ISSN 1995-2732 (Print)
ISSN 2412-9003 (Online)

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2018. Т.16, №2

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

Издается с марта 2003 года

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

Главный редактор: М.В. Чукин (Россия)

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

Зам. главного редактора:
С.Е. Гавришев (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), В.Р. Храмшин (Россия)

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

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

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

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

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:
код html: <a href=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,
пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: http://www.vestnik.magtu.ru
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Выход в свет 25.06.2018. Заказ 238. Тираж 500 экз. Цена свободная.

ISSN 1995-2732 (Print)
ISSN 2412-9003 (Online)

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2018. Vol. 16, no. 2

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

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

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

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

Deputy Editor-in-Chief:
S.E. Gavrishev (Russia), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia)

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

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

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

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.
Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)
16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

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

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.
Publication date: 25.06.2018. Order 238. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых **4**

Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А.
Целесообразность подземной отработки малых кварцевых жил 4

Хоменко О.Е., Ляшенко В.И.
Повышение геомеханической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений 14

Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов **22**

Молмакова М.С., Кожонов А.К.
Способ получения меди из хвостов флотации золотомедной руды 22

Материаловедение и термическая обработка металлов **29**

Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Гущина М.С., Стеканов П.А.
Исследование влияния многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры криогенной конструкционной стали 29

Норова М.Т., Вазиров Н.Ш., Ганиев И.Н.
Влияние церия, празеодима и неодима на электрохимические характеристики алюминиевого сплава АМг6 в нейтральной среде NaCl 41

Новые технологические процессы и оборудование **48**

Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х.
Исследование напряженного состояния системы бойки-полоса при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации 48

Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы **54**

Большанин Г.А.
Экспериментальное определение коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами 54

Сведения об авторах **63**

CONTENTS

Mineral Mining **4**

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A.
Economic feasibility of underground development of small quartz veins 4

Khomenko O.E., Lyashenko V.I.
Improved geomechanical safety in the underground mining of complex structure deposits 14

Processing and Recycling Technology of Technogenic Formations and Wastes **22**

Molmakova M.S., Kozhonov A.K.
Method of extracting copper from flotation tailings of gold and copper ore 22

Materials Science and Heat Treatment of Metals **29**

Poletskov P.P., Denisov S.V., Nikitenko O.A., Gushchina M.S., Stekanov P.A.
Understanding the effect of multi-stage heat treatment on the microstructure of cryogenic structural steel 29

Norova M.T., Vazirov N.Sh., Ganiev I.N.
Effect of cerium, praseodymium and neodymium on the electrochemical properties of the AMg6 aluminium alloy in the NaCL neutral medium 41

New Processes and Equipment **48**

Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh.
Understanding the stress state of the movable platen and the strip in the production of steel sheets on a combined contin-uous casting and rolling line 48

Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems **54**

Bolshanin G.A.
Experimental determination of the coefficients of a six-port device with two input and four output pins 54

Information About Authors **63**

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.272 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ МАЛЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А.

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): расширение сырьевой базы кварцевой отрасли возможно за счет вовлечения в отработку малых кварцевых жил с незначительными запасами. Одной из основных проблем при этом является обоснование экономической и экологической целесообразности освоения таких маломасштабных объектов. Решением может служить использование мощностей и инфраструктуры существующих горно-обогатительных производств при наличии транспортной доступности обогатительной фабрики для данного типа руд. При этом первостепенной задачей является обоснование способа отработки жил. При кажущейся очевидности применения открытого способа – небольшие глубина залегания (до 100 м) и запасы (до 35 тыс. т) – его преимущества могут быть нивелированы относительно большим объемом вскрыши, необходимостью изъятия из лесного оборота соответствующих площадей под размещение отвалов вскрышных пород, следовательно, значительным снижением экономической и экологической эффективности. В данной работе на примере жилы №193 Кузнечихинского месторождения гранулированного кварца комплексно рассматривается вопрос об эффективности и целесообразности отработки запасов малого месторождения ценного сырья подземным способом. **Цель работы** – разработка технических решений и установление экономической целесообразности освоения малых кварцевых жил. **Используемые методы:** проведение аналитических и экспериментальных исследований, технико-экономическая оценка технических решений. **Результат:** сравнение с открытым способом разработки показывает экономическое и экологическое преимущество подземного способа. Разработанная подземная геотехнология обеспечивает экономическую целесообразность освоения жилы №193 Кузнечихинского месторождения при организации обособленного участка в составе действующего Кыштымского ГОКа. Эффективность отработки запасов достигается за счет рационального способа и схемы вскрытия, применения комплекса самоходного оборудования на подготовительных и очистных работах, системы разработки с открытым очистным пространством и площадным выпуском руды, способа массовой отбойки рассредоточенными скважинными зарядами и транспортирования жильной массы на поверхность погрузо-доствочными машинами (ПДМ). Обеспечивается минимизация вредных экологических последствий путем отказа от открытого способа разработки за счет резкого сокращения земельного отвода, сохранения лесного покрова территории, утилизации пустых пород от проходки в выработанном пространстве камер, использования хвостохранилища действующей обогатительной фабрики. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при обосновании стратегии развития сырьевой базы высокоценного кварца, изыскании и проектировании подземных рудников, осваивающих маломасштабные месторождения.

Ключевые слова: малое месторождение, гранулированный кварц, способ и схема вскрытия, система разработки, рассредоточенный заряд.

Введение

Кузнечихинское месторождение гранулированного кварца располагается в Челябинской области в 18 км от г. Кыштым. В пределах разведанной части Кузнечихинского месторождения детально изучено 16 жил гранулированного кварца, приуроченных к толще метаморфических пород верхнего протерозоя [14, 15]. Жилы сложены в основном тонко-мелкозернистым гранулированным кварцем. Основные запасы месторождения сосредоточены в самой крупной жиле №193. По данным детальной разведки, они составляли 46 тыс. т при содержании гранулированного кварца 98,7%, т.е. балансовые запасы гранулированного кварца – 45,5 тыс. т. В конце 1980-х гг. верхняя часть жилы была частично отработана открытым способом на глубину до 5 м. В результате было вынуто около 11 тыс. т жильной массы. На настоящий момент расчет-

© Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А., 2018

ные балансовые запасы приняты равными 35 тыс. т. Длина жилы по простиранию 220 м, по падению 65 м. Угол падения 75-83°, на некоторых участках – 60-70°. Мощность жилы 2-5 м. На контакте жила обладает четкими геологическими границами. Вмещающие породы относятся к устойчивым и среднеустойчивым. Основными источниками воды при отработке жилы №193 являются подземные воды водоносного комплекса и атмосферные осадки. В целом инженерно-геологические условия отработки жилы №193 Кузнечихинского месторождения достаточно благоприятны. Район месторождения обладает развитой горнодобывающей промышленностью, в частности функционирует Кыштымский горно-обогатительный комбинат (КГОК) – промышленное предприятие по добыче и обогащению жильного гранулированного кварца, осваивающее подземным способом жилу №175 Кыштымского месторождения [16]. Обогащение добытой руды принято на обогатительных мощностях КГОК.

Организационные, технические и технологические решения

При подземном способе отработки целесообразно организовать на жиле №193 обособленный участок – шахту, входящую в состав Кыштымского подземного рудника. При этом рабочий персонал участка обслуживается в административно-бытовом комбинате рудника и доставляется автобусом.

Годовая производственная мощность участка принята исходя из потребностей КГОКа, равной 5 тыс. т жильной массы, режим работы – односменный. Небольшая производственная мощность участка позволяет рекомендовать сезонную отработку только в летний период (май-сентябрь). Это дает возможность строительства производственных помещений из временных разборных конструкций, а также отказаться от затрат на их отопление в зимнее время. Также не потребуется подогрев воздуха, подаваемого в шахту, в период отрицательных температур.

На промплощадке шахты необходимо строительство следующих объектов:

- вентиляторная главного проветривания;
- компрессорная станция;
- ЛЭП и электроподстанция;
- хозяйственно-бытовое здание;
- инженерные сети и коммуникации.

Капитальные затраты на строительство объектов поверхности шахты составят 32000 тыс. руб.

Добытая жильная масса размещается на рудном складе, где производится первичная рудосортировка с отделением пустой породы и некондиционной мелкой фракции. По опыту Кыштымского подземного рудника, выход годного для обогащения кварцевого сырья составляет около 70%, т.е. годовой объем транспортировки кварца ориентировочно равен 3,5 тыс. т. При принятом количестве рабочих дней (125) суточная производительность составляет 28 т. При транспортировании автосамосвалом КАМАЗ-45141 грузоподъемностью 10 т на промплощадку подземного рудника на расстояние 23 км время одного рейса составит около 2 ч. Перевозка суточного объема добытого кварца обеспечивается работой одного автосамосвала. Этой же машиной обеспечивается и доставка на участок необходимых материалов и оборудования.

Верхняя часть жилы №193 частично отработана открытым способом на глубину до 5 м. Ее доработка подземным способом оценена при использовании самоходной техники на проходческих, очистных работах и транспортировании горной массы.

Освоение подкарьерных запасов целесообразно производить в два этапа: 1-й этап – вскрытие и отработка основных запасов в этаже 385/355 м (90%), 2-й этап – вскрытие и очистная выемка запасов в этаже 355/320 м (10%).

Запасы жилы вскрываются следующими выработками:

- траншея 390/379 м;
- транспортный уклон 379/320 м;
- заезды на гор. 379 м, 355 м, 345 м и 320 м;
- вентиляционно-закладочный штрек гор. 379 м;
- доставочные штреки гор. 355 м, 345 м, 320 м и камерными выработками;
- фланговые вентиляционно-ходовые восстающие (ВХВ) №1 и 2.

Разрезная траншея проходится открытым способом с поверхности (отм. 390 м) до гор. 379 м под углом 10° при помощи экскаватора. Транспортный уклон проходится в лежачем боку месторождения с гор. 379 м до гор. 320 м под углом 10° и служит для транспортирования руды и породы на поверхность, подачи в шахту свежего воздуха, прокладки коммуникаций, водоотлива, доставки к местам работы людей, материалов и оборудования. Транспортирование горной массы из забоя непосредственно на поверхность осуществляется ПДМ типа *Atlas Copco ST* 3.5.

Принципиальная схема вскрытия приведена на **рис. 1**.

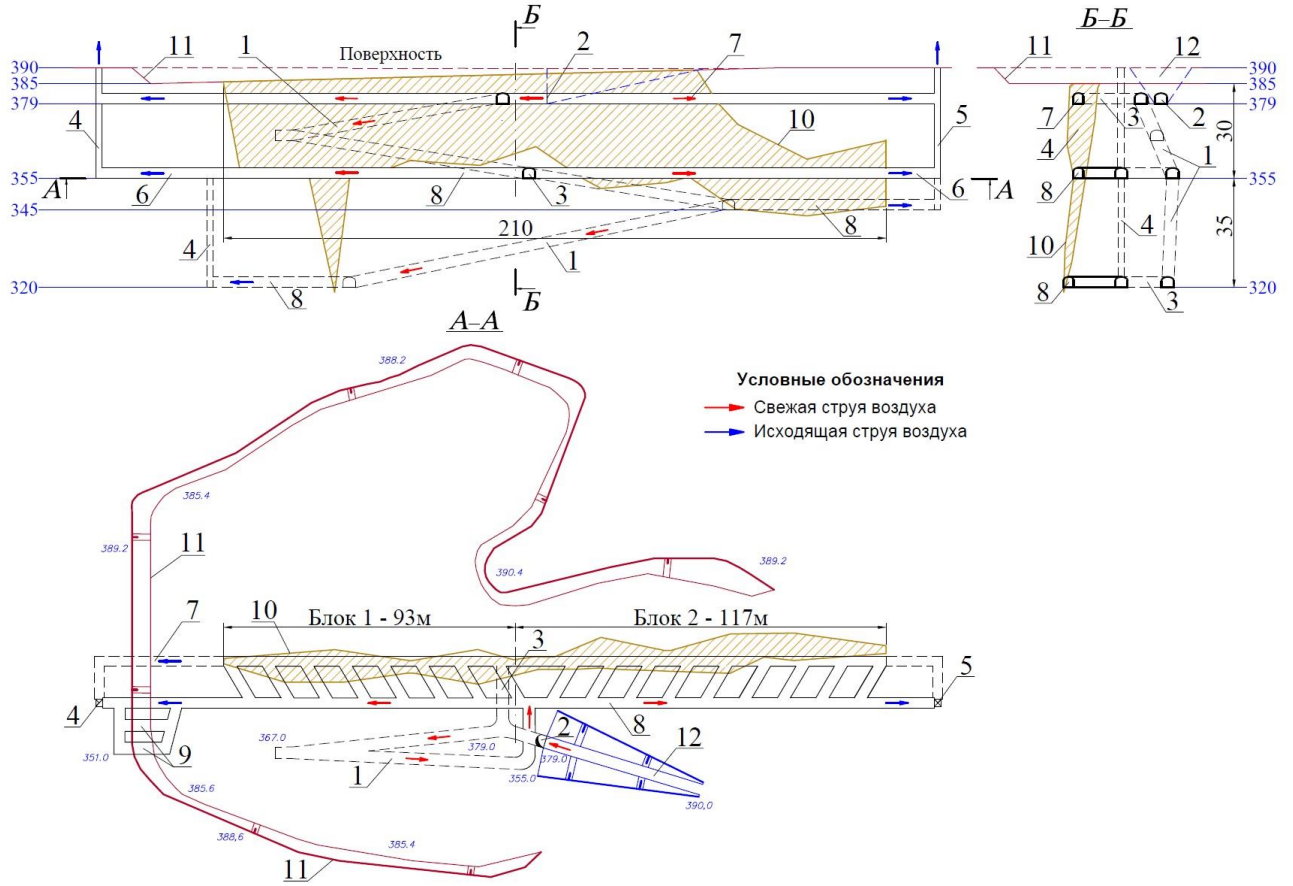


Рис. 1. Схема вскрытия жилы №193:
1 – транспортный уклон; 2 – портал транспортного уклона; 3 – заезд на горизонт; 4, 5 – фланговые ВХВ №1 и 2; 6 – вентиляционная сбойка; 7 – вентиляционно-закладочный штрек; 8 – доставочный штрек; 9 – камерные выработки; 10 – контур рудного тела; 11 – граница карьера; 12 – траншея

Горизонтальные и наклонные выработки проходятся буровзрывным способом. Сечения выработок приняты в соответствии с габаритами размещаемого в них транспортных средств и оборудования. Форма сечения принята с вертикальными стенками и трехцентровым сводом. Крепление вскрывающих выработок производится штангами в сочетании с металлической сеткой и набрызгбетоном толщиной 5 см.

Бурение шпуров проходческого забоя и под анкерное крепление осуществляется буровой установкой типа *Atlas Copco Boomer T1D* коронками диаметром 42 мм. Зарядка шпуров производится гранулированным ВВ типа граммонит 21 ТМЗ зарядчиком ЗМК-1А. Уборку породы из забоя на поверхность, а также доставку материалов и оборудования к местам работы производят ПДМ типа *Atlas Copco ST* 3.5. Проветривание проходческих забоев предусматривается двумя вентиляторами местного проветривания ВМ-6М с гибкими трубопроводами. Фланговые ВХВ проходят с помощью проходческого комплекса типа КПВ-4, оборудованного навесными телескопными перфораторами ПТ-48. Форма сечения – прямоугольная. Восстающие оборудуют лестничными отделениями.

Объем ГКР для проходки вскрывающих выработок составит 6875 м^3. Капитальные затраты на проходку вскрывающих выработок, при средней взвешенной себестоимости проходки выработок 3248 руб./м^3 (горизонтальных и наклонных выработок – 3100 руб./м^3, вертикальных – 4700 руб./м^3, камерных – 3800 руб./м^3), составят 22330 тыс. руб.

Капитальные затраты на технологическое и стационарное оборудование с учетом использования имеющегося оборудования Кыштымского подземного рудника составят 18200 тыс. руб.

Суммарные капитальные затраты строительство шахты – 72530 тыс. руб.

В рассмотренных условиях наиболее рациональным является применение варианта камерной системы разработки с закладкой выработан-

ного пространства пустой породой от проходки и отходами первичной рудосортировки жильной массы с формированием изолирующего подкарьерного целика-потолочины [17] и применением самоходного оборудования.

На 1-м этапе порядок подготовки к выемке запасов в этаже 385/355 м состоит в следующем **(рис. 2)**. В пределах рудного тела в отм. 385 и 355 м выделяют добычной участок длиной, равной длине рудного тела, – 210 м и высотой, равной высоте этажа, – 30 м. Запасы добычного участка в этаже 385/355 м по простиранию рудного тела разбивают на две выемочные единицы – два очистных блока, состоящих из камеры и потолочины. Длина блоков составляет 93 и 117 м, ширина равна мощности рудного тела. Первоначально осуществляют подготовку к выемке запасов блока 1 на северо-востоке, затем блока 2 на юго-западе. Для изоляции подземных выработок от карьерного пространства в кровле камер под дном карьера предусматривается формирование временного целика-потолочины толщиной 3 м, длиной, равной длине камеры, и шириной, равной мощности рудного тела. Из транспортного уклона, пройденного до отм. 355 м и расположенного по центру рудного тела, проходят нижний заезд на гор. 355 м (выпуска и доставки) и верхний заезд на гор. 379 м (вентиляционно-закладочный). Из верхнего заезда к флангам рудного тела проходят вентиляционно-закладочный штрек гор. 379 м, располагаемый ниже дна карьера (отм. 385 м) на 6 м, что позволяет сформировать потолочину толщиной 3 м над камерами. На флангах вентиляционно-закладочный штрек соединяется с ВХВ вентиляционными сбойками. Из нижнего заезда гор. 355 м к флангам рудного тела проходят доставочный штрек, вентиляционные сбойки доставочного штрека с фланговыми ВХВ, траншейный штрек и погрузочные заезды. На флангах рудного тела из вентиляционных сбоек проходят (по породе) ВХВ с выходом на поверхность. В камере блока 1 проходится отрезной восстающий 379/355 м.

Объем ПНР по 1-му этапу составляет 4810 м^3.

Очистная выемка запасов блока, включающего запасы камеры и изолирующей потолочины, осуществляют в две стадии: на 1 стадии вынимают камерные запасы, на второй – запасы изолирующего целика. Отбойка камерных запасов ведется вертикальными слоями (высотой 21 м) восходящих и нисходящих вееров скважин, пробуренных из вентиляционно-закладочного и траншейного штреков соответственно. Выпуск отбитой руды – площадной из погрузочных заездов с помощью ПДМ, транспортирование ее на поверхность до рудного склада также ПДМ (см. **рис. 2**).

Погашение отработанной камеры осуществляют путем закладки выработанного пространства пустой породой и отходами рудосортировки [18]. Закладочный массив формируют из вентиляционно-закладочного штрека с помощью ПДМ. Закладочные работы можно производить в период выемки запасов камеры, но с отставанием на 50 м от очистного забоя для предотвращения разубоживания руды.

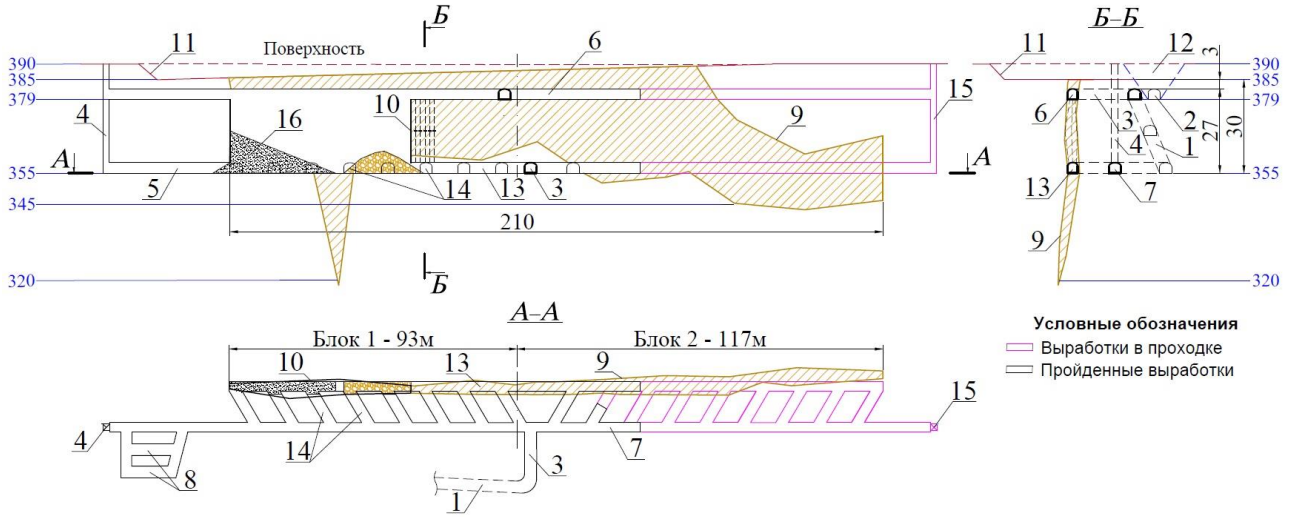


Рис. 2. Система разработки жилы №193:
1 – транспортный уклон; 2 – портал транспортного уклона; 3 – заезд на горизонт; 4, 15 – фланговые ВХВ №1 и 2; 5 – вентиляционная сбойка; 6 – вентиляционно-закладочный штрек; 7 – доставочный штрек; 8 – камерные выработки; 9 – контур рудного тела; 10 – контур выработанного пространства; 11 – граница карьера; 12 – траншея; 13 – буровой штрек; 14 – погрузочные заезды; 16 – закладка

Погашение отработанной камеры осуществляют путем закладки выработанного пространства пустой породой и отходами рудосортировки [18]. Закладочный массив формируют из вентиляционно-закладочного штрека с помощью ПДМ. Закладочные работы можно производить в период выемки запасов камеры, но с отставанием на 50 м от очистного забоя для предотвращения разубоживания руды.

Выемку изолирующего временного целика производят после полной закладки отработанной камеры. Его обуривание производят скважинами из вентиляционно-закладочного штрека в период бурения скважин для отбойки камерных запасов. Заряжание и массовое взрывание целика зарядами гранулированного ВВ осуществляют из вентиляционно-закладочного штрека, погрузку обрушенной на почву закладочного массива руды производят ПДМ открытым способом, транспортировку ее на поверхность – по существующим подземным выработкам [19].

На 2-м этапе порядок подготовки к выемке запасов ниже гор. 355 м состоит в следующем. Выделяют два блока, состоящих из камеры и потолочины. Блок 3 на юго-западе в этаже 355/345 м длиной 50 м и высотой 10 м и блок 4 на северо-востоке в этаже 355/320 м длиной 7 м и высотой 35 м. Из транспортного уклона, пройденного до отм. 320 м, проходят заезд на горизонты 345 и 320 м. На гор. 345 м проходят доставочный штрек, вентиляционную сбойку, фланговый ВХВ 355/345 м, траншейный штрек, погрузочные заезды и отрезной восстающий 355/345 м. На гор. 320 м проходят доставочный штрек, вентиляционную сбойку, фланговый ВХВ 355/320 м, траншейный штрек, погрузочный заезд и отрезной восстающий 355/320 м.

Объем ПНР по 2-му этапу составляет 1707 м^3.

Очистная выемка камер осуществляется аналогично 1-му этапу, запасы потолочины после массового взрывания выпускаются под обрушенными породами на гор. 320 и 345 м.

По данной технологии можно прогнозировать величину потерь 12,5% и разубоживания 12,5%, а количество добытой жильной массы при отработке всех запасов равно 35 тыс. т.

Буровзрывные работы (БВР), по опыту Кыштымского месторождения, следует вести с учетом физико-механических свойств гранулированного кварца (склонность к переизмельчению, значительный коэффициент крепости) [20] и свойств всего массива жилы в целом (блочность, действующие поля напряжений) [21, 22].

Переизмельченный в результате действия взрыва кварц (фракция -20 мм) не пригоден для дальнейшей переработки и получения ОЧК [23]. Проведенные исследования БВР показали, что степень переизмельчения гранулированного кварца при взрывной отбойке прямо пропорциональна мощности взрыва, т.е. удельному расходу взрывчатого вещества (ВВ), и может быть аппроксимирована линейной зависимостью с достаточно высоким коэффициентом детерминации **(рис. 3)** [24].

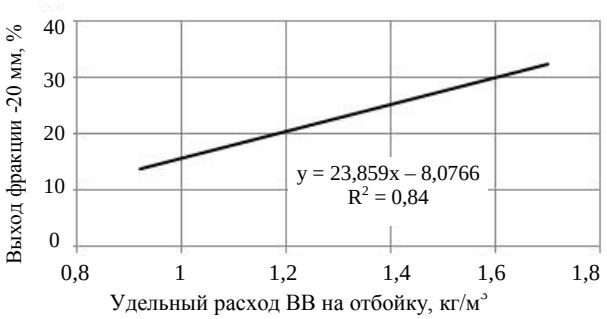


Рис. 3. Зависимость выхода переизмельченной фракции кварца от удельного расхода ВВ

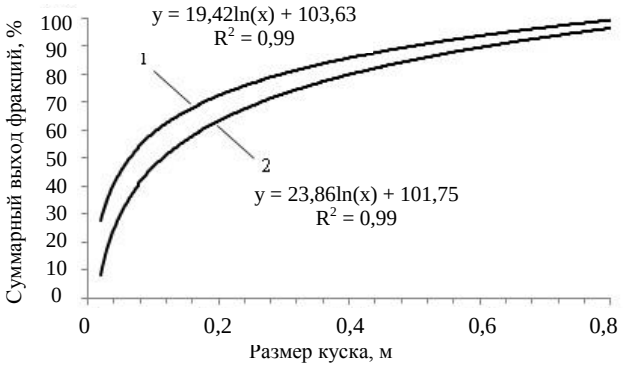
Для повышения качества дробления при отбойке кварца разработан способ массовой отбойки [25], заключающийся в рассредоточении зарядов воздушными промежутками в скважинах уменьшенного диаметра и их мгновенном взрывании. При этом достигается равномерное распределение ВВ по плоскости веера со значительным снижением его удельного расхода на отбойку (порядка 30-40%). Рассредоточение заряда позволяет снизить начальное давление продуктов детонации на единицу поверхности стенок скважины, удлиняя тем самым время воздействия на разрушаемую породу, уменьшая бризантное действие взрыва, связанное с переизмельченим материала в ближней зоне, и способствует более равномерному дроблению породы [26].

Способ был испытан при массовой отбойке веерами скважин диаметром 65 мм на Кыштымском подземном руднике, при этом удельный расход ВВ был снижен с 1,4 до 0,9 кг/м^3 при улучшенном качестве дробления руды. Эффективность способа оценивалась по критерию максимального выхода кондиционного куска руды. Для гранулированного кварца это кусок +65-700 мм на первой стадии грохочения горной массы и +20-65 мм на второй **(рис. 4)**.

Как видно из графика, при сниженном на 35,7% удельном расходе ВВ выход кондиционного куска суммарно повысился на 10,7%, однако уже при первом грохочении повышение составило 33,7% относительно результатов отбойки веером зарядов со сплошной конструкцией.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что предлагаемый способ отбойки отвечает гор-

но-геологическим и горнотехническим условиям отработки жилы, может обеспечить снижение потерь кварца в виде некондиционной фракции и повышение производительности труда на рудосортировке [27].



1 – сплошная конструкция, 2 – рассредоточенная конструкция

Рис. 4. Сравнение качества дробления гранулированного кварца при разных онструкциях зарядов в веерах скважин с одинаковыми параметрамирасположения в массиве

Проветривание горных выработок предусмотрено нагнетательным способом с расположением главной вентиляторной установки у портала транспортного уклона (отм. 379 м). Свежий воздух подается по транспортному уклону на рабочие горизонты и далее – в проходческие забои и добычные блоки (см. **рис. 1**). Загрязненный воздух из рабочих забоев и служебных камер по фланговым ВХВ выдается на поверхность.

Для проветривания подземного рудника, ведущего добычу руды с использованием самоходного дизельного оборудования, определяющим фактором потребного количества воздуха является загрязнение воздуха выхлопными газами. Исходя из того, что на проходке выработок и на очистных работах будет задействована одна ПДМ с двигателем мощностью 138 кВт, потребное количество воздуха можно принять равным 35 м^3/с. Подача необходимого объема воздуха обеспечивается вентилятором *Atlas Copco AVN 140.75.4.8*.

При эксплуатации рудника предусмотрено размещение насосной станции главного водоотлива и водосборников вблизи доставоч-ного штрека гор. 355 м (отм. 351 м). Водо-отливный трубопровод прокладывается по фланговому ВХВ №2 до поверхности (отм. 390 м), где производится слив шахтной воды в водосборный колодец. Для откачки воды в максимальном объеме 70 м^3/час приняты три насоса ЦНС.Г-105/98 (один в работе, один резервный, один в ремонте).

Сравнение с открытым способом разработки

Экономические расчеты базируются на следующих исходных данных. По аналогии с Кыштымским подземным рудником себестоимость добычи подземным способом 1 т жильного кварца принята 2050 руб. [28]. Условная цена реализации жильного кварца равна 7000 руб. за 1 т. Общий доход при отработке жилы №193 составит 171500 тыс. руб., условная прибыль до уплаты налогов – 27220 тыс. руб. Продолжительность строительства до ввода шахты в эксплуатацию – 2,5 года.

Основные технико-экономические показатели отработки жилы №193 подземным способом приведены в **таблице**.

Основные технико-экономические показатели

Показатель	Ед. изм.	Значение
Балансовые запасы для подземной разработки	т	35000
Потери руды	%	12,5
Разубоживание	%	12,5
Эксплуатационные запасы, в т.ч.: - в этаже 385/355 м - в этаже 355/320 м	т т т	35000 31500 3500
Режим работы рудника: - количество рабочих дней в году - количество рабочих смен - продолжительность смены	 день смена ч	 125 1 6
Годовая производительность рудника по руде	т	5000
Явочная численность персонала, в т. ч.: - забойных рабочих - вспомогательных рабочих - ИТР	 чел. чел. чел.	 4 2 1
Производительность труда забойного рабочего на очистной выемке	т/чел.-см	107
Объем ГКР	м^3	6875
Себестоимость проходки 1 м^3 ГКР выработок	руб./м^3	3248
Капитальные затраты , в.т.ч.:		72530
- объекты поверхности	тыс. руб.	32000
- технологическое и стационарное оборудование	тыс. руб.	18200
- ГКР	тыс. руб.	22330
Срок ввода рудника в эксплуатацию	лет	2,5
Продолжительность отработки запасов: - этажа 385/355 м - этажа 355/320 м	 лет лет	 6 1
Удельные эксплуатационные затраты на добычу 1 т жильной массы	руб./т	2050
Валовые эксплуатационные затраты	тыс. руб.	71750
Условная цена реализации жильного кварца	руб.	7000
Выход годного кварцевого сырья	%	70
Условная прибыль до уплаты налогов	тыс. руб.	27220

При оценке открытого способа разработки в качестве аналога приняты стоимостные показатели проекта разработки жилы №2136 Уфимского месторождения кварца:

- глубина карьера – 70 м;
- генеральный угол наклона борта карьера – 30°;
- коэффициент вскрыши – 16,2 м^3/т;
- себестоимость вскрыши –120 руб./м^3;
- себестоимость добычи –105 руб./т.

