 325 с.
12. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и (или) оборудования». Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 823. М., 2012.
13. Базовский И. Надежность: монография. М.: Мир, 1965. 374 с.
14. Надежность в машиностроении: справ. / под ред. Шашкина В.В., Карзова Г.П. СПб.: Политехника, 1992. 719 с.
15. Надежность технических систем: справ. / под ред. Ушакова И.А. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
16. Справочник по надежности / Епишин Ю.Г., Смиренин Б.А., Левин Б.Р.; под ред. Левина Б.Р. М.: Мир, 1969. Т. 1. 339 с.
17. Горохов П.К., Бердичевский Б.Е. Справочник по надежности / под ред. Бердичевского Б.Е. М.: Мир, 1970. Т. 2. 304 с.
18. Соловейчик Ф.С., Бердичевский Б.Е. Справочник по надежности. М.: Мир, 1970. Т. 3. 376 с.
19. Ширяева Е.Н. Проектирование процесса горячей прокатки на основе системного анализа // XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля: тез. докл. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. 2019. С. 284.
20. Технология горячей прокатки стального листа как объект проектирования на основе системного анализа / Полякова М.А., Ширяева Е.Н., Налимова М.В. // Актуальные проблемы современной науки, техники, образования: тез. докл. 77-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 218–219.
21. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Построение структурной схемы технической системы «Стан горячей прокатки» // Актуальные проблемы современной науки, техники, образования: тез. докл. 77-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 163–164.
22. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности взаимодействия потоков в технической системе «Стан горячей прокатки» // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: proceedings of the 4th Youth Scientific and Practical Conference / ed. by A.G. Korchunov. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publishing House, 2019. P. 115–117.
23. Оценивание качества тонких горячекатаных полос для определения возможности замещения холоднокатаной листовой стали общего назначения / Румянцев М.И., Шубин И.Г., Завалишин А.Н., Корнилов В.Л., Буданов А.П., Цепкин А.С., Пантелеева Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4(20). С. 69–73.
24. Разработка технологии производства горячекатаного тонколистового проката для замещения холоднокатаного проката аналогичного назначения / Румянцев М.И., Шубин И.Г., Завалишин А.Н., Корнилов В.Л., Буданов А.П., Цепкин А.С., Пантелеева Н.А. // Производство проката. 2009. № 4. С. 30–34.
25. Производство горячекатаного листового проката для замещения холоднокатаного аналогичного назначения: монография / Шубин И.Г., Исмагилов Р.А., Завалишин А.Н., Цепкин А.С., Корнилов В.Л., Буданов А.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 217 с.
26. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №1. С. 45–55.
27. ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике (ССНТ). Системы технологические. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 1985. 9 с.
28. ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2016. 12 с.
29. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартиформ, 2017. 18 с.
30. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. М.: Стандартиформ, 2002. 29 с.
31. Конструкции и расчет надежности деталей и узлов прокатных станов: монография / Анцупов В.П., Анцупов А.В., Анцупов А.В., Русанов В.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 156 с.
32. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям / Анцупов В.П., Анцупов А.В., Анцупов А.В. // Надежность. 2013. №3(46). С. 5–14.
33. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / Анцупов В.П., Дворников Л.Т., Громаковский Д.Г., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 141–146.
34. Основы диагностики и надежности технических объектов: монография / Анцупов В.П., Корчунов А.Г., Анцупов

- А.В., Анцупов А.В. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 114 с.
35. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria / Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun), Antsupov V.P. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). P. 62–66.
36. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография / Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2015. 308 с.

Поступила 27.06.19

Принята в печать 22.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-60-69>

DEPENDABILITY ASSESSMENT OF MANUFACTURING AND ENGINEERING SYSTEMS ON THE BASIS OF APPLICABLE STANDARDS

Elena N. Shiriaeva – Master Degree Student

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

ORCID 0000-0002-4505-3873

Marina A. Polyakova – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor,

Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

ORCID 0000-0002-1597-8867

Abstract. Problem Statement (Relevance): This paper gives some general information about system analysis as a technique that is widely used for characterization of manufacturing and engineering systems. The paper uses a case study of the hot strip rolling process to describe a system encompassing the input and output parameters of the matter, as well as the existing energy and information flows. The principle problems are outlined that can help in the development of adequate mathematical models for a formalized process dependability assessment in steel products manufacturing. Objectives: To analyze the existing dependability assessment techniques applicable to manufacturing and engineering systems in order to choose the appropriate technique for solving a particular manufacturing problem. Methods Applied: The authors have analysed the applicable standards which regulate dependability parameters in engineering. The existing dependability assessment techniques have been examined. Originality: The originality of this study lies in the fact that the process of hot rolling was analysed with the help of system analysis, which enabled to demonstrate the interconnections between the flows of matter, energy, and information. A classification of manufacturing and engineering systems is presented which can serve as the basis for choosing the adequate dependability assessment technique for a particular system. The paper lists the application areas for the available dependability assessment systems applicable to manufacturing and engineering systems. Findings: The paper describes the results of the system analysis that was carried out for the hot rolling process, which helped establish a relationship between the requirements to the rolling stock and the requirements to the finished steel product. It is a pre-requisite for choosing appropriate rolling regimes that would enable to obtain the desired properties in the final product. The paper describes the existing dependability assessment techniques applicable to manufacturing and engineering

systems. Practical Relevance: The proposed approach enables to make a scientifically justified choice of the dependability assessment technique taking into consideration the characteristics of a particular process or engineering system.

Keywords: Dependability, system analysis, hot strip rolling, manufacturing system, engineering system, assessment technique, standard.

