

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2019. Т.17, №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. Колокольников (Россия)

Главный редактор: О.Н. Тулупов (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. Дья (Польша),
Р. Диосан (Индия), Р. Кавалла (Германия),
В.Н. Калмыков (Россия), Д.Р. Каплунов (Россия),
Д. Милованович (Сербия), К. Мори (Япония),
И.Б. Муслирин (Малайзия), А.Б. Найзабеков (Казахстан),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),
Г. Роджерсон (Великобритания), В.М. Счастливец (Россия),
Ю Фенг (КНР), Р. Цин (Великобритания)

Редакция:

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун

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

Редактор: Н.В. Кутекина

Технический редактор: И.В. Ключникова

Перевод на английский: В.И. Елесина, О.Е. Сухих

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019

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

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

код html: <a href=<http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-technicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>>

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402

Тел.: (3519) 22-14-93.

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

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

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Адрес типографии:

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

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии

Выход в свет 26.06.2019. Заказ 175. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2019. Vol. 17, 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: O.N. Tulupov (Russia)

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

Deputy Editor-in-Chief:

S.E. Gavrishev (Russia), V.R. Khrumshin (Russia),

A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia)

V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia)

M. Dabala (Italy), H. Dyja (Poland),

R.O. Dusane (India), Feng Ye (P.R.China),

V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),

R. Kawalla (Germany), D. Milovanovic (Serbia),

K. Mori (Japan), I.B. Musirin (Malaysia),

A.B. Naizabekov (Republic of Kazakhstan),

M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (Great Britain),

V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (Great Britain),

V.M. Schastlivtsev (Russia), J.-B. Vogt (France)

Editorial Staff:

First Deputy Editor-in-Chief: G.S. Gun

Executive Editors: M.A. Polyakova, M.V. Shubina

Editor: N.V. Kutekina

Technical Editor: I.V. Klyunnikova

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

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019

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

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University

(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

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

Editorial office:

402, 45/2 Karla Marksa prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Phone: +7 (3519) 221 493.

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

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

Editorial office:

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

Printing office:

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

Publication date: 26.06.2019. Order 175. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>ГолИК В.И., ДмИтраК Ю.В., Разоренов Ю.И.</i> Прорывные достижения добытчиков урана на севере Казахстана	4
<i>Чебан А.Ю.</i> Способ подготовки к выемке сезонно промерзших уступов и оборудование для его осуществления	11
Металлургия черных, цветных и редких металлов	17
<i>Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В.</i> Современные процессы ковшей десульфурации чугуна	17
Обработка металлов давлением	24
<i>Phalke V., Nayak S., Narasimhan K., Nandedkar V.M.</i> 3D Coupled Thermo-Mechanical FE analysis of effect of process parameters in ring rolling process	24
<i>Выдрин А.В., Шкуратов Е.А.</i> Аль-дожумайли Мохаммед Жасим Мохаммед, Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане	32
Технологии обработки материалов	38
<i>Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V.</i> Sustainable stainless steel – A review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines	38
Материаловедение и термическая обработка металлов	49
<i>Yuriev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F., Qin R., Tang G., Konovalov S.V., Semin A.P.</i> Transformations of fine structure and carbon atoms distribution in 100-m differentially hardened rails under long term operation	49
Надежность и долговечность металлургического оборудования	55
<i>Попов И.П.</i> Реактивная и полная механические мощности вибрационных машин	55
<i>Найгерт К.В., Целищев В.А.</i> Повышение эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса	60

CONTENTS

Mineral Mining	4
<i>Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I.</i> Uranium mining breakthroughs in northern Kazakhstan	4
<i>Cheban A.Yu.</i> Preparation of seasonally rozen scarp slopes for excavation and the relevant equipment	11
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	17
<i>Ushakov S.N., Bigeev V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V.</i> Modern processes of iron desulphuration in the ladle	17
Metal Forming	24
<i>Phalke V., Nayak S., Narasimhan K., Nandedkar V.M.</i> 3D Coupled Thermo-Mechanical FE analysis of effect of process parameters in ring rolling process	24
<i>Vydrin A.V., Shkuratov E.A., Al-Jumaili M.J.M.</i> Algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill	32
Material Process Engineering	38
<i>Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V.</i> Sustainable stainless steel – A review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines	38
Materials Science and heat treatment of metals	49
<i>Yuriev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F., Qin R., Tang G., Konovalov S.V., Semin A.P.</i> Transformations of fine structure and carbon atoms distribution in 100-m differentially hardened rails under long term operation	49
Reliability and Service Life of Metallurgical Facilities	55
<i>Popov I.P.</i> Reactive and full mechanical power of vibration machines	55
<i>Naigert K.V., Tselishchev V.A.</i> Improving the magnetodynamic pump performance	60

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 504.55.054:662

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-4-10>ПРОРЫВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ДОБЫТЧИКОВ УРАНА
НА СЕВЕРЕ КАЗАХСТАНАГолик В.И.¹, Дмитрак Ю.В.¹, Разоренов Ю.И.²¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Перспективы развития ядерной энергетики связаны с увеличением объемов добычи радиоактивных руд, поэтому исследования в этом направлении являются актуальными. **Цель исследования.** Систематизация достижений урановых предприятий для использования их в дальнейшем прогрессе добычи минерального сырья и других металлов. **Используемые методы.** Обобщение и критический анализ достижений предприятий мирового уровня с выделением их научной и практической значимости. **Новизна публикуемых сведений** заключается в том, что большинство из них и в настоящее время не стали достоянием широкой научной и инженерной общественности в силу ведомственных причин. **Результаты.** Сформулированы основные направления реализации технологических решений. Охарактеризована технология управления свойствами твердеющей смеси путем воздействия высокой энергией в дезинтеграторах. Приведены результаты опытно-промышленного подземного выщелачивания балансовых руд. Дана справка о крупных достижениях на рудниках структурных подразделений Целинного горно-химического комбината. Более детализированы сведения о технологии повышения вязкости способности добавок к цементу активацией в дезинтеграторе и развитии ее для выщелачивания металлов из некондиционного металлотесного сырья с извлечением металлов до 70% от содержания в исходных хвостах. Обозначена концепция природоохранной эксплуатации недр. Приведены сведения о транспортировании твердеющих смесей по вибропроводу на расстояние до 2000 м. **Практическая значимость.** Прорывное совершенствование производственных процессов добычи урана, осуществленное на предприятиях атомной энергетики, могут найти применение при добыче металлов. В первую очередь из вскрываемых руд. Увеличение объемов производства некондиционных запасов путем комбинирования традиционных технологий разработки с технологиями выщелачивания металлов резервом оздоровления экономики горных предприятий в условиях рыночной экономики.

Ключевые слова: радиоактивные руды, достижения мирового уровня, дезинтегратор, подземное выщелачивание балансовых руд, вибротранспортирование твердеющих смесей.

Введение

Разработка радиоактивных месторождений в СССР во второй половине прошлого века осуществлялась в России, Украине, Казахстане, Киргизии, Узбекистане, Таджикистане, Эстонии и в ряде зарубежных стран (рис. 1).

Добычей урана занимались структурные единицы Министерства среднего машиностроения, а затем Министерства атомной энергии и промышленности: Восточный ГОК (г. Желтые Воды, Украина), Прикаспийский ГОК (г. Шевченко, Казахстан), Приаргунский ГХК (г. Краснокаменск, Россия), Целинный ГХК (г. Степногорск, Казахстан), Навоийский ГХК (г. Навои, Узбекистан), Ленинобадский ГХК (г. Чкаловск, Узбекистан), Киргизский ГРК (п. Аксуек, Киргизия), Малышевское ру-

доуправление (п. Малышевка, Россия), Лермонтовское рудоуправление (г. Лермонтов, Россия) и др.

Освоение урановых месторождений обеспечивалось привлечением в отрасль ученых и специалистов и созданием ускоренными темпами инфраструктур, транспортных и энергетических систем на некомфортных территориях [4].

На предприятиях МАЭП СССР в Казахстане разработаны и промышленно освоены новейшие для своего уровня технологии мирового уровня.

Разработана техника новых поколений, например, техника новых поколений с электрогидро-фицированным приводом. Освоены природно-ресурсосберегающие технологии, например, с выщелачиванием металлов из руд. Для ускоренного ввода в эксплуатацию новых рудных полей скорость проходки горных выработок одним забоем доведена до 805,2 м в месяц.

© Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., 2019



Рис. 1. Крупнейшие месторождения урана СССР и стран народной демократии



Рис. 2. Подразделения Целинного горно-химического комбината: 1–5 рудоуправления

Целинный горно-химический комбинат с центром в г. Степногорск и структурными единицами в п. Шантобе, Аксу, Заозерный, Красногорск и Володарское разрабатывали месторождения руд весьма различающихся морфологических и вещественных типов в трех северных областях Казахстана (рис. 2).

Перспективы развития ядерной энергетики предполагают увеличения темпов добычи радиоактивного сырья при ухудшении условий разработки месторождений, поэтому исследования в этом направлении пользуются особой актуальностью [8, 10–11]. Казахстан занимает почетное третье место в мировой добыче урановых руд и наращивает производство этого энергетического сырья, поэтому обобщение и развитие достигнутого своевременно и заслуживает внимания.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Базой исследований наследия горняков-атомщиков являются труды Попова Г.Н., Нифонтова Б.И., Лобанова Д.П., Котенко Е.А., Симакова В.А., Куликова А.В., Петросова А.А., Слепцова М.Н., Мосинца В.Н., Иванова В.Г., Бубнова В.К. и др.

История развития технологий управления состоянием массива при подземной разработке месторождения связана с работами Ветрова С.В., Мясникова К.В., Руденко В.В., Рычик Ф.Ф., Котенко Е.А., Голика В.И., Култышева В.И., Бронникова Д.М., Замесова Н.Ф., Цыгалова М.Н., Хомякова В.И. и др.

По данным публикаций и опыта научно-практической деятельности авторов произведен краткий ретроспективный анализ истории развития горной подотрасли уранового производства и

критически обобщены наиболее крупные из достигнутых результатов. Из широкого круга функций горного предприятия выявлены, сопоставлены и проанализированы наиболее важные и перспективные направления развития отрасли, до сих пор сохраняющие свою новизну.

Результаты исследования и их обсуждение

В подразделениях комбината созданы и реализованы в промышленном масштабе новые технические и технологические решения, направленные на совершенствование конструкции технологической разработки, способов подготовки и нарезки блоков и интенсификацию горных работ.

Получение прибыли с минимизацией ущерба окружающей среде достигалось реализацией технологических решений, в том числе:

- оптимизация процесса управления состоянием массива разделением его на геомеханически сбалансированные участки с погашением экономичными способами;
- групповая подготовка блоков к очистной выемке наклонными съездами;
- выщелачивание металлов из забалансовых руд и отходов переделов;
- комбинирование традиционных и инновационных технологий разработки месторождений.

Основу совершенствования составляли комбинированные технологии, где приоритетную роль играли твердеющие смеси (рис. 3).

Оптимальная по коллективным показателям схема включала элементы: добыча богатых руд с закладкой пустот твердеющей смесью и переработкой руд на гидromеталлургическом заводе; добыча рядовых руд с закладкой твердеющей смесью и кучным выщелачиванием не земной поверхности; блоковое выщелачивание бедных балансовых и забалансовых руд на месте локализации [2, 7, 9].

Вовлечение в переработку забалансовых руд дало возможность комбинату экономически эффективно обрабатывать руды с уменьшающимся содержанием металлов.

В комбинате получила право на существование технология управления свойствами твердеющей смеси путем воздействия высокой энергии в дезинтеграторах, получившая дальнейшее развитие при выщелачивании металлов в активаторах уже на Юге России (рис. 4).

На месторождении Восток (рудоуправление 1) при отработке рудного тела в неустойчивых породах применили перекрытие из тростов и дерева, освоили буровые каретки СВ-1 П, погрузочно-доставочные машины ЛБ-1/1000 и МПДН-1А, электро- и гидрперфораторы и буровой молоток Осиповского. Впервые в мировой практике осу-

ществлено опытно-промышленное подземное выщелачивание балансовых руд с блоковым (70%) и сквозным извлечением (87%), что превысило показатели традиционного подземного способа.

На месторождении Маньбай (рудоуправление 2) мощное штокерское рудное тело интенсивно отработывали одновременно открытым и подземным способом с закладкой пустот композитными смесями. В штателе месторождения 20 лет выщелачивали забалансовые уран-молибденовые руды и хвосты суспензионного обогащения. Осуществлено продолжающееся и в настоящее время скважинное выщелачивание руд месторождения Семизбай в условиях, где любая другая технология не может быть эффективной. Комбинат был единственным предприятием, где были освоены все способы выщелачивания металлов из урановых руд.

Сложно-структурное месторождение Заозерное (рудоуправление 3) разрабатывали с комбинированным управлением горным давлением путем деления на геомеханически обособленные участки.

Месторождение пологого падения Ишимское (рудоуправление 4) отработано с оставлением более 1 млн м³ пустот без закладки с обеспечением сохранности земной поверхности. Месторождения Шокпак и Камышовое отработывали с закладкой пустот твердеющими смесями и вибротранспортированием твердеющей смеси на 2 км. На месторождении Ишимское в породах с коэффициентом крепости 14 по Протодакинову за месяц одним забоем пройдено 805,2 м квершлага сечением 7,4 м².

На месторождении Косачинное (рудоуправление 5) массивное рудное тело отработывали одновременно карьером и подземным рудником с закладкой пустот твердеющими смесями на основе композитного вяжущего из активированного гранулированного шлака.

В ЦГХК в 1970-х годах освоены колонковые станки КБУ-50 и КБУ-80 и самоходные станки ПБУ-80, ПБУ-70, СБ-70 и комплексы КПВ и 2 КВ. На заводах комбината выпускали перфораторы, буровые станки и погрузочно-доставочные машины типа МПДН-1М, а затем электрогидрофицированную технику: перфораторы 2ГП, 3ГП и др.

На месторождении Шокпак впервые в мировой горной практике в технологической цепи закладочного комплекса использована технология повышения вяжущей способности добавок к цементу активацией в дезинтеграторе. В течение 10 лет дезинтеграторная установка ДУ-65 с двигателями мощностью 200–250 кВт и самофутерующимися

роторами обеспечивала выход активного класса до 55%, а в комбинации с вибромельницей – до 70%, что позволяло активированному шлаку конкурировать с цементом. Эффект приращения активности достигал 40% по сравнению с базовым [3].

Дезинтеграторная технология получила развитие в рамках направления комбинированного выщелачивания металлов из некондиционного металлосодержащего сырья в ходе экспериментального извлечения на полиметаллических рудах Садоны, углях Донбасса и железистых кварцитах КМА. Она обеспечила извлечение металлов до 70% от содержания в исходных хвостах с близким к фоновому значению остаточным содержанием. Особенность технологии заключается в том, что

реагент подается в рабочий орган дезинтегратора, поэтому извлечение металлов в раствор происходит одновременно с разрушением кристаллов в результате запрессовывания реагента в образующиеся от деформации частиц трещины.

Установившейся тенденцией мирового горного производства является ухудшение условий разработки месторождений полезных ископаемых с усилением негативного влияния на окружающую среду. С ней не согласуется, например, потери в виде целиков более 60% запасов или сброс в технологические пустоты хвостов обогащения без извлечения из них попутных полезных компонентов, суммарная стоимость которых сопоставима с извлекаемой стоимостью основного компонента.

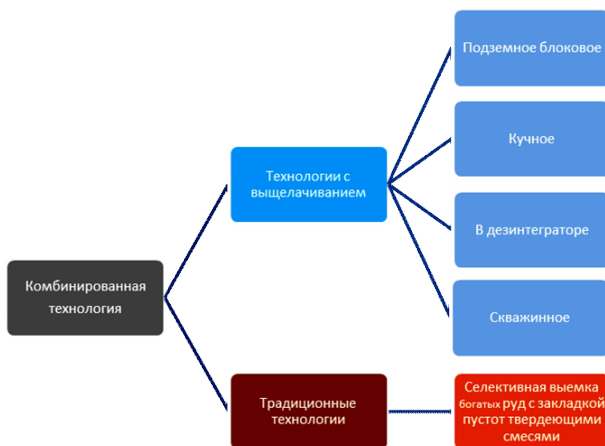


Рис. 3. Схема комбинирования технологий разработки месторождений

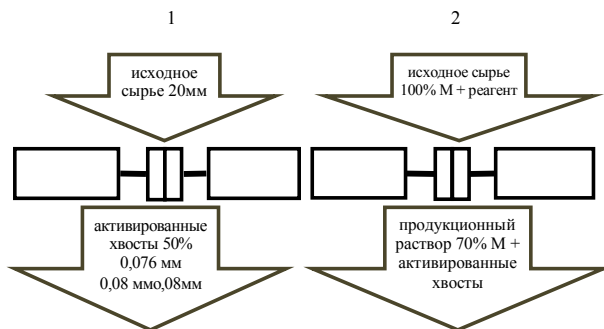


Рис. 4. Функции дезинтеграторов: 1 – повышение активности компонентов твердеющих смесей; 2 – извлечение металлов и повышение активности компонентов

При неоспоримых достоинствах технология с закладкой твердеющими смесями не уменьшает объемов выдаваемого на поверхность сырья и количество опасных отходов переработки.