Капитальные затраты составляют 20,0 млн руб., эксплуатационные – 144 млн руб., условная прибыль до уплаты налогов – 7,5 млн руб.

Кроме этого, следует принять во внимание нарушение земной поверхности и увеличение площади земельного отвода ориентировочно на 15 га [29]. Также значительно возрастает нагрузка на окружающую среду.

Таким образом, сравнение с открытым способом разработки показывает экономическое и экологическое преимущество подземного способа.

Заключение

Предлагаемые организация обособленного участка – шахты, в составе Кыштымского подземного рудника, и подземная геотехнология отработки жилы №193 Кузнечихинского месторождения обеспечивают:

- преимущество перед открытым способом добычи за счет меньших суммарных капитальных и эксплуатационных затрат;
- экономическую эффективность за счет использования производственных мощностей и инфраструктуры действующего горно-обогатительного предприятия, сезонного (летнего) режима работы шахты, временных разборных конструкций для строительства объектов поверхности, рационального способа и схемы вскрытия, самоходного технологического оборудования, системы разработки с изоляцией подземных горных работ, способа массовой отбойки рассредоточенными скважинными зарядами;
- снижение экологической нагрузки по сравнению с открытым способом разработки за счет сокращения земельного отвода и сохранения лесного покрова территории, утилизации пустых пород от проходки в выработанном пространстве камер, использования действующего хвостохранилища.

Работа выполнена по Госзаданию 007-00293-18-00. Тема №0405-2018-0015.

Список литературы

1. Яковлев В.Л. О развитии методологических подходов к исследованию проблем освоения недр // Проблемы недропользования. 2015. №2. С. 5-9.
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. 2013. №2. С.86-90.
3. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. №3. С.4-11.
4. Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Ивашов А.Н. Экономико-математическое моделирование процесса отработки группы месторождений подземным способом // Горный журнал. 2015. №12. С. 37-41.
5. Определение ценности техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, В.Ю. Залядное, И.А. Пыталев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 5-8.
6. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 6. P. 1065–1071.
7. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. №11. С. 52-59.
8. Рославцева Ю.Г., Федорко В.П. Обоснование объемов горно-капитальных работ на карьерах, разрабатывающих малые месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №10. С. 84-88.
9. Сабянин Г.В. Экологические особенности горнопромышленного производства при освоении жильных месторождений // Экология промышленного производства. 2011. №1. С. 11-15.
10. Антонинова Н.Ю., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А. Оценка геоэкологических рисков при возобновлении эксплуатации месторождений // Проблемы недропользования. 2014. №3. С. 197-205.
11. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárik M., Kubečka K. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic // Engineering Geology. 2012. Vol. 147. P. 37-51.
12. Петров И.М. Тенденции и особенности развития мирового и российского рынков обогащаемых видов неметаллического минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. №6. С. 68-71.
13. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. Resources Policy. 2015. Vol. 46. Pp. 6-14.
14. Красильников П.А. Кварцевые жилы Кузнечихинского месторождения гранулированного кварца // Разведка и охрана недр. 1999. №3. С. 11-15.
15. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Götze J.; Möckel R. (Eds.). 2012, XVI, 360 p.
16. Кравец Б.Н., Кузьмин В.Г. О состоянии производства высокочистых кварцевых концентратов на Урале. Про-

блемы и перспективы // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. №4. С. 15-19.
17. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257. Iss. 1. P. 297–309.
18. Рыльникова М.В., Ангелов В.А., Туркин И.С. Обоснование технологической схемы и комплекса оборудования для утилизации текущих хвостов обогащения в выработанном подземном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №9. С. 62-69.
19. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка комбинированных геотехнологий полного цикла комплексного освоения месторождений с формированием систем управления потоками природного и техногенного сырья // Проблемы недропользования. 2014. №3. С. 105-113.
20. . Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №1. С. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9.
21. Калмыков В.Н., Пергамент В.Х., Неугомонов С.С. Расчет параметров отбойки трещиноватых руд скважинными зарядами при системах разработки с твердеющей закладкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №1. С. 22-24.
22. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Resource-saving technology for underground mining of high-value quartz in Kyshtym // Journal of Mining Science. 2015. V. 51. No 6. P. 1191-1202.
23. Минералургия жильного кварца / под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
24. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Отбойка кварца рассредоточенными скважинными зарядами при подземной добыче // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №10. С. 178-185.
25. Пат. 2645048 Российская Федерация, МПК F42D3/04 F42D1/08. Способ массовой отбойки скальных руд / А.А. Смирнов, И.В. Соколов, К.В. Барановский, А.А. Рожков, И.В. Качалов; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИГД УрО РАН. №2017105990; заявл. 21.02.2017; опубл. 15.02.2018.
26. Шевкун Е.Б. Лещинский А.В. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. №5. С. 116-123.
27. Предварительное обогащение кварцевого сырья / В.С. Шемякин, С.В. Скопов, Р.В. Маньковский и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. №8. С. 74-78.
28. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10-17.
29. Методика определения и оптимизации параметров экологически сбалансированной подземной геотехнологии освоения железорудных месторождений / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, Ю.М. Соломеин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. №8. С. 379-390.

Поступила 05.04.18
Принята в печать 07.05.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13

ECONOMIC FEASIBILITY OF UNDERGROUND DEVELOPMENT OF SMALL QUARTZ VEINS

Igor V. Sokolov – DSc (Eng.)
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7841-5319

Aleksey A. Smirnov – PhD (Eng.)
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8949-1525

Yury G. Antipin – PhD (Eng.)
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3564-0310

Kirill V. Baranovsky – PhD (Eng.)
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2572-166X

Igor V. Nikitin – research fellow
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3593-4319

Artem A. Rozhkov – junior research fellow
Institute of Mining at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3007-1099

Abstract
Problem Statement (Relevance): The expansion of the quartz sector is possible due to the development of small quartz veins. One of the main problems that arise in this case is how to justify the development of such small-scale sites from the economical and environmental standpoints. The solution can be the use of the capacities and infrastructure of the existing mining sites provided this type of ores can be delivered to the concentrator plant. At the same time, the priority task is to justify the method of mining to be used for quartz veins. Even that the open-cut method may seem to be the one to be exploited here considering the small depth (up to 100 m) and the amount of reserves (up to 35 thousand tons), the advantages delivered by it can be offset by a relatively large amount of overburden, the need to allocate the corresponding areas of the forest land to accommodate overburden dumps, and, consequently, a significant reduction in economic and environmental efficiency. Using the case study of the vein no. 193 at the Kuznechikhinskoe granular quartz deposit, this paper provides a comprehensive feasibility study of the underground mining of a small deposit containing valuable minerals. **Objectives:** The objectives of this research were to develop some technical solutions and substantiate the feasibility of mining small quartz veins. **Methods Applied:** Analytical and experimental studies and a feasibility study have been carried out. **Findings**: In this application, the underground mining method delivered economic and environmental advantages compared with the open-cut method. The developed underground mining technique ensures feasibility of developing the vein no. 193 at the Kuznechikhinskoe deposit provided a separate site is set up within the existing Kyshtym GOK property. The efficiency of this development is achieved through the use of efficient opening method and scheme, mobile machinery for preparatory and stoping operations, an open stope system with ore drawn through loading drifts, a method of mass breaking by decked charges, and load-haul-dump machinery for rock transportation. Because the open-cut method is not applied, the environmental impact is minimized due to reduced acquisition of land, the preservation of forest lands, the reclamation of waste rock and the use of the tailings pond by the operating concentrator plant. **Practical Relevance:** The obtained results can be useful in substantiating the growth strategy for the high-grade quartz sector, as well as in exploration and design of underground mines to develop small-scale deposits.

Keywords: Small deposit, granular quartz, opening method and opening scheme, mining system, decked charge.

This research was carried out following the Public Statement of Work 007-00293-18-00. Subject no. 0405-2018-0015.

References

1. Yakovlev V.L. On the development of methodological approaches to the study of subsoil development problems. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of subsoil use], 2015, no. 2, pp. 5-9. (In Russ.)
2. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N. Expanding the raw material base of mining enterprises through a complex use of mineral resources. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2013, no. 2, pp. 86-90. (In Russ.)
3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I. How recovery impacts the underground mining performance in the case of ore deposits. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2012, no. 3, pp. 4-11. (In Russ.)
4. Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Ivashov A.N. Economic and mathematical modeling of the processes involved in underground mining of a cluster. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 12, pp. 37-41. (In Russ.)
5. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A. et al. Estimating the value of man-made georesources. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 5-8. (In Russ.)
6. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, iss., 6. pp. 1065–1071.
7. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design principles and selection of mining techniques to ensure sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 52-59. (In Russ.)
8. Roslavtseva Yu.G., Fedorko V.P. Substantiating the scope of open-cast mining operations to develop small-scale deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 10, pp. 84-88. (In Russ.)
9. Sabyanin G.V. Ecological aspects of mining operations when developing vein deposits. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Industrial Ecology], 2011, no. 1, pp. 11-15. (In Russ.)
10. Antoninova N.Yu., Slavikovskaya Yu.O., Shubina L.A. Analysis of geo-ecological risks posed by resumed exploitation of deposits. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], 2014, no. 3, pp. 197-205. (In Russ.)
11. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárik M., Kubečka K. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic. *Engineering Geology*. 2012, vol. 147, pp. 37-51.
12. Petrov I.M. Development trends at the global and Russian markets of enriched nonmetallic minerals. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2010, no. 6, pp. 68-71. (In Russ.)
13. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. Resources Policy. 2015, vol. 46, pp. 6-14.
14. Krasilnikov P.A. Quartz veins of the Kuznechikhinskoe granular quartz deposit. *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and conservation of mineral resources], 1999, no. 3, pp. 11-15. (In Russ.)
15. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Götze J.; Möckel R. (Eds.). 2012, XVI, 360 p.

16. Kravets B.N., Kuzmin V.G. On the state of production of high-purity quartz concentrates in the Urals. Problems and prospects. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2011, no. 4, pp. 15-19. (In Russ.)
17. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition. European Journal of Operational Research. 2017, vol. 257, iss. 1, pp. 297–309.
18. Rylnikova M.V., Angelov V.A., Turkin I.S. Substantiating the process and equipment for disposal of current concentration tailings in the mined-out underground space. *Gornyi informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin], 2014, no. 9, pp. 62-69. (In Russ.)
19. Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Design of combined full-cycle geotechnologies for the development of deposits while setting up flow management systems to control natural and man-made raw materials. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], 2014, no. 3, pp. 105-113. (In Russ.)
20. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. *Fizicheskoe modelirovanie vzryvnoy otboyki vysokocennogo kvarca* [Physical modeling of blasting in high-grade quartz mining]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, no. 1, pp. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9. (In Russ.)
21. Kalmykov V.N., Pergament V.Kh., Neugomonov S.S. Design of deep-hole blasting process to break fractured ores when solid stowing systems are used. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 1, pp. 22-24. (In Russ.)
22. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Resource-saving technology for underground mining of high-value quartz in Kyshtym. Journal of Mining Science. 2015, v. 51, no. 6, pp. 1191-1202.
23. *Mineralurgiya zhil'nogo kvarca* [Minerallurgy of vein quartz]. Ed. by V.G. Kuzmin, B.N. Kravets. Moscow: Nedra, 1990, 294 p. (In Russ.)
24. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. The use of decked charges to break quartz in underground mining. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin], 2017, no. 10, pp. 178-185. (In Russ.)
25. Smirnov A.A., Sokolov I.V., Baranovskiy K.V., Rozhkov A.A., Kachalov I.V. *Sposob massovoy otboyki skal'nyh rud* [Method of mass breaking of rock ores]. Patent RF, no. 2645048, 2018.
26. Shevkun E.B., Leshchinsky A.V. The use of expanded polystyrene for decked charges. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin], 2006, no. 5, pp. 116-123. (In Russ.)
27. Shemyakin V.S., Skopov S.V., Mankovsky R.V., Krasilnikov P.A., Mamonov R.S. Preconcentration of raw quartz. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining Journal], 2016, no. 8, pp. 74-79. (In Russ.)
28. Sokolov I.V., Baranovskiy K.V. How to choose an efficient technology for the underground development of a quartz deposit. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 10-17. (In Russ.)
29. Sokolov I.V., Gobov N.V., Solomein Yu.M., Nikitin I.V. A technique for identifying and optimizing the ecologically balanced underground geotechnology to develop iron ore deposits. *Gornyi informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin], 2016, no. 8, pp. 379-390. (In Russ.)

Received 05/04/18
Accepted 07/05/18

Образец для цитирования

Целесообразность подземной отработки малых кварцевых жил / Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 4–13. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13

For citation

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A. Economic feasibility of underground development of small quartz veins. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 4–13. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-4-13

УДК 622.273: 622.349 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21

ПОВЫШЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Хоменко О.Е.[1], Ляшенко В.И.[2]

[1] Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина
[2] Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии», г. Желтые Воды, Украина

Аннотация
Постановка задачи (актуальность работы): описаны основные научные и практические результаты исследований повышения геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурых месторождений на основе данных *оперативного* контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. На примере сложноструктурых месторождений Украины проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом увязки выемки руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки. **Цель работы**: повышение геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурых месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. **Используемые методы**: применялся усовершенствованный метод шахтных, лабораторных и экспериментальных исследований, математического и физического моделирования, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам. **Новизна**: установлена параболическая зависимость коэффициента напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства (y) от соотношения его длины к ширине (x) вида $y=a\cdot x^2 + bx$ (a и b – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива). **Результат**: приведена классификация напряженного состояния горного массива по степени удароопасности. Так, при $\eta \leq 0{,}2$ участок месторождения относится к неудароопасным. При $0{,}2 < \eta \leq 0{,}3$ устанавливается третья, при $0{,}3 < \eta \leq 0{,}5$ – вторая, а при $\eta > 0{,}5$ – первая категория удароопасности. **Практическая значимость**: получены исходные данные для проектирования подземной разработки сложноструктурых месторождений в зависимости от ориентации максимальных напряжений относительно выработки.

Ключевые слова: сложноструктурые месторождения, подземная разработка, геомеханическая безопасность, горное давление, категории удароопасности.

Введение

Сложноструктурные месторождения обладают рядом общих особенностей генезиса, приуроченного к разломам, сложной морфологией рудных залежей, что позволяет сформулировать рекомендации по прогнозу и предотвращению проявления горного давления различных форм при их разработке. Увеличение глубины отработки, объемов пустот на вышележащих горизонтах существенно изменяют геодинамический режим геологической среды. Поэтому повышение геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурых месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов на стадиях проектирования и разработки – вот те важные, имеющие научное и практическое значение задачи, требующие неотлагательного решения [1-4].

Теория и методы исследования

Авторами выполнены исследования в области повышения безопасности подземной разработки сложноструктурых месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления. Проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом оценки степени устойчивости обнажений, выявления закономерностей их деформирования и разрушения, увязки выемки руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки, способов крепления и соответствующих типов крепи, шахтные, лабораторные и экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирова-

© Хоменко О.Е., Ляшенко В.И., 2018

ние, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам [5].

Обсуждение и оценка полученных результатов

Степень удароопасности участков месторождения определяется интенсивностью динамического проявления горного давления и подразделяется на три категории удароопасности.

Первая. Участок массива представляет опасность по проявлению собственно горных ударов и микроударов.

Вторая. Участок массива представляет опасность по проявлению микроударов, динамического заколообразования и стреляния пород.

Третья. Участок массива не представляет непосредственной опасности по проявлению горных ударов.

К неопасным, кроме естественно неопасных, относятся участки подверженных горным ударам пород (массивов), в которых в результате производства горных работ или специальных профилактических мероприятий возможность проявления горных ударов исключена.

Рассматриваемые сложноструктурные месторождения ГП «ВостГОК» (Украина) отнесены к подверженным горным ударам. На этапе предварительного районирования площадь Ватутинского месторождений разделена на три структурно-обособленные зоны, отличающиеся удароопасным состоянием. **Первая** – участок повышенной удароопасности. **Вторая** – участок возможных проявлений горных ударов. **Третья** – неудароопасный участок. Вскрытием, подготовкой и очистной выемкой подтверждено предположение о локальности проявления динамических форм горного давления, включая первую зону. За период эксплуатации месторождения не произошло ни одного собственно горного удара. Учитывая, что инструментальные методы оценки категории удароопасности требуют много времени и, главное, измерения могут осуществляться только на вскрытых участках массива и поэтому недостаточно оперативны, а внешние отличительные признаки удароопасности определяются нечетко, представляется надежная возможность использования визуальных методов. Динамические формы проявления горного давления от шелушения и интенсивного заколообразования до горно-тектонических ударов по мере нарастания интенсивности и местоположению очага разрушения подразделяются на: шелушение; интенсивное (динамическое) заколообразование; стреляние; микроудар; собственно горный удар; толчок; горно-тектонический удар [6-11].

Районирование шахтных полей по степени удароопасности авторы осуществляли согласно формуле [12]

$$\eta = \frac{K\gamma H + \sigma_{т}}{R_{сж}}, \qquad (1)$$

где η – интенсивность проявления горного давления в зависимости от уровня напряжённого состояния массива; K – коэффициент концентрации напряжений (наведенный очистными работами, вне зоны их влияния равен 1,0, в зонах влияния в зависимости от положения относительно выработанного пространства изменяется от 0,3 в защищенных зонах и до 1,6 в зонах стационарного опорного давления); γ – плотность налегающих пород, т/м^3; H – глубина контролируемого обнажения, м; $R_{сж}$ – прочность пород на одноосное сжатие, т/м^2; $\sigma_{т}$ – интенсивность тектонических напряжений, определяемая непосредственно по местам локальных проявлений горных ударов. При отсутствии этих признаков $\sigma_{т} = 0$.

Исследование максимальной компоненты поля напряжений

Выполняется двумя методами: по уровню напряжённого состояния массива; по данным строгих теоретических решений методом суперпозиций. Ориентация максимальной компоненты по обоим методам принимается по месту проявления горного давления. Согласно данным обследования можно констатировать, что максимальная компонента напряжений ориентирована горизонтально в направлении простирания залежи с отклонениями до 20˚. В ортах области проявлений интенсивностью от шелушения до отслоений по «живому» приурочены к кровле и симметричны относительно вертикальной оси. В выработках по простиранию нарушений кроме оконтуривания по трещинам естественной отдельности и отслоений в стенках (штрек расположен в зоне опорного давления вокруг камеры 464-2с Смолинской шахты ГП «ВостГОК», Украина) обследованием не выявлено. Исследование максимальной компоненты выполнено по выработкам, в которых проявления горного давления обусловлены наибольшим уровнем напряжённого состояния массива $0{,}12 \le \eta < 0{,}2$ и $0{,}2 \le \eta < 0{,}3$ для каждого конкретного случая $\sigma_{max} = \eta R$ (здесь η – интенсивность проявления горного давления в зависимости от уровня напряжённого состояния массива, доли ед.; R– временное сопротивление сжатию, МПа, изменяется от 23 до 250 МПа). Принимая во внимание, что в первую очередь разрушаются более

слабые разности пород, к расчёту приняты меньшие значения их коэффициентов крепости. Связь прочности с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова f выражается зависимостью

$$f = \frac{R_o}{10^5 \cdot 300} + \sqrt{\frac{R_o}{10^5 \cdot 300}}, \qquad (2)$$

откуда $R = 3000(f + 5 - \sqrt{10f + 25})$. (3)

Пример 1. *Исходные данные*. Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова $f = 14$.

Решение. Согласно формуле (3) R = 18464 т/м^2 – орт 34 оси гор. 460 м; при $f = 10$; R = 11458 т/м^2 – орты-заезды 48 – 7,5 м и 48 + 10 м, гор.550 м. Горное давление обусловлено наибольшим уровнем напряжённого состояния массива согласно формуле $\sigma_{max} = \eta R$ по – орту 34 оси гор. 460 м составляет σ_{max} = 0,2 × 18464= 3692т/м^2, а по ортам – заездам 48 – 7,5 м и 48 + 10 м, гор.550 м – 3438 т/м^2.

Таким образом, изменения интенсивности горизонтальной компоненты с увеличением глубины не установлены. Постоянство её подтверждается и тем, что изменения интенсивности проявлений горного давления по глубине в исследуемом интервале также не наблюдается.

Исследование горизонтальной компоненты на устойчивость

В формировании полей напряжений вокруг очистного пространства принимают участие три компоненты: вертикальная $\sigma_{0в} = \gamma H$, продольная $\sigma_{пр}$ и поперечная $\sigma_п$. Максимальная из них согласно закону Гука [9] обуславливает величину бокового распора в перпендикулярном ей направлении и определяемого по формуле

$$\sigma_{пп} = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_{max} \cong \frac{0,25}{1-0,25}\sigma_{max} \cong 0,333\sigma_{max}. \qquad (4)$$

На проектируемых глубинах работ $\sigma_{пр} \approx 3\gamma H$, следовательно, $\sigma_{пп} \approx \gamma H$ коэффициенты концентрации напряжений вокруг выработанных пространств от действия одной компоненты [10]. Поскольку $\sigma_п$ в три раза превосходит γH, их значения утраиваются **(рис.1)**.

Суммарные коэффициенты концентрации, изолинии концентраций σ_{max} и σ_{min}, касательных напряжений τ_{max}, траекторий σ_{max} и σ_{min} при соотношении сторон выемки 1:1, на контуре камер интенсивность напряжений, перпендикулярных обнажению, равна нулю по всему периметру. Относительно σ_{max} горизонтальным участкам соответствуют висячий и лежачий бока. Слева приведены изолинии σ_{max}, справа – σ_{min}. Вертикальные линии представляют стенки камеры. Концентрации нормальных напряжений в лежачем и висячем боках камеры, равные 4,5 МПа по середине обнажения, возрастают в углах до 11,4 МПа, где они работают в условиях объемного сжатия, препятствующего разрушению [11].

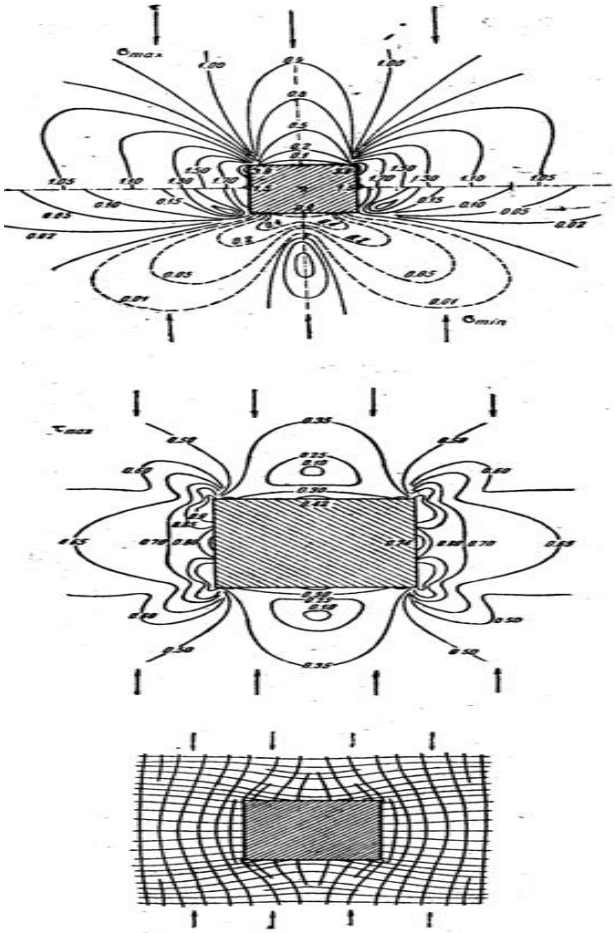


Рис. 1. Распределение главных нормальных, касательных напряжений и траектории нормальных напряжений вокруг очистного пространства от действия продольной компоненты

В стенках камер от действия $\sigma_п$ концентрация напряжений равна –2,7 МПа растяжения. Суммарные концентрации от взаимодействия $\sigma_п$ и $\sigma_{пп}$, имеющих противоположные знаки, меньше, чем при одноосном нагружении, и составляют в стенках –1,2 МПа растяжения, т.е. в 2,25 раза ниже, глубина области растяжений не превышает 0,12 длины стенки в плане. В лежачем и висячем боках концентрации 3,6 МПа. С увеличением длины выработанного пространства до соотношения 3:1. концентрации напряжений в висячем и лежачем боках снижаются до 3,07 МПа

сжатия. По середине стенок суммарные концентрации равны –0,25 МПа – растяжение, переходящее в сжатие к углам. Глубина зоны растягивающих напряжений, способствующих вывалам, сокращается до 0,8–0,9 м и не охватывает более 0,5 её длины. При соотношении длины к ширине выработанного пространства 5:1 концентрации напряжений в лежачем и висячем боках составляют +2,3 МПа сжатия. В стенках +0,1МПа область растягивающих напряжений отсутствует. Дальнейшее увеличение длины выработанного пространства до соотношения длины к ширине, равном 18:1 и более, не меняет тенденции формирования поля напряжений **(рис. 2)**.

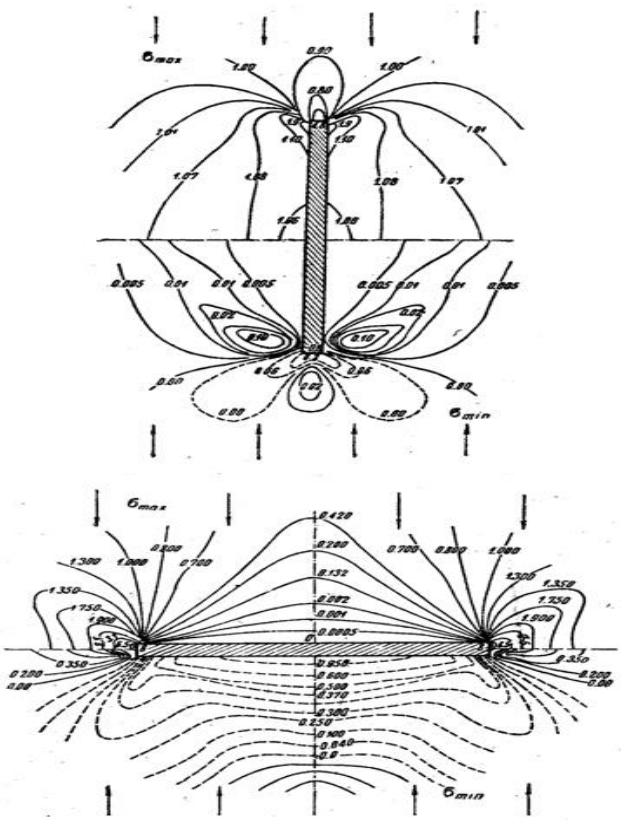


Рис. 2. Распределение нормальных горизонтальных напряжений вокруг очистного пространства от действия продольной и поперечной компонент (соотношение сторон 18:1)

Распределение напряжений в висячем и лежачем боках при соотношениях длины к ширине 18:1 **(см. рис. 2)** составляют 2,18 МПа. В стенках 5,6 МПа. Данные расчеты не учитывают восприятия нормальной компоненты твердеющей закладкой, которая начинает воспринимать нагрузки от поперечной составляющей после развития горных работ по простиранию при соотношении от 5:1 и более [12].

Результаты исследований

Исходя из выполненного опасность может представлять устойчивость стенок камер на флангах горных работ. До соотношения длины к ширине равном 5:1 угрозу могут представлять вывалы в стенках камер в области растягивающих напряжений [13]. С увеличением протяженности выработанного пространства сжимающие напряжения в стенках возрастают по параболической зависимости вида $y=a\cdot x^2 + bx$ (здесь y – коэффициент напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства; x– величина соотношения длины выработанного пространства к его ширине; a и b – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива) при степени корреляции равной 0,99 **(рис. 3)**. Приведенная крепость руд по Смолинской шахте по 22 блокам (коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова составляет f=16,55), что соответствует кубиковой прочности, и согласно формуле (3)

$$R = 3000\,x\,(f + 5 - \sqrt{10f + 25}) = 23243 \text{ т/м}^2.$$

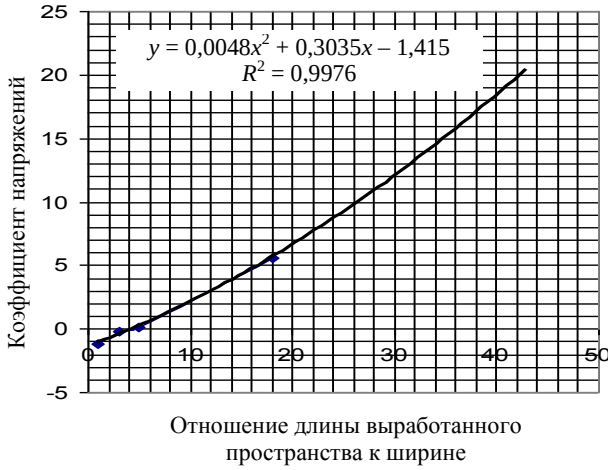


Рис. 3. Зависимость напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства от соотношения его длины к ширине

Пример 2. *Исходные данные*. Коэффициент структурного ослабления принимаем равным 0,35, преобладающая прочность руд в массиве Rм = 8135 т/м^2.

Решение. Согласно формуле $R_м/\gamma H$, допустимый коэффициент концентрации сжимающих напряжений не должен превышать $R_м/\gamma H$ = 8135: (2,6 × 550) = 5,67. Этому значению согласно зависимости соответствует соотношение длины выработанного пространства к ширине, равное 18:1. Это заведомо выше соотношения, при котором закладка начинает воспринимать нагрузки

от бокового давления. По результатам оценки уровня напряжённого состояния массива и механизма проявления горного давления по визуальным признакам авторами разработана классификация напряженного состояния горного массива и в зависимости от ориентации максимальных напряжений относительно выработки, что соответствует требованиям Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых [14] **(см. таблицу)**.