References

1. Averianov A.M. *Sistemnoe poznanie mira: monografiya* [Systematic understanding of the world]. Moscow: Politizdat, 1985, 263 p. (In Russ.)
2. Bertalanffy L. von. The history and status of general systems theory. *Sistemnye issledovaniya. Ezhegodnik* [Systematic studies. Annual report]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 20–37. (In Russ.)
3. V. Hubka. *Teoriya tekhnicheskikh sistem: monografiya* [The theory of engineering systems: Monograph]. Translated from German. Moscow: Mir, 1987, 208 p. (In Russ.)
4. Vinogray E.G. *Osnovy obshchey teorii sistem: monografiya* [Basics of the general systems theory: Monograph]. Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 1993, 339 p. (In Russ.)
5. Mogilevskiy V.D. *Osnovy teorii sistem* [Basics of the systems theory]. In 2 parts. Moscow: MIREA, 1997, 190 p. (In Russ.)
6. *Problemy metodologii sistemnogo issledovaniya: monografiya* [The problems related to the methodology of systematic studies]. Moscow: Mysl, 1970, 435 p. (In Russ.)
7. Mesarovich M., Takahara I. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy: monografiya* [General systems theory: Mathematical basics: Monograph]. Moscow: Mir, 1978, 311 p. (In Russ.)
8. Arbib M., Manes E.G. Fundamentals of the systems theory: Decomposable systems. *Matematicheskie metody v teorii sistem* [Mathematical methods in the systems theory]. Moscow: Mir, 1979, pp. 7–49. (In Russ.)
9. Bondarenko N.I. *Metodologiya sistemnogo podkhoda k*

- resheniyu problem: istoriya, teoriya, praktika: monografiya [The methodology of systematic approach to problem resolution: History, theory, practice. Monograph]. Saint Petersburg: SPbUEF, 1997, 388 p. (In Russ.)
10. Golubkov E.P. *Ispolzovanie sistemnogo analiza v otraslevom planirovanii: monografiya* [Application of system analysis in production planning: Monograph]. Moscow: Ekonomika, 1977, 160 p. (In Russ.)
 11. *Issledovaniya po obshchey teorii sistem: monografiya* [Studies on the general systems theory: Monograph]. Ed. by V.N. Sadovskiy, E.B. Yudin. Moscow: Progress, 1969, 325 p. (In Russ.)
 12. Regulations of the Customs Union "On safety of machinery and (or) equipment". Approved by the Customs Union's Decree No. 823 dated 18th October 2011.
 13. Bazovskiy I. *Nadezhnost: monografiya* [Reliability: Monograph]. Moscow: Mir, 1965, 374 p. (In Russ.)
 14. *Nadezhnost v mashinostroenii: spravochnik* [Reliability in mechanical engineering: Reference book]. Ed. by V.V. Shashkin, G.P. Karzov. Saint Petersburg: Politehnika, 1992, 719 p. (In Russ.)
 15. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem: spravochnik* [Reliability of engineering systems: Reference book]. Ed. by I.A. Ushakov. Moscow: Radio i svyaz, 1985, 608 p. (In Russ.)
 16. Epishin Yu.G., Smirenin B.A., Levin B.R. *Spravochnik po nadezhnosti* [Reference book on reliability]. Ed. by B.R. Levin. Moscow: Mir, 1969, vol. 1, 339 p. (In Russ.)
 17. Gorokhov P.K., Berdichevskiy B.E. *Spravochnik po nadezhnosti* [Reference book on reliability]. Ed. by B.E. Berdichevskiy. Moscow: Mir, 1970, vol. 2, 304 p. (In Russ.)
 18. Soloveychik F.S., Berdichevskiy B.E. *Spravochnik po nadezhnosti* [Reference book on reliability]. Moscow: Mir, 1970, vol. 3, 376 p. (In Russ.)
 19. Shiryayeva E.N. System analysis based design of the hot rolling process. XVII Vserossiyskaya konferentsiya-konkurs studentov i aspirantov gorno-geologicheskogo, neftegazovogo, energeticheskogo, mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo profilya: tez. dokl. [17th National Conference and Competition among Undergraduate and Postgraduate Students of Mining and Geology, Oil and Gas, Energy, Mechanical Engineering and Metallurgy: Abstracts of reports]. Saint Petersburg Mining University, 2019, p. 284. (In Russ.)
 20. Polyakova M.A., Shiryayeva E.N., Nalimova M.V. The process of hot rolling of steel sheets as a design object in the system analysis based design. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki, obrazovaniya: tez. dokl. 77-y mezhdunarod. nauch.-tekhnich. konf.* [Important problems of today's science, technology and education: Abstracts of reports presented at the 77th International Science and Technology Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 218–219. (In Russ.)
 21. Shiryayeva E.N., Polyakova M.A. Building a block diagram of the system "Hot Rolling Mill". *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki, obrazovaniya: tez. dokl. 77-y mezhdunarod. nauch.-tekhnich. konf.* [Important problems of today's science, technology and education: Abstracts of reports presented at the 77th International Science and Technology Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 163–164. (In Russ.)
 22. Shiryayeva E.N., Polyakova M.A. Interaction of flows in the system "Hot Rolling Mill". Magnitogorsk Rolling Practice 2019: Proceedings of the 4th Youth Scientific and Practical Conference. Ed. by A.G. Korchunov. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 115–117. (In Russ.)
 23. Rumyantsev M.I., Shubin I.G., Zavalishchin A.N., Kornilov V.L., Budanov A.P., Tsepkin A.S., Panteleeva N.A. Assessing the quality of thin hot-rolled strips to understand if they can be used to substitute the general-purpose cold-rolled steel sheets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 4(20), pp. 69–73. (In Russ.)
 24. Rumyantsev M.I., Shubin I.G., Zavalishchin A.N., Kornilov V.L., Budanov A.P., Tsepkin A.S., Panteleeva N.A. Developing a process for producing hot-rolled sheets as a substitution for cold-rolled steel designed for the same application. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled steel], 2009, no. 4, pp. 30–34. (In Russ.)
 25. Shubin I.G., Ismagilov R.A., Zavalishchin A.N., Tsepkin A.S., Kornilov V.L., Budanov A.P. *Proizvodstvo goryachekatanogo listovogo prokata dlya zameshcheniya kholodnokatanogo analogichnogo naznacheniya: monografiya* [Production of hot-rolled sheets as a substitution for cold-rolled steel designed for the same application: Monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 217 p. (In Russ.)
 26. Rumyantsev M.I. Development and application of methods for improving steel sheet rolling systems: Some outcomes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 45–55. (In Russ.)
 27. GOST 27.004-85. Industrial product dependability. Technological systems. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 1985, 9 p.
 28. GOST R 57194.1-2016. Transfer of technology. General provisions. Moscow: Standartinform, 2016, 12 p.
 29. GOST 27.003-2016. Industrial product dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements. Moscow: Standartinform, 2017, 18 p.
 30. GOST R 51901-2002. Dependability management. Manufacturing system risk analysis. Moscow: Standartinform, 2002, 29 p.
 31. Antsupov V.P., Antsupov A.V., Antsupov A.V., Rusanov V.A. *Konstruktsii i raschet nadezhnosti detaley i uzlov prokatnykh stanov: monografiya* [Components and systems of rolling mills: Design and dependability calculation. Monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 156 p. (In Russ.)
 32. Antsupov V.P., Antsupov A.V., Antsupov A.V. How to predict the dependability of machine components using various criteria. *Nadezhnost* [Dependability], 2013, no. 3(46), pp. 5–14. (In Russ.)
 33. Antsupov V.P., Dvornikov L.T., Gromakovskiy D.G., Antsupov A.V. (junior), Antsupov A.V. Basics of the physical theory of machine part dependability based on kinetical strength of materials. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 141–146. (In Russ.)
 34. Antsupov V.P., Korchunov A.G., Antsupov A.V., Antsupov A.V. *Osnovy diagnostiki i nadezhnosti tekhnicheskikh ob'ektov: monografiya* [Basics of machine diagnosis and dependability: Monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 114 p. (In Russ.)
 35. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun), Antsupov V.P. De-