И только технология с выщелачиванием металлов решает проблему безотходности радикально, позволяя извлечь все металлы и превратить вторичные хвосты переработки в доступное без санитарных ограничений сырье [5–6].

Нарастание объемов горного производства обусловлено увеличивающимися потребностями в количестве и номенклатуре полезных ископаемых, инструментом управления которыми является соблюдение нормативных требований к сохранности окружающей среды.

Оценивать перспективы совместного развития горного дела и сохранности окружающей среды следует, исходя из дальнейшего ухудшения условий добычи, увеличения объемов добычи минерального сырья и ужесточения требований к сохранности окружающей среды.

Горными работами ежегодно нарушается около 150 тыс. гектаров земель, из которых около 40% – сельскохозяйственные угодья. При добыче 1 т цветных металлов образуется до 10 тыс. т отходов, а при переработке – до 100 тыс. т.

Повышение темпов и качества добычи металлов со снижением опасности для окружающей среды может быть обеспечено путем комбинирования прогрессивных технологических решений, в том числе добыча богатых руд с закладкой пустот твердеющими смесями; подземное выщелачивание бедных руд; кучное выщелачивание выданных на поверхность бедных руд; выщелачивание хвостов переработки в активаторах типа дезинтегратор.

Выщелачивание хвостов переработки в активаторах позволяет извлечь до 50–70 % теремых ранее металлов с получением побочных товаров, в том числе строительное сырье, обессоленная вода, хлор, водород, кислород, кислоты и щелочи, реализация которых удешевляет основное производство.

Концепция природоохранной эксплуатации недр включает в себя направления:

- снижение разубоживания руд при закладке

пустот твердеющими смесями;

- перевод неактивных запасов в активные при выщелачивании бедных руд;
- комплексирование способов переработки руд.

Перспективы закладочных технологий связаны с использованием хвостов обогащения и хвостов подземного выщелачивания [1]. Переработанные хвосты обогащения становятся сырьем для изготовления твердеющих смесей, а выщелоченные руды природными вязкими веществами скрепляются в массив, прочность которого достаточна в большинстве случаев (0,5–1,0 МПа).

В то время как добыча сырья для приготовления смесей осложняет экологическую ситуацию в регионе, в хранилищах находятся отходы, которые не могут использоваться только из-за наличия в них металлов. Поэтому развивается направление извлечения металлов из хвостов горного производства путем комбинирования процессов механической активации и химического выщелачивания.

Обработка в дезинтеграторе повышает активность веществ на величину до 40% и показатели извлечения металлов из хвостов обогащения в 1,2–1,4 раза на 2 порядка времени быстрее.

Параметры транспортирования смесей улучшали путем воздействия на трубопровод. Использовали закономерность возникновения сопротивления транспортированию в трубопроводе при приложении сил динамического трения. При полном заполнении трубы значительной длины сопротивление транспортированию в трубе превышает вес смеси и дискредитирует сам процесс. При сообщении же трубопроводу вибраций сопротивление существенно уменьшается, что увеличивает влияние напорного потока. Активность твердеющих смесей может быть увеличена до 20% в процессе их транспортирования по трубопроводу (рис. 5).

Практика месторождения Шокпак свидетельствует о возможности доставки смесей по трубопроводу на расстояние до 2000 м с повышением их активности примерно на 20%.

Результаты горняков Казахстана в наше время могут найти развитие в других странах.

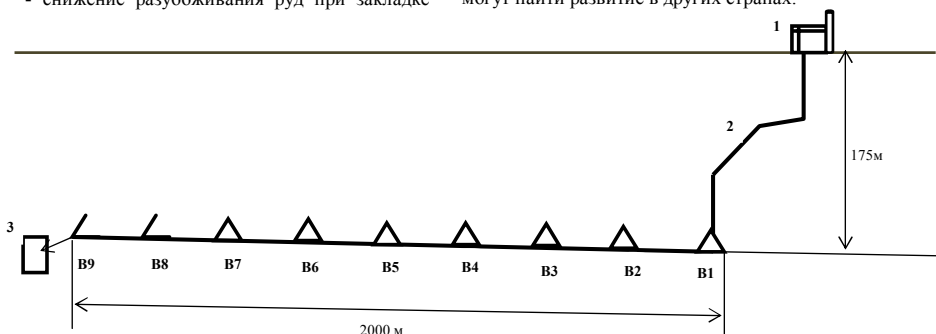


Рис. 5. Схема вибротранспорта твердеющих смесей от закладочного комплекса месторождения Шокпак к месторождению Камышовое: 1 – закладочный комплекс; 2 – вертикальная часть трубопровода; 3 – закладочная камера блока; B1–B9 – вибровозбудители

Закключение

Разработка и внедрение рациональных технологий добычи урана основываются на прорывном совершенствовании производственных процессов. Эффективность инновационных технологий обеспечивается обоснованностью как физико-химических процессов, так и процессов подготовки руд к переработке.

Вовлечение в производство некондиционных запасов путем комбинирования традиционных технологий разработки с технологиями выщелачивания металлов является резервом оздоровления экономики горных предприятий, особенно при конверсии производства в условиях рыночной экономики.

Список литературы

1. Белоусов А.С. Оптимизация закладочных работ на урановых рудниках ПАО «ППГХО» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №7.
2. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. 2013. № 5. С. 93–97.
3. Голик В.И., Комащенко В.И., Жабин А.Б. Активация отходов горного производства при выщелачивании металлов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 3. С. 3–13.

4. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // Горный журнал. 2016. № 3. С. 6–12.
5. Исследование твердой фазы отходов обогащения урановых руд / Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Тедеев М.Н., Касаткин В.В., Кузин Р.Е. // Горный журнал. 2012. №8.
6. Подземные геотехнологии подземной разработки рудных месторождений / Лизункин В.М., Лизункин М.В., Беидина В.И. и др. // ГИАБ. 2014. №1.
7. Технико-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля / Морозов А.А., Смагин А.П., Безносос Г.Ф., Юртаев А.Н. // Горный журнал. 2013. №8–2.
8. Святецкий В.С., Литвиненко В.Г., Морозов А.А. О возможности и условиях применения блочного подземного выщелачивания урановых руд Стрельцовского месторождения // Горный журнал. 2012. №10.
9. Святецкий В.С. Исследования возможности пастовой закладки камер на основе хвостов переработки урановых руд ПАО «ППГХО» // ГИАБ. 2015. №10.
10. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 73–119.
11. Jarvie-Eggart M. E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.

Поступила 28.01.19

Принята в печать 27.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-4-10>

URANIUM MINING BREAKTHROUGHS IN NORTHERN KAZAKHSTAN

Vladimir I. Golik – DSc (Eng.), Professor

Department of Mining, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Yuriy V. Dmitrak – DSc (Eng.), Professor, Rector

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Yuriy I. Razorenov – DSc (Eng.), Professor, Vice Rector

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Abstract. Problem Statement. Prospective development of nuclear power is associated with an ever greater scale of radioactive ore mining. That is why research in this area is of relevance. **Objectives.** To systematize the achievements in uranium mining for promoting further progress in mining of this mineral and other metals. **Methods Applied.** Summarization and critical overview of the achievements of global importance highlighting their scientific and practical relevance. Originality of this publication lies in the fact that it contains a lot of information that has not been made public before for bureaucratic reasons. **Findings.** The authors of this paper define

key implementation areas for the technical solutions; describe the technique to control the properties of the solidifying agent by applying high energy in disintegrators; describe the results of trial underground leaching of commercial ores; give reference to major mining achievements of Tselinny Mining and Processing Works; provide more details about the method of enhancing the binding capacity of cement additives through activation in a disintegrator and how the method could be advanced to be applicable for metals leaching from low-grade metal containing material with the recovery rate reaching 70% of the initial tailings concentration; define the concept of

sustainable subsoil management; provide details about the use of vibrating conveyors for transporting solidifying agents for distances of up to 2,000 m. **Practical Relevance.** Due to breakthroughs in uranium mining achieved by nuclear power industry, the advanced processes may find application in metal mining (from breakable ores, in the first place). Raising the output in the mining of low-grade reserves by combining conventional mining technology with metal leaching can potentially provide a boost to the mining sector in the market economy environment.

Keywords: Radioactive ores, achievements of global importance, disintegrator, underground leaching of commercial ores, vibrating conveyors for solidifying agents.

References

1. Belousov A.S. Optimization of backfilling at the uranium mines of PIMCU PJSC. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 7, pp. 67–73. (In Russ.)
2. Golik V.I. Conceptual approaches to the creation of low- and zero-waste mining production on the basis of combining physicochemical and physicochemical geotechnologies. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2013, no. 5, pp. 93–97. (In Russ.)
3. Golik V.I., Komashchenko V.I., Zhabin A.B. Activation of mining waste in metal leaching. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth sciences], 2016, no. 3, pp. 3–13. (In Russ.)
4. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. "Leading Design and Research Institute of Industrial Technology" – A 65-year long path. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2016, no. 3, pp. 6–12. (In Russ.)
5. Karamushka V.P., Kamnev E.N., Tedeev M.N., Kasatkin V.V., Kuzin R.E. Investigation of the solid phase of uranium ore dressing waste. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2012, no. 8, pp. 45–52. (In Russ.)
6. Lizunkin V.M., Lizunkin M.V., Beidina V.I. et al. Underground geotechnologies for underground mining of ore deposits. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2014, no. 1, pp. 123–128. (In Russ.)
7. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., Yurtaev A.N. Underground block leaching of uranium from low-grade ores of Strel'tsovsk ore field. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2013, no. 8-2, pp. 104–108. (In Russ.)
8. Svyatetskiy V.S., Litvinenko V.G., Morozov A.A. Underground block leaching of uranium ores from the Strel'tsovsk deposit: Possible application and conditions. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2012, no. 10, pp. 37–45. (In Russ.)
9. Svyatetskiy V.S. Understanding the possibility of paste filling using uranium mill tailings of PIMCU PJSC. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 10, pp. 89–94. (In Russ.)
10. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, Vol. 37, No. 2, pp. 73–119.
11. Jarvie-Eggart M. E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.

Received 28/01/19

Accepted 27/02/19

Образец для цитирования

Голік В.І., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.І. Прорывные достижения добытчиков урана на севере Казахстана // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 4–10. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-4-10>

For citation

Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I. Uranium mining breakthroughs in northern Kazakhstan. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 4–10. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-4-10>

СПОСОБ ПОДГОТОВКИ К ВЫЕМКЕ СЕЗОННО ПРОМЕРЗШИХ УСТУПОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В настоящее время в России происходит формированию новых центров добычи угля с постепенным смещением угледобычи в восточную часть страны. Повышение требований к обеспечению экологической и промышленной безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства предопределяет необходимость изыскания новых геотехнологических решений, оптимизации параметров горных работ и оборудования, техники и технологий. Вскрышные породы многих дальневосточных угольных разрезов представлены мелкозернистыми наносными породами, которые в талом состоянии легко разрабатываются карьерными экскаваторами, однако в холодное время года при промерзании их прочность и сопротивление выемке многократно возрастают, что приводит к необходимости применения буровзрывных работ. Известны различные способы и оборудование для механического разрушения мерзлоты, однако при значительной глубине промерзания откосов уступов возникают проблемы с их безвзрывной подготовкой к выемке. **Цель работы.** Создание эффективного и компактного сменного рабочего оборудования для гидравлического экскаватора, обеспечивающего возможность ослабления массива промерзшего на глубину до 2,0–2,5 м щелями, при этом конструктивная схема машины должна обеспечивать возможность нарезания щелей в откосах уступов с криволинейной поверхностью. **Результаты.** В статье предлагается усовершенствованная схема ослабления поверхности промерзших уступов с применением гидравлического экскаватора с комбинированным сменным рабочим оборудованием, включающим фрезу, термоторелку и рыхлитель. Разупрочнение сезонно промерзшего поверхностного слоя уступа ведется путем нарезания щелей, которое производится на всю глубину промерзания, при этом разупрочнение откоса осуществляется наклонными щелями, а разупрочнение рабочей площадки – горизонтальными щелями вдоль уступа. Первоначально щель нарезает фреза. В случае если глубина промерзшего слоя превышает глубину щели, нарезанной фрезой, то посредством термоторелки производится термическое воздействие на оставшийся промерзшим слой, в результате которого происходит оттаивание мерзлоты, после чего рыхлитель прорезает углубочную щель в оттаявшей породе, что обеспечивает разупрочнение промерзшего слоя на всю глубину. **Выводы.** Предлагаемые способ и оборудование для подготовки к выемке сезонно промерзших уступов позволяют упростить технологический процесс ведения открытых горных работ в зимнее время, снизить себестоимость добычи полезного ископаемого и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: вскрышные работы, откос уступа, мерзлота, нарезание щелей, гидравлический экскаватор, фрезерный рабочий орган, термоторелка.

Введение

Горнодобывающая промышленность является важной составляющей экономики большинства регионов Дальнего Востока, на территории которых ведется освоение месторождений золота, серебра, платины, алмазов, бурого и каменного угля, черных и цветных металлов, а также других полезных ископаемых. Разработка угольных месторождений ведется практически во всех регионах Дальнего Востока – в Амурской, Сахалинской, Магаданской и Чукотской областях, Хабаровском и Приморском краях, Республике Саха (Якутия) [1–2]. В 2016 году добычу угля в Дальневосточном федеральном округе осуществляли 35 угольных компаний и организаций [3]. Основным направлением поставок угля на Дальнем Востоке в настоя-

щее время остаются электростанции, однако существенно выросла доля угля, идущего на экспорт. В соответствии с принятыми в «Программе развития угольной промышленности России на период до 2030 г.» целями по формированию новых центров добычи угля происходит постепенное смещение угледобычи в восточном направлении страны. При этом планируется, что доля Восточной Сибири в добыче угля возрастет с 23,7 до 34,0%, а Дальнего Востока – с 9,7 до 15,2% [4].

Добыча угля в Дальневосточном регионе осуществляется преимущественно открытым способом. С развитием промышленности и ростом ее потребности в полезных ископаемых открытым способом, ввиду его масштабности, стал для альтернативного подземного, по сути, недостижимым как по фактору производственной мощности горных предприятий, условиям обеспечения без-

опасности горных работ, так и по показателям инвестиционной привлекательности [5–6]. Повышение требований к обеспечению экологической и промышленной безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства предопределяют необходимость изыскания новых геотехнологических решений, оптимизации параметров горных работ и оборудования, техники и технологий с учетом принципов рационального сочетания различных ресурсосберегающих, малоотходных и ресурсовоспроизводящих процессов открытых горных работ [7–9]. Развитие технических средств позволяет вести на месторождениях безвзрывную выемку все более прочных горных пород [10–12].

Постановка проблемы

Вскрышные породы Еркевещкого, Лучегорского, Райчихинского и некоторых других дальневосточных угольных разрезов представлены глинами, суглинками или супесями. Данные мелкозернистые наносные породы относятся к мягким породам и в талом состоянии легко разрабатываются одноковшовыми карьерными экскаваторами, однако в холодное время года при промерзании их прочность и сопротивление выемке многократно возрастают, что приводит к значительным сложностям при ведении вскрышных работ. В ноябре месяце при небольшой глубине промерзания (до 0,5–0,7 м) карьерные экскаваторы, осуществляющие вскрышные работы, достаточно успешно «взламывают» промерзший откос непосредственно рабочим оборудованием, однако при этом на агрегаты и металлоконструкцию экскаватора воздействуют значительные динамические нагрузки, что может привести к его поломке, особенно в условиях низких температур. В связи с этим с декабря месяца при глубине промерзания более 0,7 м начинается подготовка вскрышных пород к выемке с применением буровзрывного способа. Применение взрывания усложняет технологический процесс ведения открытых горных работ, значительно повышает себестоимость добычи полезного ископаемого, ведет к простоям выемочной техники и оказывает отрицательное влияние на окружающую среду, а также имеет ряд других недостатков. Для исключения буровзрывной подготовки из технологического процесса открытых горных работ предлагаются новые и совершенствуются известные способы безвзрывной подготовки сезонно мерзлых пород к выемке. Промерзший слой рабочих площадок уступов возможно эффективно разрушать с помощью рыхлителей на базе тяжелых гусеничных

тракторов [13], однако данные машины не обеспечивают возможности рыхления откосов уступов. Откосы промерзших уступов возможно рыхлить с применением гидравлических строительных экскаваторов, оборудованных ковшами с рыхлящими зубьями на днище или дополнительными выдвижными зубьями [14], однако при увеличении глубины промерзания горных пород более 0,7 м данный тип оборудования становится малоэффективным. Способ разрезания мерзлого грунта [15] посредством базовой машины, оборудованной фрезой, на которой между зубьями установлены термогорелки, может быть использован в горном деле и строительстве для нарезания щелей в промерзшем массиве и разделения его на отдельные части перед выемкой, однако данное оборудование не позволяет вести нарезание щелей в откосах уступов.