Классификация напряженного состояния горного массива

Место проявления нарушения	Форма и интенсивность нарушения	Ориентация σ_{max}	Уровень напряженного состояния массива **η**	Категория удароопасности
Нарушений нет по всему периметру	Оконтуривание выработки по естественным поверхностям ослабления	Вертикально	$\eta \le 0{,}12$	Неудароопасная
В пятах свода и стенках с обеих сторон	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности	Вертикально	$0{,}12 < \eta \le 0{,}2$	
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0{,}2 < \eta \le 0{,}3$	III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0{,}3 < \eta \le 0{,}5$	II
	Горные удары		$\eta > 0{,}5$	I
Посередине свода	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности	Горизонтально	$0{,}12 < \eta \le 0{,}2$	Неудароопасная
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0{,}2 < \eta \le 0{,}3$	III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0{,}3 < \eta \le 0{,}5$	II
	Горные удары		$\eta > 0{,}5$	I
Смещение очага нарушения от замка свода	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности	По касательной к поверхности нарушения	$0{,}12 < \eta \le 0{,}2$	Неудароопасная
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0{,}2 < \eta \le 0{,}3$	III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0{,}3 < \eta \le 0{,}5$	II
	Горные удары		$\eta > 0{,}5$	I

Таким образом, геодинамическая безопасность разработки сложноструктурных месторождений достигается за счет ведения комплексных методов измерений напряженного состояния массива горных пород и геомеханического мониторинга, который осуществляется посредством звукометрических и маркшейдерских приборов, струнных тензометров, глубинных реперов, оптических приборов, электрических цепей, смонтированных в скважинах на контролируемом участке, визуально и косвенных методов по признакам и критериям водоопасности и удельной минерализации шахтных вод, нашедших применение при подземной разработке, в частности, приповерхностных запасов подречного целика реки Ингул (Украина) Мичуринского сложноструктурного месторождения в интервале глубин от 40–50 до 150–200 м и др. [15, 16].

Выводы

1. **Установлены** интенсивность и механизм проявления горного давления для Мичуринского сложноструктурного месторождения с трещинами блочной отдельности и отсутствием шелушения в вершинах углах. Интенсивность напряженного состояния горного массива составила $\eta < 0{,}12$. На контуре выработки, где местами представлены поверхности разрушения по «живому» с обособлением линзообразных пластин, независимо от сланцеватости и блочности, интенсивнось напряжённого состояния массива – $0{,}2 < \eta < 0{,}3$.

2. **Предложена** классификация напряженного состояния горного массива по степени удароопасности. При $0{,}2 < \eta \leq 0{,}3$ устанавливается третья, при $0{,}3 < \eta \leq 0{,}5$ – вторая, а при $\eta > 0{,}5$ – первая категория удароопасности.

3. **Получена** эмпирическая параболическая зависимость величины коэффициента напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства (y) от соотношения его длины к ширине (x) вида $y=a{\cdot}x2 + bx$ (a и b – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива).

Список литературы

1. Khomenko, O.Ye. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2012. No. 4. P. 44–54.
2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013. Vol. 113. No. 12. P. 913–922.
3. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of high?tensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading, 7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction, Perth, Australia, 2013, 13–15 May, pp. 345–370.
4. Balg C., Roduner A. Geobrugg AG: ground support applications, Int. Ground Support Conf., AGH University, Lungern, Switzerland, 2013, 11–13 September, pp. 311–320.
5. Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч.1. Давление горных пород. 3-е изд. М.; Л.; Новосибирск: ГНТИ, 1933. 127 с.
6. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 532 с.
7. Борисов А.А. Механика горных пород. М.: Недра, 1980. 359 с.
8. Цыгалов М.Н. Подземная разработка с высокой полнотой извлечения руд. М.: Недра, 1985. 272 с.
9. Слепцов М.Н., Азимов Р.Ш., Мосинец В.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов. М.: Недра, 1986. 206 с.
10. Палий В.Д., Смелянский Е.С., Кравченко В.Г. Определение нормативной прочности твердеющей закладки // Горный журнал. 1989. №3. С.25–28.
11. Добыча и переработка урановых руд: монография / под общ. ред. А.П. Чернова. Киев: «Адеф-Украина», 2001. 238 с.
12. Чистяков Е.П. Совершенствование способов поддержания подземных горных выработок шахт Криворожского бассейна // Вісник Криворізького технічного університету. 2006. №13. С. 16–20.
13. Ляшенко В.И., Ткаченко А.А., Чистяков Е.П. Научно-технические основы определения геомеханических характеристик породных массивов при подземной разработке урановых месторождений // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. №1. С. 85–89.
14. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 11 дек. 2013 г. №599. Сер. 03. Вып. 78. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. 276 с.
15. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Маркшейдерский вестник. 2016. №1. С. 35–43.
16. Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. №8. С. 10–18.

Поступила 12.03.18
Принята в печать 16.04.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21

IMPROVED GEOMECHANICAL SAFETY IN THE UNDERGROUND MINING OF COMPLEX STRUCTURE DEPOSITS

Oleg E. Khomenko – DSc (Eng.), Professor
National Technical University «Dnieprovska Politekhnika», Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnieper, Ukraine. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

Vasily I. Lyashenko – PhD (Eng.), Senior researcher
Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Abstract
Problem Statement (Relevance): This paper describes the main scientific and practical results of a study into enhancement of the geodynamic safety in the underground mining of complex structure deposits achieved through the application of stress monitoring and forecasting data on the rock mass with various rock pressure dynamics, as well as through certain preventive measures, including the prevention of rock bumps. Using the example of complex structure deposits of Ukraine, the physical properties of rock were analyzed, as well as some new rock pressure hypotheses, taking into account the outcrop stability analysis, the deformation and failure patterns, the time and space correlation of ore and rock excavation, and the parameter definition in terms of the structural elements of the development systems. **Objectives:** This research aims to increase the geodynamic safety in the underground mining of complex structure deposits through the application of stress monitoring and forecasting data on the rock mass with various rock pressure dynamics, as well as through certain preventive measures, including the prevention of rock bumps. **Methods Applied:** Improved techniques of underground investigations, laboratory and experimental research and mathematical and physical modeling were applied, as well as established and novel methods of theoretical analysis and summarization. **Originality:** The original features of this research include an established parabolic dependence of the stress coefficient in the chamber walls on the sides of the stripped area (y) on the ratio of its length to its width (x): $y = a \cdot x2 + bx$ (where a and b are coefficients that depend on the geomechanical properties of the rock mass). **Findings:** The article gives a classification of the stress state of the rock mass according to its rock-bump hazard degree. Thus, an area with $\eta \leq 0.2$ is considered safe; $0.2 < \eta \leq 0.3$ refers to the third class of rock-bump hazard, $0.3 < \eta \leq 0.5$ – to the second class, and $\eta > 0.5$ – to the first class correspondingly. **Practical Relevance:** This research provided initial data for the design of underground development system applicable to complex structure deposits depending on the orientation of maximum stresses relative to the mine.

Keywords: Complex structure deposits, underground development, geomechanical safety, rock pressure, rock-bump hazard.

References

1. Khomenko O.Ye. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2012, no. 4, pp. 44–54.
2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2013, vol. 113, no. 12, pp. 913–922.
3. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of high?tensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading, 7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction, Perth, Australia, 2013, 13–15 May, pp. 345–370.
4. Balg C., Roduner A. Geobrugg AG: ground support applications, Int. Ground Support Conf., AGH University, Lungern, Switzerland, 2013, 11–13 September, pp. 311–320.
5. Protodyakonov M.M. Davlenie gornykh porod i rudnichnoe kreplenie. Ch.1. Davlenie gornykh porod. 3-e izd. M.-L. [Rock pressure and ground support. Part 1. Rock pressure. 3rd ed. Moscow, Leningrad, Novosibirsk: GNTI, 1933, 127 p. (In Russ.)
6. Muskhelishvili N.I. Nekotorye *osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1966, 532 p. (In Russ.)
7. Borisov A.A. *Mekhanika gornykh porod* [Rocks mechanics]. Moscow: Nedra, 1980, 359 p. (In Russ.)
8. Tsygalov M.N. *Podzemnaya razrabotka s vysokoy polnotoy izvlecheniya rud* [Underground mining with high ore recovery]. Moscow: Nedra, 1985, 272 p. (In Russ.)
9. Sleptsov M.N., Azimov R.Sh., *Mosinets V.N. Podzemnaya razrabotka mestorozhdeniy tsvetnykh i redkikh metallov* [Underground mining of non-ferrous and rare metal deposits]. Moscow: Nedra, 1986, 206 p. (In Russ.)
10. Paliy V.D., Smelyansky E.S., Kravchenko V.G. Identifying the standard strength of the solid stowing. *Gornyi zhurnal* [Mining journal], 1989, no. 3, pp. 25–28. (In Russ.)
11. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud*. Monografiya. Pod obshchey redaktsiey A.P. Chernova [Mining and processing of uranium ores. Monograph. Ed. by A.P. Chernov]. Kiev: Adef-Ukraine, 2001, 238 p.
12. Chistyakov E.P. Improving the ground support techniques at the underground mines of the Krivoy Rog basin. *Вісник Криворізького технічного університету* [Bulletin of the Kryvoy Rog Technical University], 2006, no. 13, pp. 16–20.

13. Lyashenko V.I., Tkachenko A.A., Chistyakov E.P. The scientific and technical basis for determining the geomechanical characteristics of rock masses in the underground mining of uranium deposits. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2006, no. 1, pp. 85–89. (In Russ.)
14. Mining safety: Federal HSE norms and regulations: Ratified by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia no. 599 dated 11 December 2013, Series 03, Issue 78. Moscow: Science and Technology Centre Industrial Safety, 2014. 276 p. (In Russ.)
15. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of the properties and the state of a rock mass in the underground mining of complex structure deposits. *Markshreydersky vestnik* [Surveyor bulletin], 2016, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.)
16. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Geoenergy in the underground mining of ore. Izvestiya vuzov. *Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining journal], 2017, no. 8, pp. 10–18. (In Russ.)

Received 12/03/18
Accepted 16/04/18

Образец для цитирования

Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Повышение геомеханической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 14–21. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21

For citation

Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Improved geomechanical safety in the underground mining of complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 14–21. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 669.334.12:549.332 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-22-28

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МЕДИ ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ ЗОЛОТОМЕДНОЙ РУДЫ

Молмакова М.С.[1], Кожонов А.К.[2]

[1] Институт горного дела и горных технологий им. У.Асаналиева при Кыргызском государственном техническом университете им. И.Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика
[2] ОсОО «Geotechservice Technology», Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация
Постановка задачи (актуальность работы): в статье приведены результаты исследования по выщелачиванию меди из хвостов флотационного обогащения золотомедной руды месторождения Кумбель. Для выбора условий процесса выщелачивания меди изучены зависимости расхода серной кислоты, продолжительности, температуры, соотношения Т:Ж. Для интенсификации процесса сернокислотного выщелачивания предложено использование ферромагнитного порошкообразного катализатора, введение которого способствует снижению кинетики выщелачивания и расхода растворителя. **Цель работы** – определение оптимальных параметров сернокислотного выщелачивания меди из хвостов флотационного обогащения с применением катализатора. **Используемые методы:** ИК-спектроскопический, рентгенофазовый, спектральный, химический (с применением сертифицированных методик) методы анализа. **Новизна:** при сернокислотном выщелачивании использован ферромагнитный катализатор, введение которого способствовало повышению скорости выщелачивания и снижению расхода растворителя. **Результаты:** установлено, что выщелачивание хвостов флотационного обогащения медьсодержащих руд сернокислотными растворами в присутствии ферромагнитного катализатора приводит к повышению уровня извлечения меди. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть полезными для горно-обогатительных предприятий при вовлечении в переработку техногенных отходов с целью повышения сырьевой базы.

Ключевые слова: медь, выщелачивание, серная кислота, температура, пульпа, интенсификация, ферромагнитный катализатор, извлечение.

Введение

В последнее время повышенное внимание во всем мире уделяется разработке эффективных гидрометаллургических методов переработки отходов обогатительных фабрик. Гидрометаллургические технологии обеспечивают низкую себестоимость получения металлов и оказывают значительно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, чем пирометаллургические способы переработки. В условиях снижения качества рудного сырья и повышения экологических требований преимущества гидрометаллургической переработки очевидны [1, 11, 24].

Для всех разновидностей процесса выщелачивания в основу химических реакций растворения металлов положены кислотно-обменные, окислительного бактериального или комбинация кислотного и окислительного с бактериальным методом химического обогащения. В основном применяются методы выщелачивания серной кислотой [4, 5, 10, 27] кучным и подземным выщелачиванием [18].

В настоящее время одним из основных направлений технического прогресса в металлургической промышленности является интенсификация и удешевление технологических процессов, позволяющих увеличить выпуск новой высокорентабельной продукции и повысить ее конкурентоспособность [7, 23, 28].

Методы интенсификации включают физические, химические и механические способы воздействия [18]. Анализируя стадии гидратации и протонирования растворения меди, предложены способы активации процессов выщелачивания: уменьшение pH раствора; увеличение концентрации анионов фонового электролита; увеличение анодной поляризации [19].

Кроме методов прямого выщелачивания, особое внимание уделяется также комбинированным технологиям извлечения меди, где основной акцент ставится на предварительный автогенный обжиг с последующим выщелачиванием раствором серной кислоты [9].

© Молмакова М.С., Кожонов А.К., 2018

В ряду ферромагнитных материалов большое место занимают ферромагнитные жидкости, которые представляют собой не индивидуальные вещества, а коллоидные растворы, в которых ферромагнитные частицы равномерно распределены в жидкой фазе [2].

Ферромагнитные катализаторы используются в виде порошков, реже − в виде растворов (суспензий), а иногда − в виде волокон или пленок. Наиболее распространено применение в качестве катализаторов порошков металлов и сплавов, которые, в свою очередь, осаждают на носитель с развитой поверхностью: цеолиты, силикагель, кремнезем, пемзу, стекло и т.д.

Носитель способствует достижению наименьшего размера осаждаемых частиц и препятствует их спонтанной коалесценции. Однако носитель в катализе может играть весьма важную роль: из-за образования связей с носителем атомы катализатора, непосредственно с ним контактирующие, могут изменять свою электронную структуру. При этом, чем большее число атомов находится в контакте с носителем, тем больше его влияние на каталитическую активность. Поэтому для крупных частиц роль носителя сравнительно мала, однако по мере уменьшения размера материала она увеличивается и становится достаточно заметной.

Ферромагнитная жидкость представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из дисперсионной среды, магнитной фазы и стабилизатора. В качестве дисперсионной среды может выступать любая жидкая среда: вода, масло, различные растворы. В качестве магнитной составляющей обычно используются наночастицы, обладающие сильными ферромагнитными свойствами. Введение же в жидкость стабилизатора, прочно связывающегося с поверхностью магнитных частиц и препятствующего их агрегации, обеспечивает устойчивость такой жидкости. Ферромагнитные жидкости – это совершенно новый обширный класс магнитных материалов, и их, несомненно, ждет широкий спектр применений в технике и промышленности [16,17, 20–23].

Для интенсификации процесса выщелачивания хвостов флотационного обогащения золотомедной руды предлагается использовать ферромагнитный порошкообразный катализатор, введение которого будет способствовать снижению времени выщелачивания и расхода растворителя.

Проблемы сернокислотного выщелачивания руд и продуктов обогащения изучены учеными: Кефрут Д.Д., Шо Раймонд Уолтер, Тусупбаев Н.К., Шаламов В.М., Давыдова Л.А., Денисов М.Э., Таужнянская З.А., Михайлова С.Ф., Джоунс Д.Л., Дружинина С.И., Набойченко С.С., Chang Chu Vong, Minoz P.B., Miller J.D., Wodswoth M.E., Pang Jinhui, Lui Chunpeng и рассмотрены в работах [3–15, 24–32]. А вопросы по использованию ферромагнитных порошкообразных катализаторов посвящены труды видных отечественных и зарубежных ученых: Иванов В.В., Стороженко П.А., Галкин А.А., Кастюк Б.Г., Эрик Ландре, Подвязкин Ю.А., Шлыгин А.И., Скопин Ю.А., Сокольский Д.В. и рассмотрены в работах [2, 7, 10, 14–17, 20, 21, 28].

Методы экспериментальных исследований

Тесты на выщелачивание проводились на материале хвостов флотационного обогащения руд месторождения «Кумбель».

Эксперименты по выщелачиванию осуществляли в чанах при перемешивании со скоростью 500 об/мин с использованием механической мешалки марки «IKA RW 14 basic» с одновременной подачей воздуха. Пульпу после выщелачивания отфильтровывали и полученные рабочие растворы и кеки анализировали на содержание меди (Cu) и железа (Fe).

Тесты выщелачивания проводили при комнатной температуре, плотность пульпы приняли 50%, тонина помола 92% класса –0,074 мм. Содержание меди и железа определяли спектрометрическим способом.

Влияние концентрации кислоты на показатели выщелачивания меди изучали при концентрациях серной кислоты 5, 15, 25, 50, 100 г/л. Время выщелачивания – 4 ч.

Влияние продолжительности выщелачивания изучали при концентрации серной кислоты 50 г/л, плотности пульпы 50%, при тонине помола 92% класса –0,074 мм. Выщелачивание проводили от 1 до 4 ч.

Влияние температуры на степень выщелачивания меди изучали в интервале температур от 20 до 50°С при плотности пульпы 50%, концентрации серной кислоты 50 г/л, при тонине помола 92% класса –0,074 мм.

Изучение зависимости извлечения меди от разжижения пульпы проводили при плотностях пульпы: 25; 30; 40 и 50%. Концентрация серной кислоты 50 г/л при тонине помола 92% класса –0,074 мм, продолжительность выщелачивания – 8 ч.

В целях сокращения продолжительности выщелачивания проведены тесты выщелачивания с добавлением ферромагнитного катализатора. Опыты проводились при следующих условиях:

- расход серной кислоты от 3,5 до 12,53 кг/тн;
- продолжительность выщелачивания от 2 до 5 ч;
- тонина помола и концентрация серной кислоты приняты константой (98% класса –0,074 мм и 50 г/л соответственно);
- первые два опыта проведены без катализатора, последующие – в присутствии катализатора с расходом от 10 до 13 г/т.

В качестве катализатора процесса сернокислотного выщелачивания применен ферромагнетит Fe_3O_4, содержащий кварц- a-SiO_2-1087, 799, 779, 515, 460, 391, 376 см$^{-1}$, магнетит $FeFe_2O_4$ – 565, 391 см$^{-1}$. Присутствует микроклин $K[AlSi_3O_3]$ – 1139, 1087, 1019, 431 см$^{-1}$. Также возможно присутствие минерала лепидокрокит – γ-FeOOH – 1139 п, 1019, 877 п, 565, 460, 367 см$^{-1}$. В спектре наблюдаются полосы поглощения валентных ν (OH) – 3362 см$^{-1}$ и деформационных колебаний 5HOH -1644 см$^{-1}$ молекул воды. Спектры получены на ИК-Фурье спектрометре «Avatar 370Csl» в спектральном диапазоне 4000-300 см$^{-1}$ от препаратов в виде суспензии с вазелиновым маслом в окнах KRS-5. Приставка для эксперимента Transmission E.S.P.

При исследованиях создавались одинаковые экспериментальные условия наблюдения и измерения всех образцов.

Результаты

Результаты химического анализа хвостов флотационного обогащения руд месторождения «Кумбель» приведены в **табл. 1.**

Результаты сернокислотного выщелачивания хвостов обогащения приведены в **табл. 2**, а график зависимости уровня извлечения и расхода серной кислоты от продолжительности выщелачивания на **рис. 1.**

Таблица 1

Результаты химического анализа хвостов флотационного обогащения

Наименование продукта	Содержание, %				
	Cu	Zn	Pb	Fe	Au, г/т
Хвосты флотации	1,34	0,01	0,005	3,8	0,4

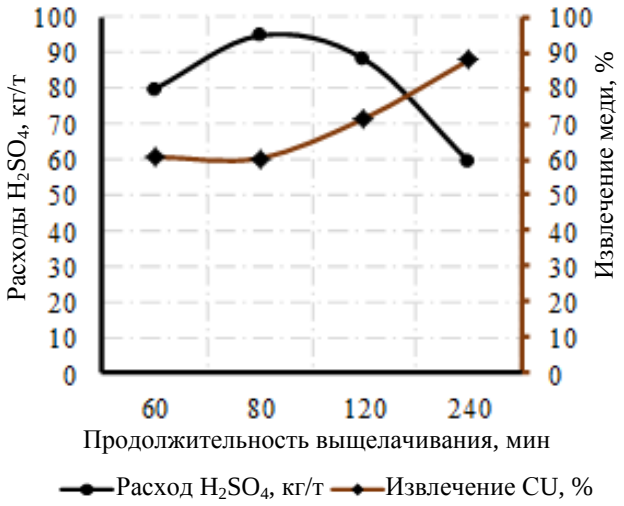


Рис. 1. Влияние продолжительности выщелачивания на уровень извлечения меди и на расход серной кислоты

Таблица 2

Результаты выщелачивания меди из хвостов флотационного обогащения

Тест	Концентрация кислоты, г/л	Время выщелачивания, мин	Тонина помола, % кл. –0,074 мм	Расход H_2SO_4, кг/т	Извлечение Cu, %
B8-1	25	60	80,1	79,7	60,7
B8-2	50	80	80,1	94,7	60,3
B8-3	57,5	240	80,1	102,8	73,8
B8-4	25	120	82,9	72,5	62,4
B8-5	50	120	82,9	66,2	68,7
B8-6	75	240	82,9	91,4	70,9
B8-18	25	60	84,8	78,8	62,2
B8-21	25	120	87,5	88,1	71,5
BR-4	50	240	92	59,3	87,9

Таблица 3

Результаты выщелачивания меди из хвостов флотационного обогащения с применением ферромагнитного катализатора

Условия и результаты	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Тонина флотоконцентрата, кл –74 мкм, %	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0
Продолжительность выщелачивания, мин	120	240	120	180	240	300
Концентрация серной кислоты, г/л	30	50	50	50	50	50
Расход серной кислоты, кг/т	12,53	16,4	5,29	4,37	3,5	3,76
Расход катализатора, г/т	0	0	10	12	13	13
Содержание меди в исходной пробе, %	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Содержание меди в кеке, %	0,328	0,226	0,110	0,105	0,057	0,101

Зависимость извлечения меди от температуры представлена на **рис. 2**. С повышением температуры от 20 до 50°С извлечение меди повышалось незначительно. Результаты зависимости показывают, что с увеличением температуры до 50°С извлечение меди составляет 92,5%.

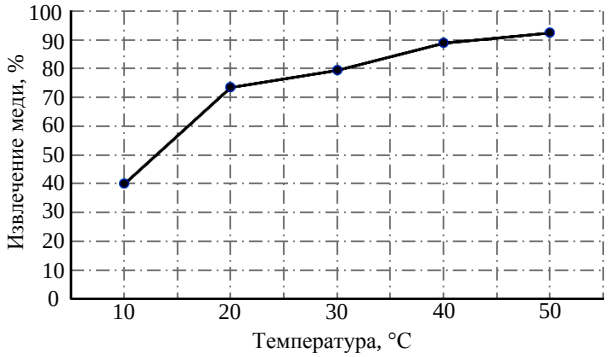


Рис. 2. Зависимость извлечения меди от температуры процесса

Результаты тестов сернокислотного выщелачивания с добавлением ферромагнитного катализатора приведены в **табл. 3**, а график зависимости уровня извлечения от входных параметров процесса сернокислотного выщелачивания в присутствии ферромагнитного катализатора на **рис. 3**.

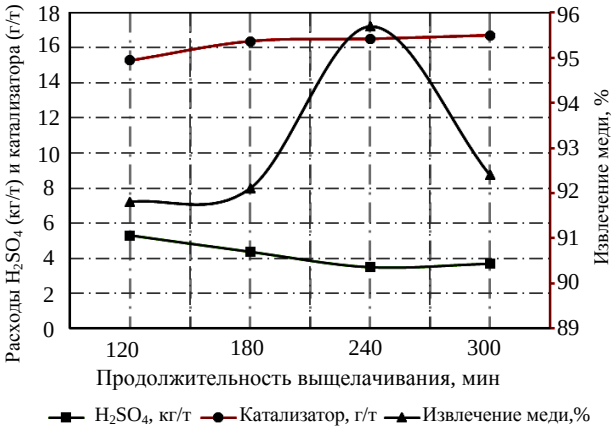


Рис. 3. График зависимости уровня извлечения от входных параметров процесса сернокислотного выщелачивания в присутствии ферромагнитного катализатора

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что определяющее влияние на уровень извлечения оказывают концентрация и расход серной кислоты, время выщелачивания.

По результатам сернокислотного выщелачивания при стандартных режимах установлено:

- расход серной кислоты колеблется от 60 до 102 кг/т, оптимальные показатели извлечения получены при расходе 59,3 кг/т;
- при концентрации серной кислоты 50 г/л извлечение меди достигает 87,9%. При повышении концентрации серной кислоты выше 50 г/л приводит к снижению кривой извлечения;
- интенсивность выщелачивания меди достигает своего пика при 4 ч. Дальнейшее продолжение процесса не приводит к улучшениям;
- при низких температурах извлечение меди повышается незначительно, а при повышении температуры до 50°С извлечение меди достигает 87%.

Влияние ферромагнитного катализатора на процесс выщелачивания меди из хвостов флотационного обогащения происходит при столкновении частиц сульфидных минералов меди с поверхностью катализатора окислителя, который концентрирует вокруг себя кислород, происходит одновременный контакт системы: «Растворенный кислород – частицы медного минерала – катализатор окисления», где протекает окислительно-восстановительная реакция, в результате которой происходит окисление сульфидных медных минералов (халькопирит, ковеллин, халькозин). Окисление в присутствии катализатора сопровождается по следующим реакциям:

$$CuFeS_2+4O_2=CuSO_4+FeSO_4;$$

$$CuS+2O_2=CuSO_4;$$

$$Cu_2S+2O_2=CuSO_4+Cu;$$

$$2Cu+O_2=2CuO;$$

$$CuO+H_2SO_4=CuSO_4+H_2O.$$

По результатам исследований установлено, что при выщелачивании хвостов флотационного обогащения медьсодержащих руд сернокислотными растворами в присутствии ферромагнитного катализатора приводит к повышению уровня извлечения меди до 95,7% при расходе серной кислоты 3,5 кг/т и катализатора 13 г/т. Оптимальное время выщелачивания – 4 ч.

Заключение

Теоретический анализ литературы показывает, что вопросы интенсификации процесса выщелачивания меди рассмотрены достаточно широко. В то же время целый ряд конкретных программ исследований, связанных с применением ферромагнитных катализаторов в различных сочетаниях технологических параметров, остается мало разработанным. К этим вопросам можно, прежде всего, отнести изучение механизма влияния катализаторов на параметры выщелачивания меди при различных температурных режимах, pH среды, концентрации и расхода выщелачивающего реагента с последующим цианидным выщелачиванием золота из кеков сернокислотного выщелачивания. Практиче-

ски отсутствуют исследования по применению ферромагнитных катализаторов при интенсификации выщелачивания меди из техногенных отходов, но детально изучен вопрос ведения процесса сернокислотного выщелачивания с уменьшением pH раствора, повышением концентрации анионов фонового электролита и увеличением анодной поляризации. Отдавая должное тому, что было сделано предшественниками, мы тем не менее считаем, что применение ферромагнитного катализатора в принятой «композиции» исходных данных позволяет получить высокие технологические показатели. В результате применения ферромагнитного катализатора уровень извлечения меди достигает 95,7%, при этом расход серной кислоты снижается с 59,3 до 3,5 кг/т, что позволяет значительно сократить операционные расходы производства.

Дальнейшие исследования с применением катализаторов будут продолжены в направлении изыскания эффективных параметров для гидрометаллургических методов выщелачивания меди и золота из лежалых хвостов обогащения с изменением состава катализаторов с различным сочетанием входных технологических факторов.

Список литературы

1. Авдохин В.М., Абрамов А.А. Окисление сульфидных минералов в процессах обогащения. М.: Недра, 1989.
2. Галкин А.А., Кастюк Б.Г., Кузнецова Н.Н. и др. // Кинетика и катализ. 2001. Т. 42. №2. С. 172–181.
3. Давыдова Л.А., Таужнянская З.А., Михайлова С.Ф. Зарубежный опыт кучного выщелачивания цветных и драгоценных металлов из забалансовых руд // Бюл. Цветная металлургия. 1982. №19. С. 19–25.
4. Технология переработки медной руды Удоканского месторождения с предварительным сернокислотным выщелачиванием / Денисов М.Э., Руднев Б.П., Крылова Л.Н., Кучмина Ю.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал); ОсОО «Горная книга». 2015. С. 100–104.
5. Джоунс Д.Л. / Способ извлечения меди из сернистой медной руды или концентрата: пат. 2137856 РФ, C22B 15/00, 20.12.1994.
6. Изменение вещественного состава забалансовых медно-порфировых руд отвалов Коунрадского рудника в процессе выщелачивания / Дружинина С.И., Шевелева Л.Д., Храменкова Д.П. и др. // Цветные металлы. 1992. №4. С. 14–17.
7. Иванов В.В. Нанопорошки нужны и востребованы современным рынком // Российские нанотехнологии. 2009. Т.4. №1–2. С. 22–26.
8. О скорости растворения и растворимости халькозина / Каражанов Н.А., Макатова И.Н., Бейсембаев Б.Б. и др. // Комплексное использование минерального сырья. 1980. №6. С. 16–21.
9. Каримова Л.М. Комбинированный метод переработки забалансовой медной сульфидной руды // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №2. С. 11–14.
10. Керфут Д.Д. Способ выделения, экстракции и извлечения никеля, кобальта и меди из сульфидного концентрата, стимулируемого хлором, путем окислительного выщелачивания серной кислотой под давлением: пат. 2221881 РФ, C22B 3/08.
11. Киореску А.В. Способы интенсификации процессов выщелачивания воздействием микроволнового излучения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал); ОсОО «Горная книга». 2015. С. 346–350.
12. Перспективы применения комбинированных методов переработки руд цветных металлов / Крушкол О.Б., Павличенко Г.А., Шевелева Л.Д. и др. // Бюл. Цветная металлургия. 1990. №10. С. 36–39.
13. Молмакова М.С., Ногаева К.А., Тусупбаев Н.К. Сернокислотное выщелачивание меди из хвостов гравитационно-флотационного обогащения месторождения Кумбель // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. №28. С. 278.
14. Молмакова М.С., Ногаева К.А., Тусупбаев Н.К. Способ сернокислотного выщелачивания меди: пат. 1637 КР, 30.05.2014.
15. Набойченко С.С., Смирнов В.И. Гидрометаллургия меди. М.: Металлургия, 1974. 272 с.
16. Подвязкин Ю.А., Шлыгин А.И. Изучение поверхностных свойств порошкообразных металлических катализаторов и адсорбентов методом кривых заряжения // Физ. химия, 1957. Т.31. С.1305–1310.
17. Подвязкин Ю.А., Шлыгин А.И. О кривых заряжения порошкообразных катализаторов и адсорбентов // Труды четвертого совещания по электрохимии. М., 1959. С. 125–128.
18. Рыльникова М.В., Емельяненко Е.А., Ангелова Е.И. Перспективы использования физико-химических методов интенсификации процессов выщелачивания меди и цинка на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал); ОсОО «Горная книга». 2012. С. 97–102.
19. Соколов И.В., Горичев И.Г., Кузнецов С.В. Обоснование способов интенсификации выщелачивания медьсодержащего минерального сырья с позиции Модели Лоренца // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2009. №3.
20. Скопин Ю.А., Сокольский Д.В. Электрохимическое измерение поверхности металлических порошков // Вест.АН КазССР. 1956. №6. С. 89–91.
21. Скорчеллетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов. М.: Химия, 1973. 260 с.
22. Сокольский Д.В. Кинетика каталитической гидрогенизации в жидкой фазе // Вопросы химической кинетики, катализа и реакционной способности. М., 1955. С. 588–607.
23. Стороженко П.А. Нанопорошки – технология сегодняшнего дня // Российские нанотехнологии. 2009. Т.4. №1–2. С. 10–15.
24. Фомченко Н.В., Кайнова А.А., Муравьев М.И. Выщелачивание цветных металлов из металлургических шлаков сернокислыми растворами трехвалентного железа, полученными путем биоокисления // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. №1 (15). Т.4. С. 119–123.
25. Хопунов Э.А., Гуляев Н.Д. Геохимические аспекты гидрометаллургии техногенного сырья // Изв. вузов. Горный журнал. Уральское горное обозрение. 1995. №55–60.