signed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, no. 5 (45), pp. 62–66.

36. Antsupov A.V. (junior), Antsupov A.V., Antsupov V.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti detaley mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti i iznosostoykosti*

materialov: monografiya [The theory and practice of ensuring machine part dependability based on kinetic strength and wear resistance of materials: Monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 308 p. (In Russ.)

Received 27/06/19

Accepted 22/07/19

Образец для цитирования

Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 60–69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-60-69>

For citation

Shiriaeva E.N., Polyakova M.A. Dependability Assessment of Manufacturing and Engineering Systems on the Basis of Applicable Standards. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 60–69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-60-69>

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 532.13

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

ЗАЩИТА ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ ОТ ГИДРОУДАРА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Найгерт К.В.¹, Целищев В.А.²¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. Защита приводных систем от резких перепадов давления является значимой задачей, так как она нацелена на сохранение целостности магистралей / аппаратуры и стабильности рабочих параметров. В магнитореологических приводных системах высокого давления нередко приходится применять регулируемую аппаратуру с механическими запорными элементами, поэтому защита магнитореологических приводных систем высокого давления от гидроудара крайне актуальна. В данной исследовательской работе приводится способ защиты приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами и его конструктивная реализация. Описаны варианты задания управляющего сигнала для оригинального магнитореологического устройства, которые позволяют бороться со скачками давления двумя различными путями. Посредством образования неоднородного распределения электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнитореологической жидкости или за счет бегущего магнитного поля, которое возбуждает в объеме намагниченной жидкости продольные звуковые волны и способствует нейтрализации ударной волны. Первый вариант организации управляющего сигнала основан на диссипации механической энергии вязкой средой, а второй базируется на эффекте, наблюдаемом при наложении акустических волн, ударной и регулирующей с одинаковыми частотно-амплитудными характеристиками, но находящимися в противофазе. Обозначены соотношения вязкостных и скоростных параметров для реализации управления. Так как способ противофаз обладает хорошей динамикой и малыми значениями времени переходных процессов, разработана численная модель, применимая при расчете характеристик регулирующей акустической волны и требуемых параметров бегущего электромагнитного управляющего поля. Результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного способа и состоятельность описанной численной модели.

Ключевые слова: защита приводных систем, гидроудар, магнитореологические устройства, бегущие магнитные поля, диссипация механической энергии.

Введение

Эффект гидравлического удара достаточно распространен для систем, в которых в качестве кинематического звена выступает жидкость. Эксплуатация магнитореологических контуров высокого давления зачастую требует применения механической запорно-регулирующей аппаратуры, так как многие конструкции магнитореологических устройств не способны исключить непроизводительное истечение рабочей среды через рабочие зоны при высоких давлениях. Наиболее распространенное конструктивное исполнение регулирующих магнитореологических устройств в работах [1–8].

Как и прочим гидравлическим системам,

магнитореологическим системам также грозит явление гидроудара. С общепринятыми причинами возникновения и известными последствиями. Рекомендованные методы борьбы с развитием явлений гидроудара не всегда оправданы и могут быть неприменимы в прецизионных приводных системах. Например, снижение скорости перекрытия потока негативно сказывается на динамике приводных систем и недопустимо для предохранительных клапанов. Установка в систему амортизирующих устройств и компенсаторного оборудования типа мембранных гасителей, редукторов давления и гидроаккумуляторов существенно увеличивает размеры и массу магистралей, ограничивая варианты компоновки гидроаппаратов и уменьшая динамическую жесткость систем. Использование труб большого диаметра или рукавов высокого давления в при-

водных системах имеет больше недостатков, чем ожидаемых преимуществ. Очевидно и то, что резкие скачки давления также негативно влияют на динамику выходного звена и снижают точность его перемещения. Конструктивное исполнение распространенных способов защиты приводных систем от гидроудара приведены в [1–9].

Актуальность

Существующие способы защиты магистралей и гидрооборудования от гидравлического удара являются дорогостоящими, существенно снижают динамическую жесткость и увеличивают массогабаритные показатели систем. Поэтому при эксплуатации гидроаппаратов в составе магнитореологических систем для борьбы с непроизводительным изменением давления целесообразно и актуально создание и развитие альтернативных способов и устройств.