Известен способ разупрочнения промерзших уступов на угольном разрезе с применением бурового станка и роторного траншейного экскаватора [16]. Так, при максимальной глубине промерзания пород в феврале-марте, равной 2,0–2,5 м, буровым станком обеспечивается бурение скважин, параллельных откосу уступа (под углом примерно 70°), по 3–4 скважины в ряд на всю высоту уступа с оставлением между скважинами промежутков мерзлоты, которые ковш карьерного экскаватора может выломать. Расстояние между рядами скважин принимается исходя из геометрических размеров ковша карьерного экскаватора. После работы бурового станка роторным траншейным экскаватором на рабочей площадке уступа осуществляется копанье продольных траншей шириной 1,2 м на глубину промерзания с перемычками в 1 м, с одновременной засыпкой траншей вынудой горной массой для предохранения массива от дальнейшего промерзания. Таким образом, подготавливается к выемке участок уступа длиной примерно равной сменной производительности карьерного экскаватора. Недостатком способа является оставление в промерзшем откосе уступа промежутков между скважинами, в процессе разрушения которых в металлоконструкции карьерного экскаватора будут возникать значительные перегрузки, что может привести к его поломке. Также необходимо отметить, что в большинстве случаев откосы уступа имеют не прямолинейную, а криволинейную форму, повторяющую траекторию движения ковша экскаватора, а ослабление откоса уступа буровыми скважинами предполагает наличие у него исключительно прямолинейной поверхности.

Для ослабления путем нарезания щелей откосов уступов как прямолинейной, так и криволи-

нейной формы, а также рабочих площадок уступов возможно использование специального рабочего оборудования гидравлического экскаватора, которое включает поворотную платформу, связанную с ней консольную телескопическую стрелу, включающую корневую, промежуточную и головную секции [17]. На головной секции установлен фрезерный рабочий орган. С целью снижения металлоемкости оборудования, предназначенного для ослабления щелями откоса уступа на всю глубину промерзания (до 2,0–2,5 м), рабочий орган выполнен составным, включающим основную и дополнительную фрезы. Основная (широкая) фреза прорезает щель вдоль поверхности откоса уступа, а дополнительная (узкая) фреза, установленная за основной фрезой и располагающаяся в открытой ею широкой щели, прорезает узкую щель на всю глубину промерзания уступа. Недостатками данного оборудования является его сложность, громоздкость, высокая стоимость и металлоемкость, невозможность использования данного экскаватора для выполнения других работ, а также необходимость применения основной фрезы значительной ширины для размещения в отфрезерованной ею щели дополнительной фрезы с приводом вращения.

Целью работы является создание эффективного и компактного сменного рабочего оборудования для гидравлического экскаватора, обеспечивающего возможность ослабления массива промерзшего на глубину до 2,0–2,5 м щелями. При этом конструктивная схема машины должна обеспечивать возможность нарезания щелей в откосах уступов как с прямолинейной, так и с криволинейной поверхностью.

Результаты исследований и их обсуждение

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается усовершенствованная схема ослабления поверхности промерзших уступов с применением гидравлического экскаватора 1 с комбинированным сменным рабочим оборудованием 2 (см. рисунок). Комбинированное сменное рабочее оборудование 2 включает фрезу 3, термоторелку 4 и рыхлитель 5, установленные на раме 6. Фреза 3 имеет вращательное зацепление 7 относительно рамы 6, что обеспечивает значительную глубину прорезаемых щелей при относительно небольшом диаметре фрезы (для дискофрезерных рабочих органов с вращательным зацеплением глубина прорезаемой щели определяется по зависимости $H=(0,65-0,67)D$, где D – диаметр фрезы). Рыхлитель 5 шарнирно закреплен на раме 6 и управляется посредством гидроцилиндра 8. Рама 6 шар-

нирно закреплена на рукояти 9 и может поворачиваться в вертикальной плоскости посредством гидроцилиндра 10.

Разупрочнение сезонно промерзшего поверхностного слоя 11 уступа 12 ведется горизонтальными и наклонными щелями 13, 14. Нарезание щелей 13, 14 производится на всю глубину 15 промерзания и включает разупрочнение откоса 16 по криволинейной траектории наклонными щелями 14, разупрочнение промерзшего слоя 11 породы рабочей площадки 17 осуществляется вдоль уступа 12 путем формирования параллельно друг другу горизонтальных щелей 13. При нарезании щелей формируются пережки 18 между наклонными щелями 14 и между горизонтальными щелями 13 размером менее ширины ковша 19 карьерного экскаватора. Нарезание наклонных щелей 14 в промерзшем слое 11 посредством фрезы 3 начинается с верхней части откоса 16 уступа 12 (см. рисунок). В процессе нарезания щели 14 стрела и рукоять 9 гидравлического экскаватора 1 постепенно опускаются, при этом фрезерование осуществляется по необходимой криволинейной траектории. В случае если глубина 15 промерзшего слоя 11 превышает глубину щели, нарезанной фрезой 3, то посредством термоторелки 4, установленной за фрезой 3, производится термическое воздействие на оставшийся промерзшим слой 20, в результате которого происходит оттаивание мерзлоты. За термоторелкой 4 установлен рыхлитель 5, имеющий меньшую ширину, чем фреза 3, заглубление рыхлителя 5 осуществляется гидроцилиндром 8. Рыхлитель прорезает углубочную щель 21 в оттаявшей породе, что обеспечивает разупрочнение промерзшего слоя на всю глубину 15.

В результате разупрочнения промерзших поверхностей уступа за счет нарезания щелей появляется возможность разработки вскрышных пород карьерным экскаватором 19 без проведения взрыва. При необходимости сменное комбинированное оборудование гидравлического экскаватора быстро заменяется на ковш, и экскаватор может быть использован по прямому назначению – для выемки горных пород.

Заключение

Безвзрывная подготовка промерзших пород к выемке позволяет упростить технологический процесс ведения открытых горных работ, снизить себестоимость добычи полезного ископаемого, уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду. Механическое разупрочнение мерзлоты позволит увеличить производитель-

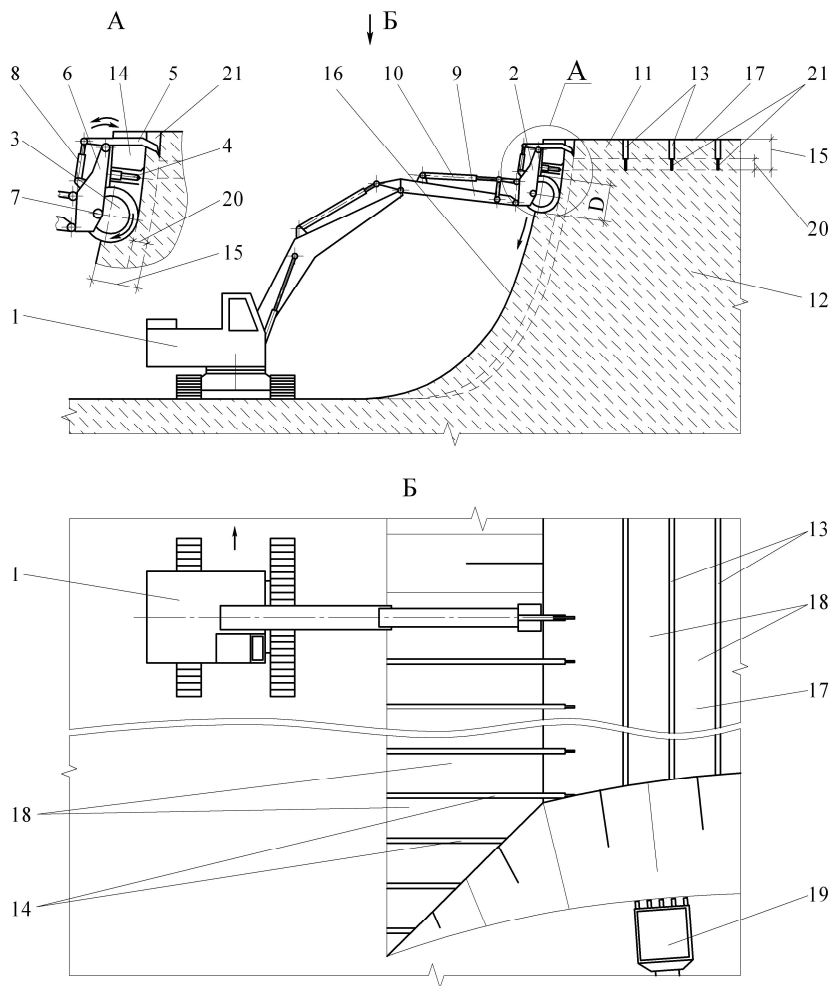


Схема разупрочнения сезонно промерзших поверхностей уступа гидравлическим экскаватором с комбинированным сменным рабочим оборудованием

ность горного оборудования, задействованного на вскрышных работах, поскольку не потребуются его отвода на безопасное расстояние, как в случае ведения взрывных работ. Предлагаемое комбинированное сменное рабочее оборудование гидравлического экскаватора для подготовки сезонно промерзших пород на глубину до 2,0–2,5 м к вы-

емке имеет значительно меньшие габариты, металлоемкость и стоимость в сравнении с известными конструкциями оборудования или комплектами машин для разупрочнения промерзших откосов. Кроме того, данное оборудование позволяет нарезать экскаватору щели в криволинейных поверхностях откосов уступов, а также обеспечи-

васт возможность быстрой его замены на ковш или другое сменное оборудование.

Список литературы

1. Плакитина Л.С. Современное состояние и перспективы развития добычи в период до 2030 г. в основных бассейнах и месторождениях, расположенных в Дальневосточном ФО // Горная промышленность. 2014. № 1. С. 12–20.
2. Чебан А.Ю. Выемочная техника, задействованная на угольных разрезах в южной части Дальневосточного региона // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. № 3. С. 081–084.
3. Плакитин Ю.А., Плакитина Л.С., Дьяченко К.И. Анализ развития угольной промышленности в Дальневосточном федеральном округе в 2000–2015 гг. // Горный журнал. 2017. № 2. С. 12–16.
4. Байсаров Р.С. Проблемы и перспективы реализации приоритетных проектов освоения угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока // Горная промышленность. 2016. № 2. С. 20–25.
5. Трубецкой К.Н. Решение проблем экологически сбалансированного освоения месторождений открытыми геотехнологиями // Горный журнал. 2018. № 6. С. 71–76.
6. Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016, 480 p.
7. Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 5–9.
8. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. Software & Systems Modeling. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
9. Василец В.Н., Лапаев В.Н., Пикалов В.А. Проблемы повышения объемов и эффективности производства на разрезе «Заречный» в условиях открыто-подземной разработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 9–15.
10. Чебан А.Ю. Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 247–254.
11. Хютянов Е.А., Гаврилов В.П. Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 10. С. 20–28.
12. Шемякин С.А., Матвеев Д.Н., Чебан А.Ю. Экономическое обоснование эффективности безвзрывной селективной выемки полезного ископаемого и вмещающих пород с использованием технико-технологических комплексов на основе фрезерных комбайнов // Горный журнал. 2015. № 2. С. 43–46.
13. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю., Щадов М.И. Справочник по открытым горным работам. М.: НТЦ «Горное дело», 2010. 700 с.
14. Шемякин С.А., Домнин Ю.В., Крадинов И.С. Ковши одноковшовых гидравлических экскаваторов для разработки мерзлого грунта // Строительные и дорожные машины. 1982. № 8. С. 4–6.
15. Пат. 2316631 Российская Федерация, МПК E02F5/02 E02F5/30. Способ разрезания мерзлого грунта / А.С. Шаволов, А.Д. Савчук; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-технический университет. № 2006128825/03; заявл. 08.08.2006; опубл. 10.02.2008.
16. Мамаев Ю.А., Шемякин С.А. Безвзрывная технология вскрышных работ в зимний период // Горный журнал. 2001. № 8. С. 24–26.
17. Пат. 2380487 Российская Федерация, МПК E02F3/28 E02F5/08. Рабочее оборудование гидравлического экскаватора / С.А. Шемякин, А.Ю. Чебан, И.Б. Ковалев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тихоокеанский государственный университет. № 2008126965/03; заявл. 02.07.2008; опубл. 27.01.2010.

Поступила 23.10.18

Принята в печать 10.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>

PREPARATION OF SEASONALLY FROZEN SCARP SLOPES FOR EXCAVATION AND THE RELEVANT EQUIPMENT

Anton Yu. Cheban – PhD (Eng.), Senior Researcher

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.

E-mail: chebanay@mail.ru

Abstract. Relevance and Objectives. Russia is currently witnessing emergence of new coal production centers with a gradual shift toward the eastern part of the country. Stricter environmental and industrial safety regulations, as well as the need to maintain an acceptable level of cost effectiveness in the mining production, determine the need for new technical solutions and optimization of min-

ing operations, equipment and technology. The overburden of many coal mines situated in the Far East is represented by fine-grained mantle rock, which can be easily developed by open-pit excavators when thawed. However, during the freezing season, its strength and resistance to excavation multiply, which creates a need for drilling and blasting operations. There exist various methods and

equipment for the mechanical destruction of permafrost. However, when the frost penetration is quite deep in the scarp slopes, it may be difficult to prepare them for excavation without using explosives. **Objectives.** To design/build an efficient and compact spare equipment for a hydraulic excavator, so that it could be used to weaken the rock with the frost depth of 2.0–2.5 m by cutting slits. At the same time the machine should be designed the way to be able to cut slits in scarp slopes with curved surfaces.

Findings. The paper proposes an improved scheme for weakening the surface of frozen scarp slopes using a hydraulic excavator with a combination replaceable equipment, which include a milling cutter, a thermal burner and a ripper. The frozen surface layer of a scarp slope can be weakened by cutting slits to the full depth of the frozen layer. Inclined slits are used for weakening the scarp slope, and horizontal slits made along the scarp slope are used for weakening the working platform. The initial slit is made with a cutter, and if the frozen layer goes deeper than the slit made with the cutter, a thermal burner is used to produce a thermal impact on the remaining frozen layer, which helps to thaw out the frozen ground. After that the ripper cuts through the thawed rock, thus weakening the frozen layer all the way through. **Findings.** The proposed technique and equipment for preparing the frozen scarp slopes for excavation help optimise the open mining operations in the winter time, bring down the mining cost and lessen the environmental impact.

Keywords: Overburden works, scarp slope, permafrost, slitting, hydraulic excavator, milling tool, thermal burner.

References

- Plakitina L.S. Current status and prospective development of coal production till 2030 at the main coal fields of the Far Eastern Federal District. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2014, no. 1, pp. 12–20. (In Russ.)
- Cheban A.Yu. The Extraction Technique Used in Coal Mines in the Southern Part of the Far-East Region]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Pacific State University], 2013, no. 3, pp. 081–084. (In Russ.)
- Plakitin Yu.A., Plakitina L.S., Dyachenko K.I. Overview of the coal industry in the Far Eastern Federal District in 2000–2015. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2017, no. 2, pp. 12–16. (In Russ.)
- Baysarov R.S. Implementation of the priority projects on the development of Eastern Siberia and Far Eastern coal deposits: Problems and prospects. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2016, no. 2, pp. 20–25. (In Russ.)
- Trubetskoy K.N. Finding solutions for sustainable development of deposits using open geotechnologies. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2018, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.)
- Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016. 480 p.
- Cheban A.Yu. Enhancing the conveying technology in explosive-free mining. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 5–9. (In Russ.)
- Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
- Vasilets V.N., Lapaev V.N., Pikalov V.A. The problems of increasing the output and production efficiency at the Zarechny pit where a combination opencast and underground mining is used. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 1, pp. 9–15. (In Russ.)
- Cheban A.Yu. Selective development of the Elginsk coal deposit using an excavation and screening complex. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences], 2017, no. 4, pp. 247–254. (In Russ.)
- Khoyutyanov E.A., Gavrilov V.L. On raising the recovery rate while taking into account the ash content of coal in the contact zones of complex structure seams. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Zabaykale State University], 2016, vol. 22, no. 10, pp. 20–28. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Matveev D.N., Cheban A.Yu. Explosive-free selective extraction of minerals and host rock using surface miner technology: Feasibility study. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2015, no. 2, pp. 43–46. (In Russ.)
- Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu., Shchadov M.I. *Spravochnik po otkrytym gornym rabotam* [Handbook of open pit mining]. Moscow: Gornoe delo, 2010. 700 p. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Dominin Yu.V., Kradinov I.S. Buckets of hydraulic shovels designed for the development of frozen soil. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machinery], 1982, no. 8, pp. 4–6. (In Russ.)
- Shavolov A.S., Savchuk A.D. *Sposob razrezaniya merzlogo grunta* [The method of cutting frozen soil]. Patent RF, no. 2316631, 2008.
- Mamaev Yu.A., Shemyakin S.A. Explosive-free technology of overburden operations in the winter time. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2001, no. 8, pp. 24–26. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Cheban A.Yu., Kovalev I.B. *Rabochee oborudovanie gidravlicheskogo ekskavatora* [Working equipment of hydraulic excavator]. Patent RF, no. 2380487, 2010.