26. Цефт А.Л. Гидрометаллургические методы переработки полиметаллического сырья. Алма-Ата: Наука, 1976. 332 с.
27. Шо Раймонд Уолтер. Извлечение меди из халькопирита: заявка 2004116335, C22B 3/04, 29.10.2002.
28. Эрик Ландре. Общие направления развития нанотехнологией до 2020 г. // Российские нанотехнологии. 2007. Т.2. №1–2. С. 8–16.
29. Chang Chu Vong, Lawson F. The kinetics of leaching covellite in acidic oxygenated sulfate-chloride soltions // Hydrometallyrgy. 1991. 27. №3. P. 269–284.
30. Complex sulfide ores: processing options // Miner Proctss. Grossroads: Problem and prospects: Proc. NATO Adv. Study Inst. Falmouth; 24 March 4 Apr. 1986. Dordrecht e.a. 1986. P. 157–194.
31. Minoz P.B., Miller J.D., Wodswoth M.E. Reaction Mechnism for the Acid Ferric Sulfate of Chalcopirite & Metall. Trans. 1979. V. 108. №2. V. 1. P. 149–158.
32. Pang Jinhui, Lui Chunpeng. The kinetics of ferric chloride leaching of sphalerite in the microwave field // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 1992. №1. P. 53–57.

Поступила 05.03.18
Принята в печать 09.04.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-22-28

METHOD OF EXTRACTING COPPER FROM FLOTATION TAILINGS OF GOLD AND COPPER ORE

Mira S. Molmakova – PhD (Eng.), Associate Professor
Asanaliev Institute of Mining and mining technology at the Razzakov Kyrgyz State Technical Univer-sity, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: molmakova_m@mail.ru

Almaz K. Kozhonov – PhD (Eng.), General Director
Geotechservice Technology, Bishkek, Kyrgyz Republic.E-mail kozhonov@mail.ru

Abstract
Problem Statement (Relevance): This article describes the results of a study that looked at copper leaching from the flotation tailings of the gold and copper ore of the Kumbel deposit. Relationships of such parameters as sulfuric acid consumption, duration, temperature, solid-to-liquid ratio, were looked at to identify the best conditions for copper leaching. Use of a ferromagnetic powder catalyst is proposed to intensify the sulfuric acid leaching process. Such catalyst helps reduce the leaching kinetics and the solvent consumption. **Objectives:** The aim of the research is to identify optimal parameters of sulfuric acid leaching of copper from flotation tailings using a catalyst. **Methods Applied:** IR spectroscopic, X-ray phase, spectral, chemical (using certified methods) analyses. **Originality:** For sulfuric acid leaching, a ferromagnetic catalyst was used, which helped increase the leaching rate and reduce the consumption of the solvent. **Findings:** It was found that leaching the flotation tailings of copper-bearing ores by sulfuric acid solutions in the presence of a ferromag-netic catalyst leads to increased copper recovery. **Practical Relevance:** The results of this research can be useful for mining enterprises striving to utilize man-made waste with the purpose of expanding their raw ma-terial base.

Keywords: Copper, leaching, sulfuric acid, temperature, slurry, intensification, ferromagnetic catalyst, recovery.

References

1. Avdokhin V.M., Abramov A.A. *Okislenie sulfidnykh mineralov v protsessakh obogash-cheniya* [Oxidation of sulphide minerals in mineral processing]. Moscow: Nedra, 1989. (In Russ.)
2. Galkin A.A., Kastyuk B.G., Kuznetsova N.N. et al. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and catalysis]. 2001, vol. 42, no. 2, 172–181 p. (In Russ.)
3. Davydova L.A., Tauzhnyanskaya Z.A., Mikhailova S.F. *Foreign practices in heap leaching of non-ferrous and precious metals from off-balance ores. Byull. Tsvetnaya metallurgiya* [Bulletin. Non-ferrous metallurgy], 1982, no. 19, pp. 19–25. (In Russ.)
4. Denisov M.E., Rudnev B.P., Krylova L.N., Kuchmina Yu.S. Processing of copper ore of the Udokan deposit with preliminary sulfuric acid leaching. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining bulletin], Gornaya kniga LLC, 2015, pp.100–104. (In Russ.)
5. Jones D.L. *Sposob izvlecheniya medi iz sernistoy mednoy rudy ili kontsentrata* [The method of extracting copper from sulphurous copper ore or concentrate]. Patent RF, no. 2137856, 1994.
6. Druzhinina S.I., Sheveleva L.D., Khramenkova D.P. et al. Changing composition of the off-balance porphyry copper ores of the Kounrad mine dumps during leaching. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 1992, no. 4, pp. 14–17. (In Russ.)
7. Ivanov V.V. Nanopowders are needed and in demand by the modern market. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2009, vol. 4, no. 1–2, pp. 22–26. (In Russ.)
8. Karazhanov N.A., Makatova I.N., Beisembaev B.B. et al. On the dissolution rate and solubility of chalcocite. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syriya* [Comprehensive use of minerals], 1980, no. 6, pp. 16–21.
9. Karimova L.M. Combined method of processing off-balance copper sulphide ore. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.)
10. Kerfut D.D. A method for separating, extracting and recovering nickel, cobalt and copper from a sulphide concentrate stimulated with chlorine by pressure oxidation leaching with sulfuric acid. Patent RF, no. 2221881, 2001.
11. Kioresku A.V. Ways to intensify leaching processes by applying microwave radiation. *Gornyi informatsionno-*

analiticheskiy byulleten [Mining bulletin], Gornaya kniga LLC, 2015, pp. 346–350. (In Russ.)
12. Krushkol O.B., Pavlichenko G.A., Sheveleva L.D. et al. Prospects of using combined methods for processing of non-ferrous metal ores. *Byull. Tsvetnaya metallurgiya* [Bulletin. Non-ferrous metallurgy], 1990, no. 10, pp. 36–39. (In Russ.)
13. Molmakova M.S., Nogaeva K.A., Tusupbaev N.K. Sulfuric acid leaching of copper from the gravity-flotation tailings of the Kumbel deposit. *Izvestiya KGTU im. I.Razzakov* [Bulletin of Razzakov Kyrgyz State Technical University], no. 28, 2013, p. 278.
14. Molmakova M.S., Nogaeva K.A., Tusupbaev N.K. *Sposob sernokislotnogo vyshchelachivaniya medi* [Method of sulfuric acid leaching of copper]. Patent KR, no. 1637, 2014.
15. Naboychenko S.S., Smirnov V.I. *Gidrometallurgiya medi* [Hydrometallurgy of copper]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 272 p. (In Russ.)
16. Podvyazkin Yu.A., Shlygin A.I. Study of surface properties of powder metal catalysts and adsorbents by charging curve method. *Zh.fiz. khimii* [Journal of physical chemistry], 1957, vol. 31, pp. 1305–1310. (In Russ.)
17. Podvyazkin Yu.A., Shlygin A.I. On the charging curves of powder catalysts and adsorbents. *Trudy chetvertogo soveshchaniya po elektrokhimii* [Proceedings of the fourth meeting on electrochemistry]. Moscow, 1959, pp. 125–128. (In Russ.)
18. Rylnikova M.V., Emelianenko E.A., Angelova E.I. Perspectives on using physical and chemical techniques to intensify copper and zinc leaching processes at mining sites. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining bulletin], Gornaya kniga LLC, 2012, pp. 97–102. (In Russ.)
19. Sokolov I.V., Gorichev I.G., Kuznetsov S.V. Justifying the methods to intensify leaching of copper-bearing minerals in terms of the Lorentz model. *Vestnik RUDN, seriya Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia, series: Engineering Surveys], 2009, no. 3. (In Russ.)
20. Skopin Yu.A., Sokolsky D.V. Electrochemical surface area measurement of metallic powders. *Vest.AN KazSSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], 1956, no. 6, pp. 89–91.
21. Scorcelletti V.V. *Teoreticheskie osnovy korrozii metallov* [Basic theory behind metal corrosion]. Moscow: Khimiya, 1973, 260 p. (In Russ.)
22. Sokolsky D.V. The kinetics of catalytic hydrogenation in the liquid phase. *Voprosy khimicheskoy kinetiki, kataliza i reaktsionnoy sposobnosti* [Problems of chemical kinetics, catalysis and reactivity]. Moscow, 1955, pp. 588–607. (In Russ.)
23. Storozhenko P.A. Nanopowders: the technology of today. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2009, vol. 4, no. 1–2, pp. 10–15. (In Russ.)
24. Fomchenko N.V., Kainova A.A., Muraviev M.I. Leaching of non-ferrous metals from metallurgical slags by ferric acid solutions obtained by biooxidation. *Izvestiya MSTU "MAMI"* [Bulletin of the Moscow State Technical University MAMI], Moscow, no. 1 (15), vol. 4, 2013, pp. 119–123. (In Russ.)
25. Khopunov E.A., Gulyaev N.D. Geochemical aspects of hydrometallurgy of man-made materials. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal. Uralskoe gornoe obozrenie* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal. Ural Mining Review], 1995, no. 55–60. (In Russ.)
26. Tseft A.L. *Gidrometallurgicheskie metody pererabotki polimetallicheskogo syriya* [Hydrometallurgical methods in polymetallic materials processing]. Alma-Ata: Nauka, 1976, 332 p.
27. Shaw Raymond Walter. *Izvlechenie medi iz khalkopirita* [Recovery of copper from chalcopyrite]. Application no. 2004116335, 2002.
28. Eric Landre. Overall development of nanotechnology till 2020. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2007, vol. 2, no. 1–2, pp. 8–16. (In Russ.)
29. Chang Chu Vong, Lawson F. The kinetics of leaching covellite in acidic oxygenated sulfate-chloride soltions. Hydrometallyrgy. 1991. 27, no. 3, pp. 269–284.
30. Complex sulfide ores: processing options. Miner Proctss. Grossroads: Problem and prospects: Proc. NATO Adv. Study Inst. Falmouth; 24 March 4 Apr. 1986. Dordrecht e.a. 1986, pp. 157–194.
31. Minoz P.B., Miller J.D., Wodswoth M.E. Reaction Mechnism for the Acid Ferric Sulfate of Chalco-pirite & Metall. Trans. 1979, v. 108, no. 2, v. 1, pp. 149–158.
32. Pang Jinhui, Lui Chunpeng. The kinetics of ferric chloride leaching of sphalerite in the microwave field. Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 1992, no. 1, pp. 53–57.

Received 05/03/18
Accepted 09/04/18

Образец для цитирования

Молмакова М.С., Кожонов А.К. Способ получения меди из хвостов флотации золотомедной руды // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 22–28. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-22-28

For citation

Molmakova M.S., Kozhonov A.K. Method of extracting copper from flotation tailings of gold and copper ore. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 22–28. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-22-28

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785:621.771.23-022.532 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-29-40

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСТАДИЙНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КРИОГЕННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ*

Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Гущина М.С., Стеканов П.А.

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

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» совместно с ПАО «ММК» при поддержке Минобнауки России, разрабатывается опытно-промышленная технология производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката для импортозамещения материалов, в том числе криогенных, используемых в условиях сверхнизких критических температур, повышенной коррозионной активности, а также в арктических широтах. Гарантией успешного достижения целей выполняемого проекта является использование оборудования, имитирующего реальные процессы производства стали и проката ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ» и центра коллективного пользования научным оборудованием «Научно-исследовательский институт Наносталей», позволяющие осуществлять поиск технологических режимов производства новых хладостойких сталей и листового проката, предназначенных для импортозамещения. **Цель работы:** исследование влияния режимов многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры листового проката криогенной конструкционной стали, обладающей повышенной хладостойкостью. **Используемые методы:** с применением оборудования лабораторного комплекса ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ» проведена выплавка слитков заданного химического состава, которые в последующем подвергались горячей деформации и термической обработке по различным режимам. Комплекс металлографических исследований выполнен с использованием оптического микроскопа Meiji с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO, а также растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM 6490 LV. Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) проводились на приборе синхронного термического анализа STA (Iupiter 449 F3). Твердость определяли на микротвердомере Buchler Mikromet методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° в соответствии с ГОСТ 9450-60. **Результат:** Определены критические точки криогенной стали марки 0Н9А (9% Ni), которые снижены по сравнению с традиционными углеродистыми сталями и составляют: $Ac_1 \approx 624$°С и $Ac_3 \approx 720$°С. Выявлено, что после двойной закалки происходит обогащение аустенита легирующими элементами, что вызывает дополнительное понижение точки Ac_1 на 20°С. Установлено влияние одинарной, двойной закалки и последующего высокого отпуска при температурах 500, 550, 600°С на формирование микроструктуры сплава. После одинарной закалки и последующего отпуска в исследуемом диапазоне температур формируется структура, состоящая из мартенсита отпуска, аустенита остаточного, α – фазы и карбидных частиц, выделяющихся преимущественно по границам зерен, что приводит к охрупчиванию стали. Данный факт подтверждается фрактографическими исследованиями. После двойной закалки и последующего отпуска в указанном диапазоне температур формируется дисперсная пластинчатая дуплексная структура, состоящая из α – фазы, реек «нового» мартенсита, участков со структурой отпущенного мартенсита и остаточного стабильного аустенита с объемной долей около 4%, что позволяет обеспечить сопротивление разрушению при криогенных температурах по вязкому механизму. **Практическая значимость:** выявленные закономерности представляют интерес не только с точки зрения общей картины процесса структурообразования ферритных никелевых сталей, но и в аспекте влияния полученных двухфазных дуплексных структур на особенности механизмов разрушения при криогенных температурах исследуемых сплавов, применяемых для изготовления резервуаров для хранения и транспортировки сжиженного газа. Использование полученных результатов новых научных данных позволит создавать и совершенствовать технологические режимы термической обработки сплавов указанного состава.

Ключевые слова: листовой прокат, криогенная конструкционная сталь, одинарная закалка, двойная закалка, многостадийная термическая обработка, отпуск, хладостойкость, твердость.

* Работа выполнена при участии аспирантов Д.Ю. Алексеева, М.В. Мишукова, М.В. Малькова, А.Н. Шишлоновой, к.т.н. Ю.Ю. Ефимовой, к.т.н. Д.М. Чукина, к.т.н. Д.А. Горленко.

© Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Гущина М.С., Стеканов П.А. , 2018

Введение

Одним из стратегических направлений современной металлургической промышленности является создание перспективных материалов и изделий из них, в частности, работающих в условиях низких и сверхнизких критических температур. В настоящее время основным материалом, применяемым для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих в таких условиях, остается сталь. Криогенными сталями называют сплавы, применяемые в машиностроительной технике для хранения и транспортировки сжиженных природных газов (СПГ) с температурой кипения от –80°С. Учитывая вышесказанное, стали для криогенной техники должны обладать сложным комплексом свойств, определяющих их функциональное назначение – обеспечивать достаточную прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению в условиях сверхнизких критических температур [1-4]. Учитывая специфику технологий изготовления изделий, работающих при низких температурах, такие стали должны обладать также хорошей свариваемостью, необходимой для изготовления герметичной аппаратуры, труб и тонкостенных конструкций. Значимой эксплуатационной характеристикой таких сталей также является высокая коррозионная стойкость [5–7].

На сегодняшний день наиболее распространенными конструкционными материалами для криогенной техники являются хромоникелевые аустенитные стали, легированные никелем и хромом в диапазоне 8–25 и 17–25% соответственно. К основным преимуществам таких сталей относят способность сохранять высокую пластичность и вязкость в широком диапазоне рабочих температур, коррозионную стойкость в сочетании с хорошими технологическими свойствами. К существенным недостаткам сталей этой группы относят сравнительно высокую стоимость, обусловленную высоким содержанием легирующих элементов, а также низкую прочность при комнатной температуре. Также в последние годы для криогенной техники используют аустенитные стали, в которых никель частично или полностью заменяется марганцем. Например, хромоникельмарганцевые стали, содержащие азот, можно также рассматривать как криогенные стали повышенной прочности, так как они имеют значительно более высокие значения предела текучести, чем аустенитные хромоникелевые стали [8–11].

Таким образом, аустенитные криогенные стали делят на три группы **(табл. 1)**:

1. Хромоникелевые аустенитные стали. Благодаря хорошей свариваемости и большим запасам вязкости при сверхнизких критических температурах, а также высокому запасу пластичности, такие стали используют для изготовления крупногабаритных газораспределительных установок большой мощности для получения сжиженных газов, транспортных емкостей и хранилищ сжиженных газов. Однако аустенит этой группы сталей нестабилен и под воздействием пластической деформации может произойти частичное мартенситное превращение.

2. Сложнолегированные аустенитные стали повышенной прочности. Эти стали применяют для изготовления паяных, сварных и не сварных конструкций, работающих при температурах от 400 до –253°С.

3. Аустенитные стали на хромомарганцевой основе. Они позволяют заменить более дорогостоящие хромоникелевые аустенитные стали. При этом важно учитывать, что пластическая деформация хромомарганцевых сталей может вызвать частичное мартенситное превращение, это снижает сопротивление хрупкому разрушению [8–9].

В мировой практике для производства деталей криогенной техники наблюдается применение алюминиевых, аустенитных Cr-Ni, Cr-Ni-Mn, Cr-Mn сталей, а также ферритных сталей, легированных никелем [8–10]. Указанные материалы должны обеспечить отсутствие хрупких разрушений конструкций при криогенной температуре –164°С, характерной для СПГ. Однако с точки зрения низкого содержания дорогостоящих легирующих элементов, а также обеспечения хладостойкости, высокой прочности, удовлетворительной свариваемости и возможности изготовления на российских металлургических предприятиях, наиболее перспективным материалом является сталь, содержащая 9% никеля. Эта сталь представлена в зарубежных стандартах: ASTM A 553, ASTM A 353, EN 10028-4, JIS G3127, ISO 9328-4:2011, а также в аналогичных стандартах и технических условиях отечественных предприятий [13–14]. Высокая хладостойкость указанной ферритной стали достигается за счет формирования в процессе термообработки участков стабильного аустенита с объемной долей около 4%, что позволяет обеспечить сопротивление разрушению при криогенных температурах по вязкому механизму [11, 15–18, 23–24]. Получение большого количества остаточного аустенита возможно при повторной закалке стали из межкритического интервала (МКИ) температур, что наблюдается в работах [11, 15–16, 19–21, 25–29].

Таблица 1

Химический состав и механические свойства аустенитной криогенной стали [12]

Марка стали	Массовая доля элементов в стали, %, не более или в пределах									Термообработка	Механические свойства при комнатной температуре			
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	N		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	KCU
											Н/мм^2		%	Дж/см^2
1. Хромоникелевые аустенитные стали														
12Х18Н10Т	0,12	0,8	2,0	0,02	0,035	17–19	9–11	5хС –0,80	–	ГОСТ 7350-77 Закалка 1000–1080°С в воде или на воздухе (4–50 мм)	235	530	38	215–372
08Х18Н10Т	0,08							5хС –0,70			205	510	43	245
2. Сложнолегированные аустенитные стали повышенной прочности														
07Х21Г7АН5	0,07	0,7	6–7,5	0,03	0,03	19,5–21	5–6	–	0,15–0,25	ГОСТ 5949-75 Закалка 1000–1050°С на воздухе	365	690	40	127
03Х20Н16АГ6	0,025	0,6		0,02	0,025	20–25	15–16,5		0,15–0,28	Закалка 1000°С в воде	410	780	52	220
3. Аустенитные стали на хромомарганцевой основе														
03Х13АГ19	0,03	0,6	19–22	0,025	0,035	12–15	1,0	–	0,05–0,1	ТУ 14-1-2682-79 Закалка 980–1020°С в воде или на воздухе	345	640	40	98 KCU^{-198}
10Х14Г14Н4Т	0,10	0,8	13–15	0,02	0,035	13–15	2,8–4,5	5х(С–0,02)–0,60	–	ГОСТ 7350-77 Закалка 1050–1080°С в воде или на воздухе (4–50 мм)	245	590	40	314 KCU^{-100}

В сталях, содержащих никель или марганец, процесс нагрева в нижнюю часть МКИ сопровождается образованием аустенита, который обогащается помимо углерода и легирующими элементами. За счет варьирования режимами термообработки в двухфазной (α + γ) области малоуглеродистых никелевых сталей возможно не только получать различные типы структур, но и в широких пределах изменять объемные доли фаз. Использование правильно подобранной термообработки на практике позволяет управлять структурой и свойствами сталей для криогенной техники [11, 14, 18–19]. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния режимов многостадийной термической обработки на формирование микроструктуры листового проката криогенной конструкционной стали, обладающей повышенной хладостойкостью.

Материал и методы исследования

В качестве материала для исследования была выбрана криогенная конструкционная сталь марки 0Н9А, химический состав и режимы термической обработки которой представлены в **табл. 2.**

Чтобы оставаться стабильным при температурах до –196°С, аустенит в конструкционных сталях для криогенной техники должен быть обогащен легирующими элементами. Основным легирующим элементом выступает никель, его содержание регламентируется в пределах 8,5–9,5%. Никель позволяет стабилизировать аустенит, полученный в процессе термической обработки. Марганец также повышает устойчивость аустенита, однако он способствует развитию отпускной хрупкости стали, поэтому его количество составляет не более 0,6%. Углерод в конструкционной стали приводит к снижению хладостойкости [8, 10], в связи с этим в никелевых ферритных сталях его содержание ограничивают не более 0,06%. Кремний дополнительно упрочняет сталь, однако может оказывать неблагоприятное влияние как на уровень ударной вязкости основного металла, так и на вязкость зоны термического влияния (ЗТВ) при сварке, поэтому его содержание не превышает 0,37%. Такие примесные элементы, как фосфор и сера приводят к снижению уровня ударной вязкости конструкционных сталей, поэтому их содержание ограничено: фосфор не более 0,010%, сера не более 0,003%.

Таблица 2

Химический состав и режимы термической обработки
образцов ультрахладостойкого листового проката

Содержание химического элемента, %, не более или в диапазоне						Температура термической обработки,°С		
C	Si	Mn	S	P	Ni	Первая закалка (из γ области)	Вторая закалка (из МКИ температур)	Отпуск
0,06	0,17–0,37	0,6	0,003	0,010	8,5–9,5	830	–	–
							–	500
							–	550
							–	600
							670	–
							670	550
							670	600

Особенностью данного исследования является использование оборудования научно-производственного комплекса ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ», имитирующего реальные процессы производства стали и проката:

– вакуумная индукционная печь ZG-0.06L для выплавки стали массой до 60 кг;

– камерная печь ПКМ 3.6.2/12.5 для нагрева заготовок перед обработкой давлением (температура нагрева 1250°С);

– гидравлический пресс П6334 усилием 250 т для имитации процессов горячей черновой прокатки;

– реверсивный стан горячей прокатки 500 «ДУО», совмещенный с установкой контролируемого охлаждения (ламинарная подача, раздельное регулирование, скорость охлаждения 80°С/с), для имитации процессов ускоренного охлаждения после прокатки, а также различных видов термической обработки [20].

Металлографические исследования опытных образцов стали выполнены в ЦКП НИИ «Наносталей» при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (Магнитогорск). Коллектив ЦКП НИИ «Наносталей» имеет успешный опыт выполнения проектов в области разработки перспективных материалов и изделий из них [30–34].

Микроанализ образцов выполнен по стандартной методике. Приготовление микрошлифов осуществлялось с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler.

Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji Techno при увеличениях от 200 до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [22].

При увеличениях более 1000 крат микроструктура исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy.

Микротвердость определяли на твердомере Buchler Mikromet методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° в соответствии с ГОСТ 9450-60 при нагрузке 1 кг и длительности нагружения 10 с.

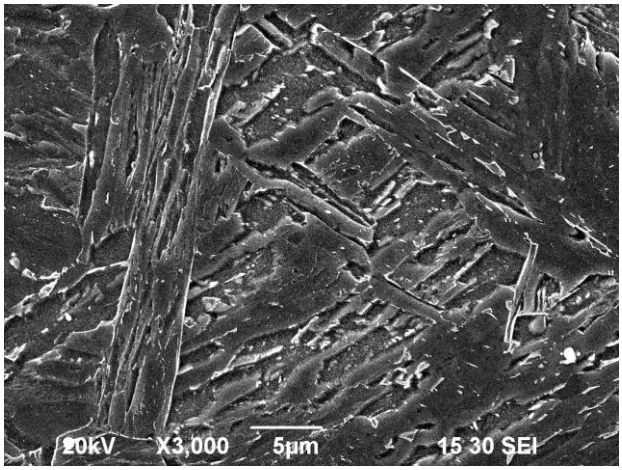
Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) проводились на приборе синхронного термического анализа STA (Iupiter 449 F3) фирмы «NETZSCH» (Германия). Нагрев образца осуществляли до температуры 900°С в среде инертного газа (аргон) при скорости нагрева 20°С/мин в корундовом тигле. Масса образца около 70 мг.

Определение количества остаточного аустенита осуществляли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Материал анода трубки Cr при напряжении 40 кВ и силе тока 30 мА. Угол $2\theta = 66…71°$, скорость съемки 0,1°/мин. Количественная оценка осуществлялась путем соотношения интегральных интенсивностей дифракционных максимумов от системы плоскостей (111) аустенитной ($2\theta = 67{,}1°$) и (110) мартенситной ($2\theta = 68{,}7°$) фазы.

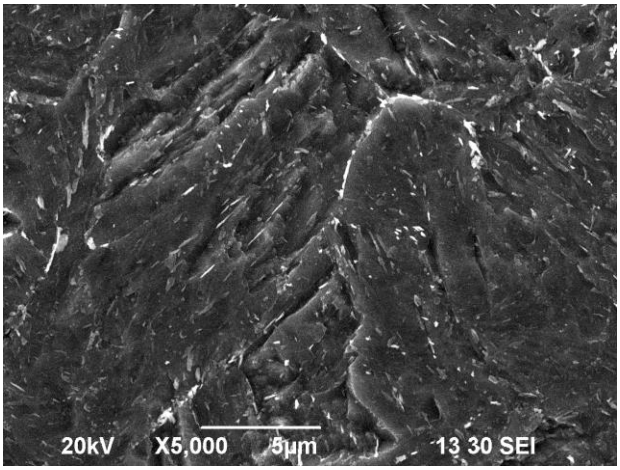
Результаты исследования и их обсуждение

Исследование показало, что после одинарной закалки при нагреве до γ – области и последующего охлаждения в воде формируется структура пакетно-реечного (или так называемого дислокационного) низкоуглеродистого мартенсита **(рис. 1, а)**: параллельные ряды α – кристаллов реек вытянуты в направлении <111>α || <011>γ и сгруппированы в пакеты. Толщина пластин – составляющих пакета – 0,2-2 мкм, длина – 30 мкм. Структура такого мартенсита, как известно, образуется по механизму скольжения. Элементарный объем превращения имеет форму рейки, каждая из которых является результатом гомогенного сдвига. Последовательные сдвиги образуют слои и далее пакет параллельных реек [23]. Между собой рейки разделены тонкими прослойками остаточного аустенита толщиной около 10–20 нм. Твердость HV1 образца составляет 3744 МПа. Высокая твердость обусловлена малыми поперечными размерами мартенситных кристаллов и высокой плотностью дислокаций в этой стали после быстрого охлаждения (в воде).

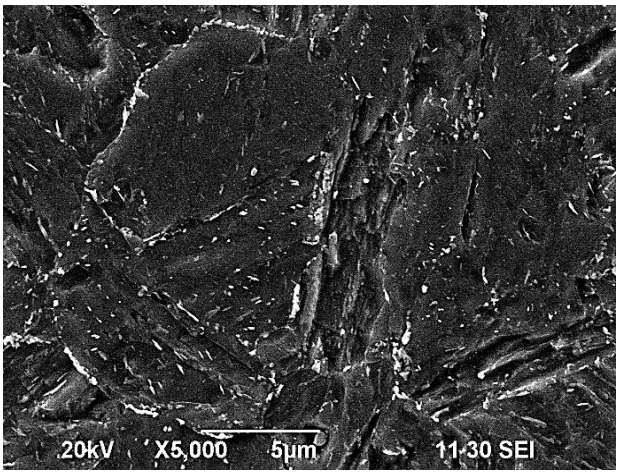
Последующий нагрев закаленной стали приводит к диффузионному распаду закаленной структуры. Микроструктура образца после закалки от 830°С и последующего отпуска 500°С состоит из α-кристаллов и мелких цементитных частиц, которые выделяются как по границам игл α-фазы и первичного зерна аустенита, так и преимущественно внутри зерен **(рис. 1, б)**. Форма кристаллов α-фазы все еще определяется исходной реечной структурой мартенсита. Твердость образца составляет 2972 МПа.



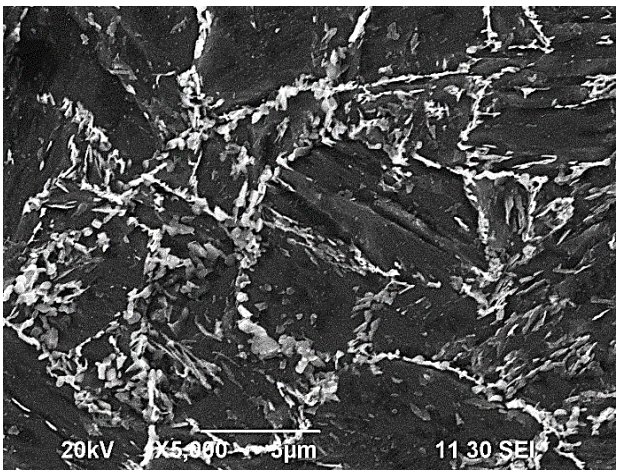
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура образцов после одинарной закалки от 830°С (а) и отпуска при температурах 500°С (б), 550°С (в), 600°С (г)

Микроструктура образца после закалки от 830°С и последующего отпуска 550°С также состоит из кристаллов α-фазы и мелких цементитных частиц, однако выделение частиц по границам зерен происходит более активно в связи с повышением скорости диффузии (см. **рис. 1, в**). Форма кристаллов α-фазы все еще определяется исходной реечной структурой мартенсита, однако признаки ее разрушения становятся более очевидными. Твердость образца составляет 2955 МПа.

Микроструктура образца после закалки от 830°С и последующего отпуска 600°С представлена на **рис. 1, г**. Превращение при этой температуре отпуска так же сопряжено выделением углерода из твердого раствора, образованием и ростом специальных карбидов легирующих элементов. Диффузионная подвижность атомов при этой температуре достаточно велика, образование карбидов идет быстрее, в большем количестве, чем при температуре 550°С, происходит их сфероидизация, сами выделения достигают значительных размеров (до 0,1 мкм).