Цель исследовательской работы

Разработать способ защиты магнитореологических систем, имеющих в своем составе гидравлические аппараты, от резких скачков давления и реализовать способ в оригинальной конструкции устройства.

Способ гашения ударных волн в магистрале

Применение в магнитореологических системах гидравлических устройств и классической запорно-регулирующей аппаратуры требует реализации защиты трубопроводов от явлений гидравлического удара, что целесообразно в данном случае производить при помощи бегущих динамических или неоднородно распределенных электромагнитных полей. Бегущие динамические электромагнитные поля, создаваемые сборками дифференциальных электромагнитов, установленных каскадом, способны выступать в качестве средства защиты трубопроводов магнитореологических систем от явлений гидравлического удара. При этом включение всех фаз сборки индукторов дифференциального электромагнита и последовательное включение дифференциальных электромагнитов, входящих в каскад, в направлении распространения ударной волны позволяет демпфировать энергию объема движущейся жидкости. Скорость последовательного включения дифференциальных электромагнитов v_{em} относительно скорости распространения ударной волны v_{gh} устанавливается соотношением $\beta v_{em} = v_{gh}$ и корректируется посредством обратной связи.

Одновременное включение всех дифференциальных электромагнитов и индивидуальное управление вольт-амперными характеристиками каждого дифференциального электромагнита образует неоднородное распределение электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнитореологической жидкости, способное также препятствовать распространению ударных волн в жидкой среде. С целью осуществления более эффективного гашения ударной волны разница вязкости магнитореологической жидкости η в зонах регулирования рядом расположенных дифференциальных электромагнитов должна находиться в пределах от $0,5\eta$ до $0,95\eta$ для предыдущего дифференциального электромагнита и в пределах от $1,2\eta$ до 2η для последующего дифференциального электромагнита.

Коэффициент β определяется из соотношения скорости распространения акустической волны в эталонной ферромагнитной среде v_{ast} и скорости распространения акустической волны в образце магнитореологической жидкости v_{agh} ,

$$\beta = \frac{v_{agh}}{v_{ast}}.$$

Очевидно, что бегущее магнитное поле возбуждает в объеме намагниченной жидкости продольные звуковые волны, частотные характеристики которых в два раза больше частоты управляющего поля. Поэтому помимо изменения вязкости магнитореологической жидкости в направлении распространения ударной волны возможен вариант гашения ударных волн за счет генерации акустических волн равной частоты, но находящихся в противофазе с ударными волнами. В случае фазного регулирования частота электромагнитного поля ω_{em} соотносится с частотой ударной волны ω_{gh} выражением $0,5\omega_{em} = \omega_{gh}$, а скорость последовательного включения дифференциальных электромагнитов v_{em} относительно скорости распространения ударной волны v_{gh} устанавливается соотношением $v_{em} = v_{gh}$ и корректируется посредством обратной связи.

Управление осуществляется контроллером по данным опроса серии вибродатчиков, установленных в системе последовательно на участке перед зоной регулирования, которые позволяют определять скорость распространения ударной волны в магнитореологической среде.

Возможна реализация сообщения магнито-реологической среде дополнительной энергии и организации в магистрали гидродинамического эффекта типа – жидкий поршень, который формируется посредством сообщения частицам магнетика кинетической энергии и генерации акустических волн. Данный гидродинамический эффект имеет прикладное значение и промышленное применение, а также позволяет бороться с падением давления при гидроударе. Более подробное описание способов приведено в [10].

Конструктивная реализация

Устройство создает электромагнитное поле сборками индукторов, образующих кольцевые управляющие дифференциальные электромагниты, установленные каскадами. Включение всех фаз сборки индукторов дифференциального электромагнита и последовательное включение дифференциальных электромагнитов, входящих в каскад, в направлении распространения ударной волны или во встречном направлении позволяет демпфировать энергию объема движущейся жидкости.

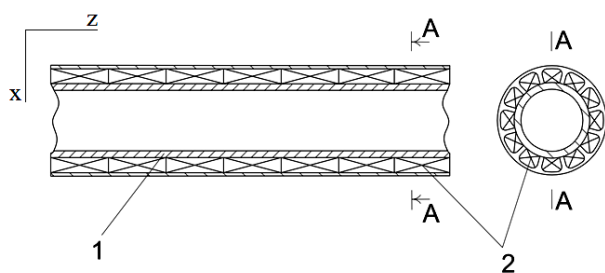


Рис. 1. Устройство защиты магнито-реологических систем высокого давления от гидроудара: 1 – корпус; 2 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

Одновременное включение всех дифференциальных электромагнитов и индивидуальное управление вольт-амперными характеристиками каждого дифференциального электромагнита образует неоднородное распределение электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнито-реологической жидкости, способное также препятствовать распространению ударных волн в жидкой среде (рис. 1). Подробное описание конструкции приведено в работах [10–13].

Численная модель

Система акустических уравнений для магнито-реологической среды [14–15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v &= 0, \\ \rho T \frac{d}{dt} \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right) &= \\ &= \tau_{i,k} \frac{\partial v_i}{\partial z_k} + \operatorname{div} (\chi \nabla T), \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\nabla (p - M_0 H) + \eta_s \Delta v + \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla \operatorname{div} v, \\ \operatorname{div} B &= 0, \\ \operatorname{rot} H &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Для них справедливы следующие уравнения. Уравнение теплопроводности

$$T \delta \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right) = \frac{i \omega \chi}{\rho c^2} \delta T. \quad (2)$$

И уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} i \omega \chi c^{-2} \rho^{-1} \delta T - T \delta \left[\mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right] &= \\ = C_v \delta T - q T c^2 \rho^{-1} \gamma^{-1} \delta \rho. \end{aligned} \quad (3)$$

t – время; $\tau_{i,k}$ – тензор вязких напряжений; v – скорость; χ – магнитная восприимчивость; p – давление; η_s – сдвиговая вязкость; η_v – объемная вязкость; B – магнитная индукция; S – энтропия; C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; γ – отношение удельных теплоемкостей.