Received 23/10/18

Accepted 10/01/19

Образцы для цитирования

Чебан А.Ю. Способ подготовки к выемке сезонно промерзших уступов и оборудование для его осуществления // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 11–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>

For citation

Cheban A.Yu. Preparation of seasonally frozen scarp slopes for excavation and the relevant equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 11–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.267.642

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОВШЕВОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Ушаков С.Н.¹, Бигеев В.А.², Столяров А.М.², Потапова М.В.²¹ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия²Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены основные процессы ковшевой десульфурации чугуна: «Kanbara Reactor (KR)», «MMI» («Ukraine-Desmag») и «Co-injection». Приведены схемы используемых установок, реакции десульфурации, достоинства и недостатки каждого процесса. Произведено сравнение трех процессов между собой по следующим параметрам: продолжительность обработки, расход реагентов, потери железа, потери тепла, износ оборудования. Для удобства сравнения значения параметров приведены в относительных значениях (минимальное значение принято равным единице). Сравнение значений итогового параметра трех процессов ковшевой десульфурации чугуна показало, что наиболее рациональное – минимальное значение имеет параметр процесса «Co-injection» – соинжекция в потоке азота гранулированного магния и извести. Данный процесс реализован на многих металлургических предприятиях мира, в том числе и в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В кислородно-конвертерном цехе построена и эксплуатируется новая установка десульфурации чугуна (УДЧ) соинжекции реагентов. Приведена техническая характеристика УДЧ. В период освоения технологии ковшевой обработки чугуна установлены статистически значимые линейные зависимости степени десульфурации чугуна от продолжительности дувания материалов азотом, суммарной массы реагентов, отношения массы флюидизированной извести к массе магния. Степень десульфурации чугуна изменялась в широком диапазоне от 50 до 87,5% и в среднем равнялась 77,3%. На современных металлургических предприятиях для ковшевой десульфурации чугуна наиболее востребованным является процесс «Co-injection», в котором осуществляется совместная инжекция в расплав гранулированного магния и извести в потоке азота. Этот процесс реализован и в ПАО «ММК». В кислородно-конвертерном цехе на установке десульфурации чугуна удаляется в среднем 83,5% серы с получением ее остаточного содержания 0,003% (данные за 15 месяцев работы).

Ключевые слова: жидкий чугун, ковш, десульфурация, процессы, сравнение, промышленная реализация.

Введение

В металлургии постоянно ужесточаются требования к содержанию серы в выплавляемой стали. Это объясняется увеличением спроса на сталь с низким (не более 0,005%) и особонизким (не более 0,001%) содержанием серы, в частности для труб магистральных газопроводов, работающих в условиях Крайнего Севера или морского бассейна («Северный Поток-2») [1, 2].

Для производства низкосернистой конвертерной стали необходимо иметь низкое содержание серы в главном шихтовом материале – жидком чугуне. Однако получение пердеельного чугуна с содержанием серы ниже 0,015% связано с ухудшением технико-экономических показателей доменного процесса, поэтому широкое распространение получили различные методы внедоменной

– ковшевой обработки жидкого чугуна. Десульфурация чугуна имеет преимущество по сравнению с удалением серы из стали [3–5]. Это связано с повышенной химической активностью серы в чугуне, обусловленной высоким содержанием в нем углерода и кремния.

Процессы современной ковшевой десульфурации чугуна

Основными процессами современной ковшевой десульфурации чугуна являются [6]:

- «Kanbara Reactor (KR)»,
- «MMI» («Ukraine-Desmag»),
- «Co-injection».

Процесс «KR» был разработан в Японии компанией «Nippon Steel» в 1963 г. Основным реагентом является известь, иногда с добавлением около 10% от общего расхода плавикового шпата (CaF_2) или глинозема (Al_2O_3). Реагент вводится в чугун через вращающуюся со средней скоростью 100–120 об/мин фурму в потоке азота (рис. 1).

© Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М.,
Потапова М.В., 2019

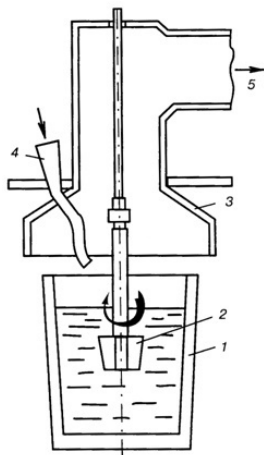
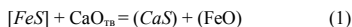


Рис. 1. Схема установки процесса «KR»:
1 – заливочный ковш с жидким чугуном;
2 – ротор-мешалка; 3 – колпак для пылеулавливания; 4 – подача десульфуратора;
5 – отвод газов

Фурма оснащена четырьмя массивными лопатками для интенсивного перемешивания чугуна в заливочном ковше. Вследствие перемешивания расплава размер пузырьков транспортирующего газа уменьшается, а время контакта извести в чугуне увеличивается по сравнению со статической инъекцией.

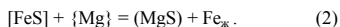
Реакция десульфурации



кинетически затруднена, так как известь сначала должна ассимилироваться шлаковой фазой и лишь после этого принять участие в рафинировочном процессе. Расход извести на ковшевую десульфурацию чугуна довольно высок, что приводит к значительному охлаждению металла, увеличению количества шлака и его загущению. Это служит причиной потери чугуна при скачивании шлака из ковша после обработки. Недостатком процесса также является повышенный износ футеровки стен заливочного ковша и необходимость в большом свободном борте ковша.

Процесс «ММІ» («Ukraine-Desmag») был разработан в 1969–1971 гг. в Национальной академии наук Украины (СССР). В этом процессе для десульфурации чугуна используется один из самых эффективных реагентов – гранулированный магнезит.

Десульфурация чугуна происходит по реакции



Технологические особенности десульфурации чугуна магнием обусловлены его физическими свойствами: низкой плотностью в твердом ($1,67 \text{ т/м}^3$) и жидком ($1,58 \text{ т/м}^3$) состоянии, чрезвычайно низкими температурами плавления (651°C) и кипения (1110°C). При температуре чугуна $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$ введенный в него магний переходит в состояние перегретого пара. Это, с одной стороны, способствует лучшему контакту реагента с чугуном, а с другой – ведет к возможности выброса металла из ковша и сгорания паров магния в воздушной атмосфере. Поэтому для лучшего протекания процесса десульфурации чугуна необходимо замедление испарения магния и увеличение времени пребывания его в глубине металлической ванны. Для этого в процессе «ММІ» гранулированный магний используется в виде частиц размером $0,5\text{--}2,0 \text{ мм}$, покрытых соляной пленкой, и вводится в расплав в потоке инертного газа через фурму, наконечник которой имеет форму колокола – испарительной камеры для магния (рис. 2).

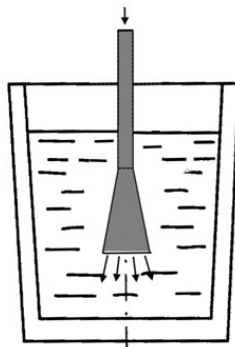


Рис. 2. Процесс «ММІ» («Ukraine-Desmag»)

Недостатками процесса моноинъекции магния являются возможность протекания ресульфурации и небольшое количество шлака.

Процесс «Co-injection» – это соинъекция (совместная инъекция) магния и извести. Он сочетает в себе достоинства обоих выше рассмотренных процессов. Магний позволяет быстро удалять серу, а известь – достичь ее низких концентраций. Известь иногда заменяется карбидом кальция, который является более эффективным реагентом, но из-за проблем безопасности этот

вариант практически не используется. Совместное введение реагентов очень широко используется на металлургических предприятиях. Реагенты хранятся в различных бункерах и смешиваются только внутри нагнетательной линии. Десульфураторы вводятся в чугун через подвижную фурму, опускаемую сверху, через одно вертикально расположенное отверстие или через боковые отверстия (рис. 3).

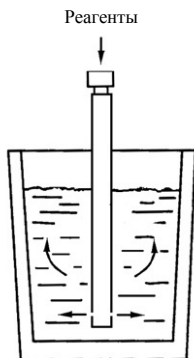


Рис. 3. Схема процесса «Co-injection»

В качестве транспортирующего газа обычно используется азот. Перемешивание чугуна в ковше создается газом-носителем и парами магния. Это обеспечивает достаточно хорошее распределение реагентов по всему объему ковша. Преимущество совместной инъекции в том, что в случае необходимости отношение между реагентами может легко изменяться.

Сравнение трех процессов ковшевой десульфурации чугуна [6] возможно по нескольким параметрам (табл. 1). Для удобства сравнения значения параметров приводятся в относительных значениях (минимальное значение принято равным единице).

Продолжительность обработки зависит от того, как быстро реагенты могут реагировать с серой. Так как магний намного эффективнее, чем известь, то процесс «ММ» является наименее продолжительным. Процесс «Co-injection» при совместном использовании магния и извести примерно на 10% дольше, чем процесс «ММ», однако при использовании магния и карбида кальция он может быть даже быстрее. Процесс «KR» требует наибольшего времени, чтобы предотвратить возвращение примесей из доменного шлака в жидкий чугун во время перемешивания.

Он занимает в среднем на 15% больше времени, чем процесс «Co-injection».

Таблица 1

Результаты сравнения различных процессов ковшевой десульфурации чугуна

Параметр	Процесс		
	«Kanbara Reactor (KR)»	«ММ» («Ukraine-Desmag»)	«Co-injection»
Продолжительность обработки	1,3	1	1,1
Расход реагентов	1	2,1	2,3
Потери железа	2,5	1	1
Потери тепла	3	1	1
Износ оборудования	2,4	1,7	1
Итого	10,2	6,8	6,4

В процессе «KR» расход извести невысокого качества может быть 10–20 кг/т чугуна. Расход дорогостоящего магния в процессе «ММ» для десульфурации составляет 0,5–1,0 кг/т чугуна. При совместной инъекции в среднем расходуется 0,5 кг/т магния и 2,0 кг/т извести. В табл. 1 относительные значения расхода реагентов в разных процессах приведены с учетом их стоимости.

Потеря железа в процессе скачивания шлака из ковша является серьезной проблемой для металлургических предприятий. Капли железа попадают в шлак, образуя с ним эмульсию. В целом около половины массы шлака – это железо в эмульсии. Следовательно, чем больше масса шлака, тем больше потери железа. В процессе «KR» потери железа в среднем в 2,5 раза больше, чем в сравниваемых процессах. В процессах «ММ» и «Co-injection» потери железа примерно одинаковы и составляют около 1%. Это объясняется тем, что, хотя процесс «ММ» характеризуется минимальным количеством шлака, но в шлаке из-за его низкой основности содержится больше железа в эмульсии.

В процессе ковшевой десульфурации температура чугуна снижается. Потери тепла возрастают с увеличением продолжительности обработки, расхода извести и турбулентности расплава, с уменьшением количества теплоизолирующего шлака и расхода магния. Процесс «KR» имеет наибольшие продолжительность и расход извести, высокую турбулентность, что ведет к наибольшим потерям тепла. Они в среднем в три раза выше, чем в двух других процессах. Потери тепла при моно и совместной инъекции примерно одинаковы – снижение температуры чугуна в процессе обработки не превышает 10°C. Это объясняется тем, что, хотя процесс соинъекции име-

ет несколько большую продолжительность по сравнению с моноинжекцией, но в нем ниже турбулентность расплава и толще слой шлака.

Износ оборудования (огнеупорной футеровки ковша и фурмы) лимитируется температурными условиями процесса и коррозионным воздействием металла и шлака. Для процесса «КР» турбулентность, создаваемая вращающейся фурмой, является одной из основных причин износа. Также сама фурма более уязвима к износу, так как лопасти могут оторваться. Уменьшение рабочей поверхности лопаток приводит к меньшей турбулентности и, следовательно, процесс становится менее эффективным. Процесс «ММ» имеет меньше проблем с износом, чем процесс «КР», из-за меньшей турбулентности. Однако, поскольку используется магний вместо извести, основность шлака становится ниже, что приводит к увеличению коррозионного износа. Процесс совместной инъекции имеет меньшую турбулентность, чем процесс моноинъекции, и более высо-

кую основность шлака, поэтому футеровка ковша и фурма изнашиваются меньше.

Сравнение значений итогового параметра трех процессов ковшевой десульфурации чугуна (см. табл. 1) показывает, что наиболее рациональное – минимальное значение имеет параметр процесса «Co-injection». Поэтому в настоящее время он наиболее востребован на металлургических предприятиях мира.

Десульфурация чугуна в условиях ПАО «ММК»

В кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» построена и эксплуатируется новая установка десульфурации чугуна (УДЧ) соинжекции реагентов. Техническая характеристика УДЧ приведена в табл. 2 [7].

Схема установки десульфурации чугуна представлена на рис. 4.

Таблица 2

Техническая характеристика УДЧ

Параметр	Значение
Годовая производительность установки, млн т чугуна	3,0
Количество мест для обработки, шт.	1
Минимальное содержание серы в чугуне после обработки, %	0,002
Продолжительность обработки металла одного ковша, мин	30
Продолжительность продувки от исходного содержания серы 0,025 %, мин	15
Удельный расход вдуваемой флюидизированной извести, кг/т	1,81
Удельный расход вдуваемого магния, кг/т	0,48
Газ-носитель	азот

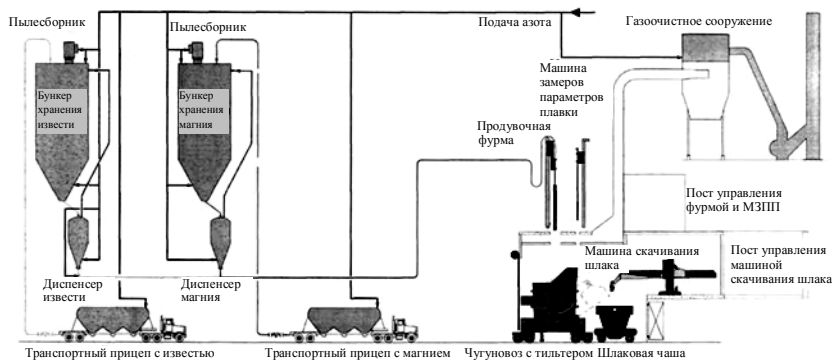


Рис. 4. Схема установки десульфурации чугуна

В загрузочный пролет ковши с чугуном вместимостью 320 т доставляются чугуновозом из участка перелива чугуна по траншею, откуда ковши заливочным краном передаются на установку десульфурации, где устанавливаются на один из чугуновозов УДЧ. В ковш с жидким чугуном опускается огнеупорная фурма, через которую в потоке азота вдувается смесь реагентов из флюидизированной извести и магния. На разгрузочную площадку флюидизированная известь и гранулированный магний доставляются в специальных грузовиках-цистернах, исключающих возможность взаимодействия извести с атмосферным воздухом и оборудованных устройствами для выгрузки порошковых материалов с помощью транспортирующего газа-азота. В качестве рабочей смеси используются магний Mg97 производства Соликамского завода десульфураторов и флюидизированная известь производства ПАО «ММК». Качество флюидизированной извести оценивается следующими параметрами:

- массовая доля оксидов кальция и магния – 98,0%;
- массовая доля фракции более 100 мкм – 3,2% (не более 4,0 %);
- потери массы при прокаливании – 1,4% (не более 3,5 %);
- насыпная плотность во флюидизированном состоянии – 0,7 г/см³.

После окончания обработки ковш наклоняется, и шлак с поверхности чугуна скачивается в шлаковую чашу машины скребкового типа. Затем чугуновоз УДЧ перемещается на позицию подъема ковша заливочным краном (две позиции), и ковш отправляется к конвертеру.

В период освоения технологии ковшевой обработки чугуна был проанализирован массив производственных данных из 89 плавков [8]. Степень десульфурации чугуна изменялась в широком диапазоне от 50 до 87,5%. В результате анализа установлены статистически значимые линейные зависимости степени десульфурации чугуна ($S_{\text{дс}}$, %) от продолжительности вдувания материалов азотом ($\tau_{\text{вд}}$, мин), суммарной массы реагентов ($R_{\text{сум}}$, кг), отношения массы флюидизированной извести к массе магния ($O_{\text{раск}}$):

$$S_{\text{дс}} = 0,489 \cdot \tau_{\text{вд}} + 67,66, \quad r = 0,302, \quad r_{0,01} = 0,272.$$

$$S_{\text{дс}} = 0,0282 \cdot R_{\text{сум}} + 54,82, \quad r = 0,552, \quad r_{0,001} = 0,343.$$

$$S_{\text{дс}} = 129,34 - 11,56 \cdot O_{\text{раск}}, \quad r = -0,689, \quad r_{0,001} = 0,343.$$

С увеличением продолжительности продувки азотом от 8 до 30 мин и суммарной массы вдуваемых реагентов от 295 до 1210 кг степень десульфурации чугуна линейно возрастает. Сравне-

ние абсолютных значений коэффициентов парной корреляции r полученных зависимостей показывает, что наиболее сильное влияние на процесс десульфурации чугуна оказало отношение массы флюидизированной извести к массе магния во вдуваемой смеси (рис. 5).