Однако выделение карбидной фазы протекает преимущественно по границам зерен, где происходит наибольшее обеднение легирующими элементами **(рис. 1, г)**. Реечные кристаллы частично теряют свою форму, но между сохранившимися рейками все-таки присутствует небольшое количество остаточного аустенита. Согласно данным рентгеноструктурного дифрактометра, его количество составляет 1,6%. Твердость образца – 2856 МПа.

Микроструктура после двойной закалки (от 830 и 670°С с охлаждением в воде) представлена на **рис. 2, а**.

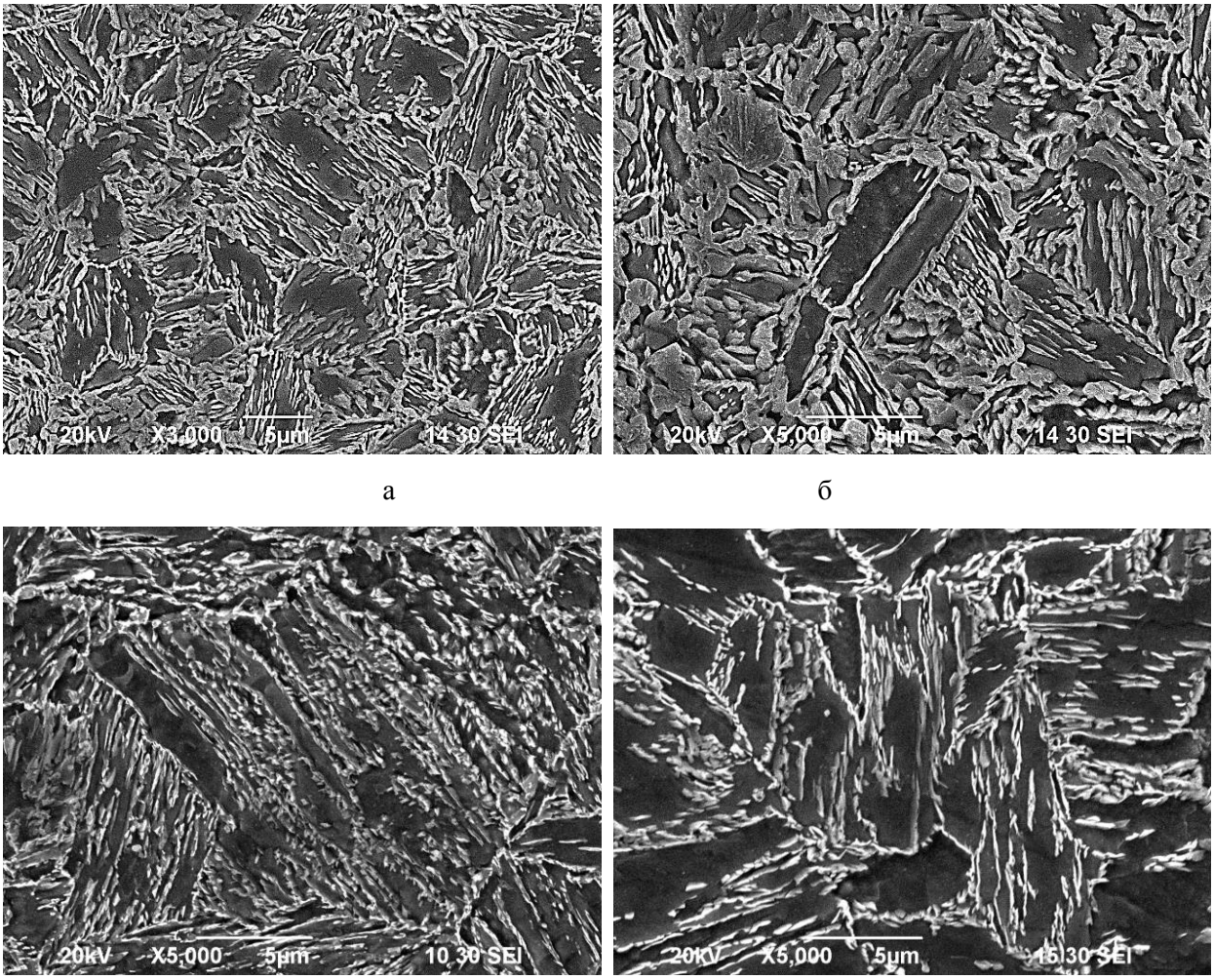


Рис. 2. Микроструктура после двойной закалки от 830 и 670°С (а, б) и последующего отпуска 550°С (в) и 600°С (г)

Температура нагрева под вторую закалку – 670°С находится в межкритическом интервале (МКИ) температур – превышает точку Ac_1 (624°С), но находится ниже Ac_3 (720°С) (**рис. 3**). Поэтому при повторном нагреве наряду с α – фазой, «бывшим» мартенситом, который был в исходном состоянии и претерпел распад при нагреве, присутствует и новый аустенит. При охлаждении этот аустенит превращается в «новую порцию» мартенсита наряду со «старым». Таким образом, структура после двойной закалки от 830 и 670°С состоит из α – фазы и «новой» мартенситной фазы, особенностью которой является наличие карбидных частиц и остаточного аустенита, расположенного по границам мартенситных кристаллов. Присутствие α – фазы после двойной закалки из МКИ объясняет более низкое значение твердости (3319 МПа), чем после одинарной закалки (3744 МПа).

При двойной закалке из МКИ температур аустенит образуется на границах предшествующего аустенитного зерна. Причем нагрев в нижнюю часть МКИ сопровождается образованием аустенита, обогащенного не только углеродом, но и легирующими элементами [16].

При последующем охлаждении этот аустенит превращается в «новый» мартенсит, обогащенный элементами, стабилизирующими аустенит. При этом «новый» мартенсит имеет более низкую точку Ac_1, чем мартенсит от первой закалки. Это подтверждается результатами, полученными с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) (см. **рис. 3**): т. Ac_1 понижается ≈ на 20°С и составляет 604°С, а т. Ac_3 не изменяется.

Таким образом, МКИ температур для исследуемой стали после одинарной закалки составляет ≈ 624–720°С, а после двойной –≈ 604–720°С.

Микроструктура образцов после двойной закалки и последующего отпуска при температуре 550 и 600°С представлена на **рис. 2, в–г**. В процессе отпуска также происходит диффузионный распад мартенсита, но если при 500°С мартенсит сохраняет свое реечное строение (ориентацию), то при 600°С происходит нарушение ориентации. Таким образом, микроструктура после отпуска (550 и 600°С) состоит из α – фазы, реек «нового» мартенсита, участков отпущенного мартенсита и остаточного стабильного аустенита с объемной долей около 4%.

Также были проведены дополнительные фактографические исследования образцов стали при криогенных температурах, которые позволили установить особенности их разрушения **(рис. 4)**.

Поверхность излома после одинарной закалки и последующего отпуска 600°С приведена на **рис. 4, а–б**. Электронно-микроскопическое исследование показало, что в исследуемом образце обнаруживаются преимущественно «речные узоры» или «ручьистое строение» излома (показано стрелками) (см. **рис. 4, б**), являющееся следствием взаимодействия движущейся трещины с дефектами кристалла, а также наличие предпочтительных кристаллографических ориентировок фасеток скола, только лишь в отдельных местах встречаются участки с ямочным строением излома (показано на **рис. 4, б**) Таким образом, наблюдается реализация двух различных механизмов разрушения: хрупкого (или разрушения сколом) и вязкого (происходящего путем зарождения, роста и слияния микропор), но с преобладанием хрупкой составляющей.

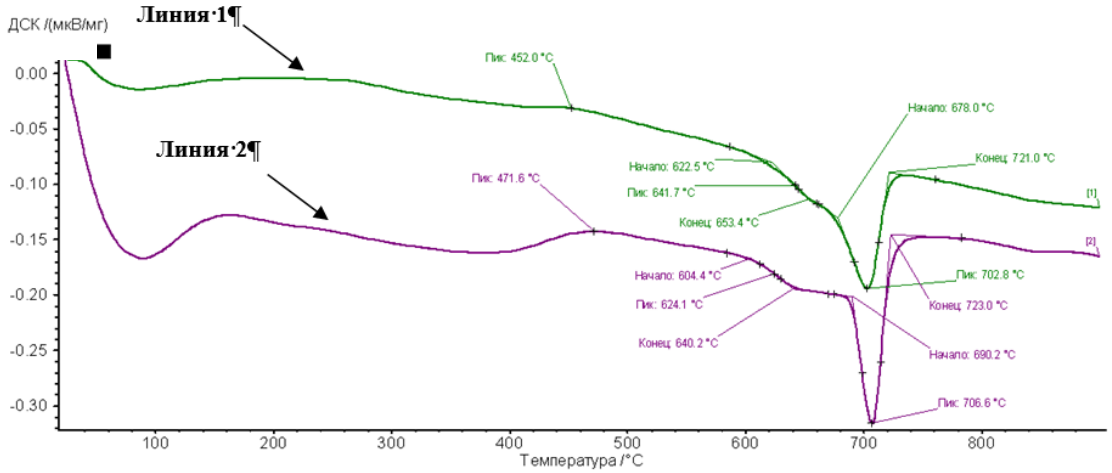
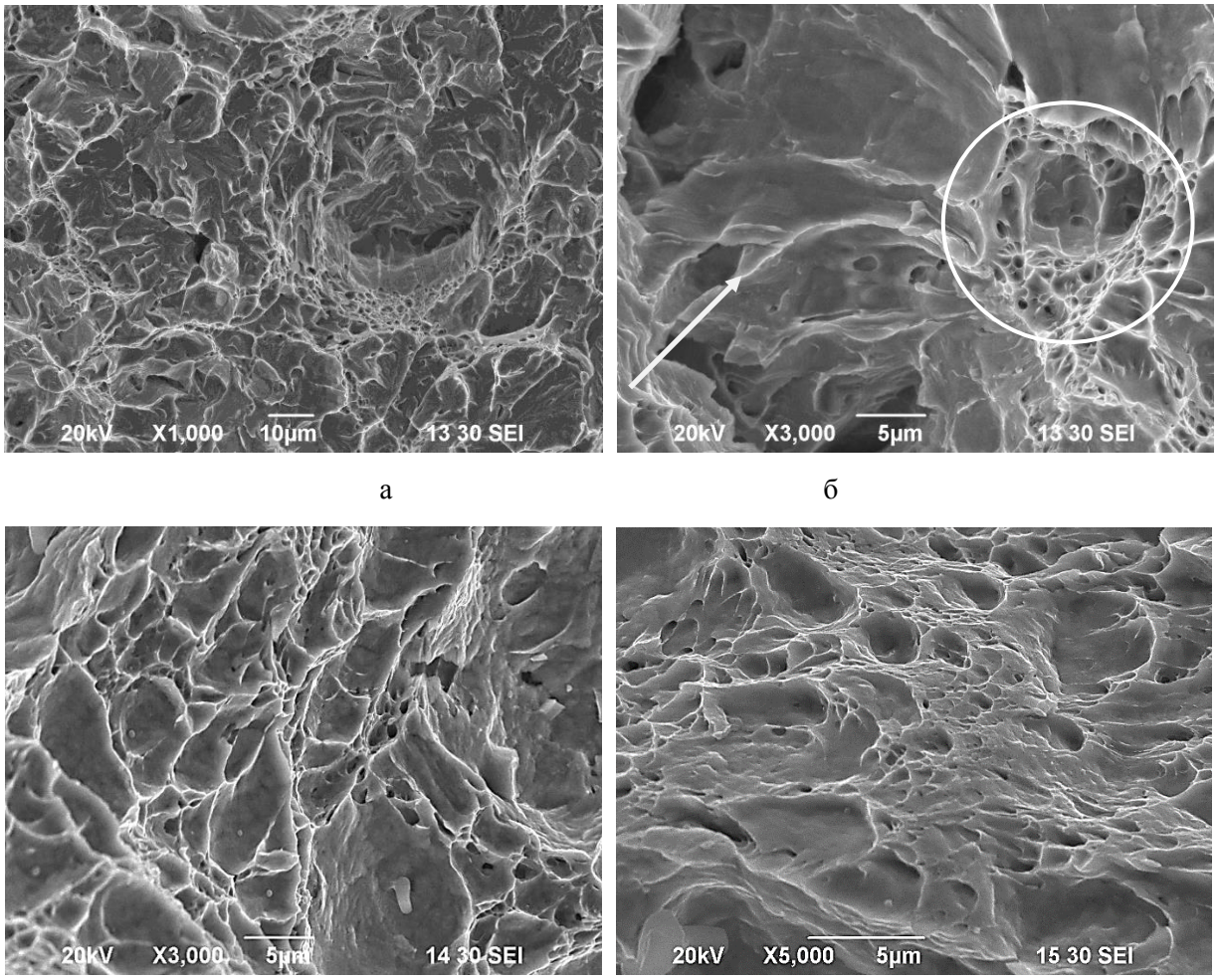


Рис. 3. Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии при нагреве после одинарной закалки (от 830°С, линия 1) и двойной закалки от (830 и 670°С, линия 2)

Поверхность излома после двойной закалки и последующего отпуска 550 и 600°С приведена на **рис. 4**. Электронно-микроскопическое исследование обнаруживает присутствие ямочек, характерное «чашечное» строение излома. Как известно, вязкое разрушение обычно начинается с образованием микротрещин внутри или около частиц второй фазы или частиц неметаллических включений. Из-за слабой когезивной прочности межфазной границы включение-матрица уже на ранней стадии образуются поры, которые растут и на изломе проявляются в виде ямок (см. **рис. 4, в**). Таким образом, данный вид излома можно отнести к вязкому (см. **рис. 4, в–г**).

Результаты измерения количества остаточного аустенита ($A_{ост}$), твердости и размера зерна приведены в **табл. 3.**



а б в г

Рис. 4. Фрактографические исследования образцов после одинарной закалки (от 830°С) и последующего отпуска 600°С (а–б) и после двойной закалки (от 830 и 670°С) и последующего отпуска 550 и 600°С (в–г)

Таблица 3

Сводная таблица результатов исследований

Температура ТО,°С			Количество остаточного аустенита ($A_{ост}$) при –196 ºС, %	Характер разрушения	Твердость, HV_1, МПа	Размер зерна $d_{ср}$, мкм
Первая закалка (из γ области)	Вторая закалка (из МКИ температур)	Отпуск				
830	–	500	1,3	Смешанный (хрупко-вязкий)	2972	11–14
	–	550	1,4		2955	11–12
	–	600	1,6		2856	8,9–11
	670	550	3,6	Вязкий	2875	6,8–9
	670	600	3,8		2826	9

Заключение

Проведенные исследования позволили установить влияние одинарной, двойной закалки и последующего высокого отпуска при температурах 500, 550, 600°С на особенности формирование микроструктуры стали марки 0Н9А (9% Ni). Выявили, что после одинарной закалки и последующего отпуска в исследуемом диапазоне температур формируется структура, состоящая из мартенсита отпуска, аустенита остаточного, α – фазы и карбидных частиц, выделяющихся преимущественно по границам зерен, что приводит к охрупчиванию стали. Данный факт подтверждается фрактографическими исследованиями. После двойной закалки и последующего отпуска в указанном диапазоне температур формируется дисперсная пластинчатая дуплексная структура, состоящая из α – фазы, реек «нового» мартенсита, участков со структурой отпущенного мартенсита и остаточного стабильного аустенита с объемной долей около 4%, что позволяет обеспечить сопротивление разрушению при криогенных температурах по вязкому механизму.

Также были определены критические точки криогенной стали, которые снижены по сравнению с традиционными углеродистыми сталями и составляют: $Ac_1 \approx 624$°С и $Ac_3 \approx 720$°С. Выявлено, что после двойной закалки происходит обогащение аустенита легирующими элементами, что вызывает дополнительное понижение точки Ac_1 на 20°С.

Выявленные закономерности представляют интерес не только с точки зрения анализа общей картины процесса структурообразования ферритных никелевых сталей, но и в аспекте влияния полученных двухфазных дуплексных структур на особенности механизмов разрушения при криогенных температурах исследуемых сплавов, применяемых для изготовления резервуаров для хранения и транспортировки сжиженного газа. Использование полученных результатов новых научных данных позволит создавать и совершенствовать технологические режимы термической обработки сплавов указанного состава.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотех-нологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 03.G25.31.0235).

Список литературы

1. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №2. С. 85–88.
2. Seok Su Sohn, Seokmin Hong, Junghoon Lee Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels. Acta Materialia, 2015, vol. 100, pp. 39–52.
3. Lu Y.Q., Hui H. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. Procedia Engineering, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
4. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур / Е.Н. Каблов, М.П. Лебедев, О.В. Старцев и др. // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата Eurastrencold 2013. Якутск, 2013. С. 5–7.
5. Анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2017. Т. 17. №2. С. 52–60.
6. Crismaru I.V., Dragomir-Stanciu D., Atanasiu M.V. The Behavior of a 1.4301 Stainless Steel Subjected to Cryogenic Temperatures. Procedia Technology, 2015, vol. 19, pp. 247–253.
7. Lu, Y.Q. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. Procedia Engineering, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
8. Разработка перспективных образцов криогенных сталей для газовозов и стационарных танков-хранилищ сжиженного природного газа, предназначенных для использования в условиях Арктики / М.Ю. Матросов, В.Н. Зикеев, П.Г. Мартынов и др. // Арктика: экология и экономика. 2016. №4 (24). С. 80–89.
9. Горынин И.В., Легостаев Ю.Л., Осокин Е.П. Проблемы морской транспортировки сжиженного природного газа: Материалы для танков судов-газовозов // Судостроение. 2009. №5. С. 32–40.
10. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Криогенные комплексы производства и отгрузки СПГ, его приема, хранения и регазификации в системе международной торговли // Технич. газы. 2010. №3. С. 2–19.
11. Smith L., Craig B. Properties of Metallic Materials for LNG Service: Paper 57. Presented at 9th MECC, Bahrain, Febr. 12–14th 2001. http://www.intetech.com/images/ downloads/Paper57.pdf.
12. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
13. ASTM A553/A553M/ Standard Specifi cation for Pressure Vessel Plates? Alloy Steel Quenched and Tempered 7, 8 and 9% Ni // STANDARD by ASTM International. 2014.
14. EN 10028-4. Прокат плоский стальной для работы под давлением. Технические условия. Ч. 4. Никелевая легированная сталь с заданными свойствами при низких температурах.
15. Голованенко С.А., Фонштейн Н.М. Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1984. 206 с.
16. Горынин И.В., Хлусова Е.И. Наноструктурированные стали для освоения месторождений шельфа Северного Ледовитого океана // Вестник РАН. 2010. №12. С. 1069–1075.
17. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей: пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.183 с.

18. Шаров Б.П., Зикеев В.Н., Гладштейн Л.И. Свойства стали 0Н9 для криогенной техники // Сталь. 1988. №3. С. 76–78.
19. Термоциклическая обработка низкоуглеродистых сталей с закалкой из межкритического интервала температур / Коноплева Е.В., Энтие Р.И., Баязитов В.М. и др. // МиТОМ. 1988. №8.
20. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков. М.О. Артамонова и др. // Сталь. 2014. №4. С.104–107.
21. Коган, Матрохина Э.Ф., Энтин Р.И. Влияние аустенизации в межкритическом интервале температур на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей // ФММ. 1981. Т. 52. Вып. 5.
22. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54. №7–8. P. 387–392.
23. Счастливцев В.М., Копцева Н.В., Артемова Т.В. Электронно-микроскопическое исследование структуры мартенсита в малоуглеродистых сплавах железа // Физика металлов и металловедение. 1976. Т. 41. №6. С. 1251–1260.
24. Садовский В.Д., Чупракова Н.П. Влияние термической обработки на количество остаточного аустенита и распад его при отпуске в конструкционных хромоникелевых сталях // Тр. УФ АН СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. Вып. 10. С. 139–151.
25. Калетин А.Ю. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства конструкционных сталей после высокого отпуска: дис. … канд. техн. наук. Свердловск, 1985. 199 с.
26. J.M. Zhang, H.Li, F. Yang, Q. Chi, L.K. Ji, Y.R. Feng. Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Microstructure of a 9% Ni Steel for Large LNG Storage Tanks. Journal of Materials Engineering and Performance, December, 2013, vol. 22(12), pp. 3867–3871.
27. Штратман П., Хорнбоген Э. Механические свойства двухфазных дуплексных и дисперсных структур никелевых сталей // Черные металлы. 1979. №12. С. 35–40.
28. Nippes E.F., Balaguer J.P. A Study of the Weld Heat-Affected Zone Toughness of 9 % Nickel Steel. Welding research supplement. 1986.P. 237–243.
29. Erin Barrick. Fundamental Studies of Phase Transformations and Mechanical Properties in the Heat Affected Zone of 10 wt% Nickel Steel. A Thesis Presented to the Graduate and Research Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Master of Science, 2016, 134 p.
30. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения: монография / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А. и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 276 с.
31. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №1. С. 39–44.
32. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 323 с.
33. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №3. С. 67.
34. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки металлов давлением по комплексному критерию качества // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1986. №12. С. 47.

Поступила 19.03.18
Принята в печать 23.04.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-29-40

UNDERSTANDING THE EFFECT OF MULTI-STAGE HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE OF CRYOGENIC STRUCTURAL STEEL

Pavel P. Poletskov – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

Sergey V. Denisov – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: den-isovservl@yandex.ru

Olga A. Nikitenko – PhD (Eng.), research fellow
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: olganikiten-ko@list.ru

Marina S. Gushchina – postgraduate student
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gush-china.ms@mail.ru

Pavel A. Stekanov – research fellow,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stekgroup@mail.ru

Abstract
Problem Statement (Relevance): Within the framework of a comprehensive project to create a hi-tech production process, which is carried out by the Nosov Magnitogorsk State Technical Uni-versity in cooperation with the Magnitogorsk Iron and Steel Works and funded by the Russian Min-istry of Education and Science, work is being carried out to develop a prototype process to produce ultra cold-resistant nanostructured steel sheets that could substitute the imported materials, includ-ing cryogenic materials designed for application in

critically low temperatures, highly aggressive environments and in the Arctic. The use of special simulation equipment, the property of the Ther-modeform-NMSTU research centre and the Institute of Nanosteel, secures successful implementa-tion of the project. With the help of the above facilities one can experiment with different produc-tion processes in order to find the way to yield new cold-resistant steels and steel sheets with import substitution in mind. **Objectives:** The objective of this research is to understand the effect of a mul-ti-stage heat treatment process on the microstructure of steel sheets made of cryogenic structural steel with high cold resistance. **Methods Applied:** Using the capabilities of the Thermodeform-NMSTU laboratory complex, ingots were produced with given chemical compositions, which were hot-rolled and heat-treated under various modes. The following metallography equipment was used: the Meiji optical microscope with the Thixomet PRO image analyzer and the JSM 6490 LV scan-ning electron microscope. Differential scanning calorimetry (DSC) was performed on the Iupiter 449 F3 synchronous thermal analyzer. A Buchler Mikromet microhardness meter was used for hardness tests as per GOST 9450-60, which calls for the use of a pyramid indenter with a 136° angle between opposite faces. **Findings:** The critical temperatures (points) of the 0H9A (9% Ni) steel were determined, which appeared to be lower in comparison with traditional carbon steels. They were found to be as follows: $Ac_1 \approx 624$°C and $Ac_3 \approx 720$°C. It was found that, following double hardening, austenite was enriched with alloying elements, which caused an additional decrease in the point Ac_1 by 20°C. The effect of single and double hardening and the following high-temperature tempering (at 500, 550, 600°C) was studied on the alloy and its microstructure. After simple hardening followed by tempering within the studied temperature range, a structure is formed consisting of tempered martensite, residual austenite, α-phase and carbide particles, which precipitate predominantly at the grain boundaries leading to embrittlement. This is confirmed by fractorgraphic studies. After double hardening followed by tempering within the specified tempera-ture range, a disperse lamellar duplex structure is formed consisting of an α-phase, a "new" marten-site, a tempered martensite, and a residual stable austenite with the volume fraction of about 4%, which ensures fracture toughness at cryogenic temperatures. **Practical Relevance:** The established regularities are of interest not only because they give a general understanding of the structural pro-cesses in ferritic nickel steels but also in terms of the relationship between the duplex structures ob-tained and the fracture mechanisms affecting the target alloys at cryogenic temperatures. Such al-loys are used to make tanks for liquified gas. Using the new scientific data obtained one can devel-op new and improve the existing heat treatment modes applicable to the specified alloys.

Keywords: Sheet steel, cryogenic structural steel, simple hardening, double hardening, multi-stage heat treatment, tempering, cold resistance, hardness.

This research was funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of the comprehensive project to create a hi-tech production process implemented by a Russian higher ed-ucation institution (Contract 03.G25.31.0235).

References

1. Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G. et al. The purpose and application of ultra cold-resistant nanostructured steel sheets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85–88. (In Russ.)
2. Seok Su Sohn, Seokmin Hong, Junghoon Lee Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels. Acta Materialia, 2015, vol. 100, pp. 39–52.
3. Lu Y.Q., Hui H. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. Procedia Engineering, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
4. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V. et al. Climatic testing of materials, structural elements, machinery and equipment in extremely low temperatures. *Trudy VI evrazijskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata Eurastrencold 2013* [Proceedings of the VI Eurasian Symposium on the Strength of Materials and Machines for Cold Regions Eurastrencold 2013]. Yakutsk, 2013, pp. 5–7. (In Russ.)
5. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G. et al. Analysis of technical requirements for ultra-cold-resistant sheet metal. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 52–60. (In Russ.)
6. Crismaru I.V., Dragomir-Stanciu D., Atanasiu M.V. The Behavior of a 1.4301 Stainless Steel Subjected to Cryogenic Temperatures. Procedia Technology, 2015, vol. 19, pp. 247–253.
7. Lu, Y.Q. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels. Procedia Engineering, 2015, vol. 130, pp. 628–637.
8. Matrosov M.Yu., Zikeev V.N., Martynov P.G. et al. Development of promising cryogenic steels for gas carriers and stationary LNG storage tanks intended for use in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy], 2016, no. 4, pp. 80–89. (In Russ.)
9. Gorynin I.V., Legostaev Yu. L., Osokin E.P. Problems of sea transportation of liquefied natural gas: Materials for tanks used on gas carrier vessels. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2009. no. 5, pp. 32–40. (In Russ.)
10. Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V. Cryogenic complexes for the production and shipment of LNG, its reception, storage and regasification in international trade. *Tekhnicheskie gazy* [Technical gases], 2010, no. 3, pp. 2–19. (In Russ.)
11. Smith L., Craig B. Properties of Metallic Materials for LNG Service: Paper 57. Presented at 9th MECC, Bahrain, Febr. 12–14th 2001. http://www.intetech.com/images/downloads/Paper57.pdf.
12. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirsky Yu.V. et al. *Marochnik stalej i splavov* [Steels and alloy grade guide]. Ed. by A.S. Zubchenko. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p. (In Russ.)
13. ASTM A553/A553M/ Standard Specification for Pressure Vessel Plates. Alloy Steel Quenched and Tempered 7, 8 and 9% Ni // STANDARD by ASTM International. 2014.
14. BS EN 10028-4:2017 Flat products made of steels for pressure purposes. Nickel alloy steels with specified low temperature properties.

15. Golovanenko S.A., Fontstein N.M. *Dvukhfaznye nizkolegirovannye stali* [Two-phase low-alloy steels]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 206 p. (In Russ.)
16. Gorynin I.V, Khlusova E.I. Nanostructured steels for the development of deposits offshore the Arctic Ocean. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2010, no. 12, pp. 1069–1075.
17. Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalej* [Physical metallurgy and the design of steels]. Transl. from English. Moscow: Metallurgiya, 1982, 183 p.
18. Sharov B.P., Zikeev V.N., Gladshtein L.I. *Svojstva stali 0N9 dlya kriogennoj tekhniki* [Properties of 0H9 steel for cryogenic technology]. *Stal'* [Steel], 1988. no. 3, pp. 76–78. (In Russ.)
19. Konopleva E.V., Entie R.I., Bayazitov V.M. et al. Thermocyclic treatment of low-carbon steels with quenching from the intercritical temperature range. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 1988, no.8. (In Russ.)
20. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O. et al. Thermodeform, research and production complex for the creation of new technologies. *Stal'* [Steel], 2014, no. 4, pp. 104–107. (In Russ.)
21. Kogan, Matrokhina E.F., Entin R.I. Effect of austenitization in the intercritical temperature range on the structure and properties of low-carbon steels. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallurgy], 1981, vol. 52, no. 5. (In Russ.)
22. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low- and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. Metal Science and Heat Treatment. 2012. no. 7–8, pp. 387–392.
23. Shchastlivtsev V.M., Koptseva N.V., Artemova T.V. Electron microscopical study of the structure of martensite in low-carbon iron alloys. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metallurgy], 1976, vol. 41, no. 6, pp. 1251–1260. (In Russ.)
24. Sadovsky V.D., Chuprakova N.P. *Vliyanie termicheskoj obrabotki na kolichestvo ostatochnogo austenita i raspad ego pri otpuske v konstrukcionnykh khromonikelevykh stalyakh* [The effect of heat treatment on the amount of residual austenite and its decay during tempering in structural chromium-nickel steels]. *Tr. UF AN SSSR* [Proceedings of the Ufa branch of the USSR Academy of Sciences]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1941, no. 10, pp. 139–151. (In Russ.)
25. Kaletin A.Yu. *Vliyanie ostatochnogo austenita na strukturu i svojstva konstrukcionnykh stalej posle vysokogo otpuska. Diss. kand. tekhn. nauk.* [Effect of residual austenite on the structure and properties of structural steels after high-temperature tempering. PhD dissertation]. Sverdlovsk, 1985, 199 p. (In Russ.)
26. J.M. Zhang, H. Li, F. Yang, Q. Chi, L.K. Ji, Y.R. Feng. Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Microstructure of a 9% Ni Steel for Large LNG Storage Tanks. Journal of Materials Engineering and Performance, December, 2013, vol. 22(12), pp. 3867–3871.
27. Stratman P., Hornbogen E. Mechanical properties of two-phase duplex and dispersed structures of nickel steels. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1979, no. 12, pp. 35–40.
28. Nippes E. F., Balaguer J. P. A Study of the Weld Heat-Affected Zone Toughness of 9% Nickel Steel. Welding research supplement. 1986, pp. 237–243.
29. Erin Barrick. Fundamental Studies of Phase Transformations and Mechanical Properties in the Heat Affected Zone of 10 wt% Nickel Steel. A Thesis Presented to the Graduate and Research Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Master of Science, 2016, 134 p.
30. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A. et al. *Proizvodstvo vysokoprochnoj stal'noj armatury dlja zhelezobetonnykh shpal novogo pokolenija: monografija* [Manufacture of high-strength steel reinforcement for new generation concrete sleepers: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 276 p. (In Russ.)
31. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. et al. *Perspektivy proizvodstva vysokoprochnogo krepezha iz zagotovok iz uglerodistykh stalej s ultramelkozernistoj strukturoj* [Prospects for the production of high-strength fasteners from carbon steels with ultrafine-grain structure]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem.* [Forging and stamping industry. Metal forming], 2014, no. 1, pp. 39–44. (In Russ.)
32. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizatsija protsessov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovanija izdelij s pokrytijami: monografija* [Optimization of production and operational deformation of coated products: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 323 p. (In Russ.)
33. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V. et al. Formulating and developing a metallurgical qualimetry theory. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitigorsk State Technical University], 2003, no. 3, p. 67. (In Russ.)
34. Gun G.S., Pudov E.A., Ivanova L.B. Optimization of metal forming processes using a comprehensive quality criterion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian universities. Ferrous metallurgy], 1986, no. 12, p. 47. (In Russ.)