В случае генерации бегущего управляющего поля скорость распространения ударной волны:

$$\begin{aligned} H^2 &= H^{*2} + 2 H^* H_a c h k x \sin(kz - \omega t) + \\ &+ H_a^2 \left[s h^2 k x + \sin^2(kz - \omega t) \right], \\ v_z &= \frac{\left(\frac{A_H}{\rho} \right) \omega / k}{\left(\frac{\omega}{k} \right)^2 - c_f^2} \cos 2(kz - \omega t) - \\ &- \frac{4 A_H}{\rho} \frac{H^*}{H_a} \frac{k}{\omega} c h k x \sin(kz - \omega t), \\ v_x &= \frac{4 A_H}{\rho} \frac{H^*}{H_a} \frac{k}{\omega} c h k x \cos(kz - \omega t), \\ H_a &= \frac{B}{\mu_0 (1 + \chi) s h k l}, \\ A_H &= \mu_0 \chi H_a^2 / 4. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом

$$H^2 = H_a^2 [sh^2 kx + \sin^2(kz - \omega t)]. \quad (5)$$

Опишем следующую численную модель:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2 + \\ &+ \nabla \eta \Delta v + \nabla \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla (\nabla v), \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v &= 0, \\ v_z &= v_{za} \cos [2(kz - \omega t) + \varphi_{vz}], \\ v_{za} &= \frac{\left(\frac{A_m}{\rho} \right) \cdot \omega / k}{\left(\left[c_f^2 - \left(\omega / k \right)^2 \right]^2 + 4 \omega^2 b_m^2 \right)^{1/2}}, \\ \operatorname{tg} \varphi_{vz} &= \frac{2 b_m \omega}{c_f^2 - \left(\omega / k \right)^2}, \\ A_m &= \mu_0 \chi H_a^2 / 4, \\ b_m &= \left[\eta_v + \left(\frac{4}{3} \right) \eta_s \right] / \rho, \\ \eta(H) &= \left(\frac{\tau_{sh}}{\gamma_v} + \eta_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau_n M(H)}{\left(1 + \left(\tau_n \tau_s H M(H) \right) / J \right)}, \quad (6) \\ k &= \frac{\omega}{v_\phi}. \end{aligned}$$

H^* – постоянная составляющая напряженности управляющего поля; k – волновой вектор; c_f – скорость звука в магнитореологической среде; l – высота объема магнитореологической среды в рабочей камере; φ_{vz} – разность фаз; η_r – реологическая вязкость, без проявления неньютоновских свойств, до помещения в механические поля; τ_{sh} – сдвиговое напряжение; J – суммарный момент инерции частиц; τ_n, τ_s – времена релаксации немагнитных и магнитных частиц; γ_v – градиент скорости; ω – угловая частота; v_ϕ – фазовая скорость волны.

При создании акустических волн, частоты которых совпадают с частотами гасимых волн, но находятся с ними в противофазе, рационально выразить отклонение, отвечающее результирующим колебаниям в виде [16–18]:

$$x_{tot} = X_{mgh} \sin(\omega t + \varphi_{0gh}) + X_{mem} \sin(\omega t + \varphi_{0em}). \quad (7)$$

Или

$$x_{tot} = X_{mtot} \sin(\omega t + \varphi_{0tot}). \quad (8)$$

X_{mgh} – амплитуда ударной волны; X_{mem} – амплитуда генерируемой волны; φ_{0gh} – начальная фаза колебаний ударной волны; φ_{0em} – начальная фаза колебаний генерируемой волны.

Амплитуда результирующих колебаний

$$X_{mtot} = \sqrt{X_{mgh}^2 + X_{mem}^2 + 2X_{mgh}X_{mem} \cos(\varphi_{0gh} - \varphi_{0em})}. \quad (9)$$

Начальная фаза результирующих колебаний

$$\varphi_{0tot} = \arctg \frac{X_{mgh} \sin(\varphi_{0gh}) + X_{mem} \sin(\varphi_{0em})}{X_{mgh} \cos(\varphi_{0gh}) + X_{mem} \cos(\varphi_{0em})}. \quad (10)$$

Численная модель расчета характеристик эффекта жидкого поршня:

$$\begin{aligned} B_z &= \frac{B_0 sh kx}{shkl} \cos(kz - \omega t), \\ B_x &= \frac{B_0 ch kx}{shkl} \sin(kz - \omega t), \\ H_z &= \frac{B_z}{\mu_0 (1 + \chi)}, \\ H_x &= \frac{B_x}{\mu_0 (1 + \chi)}, \quad (11) \\ M_z &= \frac{\chi B_z}{\mu_0 (1 + \chi)}, \\ M_x &= \frac{\chi B_x}{\mu_0 (1 + \chi)}, \\ \rho' &= \frac{\partial p}{\partial \rho} \rho' = c_f^2 \rho', \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2, \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v &= 0, \\ v_z &= \frac{\left(\frac{A_h}{\rho} \right) \cdot \omega / k}{\left(\left(\omega / k \right)^2 - c_f^2 \right)} \cos 2(kz - \omega t), \\ v_x &= 0, \\ A_h &= \mu_0 \chi H_a^2 / 4, \\ H_a &= \frac{B_0}{\mu_0 (1 + \chi) shkl}. \end{aligned}$$

ρ' – отклонения от начальных значений.