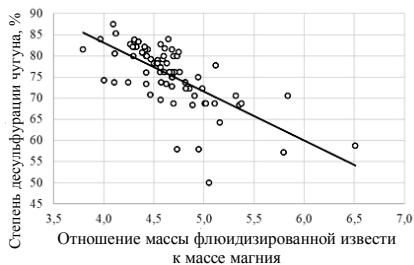


Рис. 5. Зависимость степени десульфурации чугуна от отношения массы флюидизированной извести к массе магния

С уменьшением этого отношения от 6,5 до 3,8 эффективность обработки растет, что свидетельствует о более высокой десульфурующей способности магния в смеси реагентов. Исходное содержание серы составляло от 0,014 до 0,036% (в среднем 0,022%). Конечное содержание серы в чугуне изменялось в интервале от 0,003 до 0,008% и в среднем равнялось 0,005%.

Таким образом, при опробовании на УДЧ технологии ковшевой десульфурации чугуна с удельным расходом флюидизированной извести и магния 1,9 и 0,4 кг/т соответственно при продувке длительностью до 15 мин достигнута средняя степень десульфурации 77,3%.

Результаты промышленной эксплуатации УДЧ за 15 месяцев приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ковшевой обработки чугуна

Параметр	Значение
Количество ковшей чугуна, шт.	5058
Продолжительность, мин:	
продувки	9,2
обработки	34,6
Средний расход, кг/т:	
флюидизированная известь	1,72
магний	0,35
Снижение температуры чугуна, °С	6
Среднее содержание серы, %:	
до обработки	0,020
после обработки	0,0033
Средняя степень десульфурации чугуна, %	83,5

Из представленных данных видно, что после освоения технологии ковшевой десульфурации чугуна удалось получить содержание серы на уровне 0,003%, степень десульфурации металла увеличилась до 83,5%.

Достигнутые на УДЧ ККЦ ПАО «ММК» показатели ковшевой десульфурации чугуна находятся на уровне передовых металлургических предприятий. Технология процессов десульфурации чугуна в «большой» металлургии может быть использована и в литейном производстве [9].

Заключение

На современных металлургических предприятиях для ковшевой десульфурации чугуна наиболее востребованным является процесс «*Co-injection*», в котором осуществляется совместная инъекция в расплав гранулированного магнезия и извести в потоке азота. Этот процесс реализован и в ПАО «ММК». В кислородно-конвертерном цехе на установке десульфурации чугуна удаляется в среднем 83,5% серы с получением ее остаточного содержания 0,003%.

Список литературы

1. Григорович К.В. Современные низкоуглеродистые микрелегированные стали: пути развития технологий и параметры металлургического качества // Сборник трудов XIII Международного конгресса сталеплавателей. Полевской: Эзапринт, 2014. С. 28–33.
2. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургия, 2012. 696 с.
3. Колесников Ю.А., Буданов Б.А., Столяров А.М. Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 379 с.
4. Результаты обработки расплава стали на агрегате «ковш-печь» с полыми электродами / В.А. Бигеев,

- Е.Б. Арапатов, М.М. Ерофеев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №1. С. 36–38.
5. Сравнение ведущих методов десульфурации чугуна / Франк Шрама, Барт Ван Дер Берг, Гвидо Ван Хаттум // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 38–43.
6. Производство трубной низкосернистой стали с ковшевой десульфурацией чугуна / С.Н. Ушаков, В.А. Авраменко, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Металлург. 2017. №11. С. 47–50.
7. Колокольцев В.М., Коток А.П., Долбилов К.А. Проблемы серы в литейных сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №3. С. 30–32.
8. Steel refining possibilities in LF/ M. G. Dumitru, A. Ioana, N. Constantin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2018) 012018. doi:10.1088/1757-899X/294/1/012018.
9. Management of Lime in Steel / Sanjeev Manocha, François Ponchon//Metals 2018, 8(9), 686; https://doi.org/10.3390/met8090686.
10. Researches on the influence of slag addition and secondary treatment duration on steel quality / E Ardelean, M Ardelean, A Socolici // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477 (2019) 012010. doi:10.1088/1757-899X/477/1/012010.
11. Improving the Desulfurization in COREX-3000 Process by the Optimization of Chemical Compositions of Slag / Shengli Wu, Laixin Wang, Yanan Lu, Kai Gu // ISIJ International. doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-427
12. Numerical Investigation of Desulfurization Kinetics in Gas-Stirred Ladles by a Quick Modeling Analysis Approach / Qing Cao, Laurentiu Nastac, April Pitts-Baggett, Qiulin Yu // Metallurgical and Materials Transactions B. June 2018, vol. 49, iss. 3, pp. 988–1002.
13. Effect of CaO–Al₂O₃-Based Synthetic Slag Additions on Desulfurization Kinetics of Ladle Furnace Refining / Suguna Soumya Varanasi, R. K. Pathak, K. K. Sahoo, Venu Madhava Rao More, Dey Santanu, Sankar Reddy Alli // Transactions of the Indian Institute of Metals. (2019), pp. 1–6.

Поступила 29.01.19

Принята в печать 27.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

MODERN PROCESSES OF IRON DESULPHURATION IN THE LADLE

Sergey N. Ushakov – Deputy General Director Responsible for Production
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

Vakhit A. Bigeev – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Aleksandr M. Stolyarov – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Marina V. Potapova – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

Abstract. This paper examines the main processes of ladle desulfurization of cast iron, which include Kanbara

Reactor (KR), MMI ("Ukraine-Desmag") and Co-injection; describes the equipment set-up used, desulfuri-

zation reactions, as well as advantages and disadvantages of each process. The authors compare three different processes guided by the following parameters: processing time, consumption of reagents, iron loss, heat loss, equipment wear. For convenience, relative values of the parameters are given (the minimum value is assumed to be nominal, i.e. one). Comparison of the cast iron ladle desulfurization processes based on the final parameter values showed that the Co-injection process (the co-injection of magnesium granules and lime in the nitrogen stream) has the most rational – i.e. minimal – value. This process is adopted by numerous steel makers around the world, including MMK PJSC. A new iron desulfurization unit (IDU) was built and is now in operation at MMK's BOF site. The paper provides the IDU characteristics. During the adoption phase, probably significant linear dependencies were established of the desulfurization degree on the nitrogen injection time, the total weight of the reagents, the weight ratio of fluidized lime and magnesium. The iron desulfurization degree varied within a wide range of 50 to 87.5% and was on average 77.3%. The co-injection process is the most popular cast iron ladle desulfurization process in today's steel industry. It is also implemented at MMK PJSC. The iron desulfurization unit of the BOF shop removes an average of 83.5% of sulfur, and its residual concentration is 0.003% (data for 15 months).

Keywords: Liquid iron, ladle, desulfurization, processes, comparison, industrial implementation.

References

1. Grigorovich K.V. Modern low-carbon microalloyed steels: Ways to develop the technology and metallurgical quality parameters. *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnogo kongressa staleplavilshchikov* [Proceedings of the 13th International Congress of Steelmakers]. Polevskoy: Ezaprint, 2014, pp. 28–33. (In Russ.)
2. Efron L.I. *Metallovedenie v "bolshoy" metallurgii. Trubnye stali* [Metal science as part of "big" metallurgy. Pipe steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
3. Kolesnikov Yu.A., Budanov B.A., Stolyarov A.M. *Metallurgicheskie tekhnologii v vysokoproizvoditel'nom konvertornom tsekh: uchebnoe posobie* [Metallurgical technologies in a high-performance converter shop: Learner's guide]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 379 p. (In Russ.)
4. Bigeev V.A., Agapitov E.B., Erofeev M.M. et al. The results of steel processing in a ladle furnace with hollow electrodes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosov* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 1, pp. 36–38. (In Russ.)
5. Frank Schrama, Bart van der Berg, Guido van Hattum. A comparison of the leading hot metal desulfurization methods. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2015, no. 1 (16), pp. 38–43. (In Russ.)
6. Ushakov S.N., Avramenko V.A., Bigeev V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Production of low-sulfur pipe steel with ladle desulfurization of cast iron. *Metallurg* [Metallurgist], 2017, no. 11, pp. 47–50. (In Russ.)
7. Kolokoltsev V.M., Kotok A.P., Dolbilov K.A. Problems of sulfur in cast alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosov* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 3, pp. 30–32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2014-3-30-32>. (In Russ.)
8. M.G. Dumitru, A. Ioana, N. Constantin. Steel refining possibilities in LF. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 294 (2018) 012018. doi:10.1088/1757-899X/294/1/012018.
9. Sanjeev Manocha, François Ponchon. Management of lime in steel. *Metals* 2018, 8(9), 686; <https://doi.org/10.3390/met8090686>.
10. E. Ardelean, M. Ardelean, A. Socălici. Researches on the influence of slag addition and secondary treatment duration on steel quality. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 477 (2019) 012010. doi:10.1088/1757-899X/477/1/012010.
11. Shengli Wu, Laixin Wang, Yanan Lu, Kai Gu. Improving the desulfurization in COREX-3000 process by the optimization of chemical compositions of slag. *ISIJ International*. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-427.
12. Qing Cao, Laurentiu Nastac, April Pitts-Baggett, Qiulin Yu. Numerical investigation of desulfurization kinetics in gas-stirred ladles by a quick modeling analysis approach. *Metallurgical and Materials Transactions B*. June 2018, vol. 49, no. 3, pp. 988–1002.
13. Suguna Soumya Varanasi, R.K. Pathak, K.K. Sahoo, Venu Madhava Rao More, Dey Santanu, Sankar Reddy Alli. Effect of CaO–Al₂O₃-based synthetic slag additions on desulphurisation kinetics of ladle furnace refining. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, (2019), pp 1–6.

Received 29/01/19

Accepted 27/02/19

Образцы для цитирования

Современные процессы ковшевой десульфурации чугуна / Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 17–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

For citation

Ushakov S.N., Bigeev V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Modern processes of iron desulphuration in the ladle. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 17–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

UDC 621.77

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-24-31>

3D COUPLED THERMO-MECHANICAL FE ANALYSIS OF EFFECT OF PROCESS PARAMETERS IN RING ROLLING PROCESS

Phalke Vikram¹, Nayak Soumyaranjan², Narasimhan K.², Nandedkar V.M.¹¹Shri Guru Gobind Singhji Institute of Engineering and Technology, Nanded, India²Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India

Abstract. Radial-axial ring rolling is an incremental metal forming technique which is used to produce seamless rings. The advantages associated with the process include close tolerance, short production time and significant saving in material. The process marks non-uniformity in temperature and plastic strain variation. The process parameters such as mandrel feed rate, rotational speed of the main roll and axial roll feed rate have an impact on temperature and strain distribution. A coupled thermo-mechanical FE analysis is carried out in ABAQUS/Explicit to study the effect of various combinations of process parameters on the uniformity of temperature and deformation. Taguchi method is employed to find optimum process parameters. ANOVA (ANalysis Of VAriance) is carried out to assess the effect of process parameters on plastic strain and temperature.

Keywords: ABAQUS, Process Parameters, Ring rolling, Thermo-mechanical, Taguchi, ANOVA.

Introduction

Ring rolling forging is used to produce precision axis-symmetric hollow mechanical parts. The technology of ring rolling has evolved over a period of 150 years, with a significant amount of research work in the area being done in the past 40 years[1]. This process can be divided into two major types, which are, radial ring rolling (RRR) and radial-axial ring rolling (RARR). Fig. 1 shows the working principle and motion of the different rolls involved. RARR is accompanied by two compressions, one is the radial compression in between the mandrel and main roll and axial compression which takes place in between the axial rolls [2]. The main roll rotates about its own axis. Friction between the surfaces of the preform and main roll causes the preform to rotate. The mandrel is provided with a translational motion towards the main roll, the mandrel is free to rotate about its own axis because of friction. The axial rolls compress the sample in the axial direction, themselves rotating about their axes and have retrieval motion depending on the ring growth velocity [3]. Both radial and axial compression of the ring leads to decrease in the cross-sectional area which leads to circumferential extrusion of the ring and an increase in the diameter of the ring is observed.

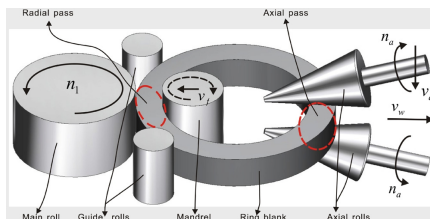


Fig. 1 Schematic of Radial-axial ring rolling process[3]

During plastic deformation of the ring, several attempts have been made to study the deformation behaviour, distribution of temperature and plastic strain of across the thickness of the ring. Zhou et al. [2] looked into the effect of changing the size of the rolls on deformation and temperature distribution. Increasing the main roll diameter, the strain distribution of the rings rolled becomes furthermore non-homogenous while the distribution of temperature became more uniform. On increasing the mandrel diameter, uniformity in the strain distribution is seen first followed by a decrease in uniformity later, whereas the temperature distribution becomes more non-uniform. Zhou et al. [4] looked into the plastic and temperature distribution across the thickness of the ring using

FE simulation. The plastic strain decreases from the ring surface to the centre of the cross section of

© Phalke Vikram, Nayak Soumyaranjan, Narasimhan K., Nandedkar V.M., 2019

the ring, while the reverse trend observed in temperature distribution.

Li et al. [8] developed 3D thermo-mechanically coupled FE model to analyse the effect of feed speed of rolls on the outer and inner diameter of the ring and plastic strain distribution across the ring thickness. Berti et al. [9] used FE simulation to determine the stable kinematic condition of different process parameters such as main roll rotation speed, mandrel feed rate etc. and to determine initial dimensions of the preform. Yang et al. [10] developed 3D FE – model to study the movement and position of guide roll in order to form precise quality rings. Zhou et al. [11] developed a finite element model of the RARR process to look into the effects of lubrication conditions and feed rate on temperature and strain distributions and their uniformity across the thickness of the ring. Giorleo et al. [12] looked into the effect of preform height on energy and force required in upsetting, piercing and during ring rolling process using FE modeling.

In the present study, effect of the combination of different process parameters on distribution of temperature and plastic strain is studied using thermo-mechanically coupled FE model developed in ABAQUS/Explicit. Taguchi method is used to find the optimal process parameters in the ring rolling process and analysis of variance (ANOVA) is carried out to find the impact of each process parameters.

Stable forming conditions

1. Rotational Speed of Main Roll (n_1) and Axial Roll (n_{a1})

The actual ring rolling process the linear speed of ring should be kept within the range of 0.4 to 0.6 m/sec to guarantee stability of rolling process [4]

The range rotational speed of the main roll is given by the following equation:

$$\frac{0.4}{R_1} < n_1 < \frac{0.6}{R_1} \quad (1)$$

Axial rolls rotational speed (n_{a1}) corresponding to the main roll can be calculated as follows [3]

$$n_{a1} = \frac{R_1 n_1}{R_{a1}} \quad (2)$$

2. Feed Speed of Mandrel (V_f) and axial rolls (V_a):

The feed speed ranges of the axial roll and mandrel depend on the draft (Δh), the radius of the main roll (R_1), the rotation speed of main roll (n_1), and initial (D_0) and final (D_f) diameter of the ring [3]:

$$\frac{2\Delta h_{min} R_1 n_1}{D_0} \leq V_f \leq \frac{2\Delta h_{max} R_1 n_1}{D_f} \quad (3)$$

$$\frac{2\Delta h_{min} R_1 n_1 (b_0 - b_f)}{D_0 (h_0 - h_f)} \leq V_a \leq \frac{2\Delta h_{max} R_1 n_1 (b_0 - b_f)}{D_f (h_0 - h_f)} \quad (4)$$

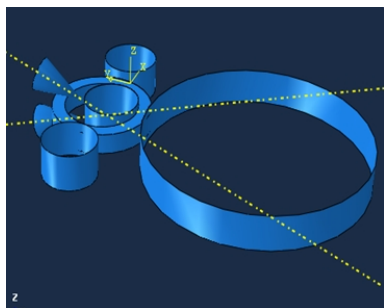
3D Finite Element modelling

In order to predict the influence of the combination of different process parameters on ring rolling process a 3D FE model is developed in ABAQUS/Explicit.

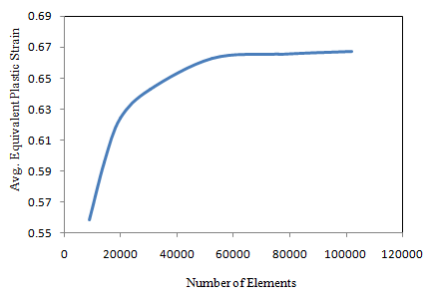
A thermo-mechanical coupled model with 8 nodes hexahedron elements (C3D8RT) is effectively used to simulate high-temperature ring rolling process as shown in **fig. 2 (a)**. The convergence study is carried out in order to decide an optimum number of elements as shown in **fig. 2 (b)**. The mass scaling and hourglass control is used to reduce computation time. The adaptive meshing technique is used to preserve the quality of mesh during the simulation. Heat convection coefficient; heat radiation coefficient and thermal contact conductance are defined in order to envisage the temperature variation of the ring with respect to rolling time. The initial temperature of the workpiece is assigned in 'predefined field' in ABAQUS at each node of the element. The workpiece is treated as deformable body and rolls as analytical rigid bodies. The Point mass and rotary inertia are defined to rigid bodies. The coefficient of friction is defined between the mandrel, main roll, axial rolls and the ring surface. The interaction amongst guide rolls and workpiece is kept as frictionless. The local coordinate system (rectangular) is defined and boundary conditions are applied on this coordinate system to control the movement of axial rolls. The developed FE model is validated with the model developed in Guo et al [3] for radial and axial force variation with respect to time.