Received 19/03/18
Accepted 23/04/18

Образец для цитирования

Исследование влияния многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры криогенной конструкционной стали / Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Гущина М.С., Стеканов П.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 29–40. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-29-40

For citation

Poletskov P.P., Denisov S.V., Nikitenko O.A., Gushchina M.S., Stekanov P.A., Understanding the effect of multi-stage heat treatment on the microstructure of cryogenic structural steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 29–40. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-29-40

УДК 669.715:620.193 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-41-47

ВЛИЯНИЕ ЦЕРИЯ, ПРАЗЕОДИМА И НЕОДИМА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 В НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДЕ NaCl

Норова М.Т., Вазиров Н.Ш., Ганиев И.Н.

Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

Аннотация
Сплавы на основе системы Al-Mg являются базовыми для разработки усовершенствованных сплавов, используемых в различных агрессивных средах. Поиск и методы повышения коррозионной стойкости алюминиево-магниевых сплавов представляют научный и практический интерес. Редкоземельные металлы (РЗМ) находят практическое применение для получения всевозможных материалов. В данном случае они имеют все шансы выступить как в качестве легирующих, так и ведущих компонентов. Добавки РЗМ дают возможность увеличить прочностные свойства, прирастить спектр температур их применения, придать материалам новые ценные качества. К примеру, легирование РЗМ дюралевых сплавов увеличивает их электросопротивление и температурный порог работы. В работе потенциостатическим способом при скорости развертки потенциала 2 мВ/с изучено коррозионно-электрохимическое поведение сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом в среде электролита NaCl. Показано, что легирование указанными металлами уменьшает скорость коррозии исходного сплава приблизительно в 1,5 раза в зависимости от концентрации электролита. Снижение скорости коррозии связано с процессом пассивации сплавов.

Ключевые слова: сплав АМг6, церий, празеодим, неодим, потенциостатический метод, потенциал свободной коррозии, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии, электролит NaCl.

Введение

Легирование алюминия магнием до 6% в качестве основного легирующего компонента упрочняет твёрдый раствор алюминия в сплаве и обеспечивает эффективность деформационного упрочнения. При конкретной восприимчивости к межзёренной коррозии (при содержании магния больше 3%) эти сплавы имеют хорошую коррозионную стойкость, тем более противодействие коррозии в морской воде и морской атмосфере, которая значительно выше, чем у сплавов других серий.

Эти сплавы сочетают в себе хорошую формуемость, довольно высокую прочность, отличную коррозионную стойкость, хорошую анодируемость и лучшую из всех сплавов свариваемость. Это дает возможность применять их во многих конструкциях, подверженных суровым атмосферным воздействиям, например в облицовочных панелях зданий и особенно в судостроении и конструкциях в прибрежных районах и в открытом море, включая нефтяные платформы. Достижение высокой прочности за счет упрочнения твердого раствора магнием возможно потому, что магний в этой роли является очень эффективным. Кроме того, его высокая растворимость позволяет увеличивать его содержание до 5% в наиболее легированных сплавах [1–10].

© Норова М.Т., Вазиров Н.Ш., Ганиев И.Н., 2018

Впрочем, в сплавах с большим содержанием магния наблюдается образование фазы Mg_5Al_8 по границам зёрен и в областях локализованной деформации в микроструктуре. Это случается вследствие того, что предельная растворимость магния в алюминии при комнатный температуре находится в пределах 2%. Выделение лишней фазы в данном случае происходит в сплавах, упрочняемых старением, но с отрицательным эффектом для качества сплава. Выделение избыточных фаз происходит медленно при комнатной температуре, но ускоряется с увеличением температуры или в случае, если сплав подвергался холодной пластической деформации. Это делает сплав восприимчивым к отдельным типам межзёренной коррозии, к примеру, коррозия под напряжением и/или смещение в худшую сторону механических показатели в ходе эксплуатации при повышенных температурах [11–14].

С целью улучшения свойств сплава АМг6 нами исследовано влияния церия, празеодима и неодима как легирующего компонента на его электрохимические характеристики.

Результаты исследования и их обсуждение

Для получения сплавов были использованы: алюминий марки А995 (ГОСТ 110669-74), магний – металлический гранулированный марки ХЧ (ТУ-112-40), церий марки Це ЭО ТУ 48-295-

83, празеодим-ПрМ-1(ТУ 48-40-215-72), неодим-НМ-2 (ТУ48-40-205-72). Содержание легирующих элементов в сплаве АМг6 составляло 0,01, 0,05, 0,1; 0,5 мас.%. Сплавы были получены в печи сопротивления типа СШОЛ с применением флюсов с целью предотвращение расплава от окисления, также использовались алюминиевые лигатуры с редкоземельными металлами. Шихтовку сплавов проводили с учётом угара металлов. Состав сплавов исследовали методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на установке дифракционного спектрографа ДФС-452 и многоканальной оптической регистрирующей системе МОРС-9. В качестве примера на **рис. 1** приведена интенсивность линии для магния и церия, которые показывают соответствие состава шихты и полученных сплавов.

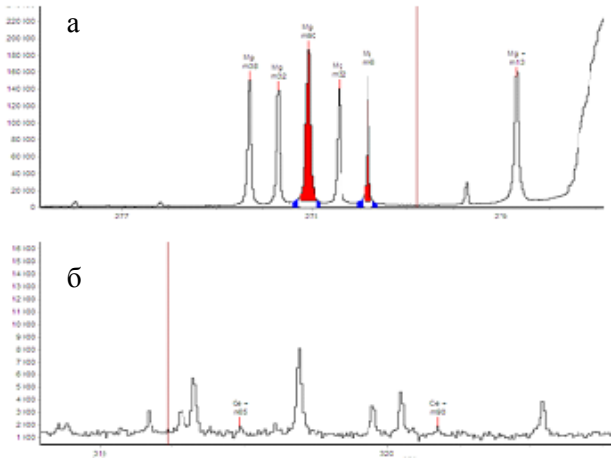


Рис. 1. Интенсивность линии, относящаяся к магнию (а) и церию (б) в сплаве АМг6

Коррозионно-электрохимические исследования проводили на потенциостате ПИ-50-1.1 с выходом на программатор и самописц ЛКД-4-002, в среде электролита NaCl марки ЧДА (ГОСТ 4233-77) при скорости развертки потенциала 2мВ/с по методикам, описанным в работах [15–19]. Электродом сравнения служил хлорсеребряный, а вспомогательным – платиновый.

При электрохимических тестированиях потенциодинамическим способом образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в итоге питтингообразования. Вслед за этим образцы поляризовали в обратном направлении до потенциала –1800 мВ, в итоге происходило подщелачивание приэлектродного слоя рабочей плоскости сплава. Далее образцы поляризовали снова в положительном направлении. На полученных таким образом потенциодинамических кривых определяли следующие анодные характеристики сплавов: потенциал коррозии ($E_{кор}$) и ток коррозии ($i_{кор}$), потенциалы питтингообразования ($E_{п.о}$) и репассивации ($E_{реп}$). Расчет тока коррозии как главной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом тафелевской константы, равной $b_к$=0,12 В, потому что в нейтральных средах процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. Скорость коррозии определяли по формуле

$$K=i_{кор}\cdot к,$$

где к=0,335 г·А$^{-1}$·ч$^{-1}$ для алюминия, $i_{кор}$ – ток коррозии.

Обобщённые результаты исследования сплавов систем АМг6-Ce (Pr, Nd) представлены в **табл. 1–3** и на **рис. 2**.

Обычно о коррозионном поведении металлов и сплавов судят по электрохимическим показателям. Поведение металлов в растворах электролита оценивается по установившимся значением потенциала свободной коррозии и характере его зависимости от времени тестирований. Это даёт ряд весомых сведений о поведении металла в коррозионной среде. Как правило, смещение потенциала коррозии в положительную область указывает на то, что скорость анодной реакции может уменьшиться вследствие пассивации. Тем самым предварительно можно предсказать, что такая система в естественных условиях эксплуатации окажется более коррозионностойкой.

Временная зависимость потенциала свободной коррозии исходного сплава АМг6 и сплавов с различным содержанием легирующих добавок показывает, что последние смещают потенциал свободной коррозии сплава АМг6 в более положительную область значений.

С ростом концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии сплава АМг6 смещается в отрицательную область от –0,670 В в среде 0,03% NaCl до –0,780 В в среде 3,0%-ного NaCl (см. **табл. 1**). Такая закономерность наблюдается также для сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом, так как при переходе от слабого электролита к более сильному происходит уменьшение величины потенциала свободной коррозии, независимо от содержания легирующего компонента.

Значение потенциала питтингообразования для сплава АМг6 и легированных сплавов приведены в **табл. 2**. При анодной поляризации возрастает адсорбция анионов-активаторов, при достижении некоторого потенциала, который называется потенциалом питтингообразования ($E_{п.о}$), происходит местное нарушение пассивности – пробой пленки и наступает точечная коррозия. Величина потенциала питтингообразования является показателем склонности металлов к точечной коррозии: чем меньше (отрицательнее) потенциал питтингообразования, тем выше склонность сплава к точечной коррозии.

Что касается сплава АМг6, легированного церием, празеодимом и неодимом, то результаты, приведённые в **табл. 2**, показывают, что с увеличением концентрации легирующих элементов до 0,05 мас% питтингоустойчивость сплавов увеличивается, о чём свидетельствует смещение потенциала питтингообразования в более положительную область.

Величина потенциала питтингообразования сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом также по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите смещается в более отрицательную область.

Таблица 1

Изменение потенциала (х.с.э.) свободной коррозии сплава АМг6, легированного церием, празеодимом и неодимом, от концентрации легирующего компонента и электролита NaCl

Легирующий элемент	Содержание легирующего элемента в сплаве АМг6, мас%	$-E_{св.\ корр}$, В		
		0,03% NaCl	0,3% NaCl	3% NaCl
Ce	–	0,670	0,684	0,780
	0,01	0,640	0,655	0,730
	0,05	0,620	0,630	0,688
	0,10	0,630	0,660	0,744
	0,50	0,650	0,670	0,745
Pr	0,01	0,620	0,644	0,722
	0,05	0,580	0,660	0,660
	0,10	0,600	0,670	0,720
	0,50	0,620	0,660	0,700
Nd	0,01	0,600	0,600	0,710
	0,05	0,505	0,505	0,622
	0,10	0,612	0,612	0,674
	0,50	0,615	0,622	0,694

Таблица 2

Изменение потенциала (х.с.э.) питтингообразования алюминиевого сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом от концентрации электролита NaCl

Легирующий элемент	Содержание легирующего элемента в сплаве АМг6, мас%	$-E_{п.о}$, В		
		0,03% NaCl	0,3% NaCl	3% NaCl
Ce	–	0,420	0,450	0,630
	0,01	0,410	0,434	0,600
	0,05	0,400	0,424	0,580
	0,10	0,420	0,448	0,590
	0,50	0,420	0,490	0,600
Pr	0,01	0,420	0,440	0,570
	0,05	0,400	0,420	0,560
	0,10	0,410	0,450	0,570
	0,50	0,410	0,480	0,580
Nd	0,01	0,410	0,450	0,560
	0,05	0,380	0,420	0,550
	0,10	0,390	0,430	0,556
	0,50	0,400	0,440	0,560

В качестве примера на **рис. 2** представлены анодные ветви поляризационных кривых сплава АМг6, легированного празеодимом, в среде электролита 3%-ного хлористого натрия. Видно, что присутствие празеодима несколько изменяет ход анодной кривой в сторону меньших значений плотности тока и в более положительную область значений потенциалов. Изучение анодных кривых сплавов в других средах показывает, что по мере разбавления электролита NaCl (влияние хлорид-иона среды ослабляется) исследуемые образцы сплавов становятся более пассивными, то есть более устойчивыми к коррозионному разрушению. Об этом свидетельствует и сдвиг Еп.о в более положительную область значений по мере разбавления электролита NaCl **(табл. 2)**.

В **табл. 3** представлены значения скорости коррозии сплавов, которые были рассчитаны из катодной ветви потенциодинамических кривых. Как видно, с ростом концентрации хлорид-иона (см. **табл. 1**) потенциал свободной коррозии уменьшается. Это свидетельствует о понижении коррозионной стойкости сплавов, что подтверждается исследованиями скорости коррозии сплавов с различным содержанием легирующих добавок в указанных средах **(табл. 3)**. Добавки церия, празеодима и неодима до 0,05% в изученных средах повышают коррозионную стойкость сплава АМг6. Дальнейший рост концентрации легирующего компонента до 0,5% несколько увеличивает скорость коррозии сплавов. Однако по абсолютной величине он остаётся меньше (3,69 г/м^2 ·ч в среде 0,03% NaCl), чем для исходного сплава (5,69 г/м^2 ·ч в среде 0,03% NaCl). С ростом концентрации хлорид-иона происходит увеличение скорости коррозии как исходного сплава, так и легированных сплавов.

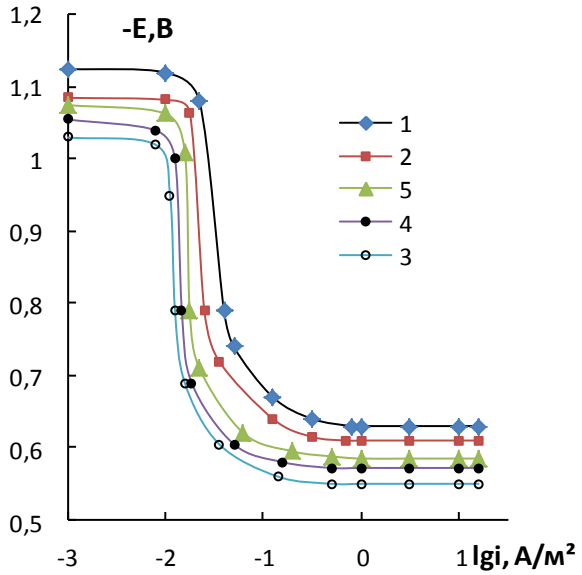


Рис. 2. Анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые сплава АМг6 (1), содержащего празеодим, мас.%: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5) в среде электролита 3%-ного NaCl

Таблица 3

Скорость коррозии алюминиевого сплава AMg6 от содержании церия, празеодима и неодима в среде электролита NaCl

Легирующий элемент	Содержание легирующего элемента в сплаве АМг6, мас%	Скорость коррозии в среде					
		0,03% NaCl		0,3% NaCl		3% NaCl	
		$i_{кор}$, А/м^2	K· 10^{-3}, г/м^2.ч	$i_{кор}$, А/м^2	K· 10^{-3}, г/м^2.ч	$i_{кор}$, А/м^2	K· 10^{-3}, г/м^2.ч
Ce	–	0,017	5,69	0,026	8,71	0,038	12,73
	0,01	0,016	5,36	0,024	8,04	0,036	12,06
	0,05	0,013	4,36	0,022	7,37	0,029	9,71
	0,10	0,020	6,70	0,025	8,38	0,031	10,38
	0,50	0,021	7,04	0,027	9,05	0,036	12,06
Pr	0,01	0,014	4,69	0,021	7,04	0,032	10,72
	0,05	0,012	4,02	0,020	6,70	0,028	9,38
	0,10	0,015	5,19	0,023	7,71	0,030	10,05
	0,50	0,016	5,34	0,024	8,04	0,033	11,01
Nd	0,01	0,016	5,36	0,020	6,70	0,030	10,05
	0,05	0,011	3,69	0,018	6,03	0,025	8,38
	0,10	0,013	4,36	0,021	7,04	0,027	9,045
	0,50	0,014	4,69	0,022	7,37	0,031	10,39

Анодная устойчивость сплава АМг6 при легировании его редкоземельными металлами объясняется как увеличением истинной поверхности анода, так и уплотнением защитного фазового слоя оксидов малорастворимыми продуктами окисления; с другой стороны, изменением или модифицированием структуры сплава при легировании, то есть зависит от величины его кристаллов.

Редкоземельные металлы удовлетворяют вышеупомянутые требования, и положительное влияние церия, празеодима и неодима на анодную стойкость алюминиевого сплава АМг6 объясняется именно их модифицирующим действием. Малые добавки церия, празеодима и неодима, изменяя характер кристаллизации сплава АМг6, существенным образом влияют на величину размера зерна алюминиевого твердого раствора [20–22].

Таким образом, можно заключить, что присадки церия, празеодима и неодима к сплаву АМг6 являются эффективными и позволяют при соответствующей концентрации повысить его коррозионную стойкость до необходимого уровня.

Выводы

Изучением коррозионно-электрохимического поведения сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом в среде электролита NaCl показано, что добавки легируюших элементов до 0,05 мас%, независимо от состава электролита уменьшают скорость коррозии исходного сплава. Также исследованием влияния хлорид-иона на электрохимические характеристики сплава АМг6 с церием, празеодимом и неодимом установлено, что снижение концентрации хлорид-иона в 10 и 100 раз способствует уменьшению скорости коррозии сплавов и сдвигу электродных потенциалов в более положительную область.

Список литературы

1. Menan F., Henaff G. Synergistic action of fatigue and corrosion during crack growth in the 2024 aluminium alloy // Procedia Engineering. Elsevier. 2010. Vol. 2. No. 1. P. 1441–1450.
2. Chlistovsky R., Heffeman P., Duquesnay D. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads // Internat. J. of Fatigue. 2007. Vol. 29. No. 9–11. P. 1941–1949.
3. Jones K., Hoeppner D. W. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy // Corros. Sci. 2006. Vol. 48. No. 10. P. 3109–3122.
4. Spencer K., Corbin S. F., Lloyd D. J. The influence of iron content of the plain strain fracture behavior of AA5754 Al-Mg sheet alloys // Mater. Sci. Eng. 2002. Vol. A 325. No. 1–2. P. 394–404.
5. Kechin V., Kireev A. Influences of gas content on corrosion and electrochemical characteristics of aluminium alloys // 22nd International Conf. on Metallurgy and Materials May 15–17th 2013 Hotel Voronez I, Brno, Czech Republic, EU.
6. Min-Kyong Chung, Yoon-Seok Choi, Jung-Gu Kima, Young-Man Kimb, Jae-Chul Lee. Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys // Materials Science and Engineering A366. 2004. P. 282–291.
7. Song Dan, Ma Ai-bin, Jiang Jing-hua, Lin Pin-hua, Yang Dong-hui. Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2009. Vol. 19. P. 1065–1070,
8. Murashkin M., Sabirov I., Kazykhanov V., Bobruk E., Dubravina A., Valiev R. Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultra-fine grained Al alloy processed via ECAP-PC // J. Mater. Sci. 2013. Vol. 48. Iss. 13. P. 4501–4509.
9. Sauvage X., Bobruk E. V., Murashkin M. Yu., Nasedkina Y., Enikeev N. A., Valiev R. Z. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys // Acta Materialia. 2015. Vol. 98. P. 355–366.
10. Chunming Su., Suarez Donald L. In situ infrared speciation of adsorbed carbonate on aluminum and iron oxides // Clays and Minerals. 1997. Vol. 45. No. 6. P. 814–825.
11. Напалков В.И., Махов С.В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. М.: МИС и С, 2002. 374 с.
12. Napalkov V.I., Makhov S.V. Legirovanie I modificirovanie aluminiya i magniya aluminium-guide.ru 2013–2017.
13. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
14. Металлургия алюминия / Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М. и др. Новосибирск: Наука; СО фирма РАН, 1999. 438 с.
15. Норова М.Т., Ганиев И.Н., Назаров Х.М. Повышение коррозионной стойкости алюминиево-литиевых сплавов микролегированием кальцием // ЖПХ. 2003. Т. 76. Вып. 4. С. 567–569.
16. Влияние лантана на анодное поведение сплава Al+6%Li / Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И., Irene C. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. №1 (44). С. 49–53.
17. Норова М.Т., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Коррозия алюминиево-литиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия. Изд. дом LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 93 с.
18. Махсудова М.С., Норова М.Т., Ганиев И.Н. Потенциодинамическое исследование сплава Al+0,05%Sr, легированного магнием, в среде электролита NaCl // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, №6. С. 621–626.
19. Коррозионно-электрохимическое поведение сплава АМг6, легированного церием / Вазиров Н.Ш., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Махсудова М.С. // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2013. №3 (152). С. 91–97.
20. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.: Гостехиздат, 1956. 135 с.
21. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутин Г.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
22. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

Поступила 30.01.18
Принята в печать 12.03.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-41-47

EFFECT OF CERIUM, PRASEODYMIUM AND NEODYMIUM ON THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF THE AMg6 ALUMINIUM ALLOY IN THE NaCL NEUTRAL MEDIUM

Muattar T. Norova – PhD (Chem.), senior research fellow

The Laboratory of Corrosion Resistant Materials, Nikitin Institute of Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail:muattar_1975@mail.ru

Nazir Sh. Vazirov – Assistant Professor

The Chair of Materials Engineering, Metallurgical Machines and Equipment, Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail: nazir7@mail.ru

Izatullo N. Ganiev – Academician at the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, D.Sc. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory of Corrosion Resistant Materials

Nikitin Institute of Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail: ganiev48@mail.ru

Abstract

Al-Mg alloys serve as base alloys for the development of advanced alloys used in various aggressive environments. Search for ways to increase the corrosion resistance of aluminium-magnesium alloys and the existing methods are of scientific and practical interest. Rare earth metals (REM) find their practical application in the production of various materials. In this case, they can act as both alloying and basic components. The benefits of using REMs as additives to the materials include increased strength, a broader application scope in terms of temperature, and a range of fresh useful properties. For example, the addition of REMs to duralumin alloys results in their increased electrical resistivity and operating temperature threshold. This work looked at the corrosion and electrochemical behavior of the AMg6-Ce (Pr, Nd) alloy in the NaCl electrolyte by applying a potentiostatic method at the potential sweep rate of 2 mV/s. It is shown that due to the addition of REMs the corrosion rate of the bearing alloy is reduced approximately 1.5 times depending on the electrolyte concentration. The reduction in the corrosion rate is associated with the passivation process.

Keywords: AMg6 alloy, cerium, praseodymium, neodymium, potentiostatic method, free corrosion potential, corrosion potential, pitting potential, corrosion rate, NaCl electrolyte.

References

1. Menan F., Henaff G. Synergistic action of fatigue and corrosion during crack growth in the 2024 aluminium alloy. Procedia Engineering. Elsevier. 2010. Vol. 2. No. 1. P. 1441–1450.
2. Chlistovsky R., Heffeman P., Duquesnay D. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads. Internat. J. of Fatigue. 2007. Vol. 29. No. 9–11. P. 1941–1949.
3. Jones K., Hoeppner D. W. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy. Corros. Sci. 2006. Vol. 48. No. 10, P. 3109–3122.
4. Spencer K., Corbin S. F., Lloyd D. J. The influence of iron content of the plain strain fracture behavior of AA5754 Al-Mg sheet alloys. Mater. Sci. Eng. 2002. Vol. A 325. No. 1–2. P. 394–404.
5. Kechin V., Kireev A. Influences of gas content on corrosion and electrochemical characteristics of aluminium alloys. 22nd International Conf. on Metallurgy and Materials May 15–17th 2013 Hotel Voronez I, Brno, Czech Republic, EU.
6. Min-Kyong Chung, Yoon-Seok Choi, Jung-Gu Kima, Young-Man Kimb, Jae-Chul Lee. Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys. Materials Science and Engineering A366. 2004. P. 282–291.
7. Song Dan, Ma Ai-bin, Jiang Jing-hua, Lin Pin-hua, Yang Dong-hui. Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2009. Vol. 19. P. 1065–1070.
8. Murashkin M., Sabirov I., Kazykhanov V., Bobruk E., Dubravina A., Valiev R. Z. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultra-fine grained Al alloy processed via ECAP-PC. J. Mater. Sci. 2013. Vol. 48. Iss. 13. P. 4501–4509.
9. Sauvage X., Bobruk E. V., Murashkin M. Yu., Nasedkina Y., Enikeev N. A., Valiev R. Z. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys. Acta Materialia. 2015. Vol. 98. P. 355–366.
10. Chunming Su., Suarez Donald L. In situ infrared speciation of adsorbed carbonate on aluminum and iron oxides. Clays and Minerals. 1997. Vol. 45. No. 6. P. 814–825.
11. Napalkov V.I., Makhov S.V. Legirovanie i modifitsirovanie aluminiya i magniya [Alloying and inoculation of aluminium and magnesium]. Moscow: MISiS, 2002, 374 p. (In Russ.)
12. Napalkov V.I., Makhov S.V. Legirovanie i modificirovanie aluminiya i magniya aluminium-guide.ru 2013–2017.
13. Fridlyander I.N. *Alyuminievye deformiruemye konstruktsionnye splavy* [Wrought aluminium alloys for structural applications]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p. (In Russ.)
14. Borisoglebsky Yu.V., Galevsky G.V., Kulagin N.M. et al. *Metallurgiya alyuminiya* [Aluminium metallurgy]. Novosibirsk: Nauka, Firma RAN, 1999, 438 p. (In Russ.)
15. Norova M.T., Ganiev I.N., Nazarov Kh.M. Enhancing the corrosion resistance of aluminium-lithium alloys by microalloying with

calcium. *ZhPKh* [Journal of applied chemistry], 2003, vol. 76, no. 4, pp. 567–569. (In Russ.)

16. Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Norova M.T., Ganieva N.I., Irene C. The effect of lanthanum on the anodic behaviour of the Al+6%Li alloy. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of solid and lamenated materials], 2016, no. 1 (44), pp. 49–53. (In Russ.)
17. Norova M.T., Ganiev I.N., Ganieva N.I. *Korroziya alyuminievo-litievykh splavov s shchelochnozemelnymi metallami* [The corrosion of aluminium-lithium alloys with alkaline earth metals]. Germany, LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012, 93 p.
18. Makhsudova M.S., Norova M.T., Ganiev I.N. A potentiodynamic study of the Al+0,05%Sr alloy doped with magnesium in the NaCl electrolyte. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan]. Dushanbe, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 621–626.
19. Vazirov N.Sh., Ganiev I.N., Norova M.T., Makhsudova M.S. The corrosion and electrochemical behaviour of the AMg6 alloy doped with cerium. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of physics and mathematics, chemistry, geology and engineering], 2013, no. 3 (152), pp. 91–97.
20. Semenchenko V.K. *Poverkhnostnye yavleniya v metallakh i splavakh* [Surface phenomena in metals and alloys]. Moscow: Publishing house for scientific literature, 1956, 135 p. (In Russ.)
21. Ganiev I.N., Parkhutin G.A., Vakhobov A.V., Kupriyanova I.Yu. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem* [Inoculation of silumins with strontium]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1985, 143 p.
22. Maltsev M.V. *Modifitsirovanie struktury metallov i splavov* [Modifying the structure in metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.)

Received 30/01/18
Accepted 12/03/18

Образец для цитирования

Норова М.Т., Вазиров Н.Ш., Ганиев И.Н. Влияние церия, празеодима и неодима на электрохимические характеристики алюминиевого сплава АМг6 в нейтральной среде NaCl // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 41–47, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-41-47

For citation

Norova M.T., Vazirov N.Sh., Ganiev I.N. Effect of cerium, praseodymium and neodymium on the electrochemical properties of the AMg6 aluminium alloy in the NaCL neutral medium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 41–47, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-41-47

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.746+621.771 https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-48-53

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ БОЙКИ-ПОЛОСА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТА ИЗ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х.

Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Изложены перспективы развития совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для производства сварных труб. Описана схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Изложены технологические возможности установки с позиции улучшения качества листов из стали. Приведена постановка задачи одновременного определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и напряжения от усилия обжатия в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Приведены исходные данные и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации, исследования напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов толщиной 3–8 мм т шириной 2250 мм из стали 09Г2С. Представлены результаты расчета осевых напряжений на линии контакта очага деформации со стенкой-бойком методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Дана оценка схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с позиции получения качественных листов из стали. Описана методика определения напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки от усилия обжатия и представлена модель стенки-бойка с каналами для их охлаждения. Показан характер нагружения стенки-бойка. Приведены результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка установки от усилия обжатия. Проведена оценка влияния каналов в стенках-бойках на уровень осевых напряжений от усилия обжатия. Показаны закономерности распределения осевых напряжений от усилия обжатия в стенках-бойках установки при получении листов из стали 09Г2С толщиной 3 мм и шириной 2250 мм.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье, стенка-боек, деформация, лист, напряжение, усилие обжатия

Введение

На современном этапе развития металлургического производства весьма актуальным является создание совмещенных процессов непрерывного литья и деформации, которые позволяют существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты и повысить качество листовой металлопродукции, особенно листов из стали для сварных труб [1, 2].

Разработана компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая позволит решить многие проблемы толстолистовой прокатки, особенно при производстве листов из стал для сварных труб [1, 3].

На **рис. 1** представлена схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая состоит из неразъемного кристаллизатора 1 и двух суппортов 2 со стеками-бойками 4.

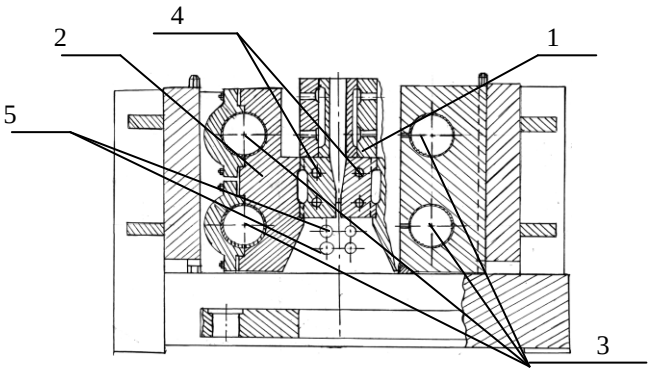


Рис. 1. Схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации

Стенки–бойки имеют специальные каналы для подвода эмульсии или воды для гидросбива

© Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. , 2018

окалины. Каждый суппорт установлен на двух эксцентриковых валах 3, синхронное вращение которых осуществляется от приводного электродвигателя. Во время рабочих ходов стенки-бойки одновременно с формированием полосы из оболочки слитка с жидкой фазой и обжатием затвердевшего металла вытягивают слиток из кристаллизатора и продвигают полосу по направлению литья.

В установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации высокое качество листа достигается за счет литья тонкого сляба и его обжатия стенками-бойками с высокой степенью деформации за проход (до 90%) и в узком температурном интервале, что позволяет существенно проработать литую структуру стали и получить калиброванный лист с однородной и мелкозернистой структурой металла и без осевой ликвации и продольной разнотолщинности [1, 3].

Постановка задачи

Основной проблемой, возникающей при обжатии непрерывнолитых слябов, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации с позиции получения листов высокого качества. Определение напряжений от усилий обжатия и термоупругих напряжений в стенках-бойках установки позволит разработать рекомендации для повышения их стойкости. Для этого одновременно с исследованием напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации необходимо определить поле напряжений в стенках-бойках установки.

Рассмотрим получение листа сечением 8×2250 мм из стали 09Г2С. В качестве исходных данных для расчета принимаем оптимальные параметры проектируемой промышленной установки непрерывного литья и деформации с производительностью 80 т/ч. Толщина полосы после смыкания широких стенок оболочки с жидкой фазой равна 30 мм. Температура тонкого сляба – 1200 град. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 12,5°. Скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора – 2,5 м/мин. Скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин$^{-1}$.

Метод исследования

Для решения поставленной задачи использован пакет ANSYS, который успешно применяется при решении методом конечных элементов задач упругой пластичности при наличии больших деформации и перемещений [1, 3, 5, 11].

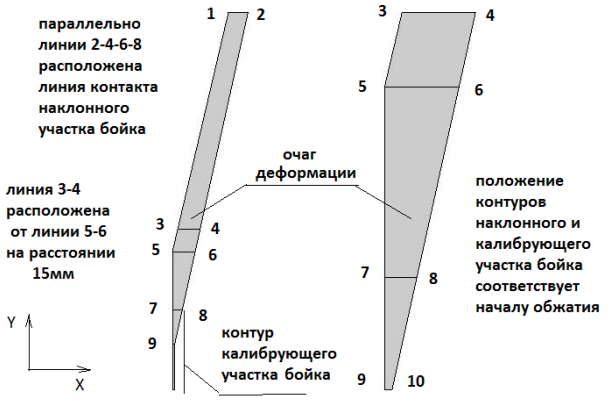


Рис. 2. Положение очага деформации, наклонного и калибрующего участка бойка перед началом рабочего хода для обеспечения выхода полосы. Здесь же показано положение точек, необходимых для наглядного представления результатов расчета

Расчет напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации выполнен в плоской постановке **(рис. 2)** с учетом вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора.

Результаты расчета

На **рис. 3** приведены результаты расчета напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком.

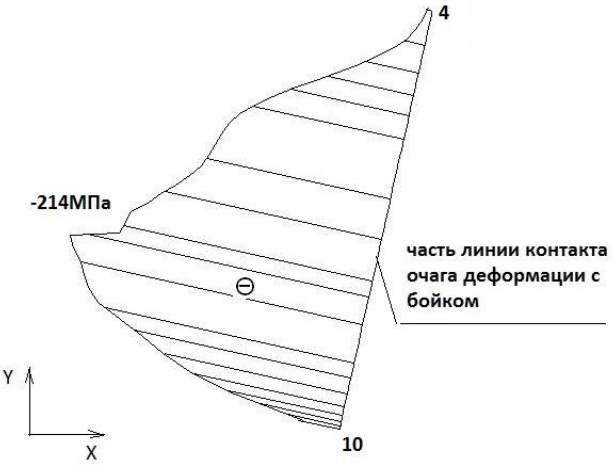


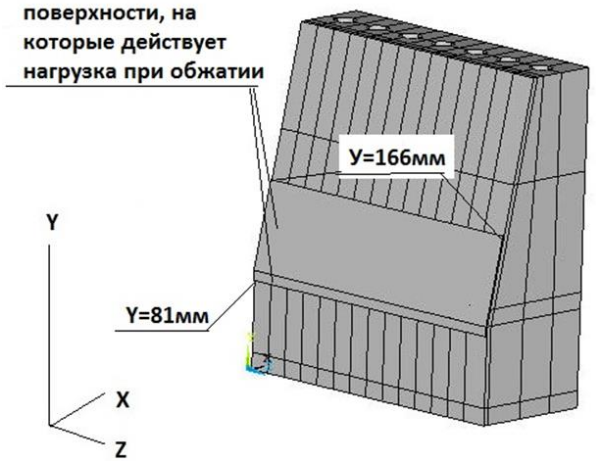
Рис. 3. Характер напряжений по оси OX на части линии контакта очага деформации с бойком

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения качественных листов из стали схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений.

Постановка задачи для расчета напряжений в стенках-бойках

Для определения напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации использованы зависимости и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке [5–12].

Модель стенки-бойка для расчета приведена на **рис. 4, а**. Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ. Толщина стенки-бойка по верхней плоскости – 70 мм. Длина стенки-бойка – 570 мм. Диаметр охлаждающих каналов – 20 мм.



а

б

Рис. 4. Модель для расчета и характер нагружения стенки-бойка

Характер нагружения стенки-бойка представлен на **рис. 4, б**, при этом точка 0 на графике соответствует линии Y=81 мм на модели для расчета. Из рисунка следует, что наибольшее удельное давление имеет место на переломе профиля стенки-бойка.

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка выполнены в 5-ти сечениях, показанных на **рис. 5**.

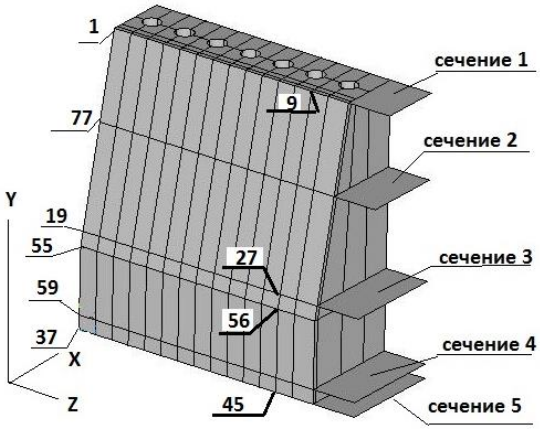


Рис. 5. Положение сечений, для которых приведены результаты расчета

При этом в каждом сечении напряжения приведены для характерных линий. Положение линий в сечении 3 дано на **рис. 6**.

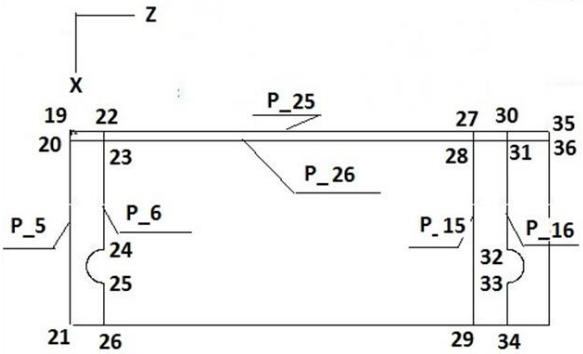


Рис. 6. Положение точек и линий в сечении 3 (положение сечений смотри на **рис. 5**)

Для каждой линии приведены осевые напряжения (SX, SY и SZ) вдоль трех координатных осей X, У и Z соответственно и эквивалентные напряжения по Мизесу (SEQV).

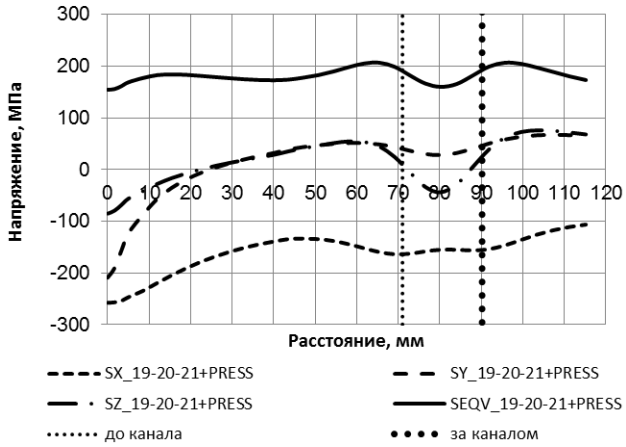
Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка установки от усилия обжатия приведены на **рис. 7** и в **таблице**.

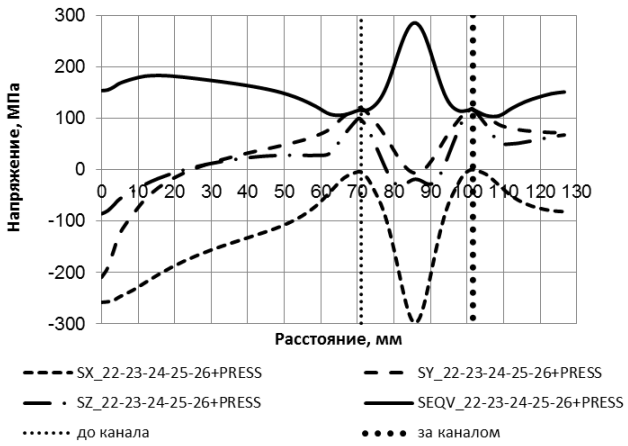
Результаты расчета свидетельствуют, что уровень напряжений в стенках-бойках практически везде меньше предела текучести стали 45ХНМ (440–590 МПа). Скачки напряжений в зоне между охлаждающими каналами стенок-бойков связаны с наличием концентрации напряжений. Так, по линии Р5, расположенной между каналами, напряжение по оси X находится на уровне минус 158 МПа, а по линии Р6, проходящей по образующей канала, напряжение

достигает значения минус 300 МПа на оси размещения каналов в в корпусе бойка (см. **рис. 6**). Коэффициент концентрации, определяемый наличием канала в этом сечении, равен 300/158 =1,9. Осевые напряжения в стенках-бойках от усилия обжатия распределяются по толщине и длине стенки-бойка крайне неравномерно, причем имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения (см. **таблицу**).

Наибольшие сжимающие напряжения возникают в направлении осей X и Y и достигают в сечении 3 значения минус 300 МПа. Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в области каналов стенок-бойков, причем максимальной величины они достигают в направлении осей Y и Z и составляют 90÷140 МПа.



Вдоль линии P_5



Вдоль линии P_6

Рис. 7. Характер напряжений вдоль линий P_5 и P_6 от воздействия на боек только усилия обжатия

Напряжения в стенке-бойке от усилия обжатия при получении листа сечением 3×2250 из стали 09Г2С

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	до канала	после канала	до канала	после канала	до канала	после канала	до канала	после канала
2, P3	0	–15	50	70	75	90	70	125
2, P4	0	–50	50	100	75	140	70	120
3, P5	–260	–100	–105	60	–90	70	150	200
3, P6	–260	–90	–300	75	–90	70	160	150
4, P7	0	–30	0	75	50	70	50	230
4, P8	0	–20	0	70	50	120	50	130
5, P9	0	70	0	30	50	100	50	100
5, P10	0	100	0	60	50	75	50	80
2, P13	0	–25	35	90	0	85	35	130
2, P14	0	–20	30	90	0	90	40	130
3, P15	–260	–100	–220	60	–100	60	150	170
3, P16	–260	–50	–220	75	–70	70	170	150
4, P17	0	–25	0	75	0	70	0	130
4, P18	0	25	0	70	0	80	0	145
5, P19	0	70	0	35	0	100	0	120
5, P20	0	50	0	60	0	115	0	150

Заключение

В заключение следует отметить, что поставлена и решена задача одновременного определения напряженно-деформированного состояния полосы и стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали 09Г2С сечением 3÷8×2250 мм для сварных труб. Определены величины и закономерности распределения напряжений в очаге циклической деформации и осевых напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Представленные результаты позволят обоснованно выбрать конструктивные параметры и материал стенок-бойков.

Список литературы

1. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 411 с.
2. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // Металлургическое производство и технология металлургических процессов: пер.с нем. М., 1990. С. 46–56.
3. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // Сталь. 2016. №1. С 52.
4. Литье и прокатка тонких слябов из сталей категории API для применения в арктических условиях / М. Форнасье, К. Пьемонте, А. Пигани, А. Сатонин // Металлургическое производство и технологии. 2011. №1. С. 16–29.
5. Лехов О.С. Прокатка широкополочных балок. Теория и расчет. LAP LAMBERT Fcademic Publishihg. 2017. 208 с.
6. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
7. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 1 // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 37–41.
8. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
9. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 432 с.
11. ANSYS. Structural Analysis Guide/ Rel. 15.0. http// www. Cadferm. ru.
12. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. 151 с.

Поступила 04.10.17
Принята в печать 05.03.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-48-53

UNDERSTANDING THE STRESS STATE OF THE MOVABLE PLATEN AND THE STRIP IN THE PRODUCTION OF STEEL SHEETS ON A COMBINED CONTIN-UOUS CASTING AND ROLLING LINE

Oleg S. Lekhov – DSc (Eng.), Professor
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Aleksandr V. Mikhalev – Assistant Professor
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mialex@trubprom.com

Maksim M. Shevelev – Engineer
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MMShevelev@mail.ru

Damir Kh. Bilalov – Associate Professor
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mas-ter_ddd@mail.ru

Abstract
This article describes a combined continuous casting and rolling line and its design while indicating the capabilities of such line in terms of the quality of steel sheets. The initial data are given that are necessary to understand the stress-strain state of steel in the cyclic deformation zone when producing 3-8 mm thick and 2,250 mm wide sheets from the 09G2S steel. The results of the calculation are presented of the axial stresses occurring at the contact line between the de-formation zone and the movable platen. The calculation was performed using the finite element method with the help of the ANSYS software. The authors analyse the stress pattern in the cyclic deformation zone in terms of obtaining high-quality steel sheets. The article describes a method for determining stresses in the movable platens of a four-plate mould based on the reduction force, and a model of the movable platen with cooling channels. The movable platen load pattern is shown. The results of the calculation are presented of the stress state of a movable platen cal-culated against the reduction force. The authors analyse the correlation between the effect pro-duced by the channels in the movable platens on the axial stresses

and the reduction force. The authors also describe the axial stresses distribution patterns in movable platens depending on the reduction force when producing 3 mm thick and 2,250 mm wide sheets from the 09G2S steel.

Keywords: Line, continuous casting, movable platen, deformation, sheet, stress, reduction force.

References

1. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye processy nepreryvnogo litiya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined continuos casting and rolling processes for rolling industry]. Yekaterinburg: USTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.)
2. Erenberg Kh.-Yu. Casting and reduction of thin slabs at the Mannesmannröhren-Werke AG plant. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov* [Steel making and metallurgical technology]. Moscow, 1990, pp. 46–56. (In Russ.)
3. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Study of a combined continuous casting and cyclic deformation process for the production of steel sheets. *Stal'* [Steel], 2016, no. 1, pp. 52–56. (In Russ.)
4. Fornasye M., Pyemonte K., Pigani A., Satonin A. Casting and rolling of thin slabs of API category steel for application in Arctic conditions. *Metallurgicheskoye proizvodstvo i tekhnologii* [Metallurgical production and technologies]. 2011, no. 1, pp. 16–29.
5. Lekhov O.S. Rolling of wide-cavity beams. Theory and calculation. LAP LAMBERT Fcademic Publishihg. 2017, 208 p.
6. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [The mechanics of deformable solids]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.)
7. Lekhov O.S. Understanding the stress-strain state of the rolls and the strip going through a wide-flange beam mill. Message 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian universities. Ferrous metallurgy], 2014, no. 10, pp. 37–41. (In Russ.)
8. Norri D., Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to the finite element method]. Moscow: Mir, 1981, 304 p. (In Russ.)
9. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya* [Finite elements and approximation]. Moscow: Mir, 1986, 318 p. (In Russ.)
10. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite element method. Basics]. Moscow: Mir, 1984, 432 p. (In Russ.)
11. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. http//www. Cadfern/ ru/
12. Lekhov O.S. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo litiya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub. Teoriya i raschet* [Combined continuous casting and rolling line for the production of steel sheets for welded pipes. Theory and design]. Yekaterinburg: Publishing house of UMC UPI, 2017, 151 p. (In Russ.)

Received 04/10/17
Accepted 05/03/18

Образец для цитирования

Исследование напряженного состояния системы бойки-полоса при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 48–53, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-1-48-53

For citation

Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Understanding the stress state of the movable platen and the strip in the production of steel sheets on a combined contin-uous casting and rolling line. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 48–53, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-48-53

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.311.004.12 https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-54-62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ШЕСТИПОЛЮСНИКА С ДВУМЯ ВХОДНЫМИ И ЧЕТЫРЬМЯ ВЫХОДНЫМИ ВЫВОДАМИ

Большанин Г.А.

Братский государственный университет, Братск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье описан один из многих возможных вариантов экспериментального определения коэффициентов уравнений А-формы, оценивающих состояние пассивного шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Таким шестиполюсником могут быть замещены устройства, элементы и части электрических цепей или электроэнергетических систем. Полученные таким образом сведения о численных значениях коэффициентов шестиполюсника дают возможность выяснения количественной связи между входными и выходными характеристиками электрической энергии замещенных устройств. **Цель работы:** формирование методики экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений А-формы, оценивающих состояние пассивного шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. **Используемые методы:** применялись методы физического и математического моделирования, использовались методы натурного эксперимента с использованием соответствующего парка электроизмерительных приборов, методы косвенного измерения искомых величин. **Новизна:** элементами новизны обладает предлагаемая методика экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений А-формы, устанавливающих количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии пассивного шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами, замещающего устройства, элементы или части электрических цепей или электроэнергетических систем. **Результат:** в статье рассмотрен один из множества возможных вариантов косвенного измерения численных значений коэффициентов уравнений А-формы, оценивающих состояние пассивного шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Для достижения сформулированной цели исследования необходима серия экспериментов из шести опытов. В результате этих опытов могут быть получены сведения о численных значениях шести разновидностей уравнений А-формы. Совместное решение этих уравнений позволит получить формулы для вычисления коэффициентов этих уравнений. **Практическая значимость:** численные значения коэффициентов уравнений А-формы позволят установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи, устройств, элементов или частей электрических цепей или электроэнергетических систем, которые могут быть замещены пассивным шестиполюсником с двумя входными и четырьмя выходными выводами. Существует реальная возможность определения количественной связи коэффициентов уравнений А-формы с уравнениями B-, G-, H-, Y- и Z-формы, которые тоже используются для оценки состояния этого шестиполюсника. Кроме того, предлагаемая методика, в принципе, может быть применениа и для анализа активных шестиполюсников подобного исполнения. Это значит, что предлагемая методика может обеспечить всесторонний анализ исследуемого объекта.

Ключевые слова: пассивный шестиполюсник, коэффициенты шестиполюсника, схема, напряжения, токи, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания, вольтметр, амперметр, фазометр.

Введение

Шестиполюсником следует называть часть электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы с шестью выводами. Эти выводы могут служить либо для входа (входные), либо для выхода (выходные) электрических сигналов. Причем количество входных и выходных выводов может быть не менее двух и не более четырех.

Шестиполюсник может иметь два входных и четыре выходных вывода **(рис. 1)**. Таким шестиполюсником могут быть замещены четырехоб-

© Большанин Г.А., 2018

моточный трансформатор, трехобмоточный трансформатор с одной расщепленной обмоткой или часть какой-либо электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы.

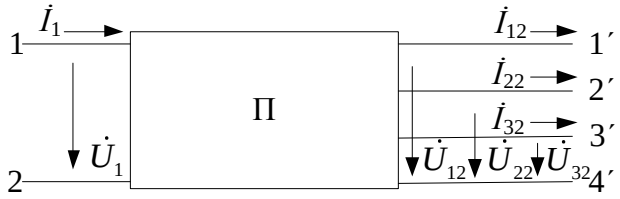


Рис. 1. Пассивный шестиполюсник с двумя входными и четырьмя выходными выводами

Идея замещения электротехнических объектов многополюсниками возникла давно [1, 2]. Но до недавнего времени основное внимание уделялось теории четырехполюсников. Теория многополюсников рассматривалась, в основном, применительно к устройствам связи [3, 4]. Позже возможность применения теории многополюсников стали рассматривать при синтезе и анализе электрических цепей [5], в силовой энергетике [6–8], в электронике [9], в системах автоматического управления промышленными технологиями [10] и даже в механике [11, 12].

Состояние шестиполюсника, а следовательно, и объекта, который он замещает, описывается уравнениями различных форм. В силовой энергетике, например, состояние такого шестиполюсника, а значит, и объекта электроэнергетики, который он замещает, предпочитают описывать уравнениями А-формы. Хотя это не принципиально. Тем более, когда установлена количественная связь между коэффициентами уравнений различных форм [13]. Но необходимо иметь сведения о численных значениях коэффициентов уравнений хотя бы одной из форм.

Если известна внутренняя электрическая схема объекта, замещаемого анализируемым шестиполюсником, то процедура определения численных значений коэффициентов уравнений особой сложностей не имеет. Но чаще всего внутренняя схема исследуемого объекта не известна. Иначе бы не было смысла в использовании теории многополюсников. В таком случае возможно только экспериментальное определение искомых численных значений коэффициентов уравнений многополюсника. В данном случае шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Предметом исследования является пассивный линейный шестиполюсник с двумя входными и четырьмя выходными выводами, который предположительно работает в синусоидальном режиме.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Пассивный шестиполюсник с двумя входными и четырьмя выходными выводами может быть описан уравнениями различных форм. Но для выявления количественной связи между входными и выходными напряжениями и токами предпочтительны уравнения А-формы:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= A\dot{U}_{12} + B\dot{I}_{12} + E\dot{U}_{22} + F\dot{I}_{22} + K\dot{U}_{32} + L\dot{I}_{32};\\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_{12} + D\dot{I}_{12} + G\dot{U}_{22} + H\dot{I}_{22} + M\dot{U}_{32} + N\dot{I}_{32},\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где *A, B, C, D, E, F, G. H, K, L, M* и *N* – коэффициенты уравнений А-формы шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами.

Для реализации этой связи необходимо иметь сведения о численных значениях коэффициентов, входящих в состав этих уравнений.

Вариантов исполнения экспериментальной установки по определению численных значений шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами может быть множество. Схемное решение одного из вариантов исполнения такой экспериментальной установки изображено на **рис. 2**.

Предлагаемая схема экспериментальной установки предполагает использование внешнего источника синусоидальной ЭДС $\dot{E}$, парка электроизмерительных приборов из 4 (четырех) вольтметров PV1–PV4, 4 (четырех) амперметров PA1–PA4 и 7 (семи) фазометров Pφ1–Pφ7, а также 7 (семи) коммутационных устройств S1–S7, в качестве которых могут быть использованы обычные ключи, выключатели, переключатели или разъединители. В качестве электрических нагрузок H1–H3 рекомендуется использовать обычные линейные резисторы. Хотя, в принципе, в качестве этих нагрузок можно использовать любые потребители электрической энергии с линейными вольтамперными характеристиками.

В уравнениях (1) участвуют 12 (двенадцать) коэффициентов. Для определения их численных значений нужно 12 (двенадцать) уравнений с численными значениями напряжений и токов. Это значит, что для определения искомых коэффициентов надо выполнить серию экспериментов из 6 (шести) опытов. Целью этих опытов является определение изображений на комплексной плоскости входных и выходных напряжений и токов при различных режимах работы анализируемого шестиполюсника, то есть в определении модулей входных и выходных напряжений и токов и их начальных фаз.

Первый опыт может быть, например, режимом передачи электрической энергии всем трем электрическим нагрузкам Н1, Н2 и Н3. Он выполняется замыканием ключей S1–S4. Ключи S5–S7 при этом должны быть разомкнуты.

В этом опыте, как, впрочем, и в последующих, модуль входного напряжения $\dot{U}_1^{(1)}$ регистрирует вольтметр PV1, а модуль входного тока $\dot{I}_1^{(1)}$ – амперметр PA1. Модули выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(1)}$, $\dot{U}_{22}^{(1)}$ и $\dot{U}_{32}^{(1)}$ регистрируются вольтметрами PV2, PV3 и PV4 соответственно.

Этих напряжений хватило бы при эксплуатации анализируемого шестиполюсника в цепях постоянного тока. В таком случае в качестве внешнего источника электрической энергии следовало бы использовать источник постоянного тока. В таком случае не было бы необходимости в определения начальных фаз напряжений и токов.

Такая необходимость появляется в случае использования в опытах источника синусоидального тока.

Величина ЭДС внешнего источника электрической энергии, как видно по схеме, изображенной на **рис. 2**, регистрируется вольтметром PV1 и определяется модулем входного напряжения $\dot{U}_1^{(1)}$. Его начальная фаза обычно известна. А если нет, то она принимается априори. Чаще всего ей присваивается нулевое значение: $\varphi_{u1} = 0$.

Фазометр $P\varphi 1$ регистрирует разность начальных фаз входных напряжения $\dot{U}_1^{(1)}$ и тока $\dot{I}_1^{(1)}$: $\varphi_1 = \varphi_{u1} - \varphi_{i1}$. В таком случае начальная фаза входного тока $\dot{I}_1^{(1)}$ определяется так: $\varphi_{i1} = \varphi_{u1} - \varphi_1$.

Таким образом определяются изображения на комплексной плоскости входных напряжения и тока: $\dot{U}_1^{(1)} = U_1^{(1)} e^{j\varphi_{u1}}$; $\dot{I}_1^{(1)} = I_1^{(1)} e^{j\varphi_{i1}}$.

Фазометр $P\varphi 2$ при подключении его измерительных обмоток так, как показано на **рис. 2**, зарегистрирует разность начальных фаз входного напряжения $\dot{U}_1^{(1)}$ и тока в выходном выводе $1'$ $\dot{I}_{12}^{(1)}$: $\varphi_2 = \varphi_{u1} - \varphi_{i12}$. Начальная фаза выходного тока $\dot{I}_{12}^{(1)}$ в таком случае определится так: $\varphi_{i12} = \varphi_{u1} - \varphi_2$.

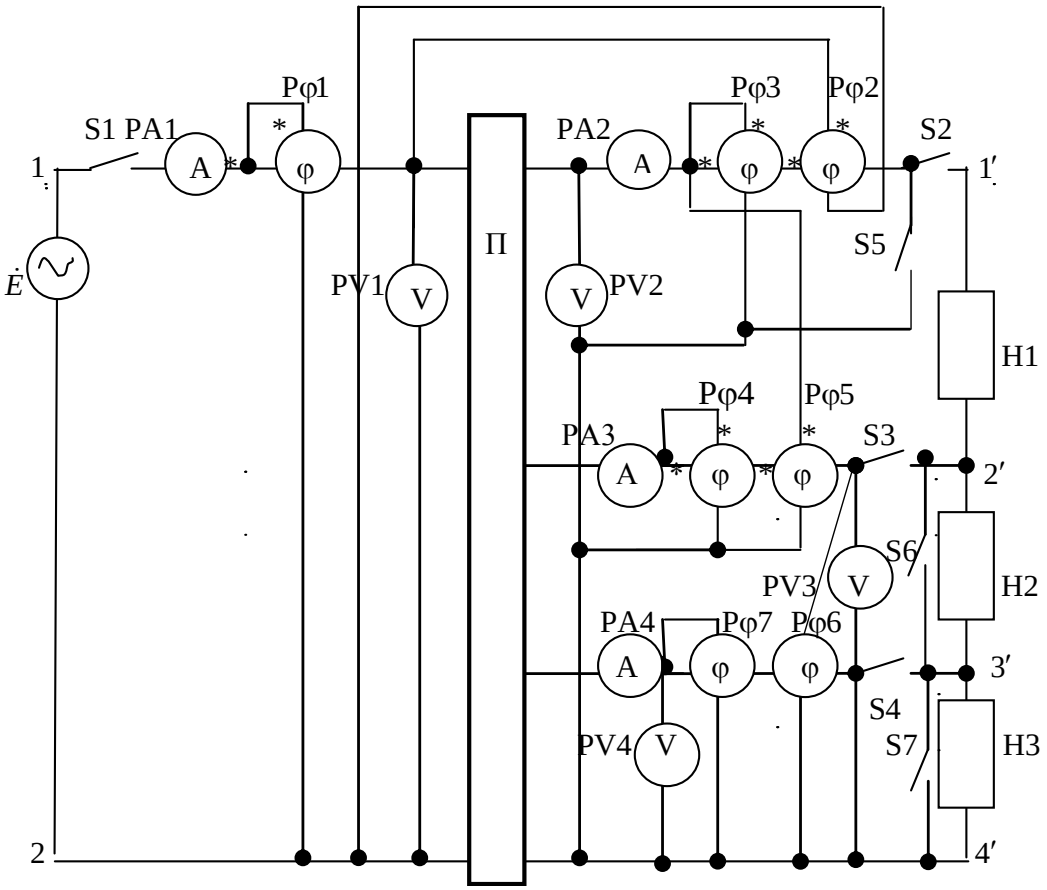


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения численных значений коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами

Фазометр $P\varphi 3$ регистрирует разность начальных фаз входного напряжения между выходными выводами $1'$, $4'$ $\dot{U}_{12}^{(1)}$ и тока $\dot{I}_{12}^{(1)}$: $\varphi_3 = \varphi_{u12} - \varphi_{i12}$. Отсюда определится начальная фаза выходного напряжения $\dot{U}_{12}^{(1)}$: $\varphi_{u12} = \varphi_3 + \varphi_{i12}$.

Фазометр $P\varphi 4$ на **рис. 2** регистрирует разность начальных фаз входного напряжения $\dot{U}_{12}^{(1)}$ и тока $\dot{I}_{22}^{(1)}$: $\varphi_4 = \varphi_{u12} - \varphi_{i22}$. В таком случае начальная фаза тока в выходном выводе $2'$ $\dot{I}_{22}^{(1)}$ определится так: $\varphi_{i22} = \varphi_{u12} - \varphi_4$.

Фазометр $P\phi 5$ регистрирует разность начальных фаз напряжения между выходными выводами $2'$, $4'$ $\dot{U}_{22}^{(1)}$ и тока в выходном выводе $2'$ $\dot{I}_{22}^{(1)}$: $\varphi_5 = \varphi_{u22} - \varphi_{i22}$. Поэтому начальная фаза выходного напряжения $\dot{U}_{22}^{(1)}$ определится так: $\varphi_{u22} = \varphi_5 + \varphi_{i22}$.

Фазометр $P\varphi 6$ регистрирует разность начальных фаз напряжения между выходными выводами $2'$, $4'$ $\dot{U}_{22}^{(1)}$ и тока в выходном выводе $3'$ $\dot{I}_{32}^{(1)}$: $\varphi_6 = \varphi_{u22} - \varphi_{i32}$. В таком случае начальная фаза тока в выходном выводе $3'$ определится так: $\varphi_{i32} = \varphi_{u22} + \varphi_6$.

Фазометр $P\varphi 7$ регистрирует разность начальных фаз входных напряжения $\dot{U}_{32}^{(1)}$ и тока $\dot{I}_{32}^{(1)}$: $\varphi_7 = \varphi_{u32} - \varphi_{i32}$. Тогда начальная фаза напряжения между выходными выводами $3'$ и $4'$ $\dot{U}_{32}^{(1)}$ определится так: $\varphi_{u32} = \varphi_7 + \varphi_{i32}$.