Численный эксперимент

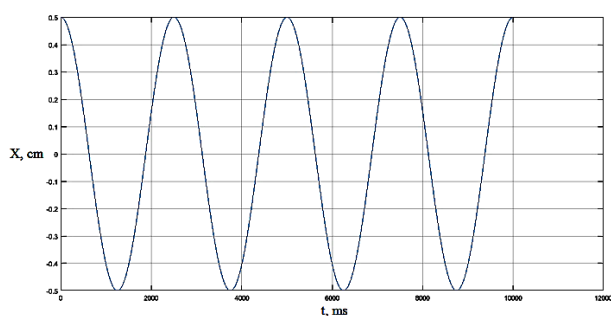


Рис. 2. Динамика изменения амплитуды ударной волны

Ударные волны представляют собой акустические волны, возникающие вследствие изменения давления и плотности в среде по направлению их распространения. В целом распространение акустических волн в среде является чередованием участков декомпрессии и компрессии среды, в которой они распространяются.

Рассмотрим самый простой вид акустических волн – периодические синусоидальные колебания.

Смоделируем распространение ударной волны в канале без учета эффекта затухания в вязкой среде (рис. 2).

В случае наложения аналогичной ударной волны в противофазе к акустической волне, распространяющейся в среде, происходит ее полное поглощение, результаты моделирования данного эффекта представлены на рис. 3.

Теперь рассмотрим вариант скоростных характеристик ударной волны, распространяющейся в среде без учета эффекта вязкого затухания, приведенных на рис. 4.

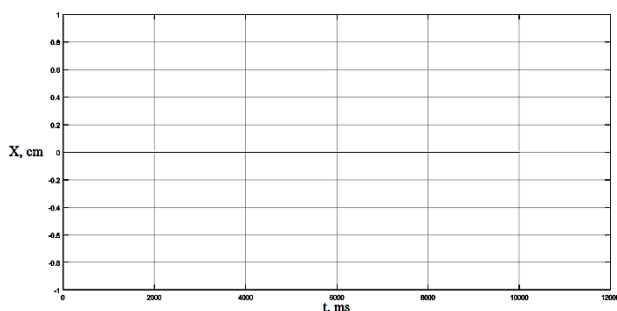


Рис. 3. Значение амплитуды ударной волны при регулировании по принципу противофазы

Принимая во внимание то, что генерирование акустических волн в противофазе происходит при помощи бегущего управляющего поля, зададим требуемые частотно-фазовые характеристики напряженности управляющего поля (рис. 5). Скоростная характеристика акустической регулирующей волны, генерируе-

мой бегущим управляющим магнитным полем изображена на рис. 6.

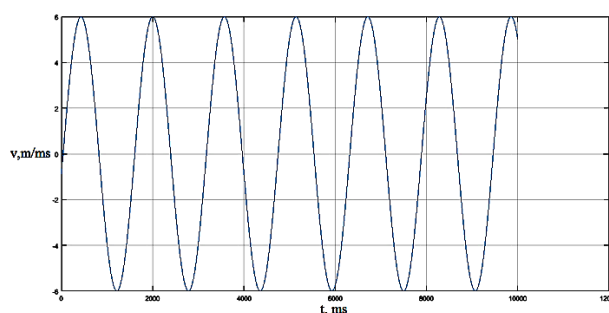


Рис. 4. Динамика изменения скорости ударной волны

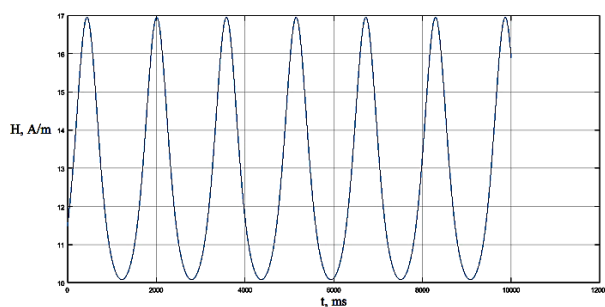


Рис. 5. Динамика изменения напряженности управляющего поля

При анализе рис. 5–6 очевидна зависимость скоростных характеристик регулирующей акустической волны не только от частотно-фазовых характеристик, но и от значений напряженности магнитного поля. Так как акустические волны возникают вследствие изменения давления и плотности в среде по направлению их распространения, очевидно, что резкое повышение значений напряженности магнитного поля способно приводить к росту вязкости, увеличению электромагнитной составляющей полного давления в магнитореологической среде, торможению потока. Резкое падение значений напряженности, наоборот, снижает вязкость и уменьшает электромагнитную составляющую давления. Данное чередование участков компрессии и декомпрессии среды генерируется посредством бегущего электромагнитного поля и создает наблюдаемый акустический эффект.

Результирующий график при наложении акустических волн, ударной и регулирующей, продемонстрирован на рис. 7.

Полученные результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного способа защиты магнитореологических систем от явлений гидравлического удара.

Разработанный метод численного моделирования позволяет рассчитывать рабочие характе-

ристики магнито реологического устройства защиты трубопроводов от гидроудара.

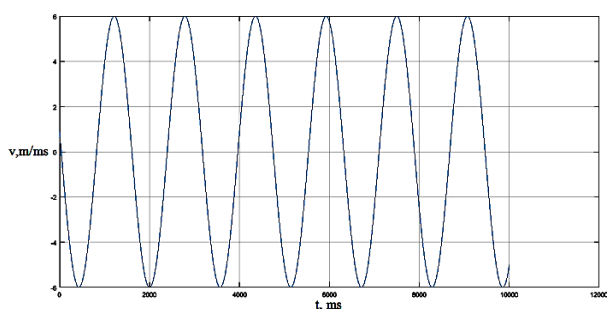


Рис. 6. Динамика изменения скорости регулирующей волны

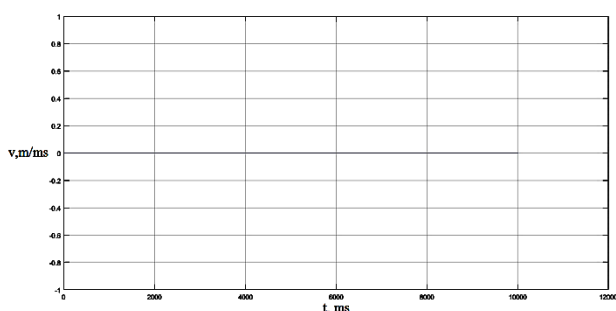


Рис. 7. Значение скорости ударной волны при регулировании по принципу противофазы

Новизна

Разработана конструкция магнито реологического устройства защиты трубопровода от гидроудара, отличающаяся от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства заключается в создании бегущего управляющего поля или неоднородного распределения электромагнитного поля, то есть и неоднородного распределения вязкостных свойств в объеме за счет каскада блоков управления, выполненных из сборок дифференциальных электромагнитов.