Model validation

Table 1 shows the geometrical and process parameters. **Fig. 3** shows the variation of axial and radial force with respect to time. Predicted forces by simulation are measured with the simulation and experimental done by Guo et. al [3] and it is found that the simulation results and experimental results are in good agreement. There is an error in experimental and simulation data to some extent. This variation is due to material properties, friction between the rollers, the measurement technique used for force in experiment etc.



(a)



(b)

Fig. 2 a) Model developed in ABAQUS
b) Convergence study

Table 1

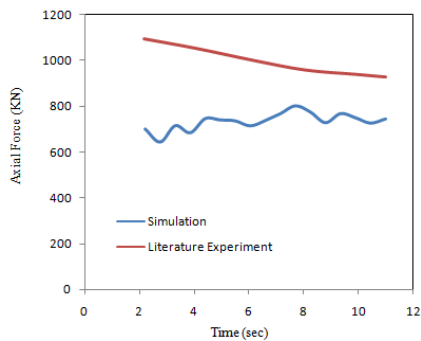
Geometrical and Process Parameters[3]

Process Parameters	Value
Outer diameters of the preform D_o , mm	483.1
Inner diameter of the preform d_o , mm	360
Height of the preform h_o , mm	84.8
Radius of the main roll R_1 , mm	550
Radius of the mandrel R_2 , mm	130
Taper angle of the axial rolls θ^0	35
Radius of the axial rolls R_{a1} , mm	72.6
Initial temperature of the ring, $^{\circ}\text{C}$	1020
Temperature of the rigid bodies, $^{\circ}\text{C}$	300
Temperature of the environment, $^{\circ}\text{C}$	20
Rotation speed of the main roll, n_1 (rad/sec)	1.5
Feed rate of the mandrel, V_f (mm/sec)	0.98

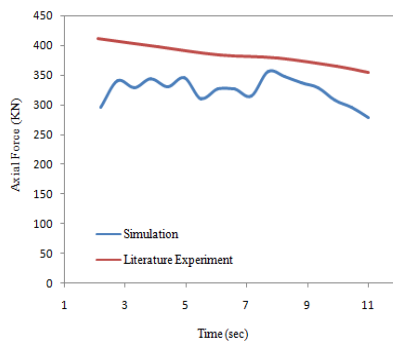
The selection of process parameters

In order to produce a stable forming condition, there is certain upper and lower limit for process parameters as mentioned in equation 1 to 4. For the above validated model, the range of feed rates of the mandrel is $V_f \in (0.1087, 1.60)$. The range for feed rates of axial roll is $V_a \in (0.07, 0.82)$, and the range for rotation speed of the main roll is $n_1 \in (0.72, 2.90)$.

In the present study combination of different process, parameters are taken into account to find the effect of these process parameters on the distribution of strain and temperature. The parameters chosen for study are in the range of stable forming condition as shown in Table 2.



(a)



(b)

Fig. 3 a) Axial and b) Radial force variation with respect time

Table 2

Parameters chosen for study

V_f (mm)	0.5	0.98	1.47
V_a (mm)	0.4	0.67	0.8
n_1 (rad/sec)	0.75	1.5	2.25

Results and Discussion

1. Plastic Strain and temperature Distribution

The Simulations were carried out with L_9 orthogonal array. **Fig. 4** shows the distribution of equivalent plastic strain (PEEQ) and temperature in the cross-section of the ring. From the **fig. 4** it can be found that PEEQ and temperature distribution is not uniform along the thickness of the ring. The maximum PEEQ found at the ring's outer and inner surface while it is minimum at the center region of the cross-section, the reason for this is that the ring is more plastically strained at the surface then at the bulk of the ring. The ring temperature is also non-homogenous; it increases from the outer surface of the ring to central region along thickness and again decreases from central portion to inner surface the ring. The reason for this is maximum heat loss takes from the surface of the ring due convection, radiation and due to thermal contact conductance between the rolls and the ring and deformation heat also adds to the temperature of the central region.

2. Quantifying Uniformity of Deformation and Temperature

In order to quantify the degree of deformation and temperature, the standard deviation can be calculated using the following formula[4]:

$$SD = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_a)^2}{N} \right)} \quad (6)$$

Where X_i is the value of PEEQ or temperature at the i^{th} element, X_a is the average value of all the elements and N is the total number of elements considered.

3. Design of Experiment and Taguchi Method

Taguchi method is an optimisation technique which is widely used in engineering analysis. The quality characteristic used here is:

Smaller-is-better (minimize),

$$[S/N]_{SB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7)$$

Where the n is number of observation and y is the observed data.

In the present work, the objective was to minimise standard deviation for strain and temperature so smaller-is-better quality characteristic was used. Three process parameters: mandrel feed rate (D) mm/s, axial roll feed speed (E) mm/s and main roll rotational speed (F) rad/s with three levels were used and is shown in **Table 2**.

The three values of response (SDP and SDT) were calculated at three cross-sections of the ring 90° apart as shown in **Table 3**. The average values of response were taken for further calculations. The signal to noise ratio (S/N) were found out by using smaller to better quality characteristic as shown in **Table 4**. The average S/N ratio values of the three factors at each different levels are shown in **Fig. 5**. The peak S/N ratio values were taken for each process parameter which represents the optimum condition [17]. It has been observed from the **fig. 5(a)** that optimal combination of parameters involved in the process for uniform distribution of equivalent plastic strain is $D_3E_3F_1$. It has been observed that the optimal combination of parameters involved in the process for uniform temperature distribution is $D_3E_2F_3$ in **fig. 5(b)**.

Table 3

Average SDP, SDT and S/N ratio

Simulation No.	SDP			SDT		
1	0.3548	0.3714	0.3416	6.5253	6.3346	6.6227
2	0.6845	0.6346	0.6820	6.2648	6.2987	6.1446
3	0.9081	0.8483	0.7633	5.4047	5.2502	5.2704
4	0.6343	0.6387	0.6167	4.8503	4.7931	4.9440
5	0.5015	0.4870	0.458	4.8925	4.8943	4.9515
6	0.3010	0.3221	0.2020	5.3471	5.1778	5.2046
7	0.3983	0.4186	0.3473	5.5300	4.3270	4.3731
8	0.5377	0.4809	0.4883	3.8095	3.7995	3.8295
9	0.2223	0.3619	0.1902	4.4404	4.4579	4.4616

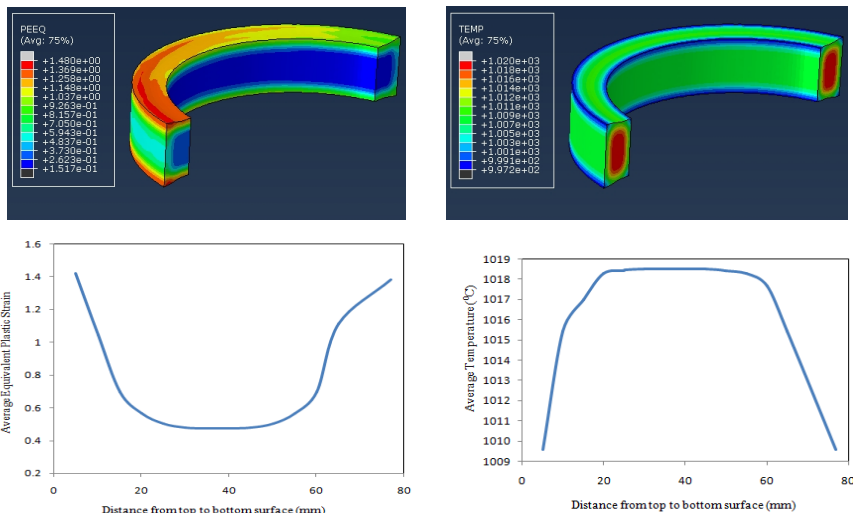


Fig. 4. PEEQ and Temperature distribution

Table 4

Average SDP, SDT and S/N ratio

Simulation No.	Average SDP	S/N Ratio	Average SDT	S/N Ratio
1	0.3559	8.9669	6.4942	-16.2505
2	0.6670	3.5118	6.2360	-15.8982
3	0.8399	1.4937	5.3084	-14.4993
4	0.6299	4.0135	4.8624	-13.7371
5	0.4821	6.3298	4.9127	-13.8265
6	0.2750	11.0563	5.2431	-14.3919
7	0.3880	8.1957	4.7433	-13.5217
8	0.5023	5.9692	3.8128	-11.625
9	0.2581	11.4145	4.4533	-12.9736

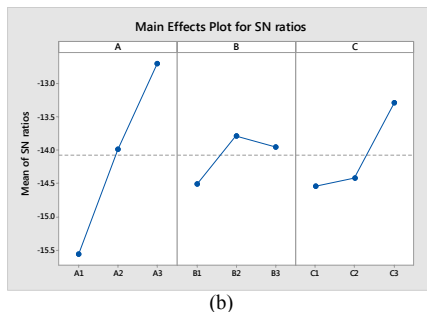
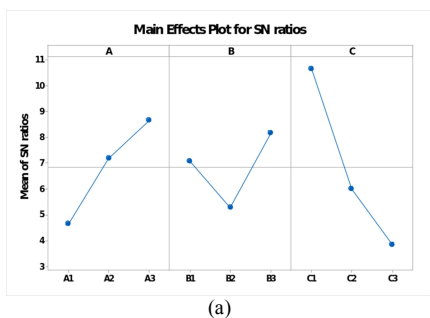


Fig. 5 Mean of S/N ratio for a) strain distribution
b) temperature distribution

4. Confirmation Test

The optimal combination of parameters involved in the process has been determined using Taguchi method. The confirmation test is carried out to determine and verify observed data by using optimum combination of process parameters. The optimum parameters for strain lie in the L_9 orthogonal array; therefore confirmation test is not mandatory for strain distribution. The confirmation test is carried out for optimum parameters $A_3B_2C_3$ for temperature distribution. The percentage error of 0.65% found in between mathematical equation and in actual run.



$$\text{Optimal value} = Y' + (D' - Y') + (E' - Y') + (F' - Y') \quad (8)$$

$$Y' = \frac{T}{N} \quad (9)$$

Where,

Y' : Average of total response value

T : total of average SDT for each simulation

N : number of simulations

$D', E' \wedge F'$: Average values of SDT and SDP for process parameter at their respective optimal level

Table 5

Confirmation Test

Sr. No	The optimum value of SDT by Eq.	Optimum value of SDT by actual run	% Error
1	3.7139	3.7383	0.65

5. Analysis of variance (ANOVA)

ANOVA method is used to explore the significance of parameters involved in the process in terms of percentage contribution. This analysis is carried out at 95% confidence level and 5% significance level. The last column of the ANOVA table 7 demonstrates the contribution of each process parameter in terms of percentage, which indicates the influence of each process parameters on the response. The total sum of the squared deviation is given by the following equation [18]

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - C.F. \quad (10)$$

Where n is the number of simulations in the orthogonal array, y_i is the response for i^{th} simulation and $C.F.$ is the correction factor.

$C.F.$ can be calculated as [18]:

$$C.F. = \frac{T^2}{n} \quad (11)$$

T is the total of the response.

In ANOVA table, the contribution of each process parameter is calculated by dividing the sum of squared deviation for each parameter by the total sum of squared deviation. The mean of the squared deviation is found out by dividing the sum of squared deviation by a number of degrees of freedom (DOF). Fisher test (F-value) is carried out to find which process parameter has a significant effect on response.

Table 6 shows the outcomes of ANOVA for plastic strain distribution.

5.1. ANOVA for PEEQ

Table 6

Analysis of variance for PEEQ

Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F-Value	% C
Mandrel Feed Speed (mm/s)	2	0.0881	0.0440	20.28	29.21
Axial Roll Speed (mm/s)	2	0.0113	0.0056	2.66	3.75
Main Roll Rotation Speed (r/s)	2	0.1921	0.0960	44.20	63.65
Error	2	0.0043	0.0021		3.38
Total	8	0.3018			

5.2. Analysis of Variance for temperature

Table 7

Analysis of variance for temperature

Source	DF	Sum of square	Mean Square	F-Value	%C
Mandrel Feed Speed (mm/s)	2	4.2718	2.1359	55.97	76.44
Axial Roll Speed (mm/s)	2	0.2843	0.142	13.73	5.08
Main Roll Rotation Speed (r/s)	2	0.9629	0.4814	12.62	17.23
Error	2	0.0763	0.0381		1.25
Total	8	5.5884			

It can be concluded that the main roll rotation speed has the largest contribution of 63.65% in uniform plastic strain distribution, mandrel feed speed has the contribution of 29.21% and axial roll feed speed has least contribution of 3.756%. Table 7 shows the outcomes of ANOVA for temperature distribution. It can be concluded that mandrel feed speed has the largest contribution of 76.44% in uniform temperature distribution, main roll rotation speed has the contribution of 17.23% and axial roll feed speed has the contribution of 5.08%

Conclusion

The effect of combinations of various process parameters on the degree of deformation and temperature distribution were studied using FE analysis. It can be concluding that:

1. The optimum combination of process parameters for uniform stain and uniform temperature distribution are $D_3E_3F_1$ and $D_3E_2F_3$ respectively was found out using Taguchi method.
2. From ANOVA, the contributions of process parameters for uniform stain distribution and temperature distribution is main roll rotation speed (n_1) > mandrel feed speed (V_f) > Axial roll feed speed (V_a) and mandrel feed speed (V_f) > main roll feed speed (n_1) > axial roll feed speed (V_a) respectively.

References

1. J.M. Allwood, E. Tekkaya, and T.F. Stanistreet. The development of ring rolling technology. *Steel Research International*, 2005, no. 2–3, pp. 111–120.
2. G. Zhou, L. Hua, and D.S. Qian. 3D coupled thermo-mechanical FE analysis of roll size effects on the radial-axial ring rolling process. *Computational Material Science*, 2011, vol. 50, no. 3, pp. 911–924.
3. L. Guo and H. Yang. Towards a steady forming condition for radial-axial ring rolling. *International Journal of Mechanical Science*, 2011, vol. 53, no. 4, pp. 286–299.
4. G. Zhou, L. Hua, J. Lan, and D.S. Qian. FE analysis of coupled thermo-mechanical behaviors in radial-axial rolling of alloy steel large ring. *Computational Material Science*, 2010, vol. 50, no.1, pp. 65–76.
5. L. Giorleo, E. Ceretti, and C. Giardini. Milling Curves Influence in Ring Rolling Processes. *Key Engineering Materials*, 2014, vols. 622–623, pp. 956–963.
6. X. Wang and L. Hua. Analysis of guide modes in vertical hot ring rolling and their effects on the ring's dimensional precision using FE method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, vol. 25, no. 3, pp. 655–662.
7. D.R. Nielsen, S.W. Thompson, C.J. Van Tyne, and M.C. Mataya. Grain Size Control in Ring-Rolled Alloy 718. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1994, pp. 373–392.
8. Q. Li, Z. Ma, T. Liu, F. Li, Z. Wei, and C. Su. 3D thermome-

chanically coupled FEM analysis of large disk rolling process and trial production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no. 1–4, pp. 403–411.

9. G. A. Berti, L. Quagliato, and M. Monti. Set-up of radial-axial ring-rolling process: Process worksheet and ring geometry expansion prediction. *International Journal of Mechanical Science*, 2015, vol. 99, pp. 58–71.
10. L.Li, H. Yang, L. Guo, and Z. Sun. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 205, no. 1–3, pp. 99–110.
11. J. Zhou, F.L. Wang, M.H. Wang, and W.J. Xu. Study on forming defects in the rolling process of large aluminum alloy ring via adaptive controlled simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 55, no. 1–4, 2011.
12. L. Giorleo, E. Ceretti, and C. Giardini. Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis. *International Journal of Mechanical Science*, 2013, vol. 74, pp. 55–64.
13. H. Lin and Z. Z. Zhi. The extremum parameters in ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 69, no. 1–3, pp. 273–276.
14. M. Kaladhar, K.V. Subbaiah, and C.H.S. Rao. Optimization of surface roughness and tool flank wear in turning of AISI 304 austenitic stainless steel with cvd coated tool. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 165–176.
15. K. Universiti, T. Tun, and H. Onn. Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, vol. 20, no. 1–2, pp. 503–506.
16. T. Kivak. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 2014, vol. 50, pp. 19–28.
17. N. Mondal, B. Doloi, B. Mondal, R. Das. Optimization of Flank wear using Zirconia toughened Alumina (ZTA) cutting tools: Taguchi Method and Regression Analysis. *Measurement*, 2011, vol. 44, no. 10, pp. 2149–2155.
18. S. Kamaruddin, Z.A. Khan, K.S. Wan, and N. Tebal. The use of the taguchi method in determining the optimum plastic injection moulding parameters for the production of a consumer. *Jurnal Mekanikal*, 2004, vol. 18, pp. 98–110.