Теперь известны и изображения на комплексной плоскости выходных напряжений и токов: $\dot{U}_{12}^{(1)} = U_{12}^{(1)} e^{j\varphi_{u12}}$; $\dot{U}_{22}^{(1)} = U_{22}^{(1)} e^{j\varphi_{u22}}$; $\dot{U}_{32}^{(1)} = U_{32}^{(1)} e^{j\varphi_{u32}}$; $\dot{I}_{12}^{(1)} = I_{12}^{(1)} e^{j\varphi_{i12}}$; $\dot{I}_{22}^{(1)} = I_{22}^{(1)} e^{j\varphi_{i22}}$; $\dot{I}_{32}^{(1)} = I_{32}^{(1)} e^{j\varphi_{i32}}$.

В результате выполнения первого опыта уравнения А-формы пассивного шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами (1) примут вид

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1^{(!)} &= A\dot{U}_{12}^{(!)} + B\dot{I}_{12}^{(!)} + E\dot{U}_{22}^{(!)} + F\dot{I}_{22}^{(!)} + K\dot{U}_{32}^{(!)} + L\dot{I}_{32}^{(!)}; \\ \dot{I}_1^{(!)} &= C\dot{U}_{12}^{(!)} + D\dot{I}_{12}^{(!)} + G\dot{U}_{22}^{(!)} + H\dot{I}_{22}^{(!)} + M\dot{U}_{32}^{(!)} + N\dot{I}_{32}^{(!)}. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Вторым опытом может быть опыт холостого хода. Он выполняется размыканием ключей S2–S7. Ключ S1 в этом опыте должен быть замкнут.

Модули и начальные фазы входных напряжения $\dot{U}_1^{(2)}$ и тока $\dot{I}_1^{(2)}$ в этом опыте определяются так же, как и в первом опыте.

В опыте холостого хода отсутствуют все выходные токи: $\dot{I}_{12}^{(2)} = 0$; $\dot{I}_{22}^{(2)} = 0$; $\dot{I}_{32}^{(2)} = 0$. Поэтому амперметры PA2–PA4 и фазометры $P\varphi 2 - P\varphi 7$ при подключении так, как показано на **рис. 2**, в этом опыте имеют нулевые показания. Но вольтметры PV2–PV4 зафиксируют, как правило, ненулевые значения модулей выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(2)}$, $\dot{U}_{22}^{(2)}$ и $\dot{U}_{32}^{(2)}$.

Чтобы определить начальные фазы этих напряжений, необходимо измерительные обмотки тока фазометров $P\varphi 3$, $P\varphi 5$ и $P\varphi 7$ переключить на входной вывод 1. В результате таких переключений фазометр $P\varphi 3$ зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{12}^{(2)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(2)}$: $\varphi_3 = \varphi_{u12} - \varphi_{i1}$; фазометр $P\varphi 5$ – разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{22}^{(2)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(2)}$: $\varphi_5 = \varphi_{u22} - \varphi_{i1}$; а фазометр $P\varphi 7$ – разность начальных фаз выходных напряжения $\dot{U}_{32}^{(2)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(2)}$: $\varphi_7 = \varphi_{u32} - \varphi_{i1}$. При таких условиях определяются начальные фазы выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(2)}$, $\dot{U}_{22}^{(2)}$ и $\dot{U}_{32}^{(2)}$: $\varphi_{u12} = \varphi_3 + \varphi_{i1}$, $\varphi_{u22} = \varphi_5 + \varphi_{i1}$; $\varphi_{u32} = \varphi_7 + \varphi_{i1}$.

Таким образом, формируются изображения на комплексной плоскости выходных напряжений: $\dot{U}_{12}^{(2)} = U_{12}^{(2)} e^{j\varphi_{u12}}$; $\dot{U}_{22}^{(2)} = U_{22}^{(2)} e^{j\varphi_{u22}}$; $\dot{U}_{32}^{(2)} = U_{32}^{(2)} e^{j\varphi_{u32}}$.

По результатам второго опыта, опыта холостого хода уравнения (1) приобретут вид

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1^{(2)} &= A\dot{U}_{12}^{(2)} + E\dot{U}_{22}^{(2)} + K\dot{U}_{32}^{(2)}; \\ \dot{I}_1^{(2)} &= C\dot{U}_{12}^{(2)} + G\dot{U}_{22}^{(2)} + M\dot{U}_{32}^{(2)}. \end{aligned}\right\}; \quad (3)$$

Третий опыт может быть опытом короткого замыкания. Во избежание аварийных ситуаций его следует выполнять при пониженном входном напряжении.

Опыт короткого замыкания выполняется замыканием ключей S5–S7. При этом ключи S2–S4 должны быть разомкнуты, а ключ S1 замкнут.

Изображения входных напряжений $\dot{U}_1^{(3)}$ и тока $\dot{I}_1^{(3)}$ на комплексном плоскости в этом опыте определяются так же, как и в первом опыте.

Замыкание ключей S5–S7 обеспечивает замыкание выходных выводов $1'$, $2'$, $3'$ и $4'$ меж-

ду собой. Поэтому выходные напряжения $\dot{U}_{12}^{(3)}$, $\dot{U}_{22}^{(3)}$ и $\dot{U}_{32}^{(3)}$ будут отсутствовать: $\dot{U}_{12}^{(3)}=0$; $\dot{U}_{22}^{(3)}=0$; $\dot{U}_{32}^{(3)}=0$. Этот факт объясняет нулевые показания вольтметров PV2–PV4 и фазометров $P\varphi3-P\varphi7$ при их подключении так, как показано на **рис. 2**.

Модули выходных токов $\dot{I}_{12}^{(3)}$, $\dot{I}_{22}^{(3)}$ и $\dot{I}_{32}^{(3)}$, которые в данном случае имеют, как правило, ненулевые значения и являются токами короткого замыкания, фиксируются амперметрами PA2–PA4.

Фазометр $P\varphi2$ при его включении так, как предложено на **рис. 2**, регистрирует разность начальных фаз входного напряжения $\dot{U}_1^{(3)}$ и выходного тока $\dot{I}_{12}^{(3)}$: $\varphi_2=\varphi_{u1}-\varphi_{i12}$. Поэтому начальная фаза тока в выходном выводе $1'$ определится так: $\varphi_{i12}=\varphi_{u1}-\varphi_2$.

Чтобы определить начальную фазу тока в выходном выводе $2'$ $\dot{I}_{22}^{(3)}$, необходимо измерительную обмотку напряжения фазометра $P\varphi4$ переключить на вход анализируемого шестиполюсника. Тогда этот фазометр зарегистрирует разность начальных фаз между входным напряжением $\dot{U}_1^{(3)}$ и выходным током $\dot{I}_{22}^{(3)}$: $\varphi_4=\varphi_{u1}-\varphi_{i22}$. В таком случае начальная фаза тока в выходном выводе $2'$ определится так: $\varphi_{i22}=\varphi_{u1}-\varphi_4$.

Для определения начальной фазы тока в выходном выводе $3'$ $\dot{I}_{32}^{(3)}$ нужно измерительную обмотку напряжения фазометра $P\varphi6$ переключить на вход анализируемого шестиполюсника. После такого переключения фазометр $P\varphi6$ зафиксирует разность начальных фаз входного напряжения $\dot{U}_1^{(3)}$ и выходного тока $\dot{I}_{32}^{(3)}$: $\varphi_6=\varphi_{u1}-\varphi_{i32}$. Теперь можно определить начальную фазу выходного тока $\dot{I}_{32}^{(3)}$: $\varphi_{i32}=\varphi_{u1}-\varphi_6$.

Так формируются изображения выходных токов на комплексной плоскости: $\dot{I}_{12}^{(3)}=I_{12}^{(3)}e^{j\varphi_{i12}}$; $\dot{I}_{22}^{(3)}=I_{22}^{(3)}e^{j\varphi_{i22}}$; $\dot{I}_{32}^{(3)}=I_{32}^{(3)}e^{j\varphi_{i32}}$.

Уравнения (1) по результатам третьего опыта, опыта короткого замыкания примут вид:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1^{(3)}&=B\dot{I}_{12}^{(3)}+F\dot{I}_{22}^{(3)}+L\dot{I}_{32}^{(3)};\\ \dot{I}_1^{(3)}&=D\dot{I}_{12}^{(3)}+H\dot{I}_{22}^{(3)}+N\dot{I}_{32}^{(3)}.\end{aligned}\right\}; \qquad (4)$$

Четвертый опыт может быть выполнен при полном отключении электрических нагрузок H1, H2 и H3. При этом выходные выводы $1'$ и $4'$ должны быть замкнуты между собой. Этот опыт выполняется размыканием ключей S2–S4 и S6–S7. Ключи S1 и S5 при этом должны быть замкнуты. При таком положении коммутационных устройств отсутствуют выходное напряжение $\dot{U}_{12}^{(4)}$ и выходные токи $\dot{I}_{22}^{(4)}$, $\dot{I}_{32}^{(4)}$: $\dot{U}_{12}^{(4)}=0$; $\dot{I}_{22}^{(4)}=0$; $\dot{I}_{32}^{(4)}=0$. Этот факт объясняет нулевые показания вольтметра PV2, амперметров PA3–PA4 и фазометров $P\varphi2-P\varphi6$ при их подключении так, как предложено на **рис. 2.**

Комплексные значения входных напряжений $\dot{U}_1^{(4)}$ и тока $\dot{I}_1^{(4)}$ в этом опыте определяются так же, как и в предыдущих.

Модули выходных напряжений $\dot{U}_{22}^{(4)}$ и $\dot{U}_{32}^{(4)}$ и в этом опыте регистрируют вольтметры PV3 и PV4 соответственно.

Фазометр $P\varphi2$ при его подключении так, как показано на **рис. 2**, регистрирует разность начальных фаз входного напряжения $\dot{U}_1^{(4)}$ и выходного тока $\dot{I}_{12}^{(4)}$: $\varphi_2=\varphi_{u1}-\varphi_{i12}$. Показания этого прибора создают возможность определения начальной фазы тока в выходном выводе $1'$: $\varphi_{i12}=\varphi_{u1}-\varphi_2$.

Для определения начальных фаз выходных напряжений $\dot{U}_{22}^{(4)}$ и $\dot{U}_{32}^{(4)}$ необходимо токовые обмотки фазометров $P\varphi5$ и $P\varphi7$ переключить на выходной вывод $1'$. Измерительные обмотки напряжения этих фазометров следует оставить в прежнем состоянии, указанном на **рис. 2**. В результате этих переключений фазометр $P\varphi5$ зарегистрирует разность начальных фаз выходных напряжения $\dot{U}_{22}^{(4)}$ и тока $\dot{I}_{12}^{(4)}$: $\varphi_5=\varphi_{u22}-\varphi_{i12}$, а фазометр $P\varphi7$ зарегистрирует разность начальных фаз выходных напряжения $\dot{U}_{32}^{(4)}$ и тока $\dot{I}_{12}^{(4)}$: $\varphi_7=\varphi_{u32}-\varphi_{i12}$.

В таком случае начальные фазы выходных напряжений $\dot{U}_{22}^{(4)}$ и $\dot{U}_{32}^{(4)}$ определятся так: $\varphi_{u22}=\varphi_5+\varphi_{i12}$, $\varphi_{u32}=\varphi_7+\varphi_{i12}$.

Таким образом формируются изображения выходных напряжений и тока на комплексной плоскости: $\dot{U}_{22}^{(4)}=U_{22}^{(4)}e^{j\varphi_{u22}}$; $\dot{U}_{32}^{(4)}=U_{32}^{(4)}e^{j\varphi_{u32}}$; $\dot{I}_{12}^{(4)}=I_{12}^{(4)}e^{j\varphi_{i12}}$.

По результатам четвертого опыта уравнения (1) примут вид:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1^{(4)} &= B\dot{I}_{12}^{(4)} + E\dot{U}_{22}^{(4)} + K\dot{U}_{32}^{(4)};\\ \dot{I}_1^{(4)} &= D\dot{I}_{12}^{(4)} + G\dot{U}_{22}^{(4)} + M\dot{U}_{32}^{(4)}.\end{aligned}\right\}; \qquad (5)$$

Пятый опыт может быть выполнен тоже при полном отключении электрических нагрузок Н1, Н2 и Н3. Замкнутыми между собой в пятом опыте должны быть выходные выводы $2'$ и $4'$.

Условия выполнения пятого опыта обеспечиваются размыканием ключей S2–S5, S7 и замыканием ключей S1 и S6. В результате выполнения этих условий электроизмерительные приборы фиксируют отсутствие выходных напряжения $\dot{U}_{22}^{(5)}$ и токов $\dot{I}_{12}^{(5)}$ и $\dot{I}_{32}^{(5)}$: $\dot{U}_{22}^{(5)} = 0$; $\dot{I}_{12}^{(5)} = 0$; $\dot{I}_{32}^{(5)} = 0$. В результате отсутствия этих величин вольтметр PV3, амперметра PA2, PA4 и фазометры $P\varphi 2$, $P\varphi 3$, $P\varphi 5 - P\varphi 7$ приобретают нулевые показания. Это если эти приборы подключены так, как показано на **рис. 2**.

Модули и начальные фазы входных напряжения $\dot{U}_1^{(5)}$ и тока $\dot{I}_1^{(5)}$, необходимые для формирования их изображений на комплексной плоскости, определяются так же, как и в первом опыте.

Модули выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(5)}$ и $\dot{U}_{32}^{(5)}$ фиксируют вольтметры PV2 и PV4 соответственно, а модуль тока $\dot{I}_{22}^{(5)}$ – амперметр PA3.

Для определения начальных фаз выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(5)}$ и $\dot{U}_{32}^{(5)}$ необходимо токовые обмотки фазометров $P\varphi 3$ и $P\varphi 7$ переключить на входной вывод 1. Измерительные обмотки напряжения этих фазометров следует оставить в том состоянии, в каком это зафиксировано на **рис. 2**. В результате этих действий фазометр $P\varphi 3$ зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{12}^{(5)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(5)}$: $\varphi_3 = \varphi_{u12} - \varphi_{i1}$, а фазометр $P\varphi 7$ – разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{32}^{(5)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(5)}$: $\varphi_7 = \varphi_{u32} - \varphi_{i1}$. Таким образом, появляется возможность определения начальных фаз выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(5)}$ и $\dot{U}_{32}^{(5)}$: $\varphi_{u12} = \varphi_3 + \varphi_{i1}$, $\varphi_{u32} = \varphi_7 + \varphi_{i1}$.

Фазометр $P\varphi 4$ при его подключении так, как показано на **рис. 2**, фиксирует разность начальных фаз выходных напряжения $\dot{U}_{12}^{(5)}$ и тока $\dot{I}_{22}^{(5)}$: $\varphi_4 = \varphi_{u12} - \varphi_{i22}$. В таком случае начальная фаза выходного тока $\dot{I}_{22}^{(5)}$ определится так: $\varphi_{i12} = \varphi_{u22} - \varphi_4$.

Так формируются изображения на комплексной плоскости выходных напряжений и тока: $\dot{U}_{12}^{(5)} = U_{12}^{(5)} e^{j\varphi_{u12}}$; $\dot{U}_{32}^{(5)} = U_{32}^{(5)} e^{j\varphi_{u32}}$; $\dot{I}_{22}^{(5)} = I_{22}^{(5)} e^{j\varphi_{i12}}$.

Уравнения (1) по результатам пятого опыта примут вид

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1^{(5)} &= A\dot{U}_{12}^{(5)} + F\dot{I}_{22}^{(5)} + K\dot{U}_{32}^{(5)};\\ \dot{I}_1^{(5)} &= C\dot{U}_{12}^{(5)} + H\dot{I}_{22}^{(5)} + M\dot{U}_{32}^{(5)}.\end{aligned}\right\}; \qquad (6)$$

Шестой опыт тоже может быть выполнен при отключении электрических нагрузок Н1, Н2 и Н3. Замкнутыми между собой в этом опыте должны быть выходные выводы $3'$ и $4'$. Это выполняется в результате размыкания ключей S2–S6 и замыканием ключей S1 и S7.

При соблюдении этих требований на выходе анализируемого шестиполюсника будут отсутствовать токи $\dot{I}_{12}^{(6)}$, $\dot{I}_{22}^{(6)}$ и напряжение $\dot{U}_{32}^{(6)}$: $\dot{I}_{12}^{(6)} = 0$; $\dot{I}_{22}^{(6)} = 0$; $\dot{U}_{32}^{(6)} = 0$.

Этот факт подтверждается нулевыми показаниями вольтметра PV4, амперметров PA2–PA3 и фазометров $P\varphi 2 - P\varphi 5$.

Комплексные значения входных напряжения $\dot{U}_1^{(6)}$ и тока $\dot{I}_1^{(6)}$ формируются так же, как и в предыдущих опытах.

Модули выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(6)}$ и $\dot{U}_{22}^{(6)}$ регистрируются вольтметрами PV2 и PV3 соответственно, а модуль тока $\dot{I}_{32}^{(6)}$ – амперметром PA4.

Для определения начальных фаз выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(6)}$ и $\dot{U}_{22}^{(6)}$ измерительные токовые обмотки фазометров $P\varphi 3$ и $P\varphi 5$ следует переключить на начало анализируемого шестиполюсника, на входной вывод 1. Измерительные обмотки напряжения этих фазометров при этом нужно оставить в том состоянии, в каком зафиксировано на **рис. 2**. В результате этих действий фазометр $P\varphi 3$ зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{12}^{(6)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(6)}$: $\varphi_3 = \varphi_{u12} - \varphi_{i1}$, а фазометр $P\varphi 5$ – разность начальных фаз выходного напряжения $\dot{U}_{22}^{(6)}$ и входного тока $\dot{I}_1^{(6)}$: $\varphi_5 = \varphi_{u22} - \varphi_{i1}$. В таком случае искомые начальные фазы выходных напряжений $\dot{U}_{12}^{(6)}$ и $\dot{U}_{22}^{(6)}$: $\varphi_{u12} = \varphi_3 + \varphi_{i1}$, $\varphi_{u22} = \varphi_5 + \varphi_{i1}$.

Фазометр $P\varphi 6$ при его подключении так, как показано на **рис. 2**, регистрирует разность начальных фаз выходных напряжения $\dot{U}_{22}^{(6)}$ и

тока $\dot{I}_{32}^{(6)}$: $\varphi_6 = \varphi_{u22} - \varphi_{i32}$. Поэтому начальную фазу выходного тока $\dot{I}_{32}^{(6)}$ следует определять так: $\varphi_{i32} = \varphi_{u22} - \varphi_6$.

Так формируются изображения выходных напряжения и тока на комплексной плоскости: $\dot{U}_{12}^{(6)} = U_{12}^{(6)} e^{j\varphi_{u12}}$; $\dot{U}_{22}^{(6)} = U_{22}^{(6)} e^{j\varphi_{u22}}$; $\dot{I}_{32}^{(6)} = I_{32}^{(6)} e^{j\varphi_{i32}}$.

А уравнения (1) в результате исполнения пятого опыта принимают вид

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1^{(6)} &= A\dot{U}_{12}^{(6)} + E\dot{U}_{22}^{(6)} + L\dot{I}_{32}^{(6)}; \\ \dot{I}_1^{(6)} &= C\dot{U}_{12}^{(6)} + G\dot{U}_{22}^{(6)} + N\dot{I}_{32}^{(6)}. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (2)–(7) позволит определить формулы для вычисления коэффициентов уравнений А-формы, описывающих работу шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами [13].

Вычислениям должны предшествовать серия экспериментов из шести опытов. Эти могут быть такими, как предложено здесь. Хотя это не догма: в принципе, набор этих опытов может быть и иным, но методика формирования равенств для вычисления искомых коэффициентов останется неизменной.

Подобная методика ранее использовалась для экспериментального определения коэффициентов четырехполюсников, а позже и восьмиполюсника с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами [14].

Заключение

Рассмотренные варианты экспериментального определения численных значений коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами представляют собой один из путей дальнейшего развития теории многополюсников. Они позволят сделать объективный анализ электротехнического оборудования. Разработанные здесь элементы теории шестиполюсников могут быть образцом для формирования подобны методик для пятиполюсников, восьмиполюсников, десятиполюсников, двенадцатиполюсников, четырнадцатиполюсников, которыми в условиях пониженного качества электрической энергии могут быть замещены, например, двухпроводные линии электропередачи, трехфазные линии электропередачи трехпроводного и четырехпроводного исполнений, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка подобных элементов теории многополюсников и иных исполнений. Теория многополюсников, в частности теория шестиполюсников, может оказать существенную помощь в определении параметров электротехнических устройств.

Список литературы

1. Воронов Р.А. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951. 192 с.
2. Зевеке Г.В. Многополюсники. М.: МЭИ, 1971. 23 с.
3. Попов Н.М., Олин Д.М., Кирилин А.А. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестник КрасГАУ. 2017. №2. С. 88–97.
4. Барабанов Е.А., Мальцева И.С., Барабанов И.О. Алгоритм параллельной обработки данных в оптических сетях // Научный вестник НГТУ. 2004. Т.56. №3. С. 88–95.
5. Салимоненко Д.А. Применение методов линейного программирования для определения параметров электрических цепей. Часть 1 // Вестник Башкирского ун-та. 2015. Т.20, №4. С. 1155–1163.
6. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места иповреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып.5. С. 16–21.
7. Китаев А.В., Агбомассу В.Л., Глухова В.И. Схемы замещения электрических двигателей переменного тока // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. №11(87). С. 59–65.
8. Беликов Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Ч. 2. М.: НТФ Энергопрогресс, 2013. 92 с.
9. Федотов Ю.Б., Нестеров С.А., Мустафа Г.М. Повышение эффективности программ моделирования устройств силовой электроники // Apriori. Серия: естественные и технические науки. 2015. №6. С. 1–14.
10. Тлустенко С.Ф., Коптев А.Н. Разработка и исследование методологии информационного обеспечения технологических систем агрегатоно-сборочного производства летательных аппаратов // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т.17. №6(2). С. 491–497.
11. Методика проектирования и перспективная конструкция средств снижения шумов судовых трубопроводов / А.Н. Крюков, Е.В. Шахматов, В.Н. Самсонов, А.Н. Дружин // Фундоментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т.7. №3. С. 67–79.
12. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network // European Researcher. 2013. Vol(40). №2–1, pp. 259–267.
13. Большанин Г.А. Многополюсники. Братск: Изд-во БрГУ, 2017. 337 с.
14. Большанин Г.А, Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Способ расчета коэффициентов восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной линии электропередачи // Системы. Методы. Технологии. 2014. №1(21). С. 71–78.

Поступила 26.04.18
Принята в печать 29.05.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-54-62

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF A SIX-PORT DEVICE WITH TWO INPUT AND FOUR OUTPUT PINS

Georgiy A. Bolshanin – PhD (Eng.), Professor
Bratsk State University, Bratsk, Russia. E-mail: bolshaning@mail.ru.

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes one of the many possible ways to experimentally determine the coefficients of the A-form equations indicating the status of a passive six-port device with two input and four output pins. Such six-port device can be used to substitute devices, elements and parts of electrical circuits or electric power systems. Using the numerical values of the six-port device coefficients obtained in this way, we can establish a quantitative relationship between the input and output power characteristics of the substituted devices. **Objectives:** The objective of this research is to design an experimental technique to determine the numerical values of the coefficients of the A-form equations indicating the status of the passive six-port device with two input and four output pins. **Methods Applied:** This research relied on such techniques as physical and mathematical modelling, full-scale experiment with the use of all appropriate electrical instruments, as well as indirect measurement of the target values. **Originality**: The original feature of this research includes the proposed experimental technique to determine the numerical values of the coefficients of the A-form equations establishing the quantitative relationship between the input and output power characteristics of the passive six-port device with two input and four output pins that substitutes devices, elements or parts of electrical curcuits or electric power systems. **Findings:** The paper describes one of the many possible ways for inferential measurement of the numerical values of the coefficients of the A-form equations indicating the status of the passive six-port device with two input and four output pins. To achieve the above stated goal, a series of six experiments is necessary. Due to these experiments, the numerical values of six different types of the A-form equations can be obtained. Through a combined solution of these equations formulas can be obtained to calculate the coefficients of the equations. **Practical Relevance:** The numerical values of the coefficients of the A-form equations will help establish a quantitative relationship between the input and output power characteristics (such as voltages and currents) of the devices, elements and parts of electrical circuits or electric power systems that can be replaced by a passive six-port device with two input and four output pins. There is a real possibility to establish a quantitative relationship between the coefficients of the A-form equations and the B-form, G-form, H-form, Y-form and Z-form equations, which can also be used to estimate the status of this six-port device. Moreover, the proposed technique can be used to also analyze active six-port devices of a similar design, which means that the proposed technique can offer a comprehensive analysis of the object of interest.

Keywords: Passive six-port device, six-port device coefficients, circuit, voltages, currents, no-load test, short circuit test, voltmeter, ammeter, phase meter.

References

1. Voronov R.A. *Obshchaya teoriya chetyrekhpolyusnikov i mnogopolyusnikov* [The general theory of four-port and multiport devices]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1951, 192 p. (In Russ.)
2. Zeveke G.V. *Mnogopolyusniki* [Multiport devices]. Moscow: MPEI, 1971, 23 p. (In Russ.)
3. Popov N.M., Olin D.M., Kirilin A.A. Method of signal transmission over 0.38 kV distribution networks of rural areas. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2017, no. 2, pp. 88–97. (In Russ.)
4. Barabanov E.A., Maltseva I.S., Barabanov I.O. The algorithm of concurrent data processing in optical networks. *Nauchny vestnik NGTU* [Scientific bulletin of NSTU], 2004, vol. 56, no. 3, pp. 88–95. (In Russ.)
5. Salimonenko D.A. Application of linear programming methods to determine the parameters of electrical circuits. Part 1. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2015, vol. 20, no. 4, pp. 1155–1163.
6. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Locating the fault place on a power line by the instantaneous values of the alarm oscillograms. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2016, no. 5, pp. 16–21. (In Russ.)
7. Kitaev A.V., Agbomassu V.L., Glukhova V.I. AC motor equivalent circuits. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye skhemy* [Electrical and computer systems], 2013, no. 11(87), pp. 59–65. (In Russ.)
8. Belikov Yu.S. *Mnogopolyusnik kak model elektricheskikh system. Chast 2* [Multiport device as a model electrical system. Part 2]. Moscow: Energoprogress, 2013, 92 p. (In Russ.)
9. Fedotov Yu.B., Nesterov S.A., Mustafa G.M. Enhanced efficiency of the programmes for simulation of power electronic devices. *Apriori.* Series: Natural and engineering sciences, 2015, no. 6, pp. 1–14. (In Russ.)

10. Tlustenko S.F., Koptev A.N. Developing and studying ways to provide information support for the engineering systems of aircraft assembly lines. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN* [Bulletin of the RAS Samara Scientific Center], 2015, vol. 17, no. 6 (2), pp. 491–497. (In Russ.)
11. Kryukov A.N., Shakhmatov E.V., Samsonov V.N., Druzhin A.N. Design methodology and innovative design of noise control devices used in vessel pipelines. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2014, vol. 7, no. 3, pp. 67–79. (In Russ.)
12. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of the Compound Ventilating Network. European Researcher. 2013. Vol (40). №2–1. pp. 259–267.
13. Bolshanin G.A. *Mnogopolyusniki* [Multiport devices]. Bratsk: Publishing House of BrSU, 2017, 337 p. (In Russ.)

Received 26/04/18
Accepted 29/05/18

Образец для цитирования

Большанин Г.А. Экспериментальное определение коэффициентов шестиполюсника с двумя входными и четырьмя выходными выводами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 54–62, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-54-62

For citation

Bolshanin G.A. Experimental determination of the coefficients of a six-port device with two input and four output pins. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 54–62, https://doi.org/10,18503/1995-2732-2018-16-2-54-62

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипин Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0002-3564-0310

Барановский Кирилл Васильевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0002-2572-166X

Билалов Дамир Харасович – доцент кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: master_ddd@mail.ru

Большанин Георгий Анатольевич – канд. техн. наук, проф., Братский государственный университет, Братск, Россия. E-mail: bolshaning@mail.ru.

Вазиров Назир Шамирович – ст. преп. кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан, E-mail: nazir7@mail.ru

Ганиев Изатулло Наврузович – академик АН Республики Таджикистан, д-р хим. наук, проф., зав. лабораторией «Коррозионностойкие материалы», Институт химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан, E-mail: ganiev48@mail.ru

Гущина Марина Сергеевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: gushchina.ms@mail.ru.

Денисов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: denisovservl@yandex.ru

Кожонов Алмаз Кыргызбаевич – канд. техн. наук, генеральный директор ОсОО «Geotechservice Technology», Бишкек, Кыргызская Республика. E-mail kozhonov@mail.ru

Лехов Олег Степанович – д-р техн. наук, профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Ляшенко Василий Иванович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела Государственного предприятия «Украинский научно–исследовательский и проектно–изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина. E-mail:vilyashenko2017@gmail.com

Михалев Александр Викторович – ст. преп. кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: mialex@trubprom.com

Молмакова Мира Сапаровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлургия и металлургические процессы», Институт горного дела и горных технологий им.акад. У. Асаналиева при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика. E-mail: molmakova_m@mail.ru

Никитенко Ольга Александровна – канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: olganikitenko@list.ru.

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0002-3593-4319

Норова Муаттар Турдиевна – канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Коррозионностойкие материалы», Институт химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан, E-mail: muattar_1975@mail.ru

Полецков Павел Петрович – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru.

Рожков Артем Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0003-3007-1099

Смирнов Алексей Алексеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0002-8949-1525

Соколов Игорь Владимирович – д-р техн. наук, зав. лабораторией подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: geotech@igduran.ru, OrcID 0000-0001-7841-5319

Стеканов Павел Александрович, научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: stekgroup@mail.ru.

Хоменко Олег Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор кафедры подземной разработки месторождений, Национальный технический университет «Днепровская политехника» Министерства образования и науки Украины, Днепр, Украина. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

Шевелев Максим Михалович – инженер кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: MMShevelev@mail.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.
Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

– **Разработка полезных ископаемых.**
– **Металлургия черных, цветных и редких металлов.**
– **Обработка металлов давлением.**
– **Литейное производство**
– **Технологии обработки материалов.**
– **Материаловедение и термическая обработка металлов.**
– **Стандартизация, сертификация и управление качеством.**
– **Моделирование металлургических процессов.**
– **Новые технологические процессы и оборудование.**
– **Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы.**
– **Управление, автоматизация и информационные технологии в металлургии.**
– **Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.**
– **Экология металлургической отрасли.**
– **Экономика, управление и рынок продукции.**
– **Стратегия развития, подготовка и обучение специалистов.**
– **Информация и др.**

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

Онлайн-перевод запрещается!

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

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)
2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки
2.3. Результаты исследования и их обсуждение
2.4. Заключение (выводы)
2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

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

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, 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.

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»).