Разработан метод численного моделирования оригинального магнито реологического устройства защиты трубопровода от гидроудара, позволяющий определять его основные рабочие параметры.

Заключение

Разработанный способ защиты магнито реологических систем, включающих в себя гидравлическую аппаратуру, от явлений гидравлического удара эффективен.

Создана конструкция устройства, позволяющая осуществлять гашение ударных волн, препятствовать их распространению в магнито реологической среде и сохранять целостность магистрали.

Численный эксперимент подтверждает эффективность способа и работоспособность конструктивных решений.

Предлагаемое устройство применимо для реализации эффекта жидкого поршня.

Список литературы

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Гордон А.В. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М.: Оборонгиз, 1960. 515 с.
2. Пат. 2145394 РФ. Магнито жидкостное устройство для гашения колебаний / В.Н. Бурченков и др. Оpubл. 10.02.2000, Бюл. № 4.
3. Пат. 2449188 РФ. Регулируемый магнито реологический пневматический амортизатор / А.Б. Корчагин и др., опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
4. Пат. 2232316 РФ. Магнито реологический амортизатор / Е.П. Гусев и др. Оpubл. 27.10.2003, Бюл. № 30.
5. Пат. 2106551 РФ. Магнито реологический виброгаситель / Ю.Б. Кудряков и др. Оpubл. 10.03.1998.
6. Пат. 2354867 РФ. Динамический гаситель / И.А. Яманин и др. Оpubл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
7. Пат. 2561610 РФ. Магнито реологический амортизатор / Б.А. Гордеев и др. Оpubл. 27.08.2015, Бюл. № 24.
8. Беляев А.В., Смородин Б.Л. Конвекция магнитной жидкости под действием переменного магнитного поля // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. №4. С. 18–27.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
10. Найгерт К.В., Тутынин В.Т., Целищев В.А. Способ управления расходными характеристиками магнито реологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях: пат. заявка РФ. № 2018130914, 27.08.2018.
11. Итоги науки. Выпуск 35. Гл. 3. Физические основы проектирования магнито реологических систем нового поколения / К.В. Найгерт, В.А. Целищев и др. // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Москва: РАН, 2018. 90 с.
12. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228. 2019.
13. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384. 2019.
14. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. 383 с.

15. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. М.: Мир, 1993. 272 с.
16. Инман Дэниел Дж. Инженерная вибрация. Прентис Холл. 2001.
17. Томпсон У.Т. Теория вибраций. Нельсон Торнс Лтд. 1996.
18. Тонгве Б. Принципы вибрации. Издательство Оксфордского университета. 2001.

Поступила 24.02.19

Принята в печать 29.03.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

PROTECTION OF DRIVE SYSTEMS FROM HYDRAULIC IMPACTS WITH THE HELP OF MAGNETORHEOLOGICAL DEVICES

Katarina V. Naigert – Cand.Sci. (Eng.), Doctoral Student

Department of Automobile Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Email: kathy_naigert@mail.ru

Vladimir A. Tselishchev – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Department

Department of Applied Hydromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

Email: pgl.ugatu@mail.ru

Abstract. Protecting drive systems from pressure spikes or drops is an important task as it aims to preserve the integrity of hydraulic lines/equipment and the stability of operating parameters. As control equipment with mechanical valves is often used in high pressure magnetorheological drive systems, their protection from hydraulic impact is extremely relevant. This research paper describes a technique for protecting drive systems from hydraulic impacts with the help of magnetorheological devices and their design. The authors describe a number of ways to set the control signal for the original magnetorheological device, which can help prevent pressure spikes in two different ways. It can either be realized through the use of unevenly distributed electromagnetic field and viscosity in the volume of magnetorheological fluid or with the help of a travelling magnetic field which excites longitudinal acoustic waves in the volume of magnetized fluid thus neutralizing the shock wave. The first option is based on dissipation of mechanical energy with the viscous fluid, while the second option is based on the effect observed when overlapping the shock wave and the control wave which have the same frequency and amplitude but are in phase opposition. Viscosity to velocity ratios are specified which are necessary for control. Since the antiphase method is characterized with good dynamics and small transient time values, a numerical model was developed which can be used to calculate the characteristics of the control acoustic wave, as well as the required parameters of the travelling electromagnetic control field. The results of a numerical experiment confirmed the effectiveness of the proposed method and the consistency of the numerical model described.

Keywords: Protection of drive systems, hydraulic impact, magnetorheological devices, travelling magnetic fields, dissipation of mechanical energy.