Received 15/01/19

Accepted 14/02/19

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 621.77

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-24-31>

ОБЪЕМНЫЙ СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ КЭ-АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЕЦ

Фальке Викрам¹, Найак Сумяраян², Нарасимхан К.^{2*}, Нандедкар В.М.¹

¹ Инженерно-технологический институт Шри Гуру Гобинд Сингх-джи, Нандед, Индия

² Индийский технологический институт Бомбея, Мумбай, Индия. E-mail: nara@iitb.ac.in

Аннотация. Радиально-аксиальная раскатка колец представляет собой метод ступенчатого деформирования, применяемый при изготовлении бесшовных колец. Преимущества данного метода заключаются в высокой точности изготовления, кратковременном производственном цикле, а также значительной экономии материала. При этом отмечается неравномерность температуры и колебания пластической деформации. Технологические параметры, такие как скорость подачи раскатки, скорость вращения главного валка и скорость осевой подачи валка, оказывают влияние на распределение температуры и деформа-

ций. Для изучения воздействия различных комбинаций технологических параметров на равномерность температуры и деформаций с помощью комплекса ABAQUS/Explicit проводится сопряженный термомеханический КЭ-анализ. Для определения оптимальных технологических параметров применяется метод Тагути. Для оценки влияния технологических параметров на пластическую деформацию и температуру проводят анализ ANOVA, или дисперсионный анализ.

Ключевые слова: комплекс ABAQUS, технологические параметры, раскатка колец, термомеханический, Тагути, анализ ANOVA.

Поступила 15.01.19

Принята в печать 14.02.19

•
For citation

Phalke V., Nayak S., Narasimhan K., Nandedkar V.M. 3D Coupled Thermo-Mechanical FE analysis of effect of process parameters in ring rolling process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-24-31>

•
Образцы для цитирования

Phalke V., Nayak S., Narasimhan K., Nandedkar V.M. 3D Coupled Thermo-Mechanical FE analysis of effect of process parameters in ring rolling process // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-24-31>
•

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ГИЛЬЗЫ В НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

Выдрин А.В.^{1,2}, Аль-джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед^{2,3}, Шкуратов Е.А.^{1,2}

¹ ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

³ Багдад, Ирак

Аннотация. Развитие трубопрокатного производства привело к широкому использованию непрерывных станов с удерживаемой оправкой и 3-валковыми калибрами для раскатки гильз. В свою очередь, это потребовало уточнения ряда теоретических положений, связанных с изменением кинематики процесса. В процессе прокатки на непрерывном раскатном стане валки и оправка эксплуатируются при сложных температурных условиях и постоянных циклических знакопеременных нагрузках, в результате чего подвергаются значительному износу. В свою очередь, проведение прокатки при усилиях, достигающих критических значений, приводит к возникновению аварийных ситуаций, вызванных, в частности, разрушением материала рабочего инструмента (валки, оправка). Причем отмеченные обстоятельства наиболее выражены в первых клетях стана, где металл трубы подвергается большим обжатиям. Ввиду того, что деформация при прокатке труб в непрерывном стане распределяется в 5–6 клетях, это дополнительно накладывает определенные ограничения и снижает возможность варьирования технологическими параметрами процесса прокатки в более широком диапазоне. В связи с этим возникает необходимость в разработке и адаптации математических моделей для расчета, прогнозирования и выбора рациональных режимов обжатия для всего сортаментного ряда труб, производимого в непрерывном раскатном стане. В рамках данного исследования на основе энергетической теории разработана методика определения энергосиловых параметров процесса. При составлении уравнения равновесия проекций сил на продольную ось определены величины среднего давления на контакте с рабочими валками и оправкой. Разработанные математические модели и алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане позволили с достаточно высокой точностью определить усилия прокатки труб в непрерывном стане. Полученные зависимости могут быть использованы как в исследовательских целях, так и при расчете таблиц прокатки на трубопрокатных агрегатах с непрерывными раскатными станами.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, трубы, кинематика, усилие прокатки.

Введение

В настоящее время для производства бесшовных труб все более широкое применение в мире находят трубопрокатные агрегаты с раскатными станами нового поколения типа PQF и FQM [1–3, 15–17]. Особенности этих станов является применение рабочих клетей с 3-валковыми калибрами и удерживаемой оправкой [4–6]. Отмеченные особенности приводят к изменению кинематики процесса прокатки, что, в свою очередь, оказывает влияние на все остальные параметры технологического процесса. Соответственно возникает необходимость уточнения теоретического описания процесса непрерывной продольной прокатки труб с учетом отмеченных изменений.

Для анализа процесса непрерывной продольной прокатки труб прежде всего необходимо наличие математических моделей для определения энергосиловых параметров процесса и их связи со скоростным режимом прокатного стана. В настоящее время известен ряд методик расчета

силовых параметров процесса раскатки гильз в непрерывных раскатных станах [7, 10, 11, 14].

Основным недостатком этих методик является то, что они не учитывают влияние на энергосиловые параметры продольных усилий, возникающих в межклетевых промежутках. Учесть этот недостаток позволяет методика, основанная на рассмотрении условий равновесия проекций сил, действующих на очаг деформации в радиальном и продольном направлении [9]. При этом условия равновесия проекций сил на продольную ось позволяют определить величину среднего давления на контакте с рабочими валками.

$$p_{cp} = \frac{\pi}{nF_k \sin \frac{\sigma_0}{2}} [S_k \sigma_1 (d_x - s_k) - s_H \sigma_0 (d_H - s_H)] - \frac{f \sigma_{ср}}{F_k} \frac{F_{k1} - F_{k0}}{F_k} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2} \quad (1)$$

Давление, действующее на оправку в пределах очага деформации, определяется из условия равновесия проекций сил на радиальное направление

© Выдрин А.В., Аль-джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед, Шкуратов Е.А., 2019

$$p_{on} = p_{cp} \frac{F_k}{F_{kon}} \cos \frac{\alpha_0}{2} - f \sigma_{ср} \frac{F_k - F_{k0}}{F_k} \sin \frac{\alpha_0}{2}, \quad (2)$$

где n – число валков, образующих калибр;

F_k – площадь контактной поверхности трубы с валком;

d_n – средний диаметр трубы на входе в очаг деформации;

d_k – средний диаметр трубы на выходе из очага деформации;

s_n – толщина стенки трубы на входе в очаг деформации;

s_k – толщина стенки трубы на выходе из очага деформации;

σ_0 – напряжение от заднего продольного усилия;

σ_1 – напряжение от переднего продольного усилия;

$\sigma_{ср}$ – усредненное по объему очага деформации сопротивление металла пластической деформации;

F_{k1} – площадь зоны опережения;

F_{k0} – площадь зоны отставания;

α_0 – угол захвата;

f_{on} – коэффициент трения на контакте с правой;

$F_{кон}$ – одна треть площади контакта металла с оправкой.

Для определения угла захвата воспользуемся формулой [13]

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{d_n - d_k}{R_g}}, \quad (3)$$

где R_g – радиус вала по вершине калибра.

Ввиду сложности точного аналитического определения площади контактной поверхности для ее расчета воспользуемся приближенной методикой, приведенной в работе [12].

$$F_k = l \frac{d_n + d_k}{R_g}. \quad (4)$$

Длина очага деформации l определяется по формуле [12]

$$l = \sqrt{(d_n + d_k) \cdot R_g}. \quad (5)$$

Из формул (1), (2) видно, что для вычисления значений средних контактных давлений необходимо прежде всего знать значения продольных напряжений, возникающих в межклетевых промежутках. Величины σ_0 , σ_1 , F_{k0} , F_{k1} определяются кинематикой процесса непрерывной раскатки гильз, и для их вычисления может быть применен энергетический метод, базирующийся на уравне-

нии баланса мощностей.

Методика их определения основывается на следующем. Ввиду того, что последняя клеть непрерывного стана, как правило, является проглаживающей, коэффициент вытяжки в ней небольшой и соответственно изменение скорости трубы также незначительно. На основании этого можно принять, что скорость трубы на выходе из последней клетки k -клетевого стана равняется средней линейной скорости валков последней клетки. В свою очередь, средняя линейная скорость валков определяется следующим образом:

$$v_{ek}^{cp} = \frac{\pi \cdot n_{ek}}{2} (d_B + d_B), \quad (6)$$

где n_{ek} – частота вращения валков k -й клетки стана;

d_B и d_B – диаметр бочки вала и диаметр по дну калибра.

Определим составляющие баланса мощностей для случая продольной раскатки гильзы. При анализе кинематики раскатки гильзы в стане продольной прокатки использовалось поле скоростей, приведенное в работе [16]:

$$v_z = v_1 \left[1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(1 - \frac{z}{l} \right) \right];$$

$$v_p = v_1 \left[1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{z}{l} \right) \right] \frac{\rho}{r R_g}, \quad (7)$$

где v_1 – продольная скорость трубы на выходе из очага деформации;

μ – коэффициент вытяжки.

Для этого поля скоростей интенсивность касательных напряжений после некоторых упрощений может быть записана в виде

$$H = 2v_1 \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 \frac{z}{l} - 1 \right) + \frac{z}{(d_n + d_k) R_g} \left(1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 \frac{z}{l} - 1 \right) \right) \right]. \quad (8)$$

Соответственно мощность формоизменения будет равна

$$N_{\phi} = 1,15\pi \sqrt{\frac{2}{3}} v_1 \sigma_{ср} \left(\frac{d_n + d_k}{2} - \delta_0 \right) \times$$

$$\times \left[\frac{l^2}{(d_n + d_k) R_g} + \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(1 - l - \frac{5l^2}{6(d_n + d_k) R_g} \right) \right]. \quad (9)$$

Для определения площадей зон отставания и опережения, входящих в уравнение (1), необходимо знать уравнение границы между этими зонами. Это уравнение можно получить, приравняв

горизонтальную проекцию вектора окружной скорости вала к горизонтальной проекции вектора скорости металла. В результате получим уравнение

$$y_r = \sqrt{R_k^2 - \left[R_b + R_k - \frac{v_1}{2\pi n_b} \times \left(1 - \frac{z_y}{l} \left(\frac{\mu-1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{z_y}{l} \right) \right) \right]^2}. \quad (10)$$

Однако в связи с тем, что площадь контактной поверхности принята в виде прямоугольника, границу между зонами опережения и отставания также целесообразно принять в виде прямой линии, перпендикулярной направлению прокатки. В этом случае $z_y = z_{yc} = \text{const}$. Тогда z_{yc} определяется как среднее арифметическое между значениями по вершине калибра и на продольной границе очага деформации (рис. 1).

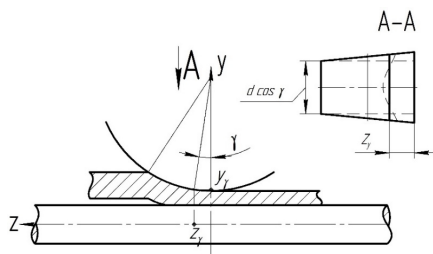


Рис. 1. К определению координаты z_y

В соответствии с формулой (9) z_y в вершине калибра будет равна

$$z_{y0} = l \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{\mu-1} \right) \left(1 - \frac{2\pi n_b R_k}{v_1} \right)} \right]. \quad (11)$$

Координата z_y на продольной границе очага деформации будет равна

$$z_{y1} = l \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\mu}{\mu-1} \left[1 - \frac{2\pi n_b}{v_1} \times \left(R_k + R_k - \sqrt{R_k^2 - \frac{(r_n + r_k)^2}{4}} \right) \right]} \right]. \quad (12)$$

Зная границу между зонами опережения и отставания, можно определить мощность активных сил трения [6], подводимую вальцами в очаг деформации:

$$N_r = f \sigma_{sc} v_1 \frac{r_n + r_k}{2} \times \left[2 z_{yc} \left(1 - \frac{\mu-1}{\mu} \frac{z_{yc}}{l} + \frac{z_{yc}}{3l} \right) - l \frac{2+\mu}{3\mu} \right]. \quad (13)$$

В процессе раскатки затрачивается мощность сил трения-скольжения на контакте внутренней поверхности трубы с оправкой. Используя подходы, описанные в работе [13], она может быть определена по формуле

$$N_{con} = 2\pi f_0 \sigma_{sc} l \left(v_1 \frac{2+\mu}{3\mu} - v_{on} \right), \quad (14)$$

где v_{on} – скорость перемещения оправки.

Следует отметить, что формула (14) получена для условий полного охвата оправки металлом труб. В реальных условиях металл охватывает оправку не по всему периметру, поэтому в формуле (14) целесообразно ввести множитель $k = \psi/\pi$, где ψ – угол охвата оправки металлом [3].

Наряду с отмеченными выше видами мощности, к очагу деформации при раскатке гильз могут подводиться мощности, создаваемые продольными усилиями в межклетевых промежутках. Согласно известным формулам мощности заднего N_0 и переднего N_1 продольных усилий равны:

$$N_0 = \pi \sigma_0 s_n v_1 \left(\frac{2r_n - s_n}{\mu} \right); \quad (15)$$

$$N_1 = \pi \sigma_1 s_k v_1 (2r_n - s_k). \quad (16)$$

Подставляя формулы (8), (12), (13), (14) и (15) в уравнение баланса мощностей, получим выражение для определения напряжения σ_0 :

$$\begin{aligned} \sigma_0 = & \frac{f \sigma_{sc} \mu (r_n + r_k)}{2\pi s_n (2r_n - s_n)} \times \\ & \times \left[2 z_{yc} \left(1 - \frac{\mu-1}{\mu} \frac{z_{yc}}{l} \left(1 + \frac{z_{yc}}{2l} \right) \right) - l \frac{2+\mu}{3\mu} \right] - \\ & - \frac{2 f_0 \sigma_{sc} l \mu}{s_n (2r_n - s_n)} \left(\frac{2+\mu}{3\mu} - \frac{v_{on}}{v_1} \right) + \sigma_1 - \\ & - 1,15 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sigma_{sc} \mu (r_n + r_k - \delta_0)}{s_n (2r_n - s_n)} \times \\ & \times \left[\frac{l^2}{2(r_n + r_k) R_b} + \frac{\mu-1}{\mu} (1-l) - \frac{5l^2}{12(r_n + r_k) R_b} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Однако формула (17) не позволяет вычислить σ_0 , т.к. в неё входит неизвестная величина σ_1 .

Для определения величины продольных уси-

лий, возникающих в межклетевых промежутках, в работе [9] представлена методика, использующая уравнение баланса мощностей, записанное для всего непрерывного раскатного стана. С использованием этой методики определяется величина секундного объема. Однако полученное уравнение является очень трудоемким для решения, даже с использованием современной компьютерной техники [14]. Поэтому для решения поставленной задачи предлагается следующий алгоритм:

1. На основе принятой гипотезы о том, что скорость выхода трубы из непрерывного стана равняется средней линейной скорости валков последней клетки, определяется величина секундного объема:

$$V_{ск} = v_{ак}^{сп} \frac{\pi \cdot n_{ак}}{2} (D_B + D_B) \cdot S_k, \quad (18)$$

где S_k – площадь поперечного сечения трубы на выходе из непрерывного стана.

2. Полученная величина секундного объема подставляется в уравнение баланса мощностей 1-й клетки стана и, с учетом того, что для неё заднее натяжение равно нулю, определяется переднее натяжение.

3. Переднее натяжение для первой клетки является задним натяжением для второй клеток стана. Соответственно, зная заднее натяжение для второй клетки и величину секундного объема, из уравнения баланса мощностей определяется переднее натяжение для 2-й клетки.

4. Процесс вычислений аналогично продолжается вплоть до последней k -й клетки стана.

5. После этого по формулам (1), (2) определяется давление на валки и оправку в каждой из клеток непрерывного раскатного стана.

Момент на валках определяется по известным зависимостям, например, представленным в работе [14]:

$$M = PR_s \sin \frac{\alpha_0}{2} \pm (T_0 - T_1) R_r, \quad (19)$$

где P – усилие, действующее на валок;

T_0 – заднее продольное усилие;

T_1 – переднее продольное усилие;

R_r – радиус валка, соответствующий координате z_{rc} (катающий радиус).

Для проверки адекватности разработанной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров процесса прокатки было проведено сопоставление результатов с производственными данными. Исходные данные, принятые при расчёте, соответствовали технологии прокатки труб

наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм с использованием имеющейся экспериментальной информации. Результаты сопоставления представлены на рис. 2.

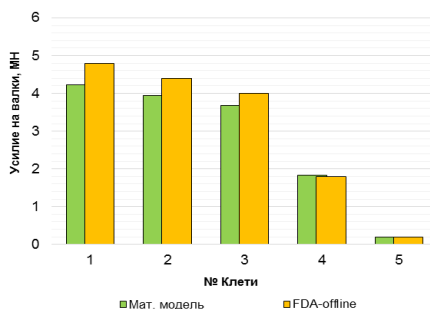


Рис. 2. Результаты сопоставления величины усилия на валки по клетям стана FQM

Заключение

Таким образом, на основе энергетической теории прокатки разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса прокатки труб с использованием непрерывных раскатных станов нового поколения.