References

1. Balagurov V.A., Galteev F.F., Gordon A.V. *Proyektirovaniye elektricheskikh apparatov aviatsionnogo elektrooborudovaniya* [Design of electrical devices for aviation industry]. Moscow: Oborongiz, 1960, 515 p. (in Russ.)
2. Burchenkov V.N. et al. *Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy* [Ferrofluid device for oscillation damping]. Patent RF, no. 2145394, 2000.
3. Korchagin A.B. et al. *Reguliruyemyy magnitoreologicheskiiy pnevmaticheskiiy amortizator* [Adjustable magnetorheological pneumatic damper]. Patent RF, no. 2449188, 2012.
4. Gusev E.P. et al. *Magnitoreologicheskiiy amortizator* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2232316, 2003.
5. Kudryakov Yu.B. et al. *Magnitoreologicheskiiy vibrogasitel* [Magnetorheological vibration damper]. Patent RF, no. 2106551, 1998.
6. Yamanin I.A. et al. *Dinamicheskiiy gasitel* [Dynamic damper]. Patent RF, no. 2354867, 2009.
7. Gordeev B.A. et al. *Magnitoreologicheskiiy amortizator* [Magnetorheological damper]. Patent RF, no. 2561610, 2015.
8. Belyaev A.V., Smorodin B.L. Convection of magnetic fluid caused by alternating magnetic field. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied mechanics and applied physics], vol. 50, no. 4, 2009, pp. 18–27. (in Russ.)
9. Landau L.D., Lifshits E.M., *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986. (in Russ.)
10. Naigert K.V., Tutynin V.T., Tselishchev V.A. *Sposob upravleniya raskhodnymi kharakteristikami magnitoreologicheskoy zhidkosti za schet sozdaniya gidrodinamicheskikh i nenyutonovskikh effektov vo vneshnikh dinamicheskikh elektromagnitnykh polyakh* [A method to control the flow of magnetorheological fluid through the creation of hydrodynamic and non-Newtonian effects in external dynamic electromagnetic fields]. Patent application RF, no. 2018130914, 2018.
11. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Monograph. Scientific outcomes. Issue 35. Chapter 3. Physical principles in the design of new generation magnetorheological systems. *Izbrannye trudy Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i tekhnologii* [Selected Works of the All-Russian Conference on Problems of Science and Technology. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018, 90 p. (in Russ.)
12. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lec-

- ture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228, 2019.
13. Naigert K.V., Tselishchev V.A. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384, 2019.
14. Polunin V.M. *Akusticheskiye svoystva nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey* [Acoustics of nanodispersed magnetic fluids]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 383 p. (in Russ.)
15. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Mir, 1993, 272 p. (in Russ.)
16. Daniel J. Inman Engineering Vibration. Prentice Hall. 2001.
17. W.T. Thompson Theory of Vibrations. Nelson Thornes Ltd. 1996.
18. B. Tongue Principles of Vibration. Oxford University Press. 2001.

Received 24/02/19

Accepted 29/03/19

Образец для цитирования

Найгерт К.В., Целищев В.А. Защита приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 70–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

For citation

Naigert K.V., Tselishchev V.A. Protection of Drive Systems from Hydraulic Impacts with the Help of Magnetorheological Devices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 70–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аникеева Олеся Владимировна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Стандартизация, метрология, управление качеством, технология и дизайн», Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия. E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

Билалов Дамир Харасович – доц. кафедры «Инжиниринг и профессиональное обучение в машиностроении и металлургии», Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия.

Богодухов Станислав Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Материаловедение и технологии материалов», Аэрокосмический институт, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия. E-mail: ogu@mailgate.ru

Вдовин Константин Николаевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Литейные процессы и материаловедение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: vdovin@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3244-3327

Добрынин Сергей Михайлович – соискатель кафедры «Литейные процессы и материаловедение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: vdovin@magtu.ru

Ерохин Юрий Викторович – канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Захаров Анатолий Владимирович – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-8790-7892

Исламова Оксана Владимировна – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Управление качеством», Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.

Каменецкий Борис Исаакович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: kamenetski@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-6306-6590

Карташев Максим Федорович – аспирант, инженер кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: goncharsk@mail.ru

Кенжалиев Багдаулет Кенжалиевич – д-р техн. наук, проф., проректор Satbayev University, Генеральный директор АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан.

Козик Елена Станиславовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Материаловедение и технология материалов», Аэрокосмический институт, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия. E-mail: ele57670823@yandex.ru

Комкова Дарья Аркадьевна – аспирант, ведущий инженер, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913

Леонова Любовь Владимировна – канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: lvleonova@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-7713-8994

Лехов Олег Степанович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Инжиниринг и профессиональное обучение в машиностроении и металлургии», Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Химия», Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: medyanikmagnitka@mail.ru

Мельничук Евгений Александрович – соискатель кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: melnichuk.EA@mmk.ru

Миндибаев Максим Ринатович – бакалавр кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: max.mindibaevv@gmail.com

Михалев Александр Викторович – ст. преп. кафедры «Инжиниринг и профессиональное обучение в машиностроении и металлургии», Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия.

Найгерт Катарина Валерьевна – канд. техн. наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия. E-mail: kathy_naigert@mail.ru. ORCID 0000-0002-8779-9729

Пермяков Глеб Львович – мл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории «Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Полякова Марина Андреевна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологии обработки материалов», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Протасьев Виктор Борисович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Инструментальные и метрологические системы», Тульский государственный университет, Тула, Россия. ORCID 0000-0002-3157-3755

Свиденко Екатерина Валерьевна – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Материаловедение и технологии материалов», Аэрокосмический институт, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия. E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Семушкина Лариса Валерьевна – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории флотореагентов и обогащения, АО «Институт металлургии и обогащения», Satbayev University, Алматы, Казахстан. E-mail: syomushkina.lara@mail.ru

Точилкин Василий Викторович – аспирант кафедры «Литейные процессы и материаловедение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: tochilkin.vas@mail.ru. ORCID 0000-0002-7562-8519

Точилкин Виктор Васильевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования», Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: toch56@mail.ru. ORCID 0000-0002-4613-3867

Трушников Дмитрий Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия. E-mail: trdimitr@yandex.ru

Тусупбаев Несипбай Куандыкович – д-р техн. наук, зав. лабораторией флотореагентов и обогащения АО «Институт металлургии и обогащения», Satbayev University, Алматы, Казахстан. E-mail: nesipbay@mail.ru

Целищев Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Прикладная гидромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: pgl.ugatu@mail.ru

Червяков Леонид Михайлович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Стандартизация, метрология, управление качеством, технология и дизайн», Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия. ORCID 0000-0002-2310-8992

Шевелев Максим Михайлович – начальник лаборатории неразрушающего контроля, ЗАО «Центр тепловизионной диагностики», Россия, Екатеринбург

Ширяева Елена Николаевна – магистр, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: e.shyraeva@mail.ru. ORCID 0000-0002-4505-3873

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

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.