Сопоставление результатов расчета с производственными данными показало высокую степень схожести, в особенности в последних (чистовых) клетях стана, что в свою очередь подтвердило адекватность разработанного алгоритма и математических моделей. Разница между усилиями на валки для черных клеток стана, полученными расчетным путем и замеренными в производственных условиях, обусловлена прежде всего погрешностью определения площади контактной поверхности. С целью дальнейшего совершенствования разработанной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований, необходимых для выявления закономерностей влияния параметров процесса прокатки на угол охвата оправки и величину уширения раската.

Список литературы

1. Теоретические и практические проблемы процесса раскатки гильз на современном непрерывном стане / А.В. Выдрин, Д.О. Струин, И.Н. Черных, Е.А. Шкуратов, М.В. Буняшин. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 72–82.
2. Шкуратов Е.А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Челябинск, 2017. 166 с.

3. Струин Д.О. Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Челябинск, 2017. 170 с.
4. Wu, J. Characteristics of Manufacturing Process and Equipment of $\phi 508$ mm PQF 3 roll Mandrel Pipe Mill / J. Wu. Steel pipe, 2013(6), vol. 42, no. 3, pp. 44–50.
5. Li, X. Optimized Design and Application of Rolls of $\phi 258$ mm PQF Mandrel Mill / X. Li, Q. Bai, X. Zhou, X. Yin. Steel Pipe, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 64–68.
6. Sun, Sh. Development of technology of PQF process for rolling Heavy-wall, Extra-sort tube / Sh. Sun, X. Guan, H. Ding, Sh. Ma. Steel pipe, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 42–45.
7. Потанов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. М.: Металлургия, 1991. 424 с.
8. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 451 с.
9. Пьянков Б.Г., Выдрин А.В., Широков В.В. Разработка компьютерной модели ТПА со станом FQM для определения степени влияния возмущающих параметров на результаты процесса прокатки // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч. 2. М.: ООО «Белый ветер», 2014. С. 95–102.
10. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Теория и технология трубного производства. Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАП», 2001. 544 с.
11. Выдрин А.В., Широков В.В. Компьютерное моделирование скоростного режима непрерывной прокатки труб // Сталь. 2011. №2. С.56–58.
12. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. М.: «Интермет Инжиниринг», 2007. 560 с.
13. Выдрин В.Н., Федосиев А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. М.: Металлургия, 1970. 456 с.
14. Храмов Е.В. Повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редукции: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. / Храмов Евгений Владимирович. Челябинск, 2017. 165 с.
15. Ku, H. Development of Structure of 3-roll Mandrel Pipe Mills and Relevant Comparative Analysis / H. Ku, G. Xiao, Y. Chang, P. Zhang. Steel Pipe, 2015(6), vol. 44, no. 3, pp. 59–62.
16. Wang, X. Optimization of process Equipment and production Practice of $\phi 460$ mm PQF Plant / X. Wang, W. Yang, F. Hu, K. Xia, C. Bai. Steel Pipe, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 49–54.
17. Fan, Q. Advanced technologies and equipment applied to $\phi 159$ FQM 3-roll mandrel mill plant // Sichuan Metallurgy. 2015(2), vol. 29, no. 1, pp. 19–22.

Поступила 15.04.19

Принята в печать 13.05.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37>

ALGORITHM FOR CALCULATING THE ENERGY PARAMETERS OF THE PROCESS OF ROLLING HOLLOW BILLETS ON A CONTINUOUS MILL

Alexander V. Vydrin – DSc (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences (RANS), Professor, Deputy General Director for Research, Russian Research Institute of Tube and Pipe Industries OJSC (RosNITI OJSC); South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vydrinav@rosniti.ru

Evgeny A. Shkuratov – PhD (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Longitudinal Rolling Laboratory Russian Research Institute of Tube and Pipe Industries OJSC (RosNITI OJSC), South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: shkuratov@rtural.ru

Mohammed J.M. Al-Jumaili – Postgraduate Student Baghdad, Iraq. E-mail: aljumailimohamad@gmail.com

Abstract. The development of pipe rolling has led to the widespread use of continuous mills with a retained mandrel and 3-roll gauges for rolling hollow billets. Consequently, this required the updating of a number of theoretical positions related to changes in kinematics of the process. In the rolling process on a continuous rolling mill, the rolls and the mandrel are operated under difficult temperature conditions and constant cyclic alternating loads; as a result, they are subjected to considerable wear. Therefore, when force values reach critical ones, rolling contributes to emergency situations caused, in particular, by the destruction of the material of working tools (rolls, the mandrel). Moreover, the stated circumstances are mostly found in the first mill stands, where the pipe mate-

rial is subjected to great reductions. Due to the fact that the deformation during pipe rolling on a continuous mill is distributed among 5–6 stands, this additionally imposes certain limitations and reduces the possibility of varying the rolling process parameters in a wider range. In this regard, there is a need to develop and adapt mathematical models for calculating, predicting, and selecting an optimal rolling schedule depending on the product mix of a continuous tube rolling mill. As part of this study, a method for determining the energy parameters of the process has been developed on the basis of the energy theory. When preparing the equilibrium equation for the projections of forces on the longitudinal axis, the authors determined average values of pressure at the contact with

work rolls and the mandrel. The developed mathematical models and the algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill made it possible to determine with a sufficiently high accuracy rolling force on a continuous tube rolling mill. The dependencies found can be used both for research purposes and the calculation of rolling tables on tube rolling machines with continuous rolling mills.

Keywords: Continuous rolling, tubes, kinematics, rolling force.

References

1. Vydrin A.V., Struin D.O., Chernykh I.N., Shkuratov E.A., Bunyashin M.V. *Teoreticheskie i prakticheskie problemy protsessa raskatki gilz na sovremennom nepreryvnom stane* [Theoretical and practical problems of the hollow billet rolling process on a modern continuous rolling mill]. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2015, pp. 72–82. (In Russ.)
2. Shkuratov E.A. *Optimizatsiya protsessa nepreryvnoy raskatki gilz s tselyu povysheniya tochnosti goryachekatannykh besshovnykh trub*. Diss. kand. tekhn. nauk [Optimization of a hollow billet continuous rolling process to improve the accuracy of hot rolled seamless pipes. PhD diss.]. Chelyabinsk, 2017, 166 p. (In Russ.)
3. Struin D.O. *Sovershenstvovanie tekhnologii prodolnoy prokatki trub na osnove sozdaniya i ispolzovaniya novykh nauchno obosnovannykh tekhnicheskikh resheniy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improved pipe longitudinal rolling technology by creating and using new science-based technical solutions. PhD diss.]. Chelyabinsk, 2017, 170 p. (In Russ.)
4. J. Wu. Characteristics of the manufacturing process and equipment of $\varnothing 508$ mm 3 roll pipe mandrel PQF mill. *Steel pipe*, 2013 (6), vol. 42, no. 3, pp. 44–50.
5. X. Li, Q. Bai, X. Zhou, X. Yin. Optimized design and application of rolls of $\varnothing 258$ mm mandrel PQF mill. *Steel Pipe*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 64–68.
6. Sh. Sun, X. Guan, H. Ding, Sh. Ma. Development of technology of PQF process for rolling heavy-wall, extra-sort tube. *Steel pipe*, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 42–45.
7. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Teoriya trubnogo proizvodstva* [Theory of tube production]. Moscow: Metallurgy, 1991, 424 p. (In Russ.)
8. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: MISIS Publishing House, 2015, 451 p. (In Russ.)
9. Pyankov B.G., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Developing a computer model of the pipe rolling plant with FQM to measure the impact of disturbing parameters on the rolling process. *Sbornik dokladov mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa OMD 2014. Fundamentalnye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii* [Proceedings of International Scientific and Technical Congress OMD 2014. Fundamental problems. Innovative materials and technologies]. Part 2. Moscow: LLC White wind, 2014, pp. 95–102. (In Russ.)
10. Druyan V.M. Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A. *Teoriya i tekhnologiya trubnogo proizvodstva* [Theory and technology of tube production]. Dnipropetrovsk: RIA Dnepr-VAL, 2001, 544 p. (In Russ.)
11. Vydrin A.V., Shirokov V.V. Computer simulation of pipe continuous rolling speed. *Stal* [Steel], 2011, no. 2, pp. 56–58. (In Russ.)
12. Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Pipe production technology and equipment]. Moscow: Internet Engineering, 2007, 560 p. (In Russ.)
13. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Protsess nepreryvnoy prokatki* [Continuous rolling process]. Moscow: Metallurgy, 1970, 456 p. (In Russ.)
14. Khramkov E.V. *Povyshenie effektivnosti izgotovleniya goryachedeformirovannykh trub na osnove fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya protsessa reduktirovaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of manufacturing hot worked tubes based on a physical and mathematical simulation of the reduction process. PhD diss.]. Chelyabinsk, 2017, 165 p. (In Russ.)
15. H. Ku, G. Xiao, Y. Chang, P. Zhang. Development of structure of 3-roll mandrel pipe mills and relevant comparative analysis. *Steel Pipe*, 2015(6), vol. 44, no.3, pp. 59–62.
16. X. Wang, W. Yang, F. Hu, K. Xia, C. Bai. Optimization of process equipment and production practice of $\varnothing 460$ mm PQF plant. *Steel Pipe*, 2014, vol. 43, no.3, pp. 49–54.
17. Q. Fan. Advanced technologies and equipment applied to $\varnothing 159$ FQM 3-roll mandrel mill plant. *Sichuan Metallurgy*, 2015(2), vol. 29, no. 1, pp. 19–22.

Received 15/04/19

Accepted 13/05/19

Образец для цитирования

Выдрин А.В., Аль-джумали Мохаммед Жасим Мохаммед, Шкуратов Е.А. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 32–37. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37>

For citation

Vydrin A.V., Al-Jumali M.J.M., Shkuratov E.A. Algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 32–37. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37>

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

UDC 669.1

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-38-48>SUSTAINABLE STAINLESS STEEL – A REVIEW
ON ACID REGENERATION SYSTEMS FOR APPLICATION
IN CONTINUOUS PICKLING LINESRögener F.¹, Lednova Yu.A.², Andrianova M.Yu.², Lednov A.V.³¹Institute of Chemical Process Engineering and Plant Design, TH Köln, Germany²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia³Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Steels go through several processing steps to reach the desired state of delivery. Properties and quality of stainless steel are mainly determined by the quality of the product surface. In high temperature processes, such as annealing, rolling and forging, scale layers of 5 to 10 µm thickness consisting of oxides and oxide hydrates are formed on the steel surface. Furthermore, underneath the scale layer the chromium content of the alloy is depleted by diffusion effects, leading to reduced chemical stability. Thus, the chemical removal of both the scale layer and the chromium depleted layer in pickling processes is a fundamental step to achieve clean and homogeneous surfaces. Most of the steels are pickled at least once, usually several times. Strong mineral acids are commonly applied as pickling media. For stainless steel pickling, usually mixtures of nitric acid and hydrofluoric acid – so called mixed acids – are applied. Due to the chemical reaction, an enrichment of the pickling medium with detached scale particles, dissolved metal salts (bound acid), as well as a depletion of active acid (free acid) takes place. In this way, the pickling medium loses its effectiveness and must be replaced or refreshed. This causes significant emissions of acidic waste streams, which need to be treated to comply with regulations. The waste streams contain considerable amounts of dissolved heavy metals, nitrates, and free acid. Commonly, precipitation neutralization is applied; however, this leads to a loss of the dissolved valuables. Furthermore, significant amounts of neutralization sludge are generated, which need to be disposed of, as they constitute hazardous wastes. For both environmental and economic reasons the loss of valuables should be avoided. For this reason, pickling media are continuously regenerated in modern pickling lines. The focus may be on acid recovery only – this is referred to as partial regeneration – or on a combined acid and metal recovery – this is referred to as total regeneration.

Keywords: Stainless steel finishing, pickling, acid pickling, scale removal, acid recovery, metal recovery.

Introduction

Stainless steels are designed especially for demanding, high-quality applications, where heat resistance, chemical resistance or resistance against any kind of corrosion is required. The term “stainless steel” comprises a group of alloys mainly based on iron, carbon and chromium. Chromium serves for the formation of a dense, tightly adherent passive layer, which separates the alloy from the medium [1]. The passive layer consists of different and hard chromium oxides, as well as a chromium depleted metal layer of several µm thickness underneath the oxide layer. Chromium depletion leads to reduced corrosion resistance [2].

To improve specific properties – such as hardness, strength or corrosion resistance – further alloy-

ing elements are added, such as nickel, manganese or others [3, 4].

Worldwide, there is a growing demand for stainless steel products in food and beverage [5], chemical, nuclear [6, 7], oil and gas industries [8]. It has become increasingly popular to prevent reinforcement corrosion of buildings, transport and energy infrastructures [9, 10]. Stainless steel is used as bipolar plate material for the production of Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) [11–13].

The ever-increasing globalization of the world economy has led to a shift in the market shares of stainless steel producing countries. In 2017, more than 50% of all stainless steel melt shop products were generated China, s. **Table 1**.

Increasing stainless steel production exacerbate global environmental problems, if the production does not follow the best available technologies. Cold rolling lines – comprising a combination of different annealing and pickling steps – generate

© Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V., 2019

Table 1

Stainless melt shop products in 1,000 metric tons
in 2008–2017 [14]

Country/Region	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
China	14,091	16,087	18,984	21,692	21,562	24,938	25,774
Total EU	7,559	7,455	7,147	7,252	7,169	7,280	7,377
Germany	1,502	1,313	1,091	864	459	414	436
Russian Federation	125	112	152	123	95	90	n.i.
USA	2,074	1,977	2,030	2,389	2,346	2,481	2,754
Total World	33,621	35,917	38,130	41,686	41,548	45,778	48,081

n.i. not indicated

gaseous, solid and liquid waste products that are hazardous and toxic for the environment. Prevention, reuse and recycling can be achieved by implementing a number of BATs that are briefly introduced in the following.

Only when the stainless steel surface is clean and homogeneous, a passive oxide film based on oxides and hydroxides of chromium can be formed that is chemically inert [1, 15].

Hot working of stainless steel – such as annealing, rolling and forging – is always accompanied by oxidation and chromium diffusion phenomena, thus surface finishing is an essential production step, which may comprise mechanical treatment, electrolytic descaling, and chemical pickling followed by water rinsing [16, 17].

Microstructure of the steel and complexity of scale layers influence the mechanism and kinetics of pickling. The respective microstructure of the respective steel grade – austenite, ferrite, martensite, and duplex steel – require different heat treatment (annealing) conditions – such as varying temperatures and annealing times, as well as reducing and oxidizing furnace atmospheres. This leads to the formation of complex multilayered oxides. Scale formed during annealing of standard austenitic steels AISI 301, 304L and 309L is dense and has a thickness $< 1 \mu\text{m}$, whereas the scale formed during hot rolling and annealing was found to have a thickness $> 1 \mu\text{m}$ and a more porous structure [18].

Only a clean, homogeneous stainless steel surface has a high corrosion resistance [19]. Accordingly, scale and chromium depleted layer need to be removed from the surface. Also, the generation of surface defects caused by hot and cold rolling have a significant effect on the pickling process [18].

Scale layers are complex in structure. Therefore,

the descaling process for stainless steels comprises several steps, such as mechanical descaling, electrolytic pickling and final chemical pickling, occasionally a subsequent blank pickling and passivation of the surface takes place. For pickling of high-alloyed austenitic grades, higher acid concentrations are required than for ferritic grades. There is no pickling solution, which can be applied for all kinds of stainless steels. On the one hand, this depends on the fact that the respective oxides and base metals have a very different dissolution behavior. On the other hand, the different dissolved metal ions show different inhibiting influence on the dissolution of the base metal. Therefore, optimal acidity and optimum metal concentration must be found for each material group [20]. Pickling of stainless steels is predominantly carried out with aggressive solutions composed of nitric acid HNO_3 and hydrofluoric acid HF, referred to as mixed acid [21–23]. Pickling with nitric acid alone would quickly lead to passivation of the stainless steel surface. HNO_3 and HF have different tasks: While the strong oxidant HNO_3 mainly reacts with the metal oxides and the chromium depleted metal layer, which results in the formation of Fe^{3+} , Cr^{3+} and Ni^{2+} ions, HF is a strong chelating agent that will form complexes with the generated Fe^{3+} , Cr^{3+} and Ni^{2+} ions. At concentrations $> 40 \text{ g/l}$ the fluoride complexes can precipitate [24]. Mixed acid pickling solutions are used at temperatures up to 60°C [25].

Up to the present, HNO_3 -free pickling solutions are used to a minor extend, as the application range is limited and the pickling process is harder to control [26, 27].

Due to the chemical reaction, an enrichment of the pickling medium with detached scale particles, dissolved metal salts (bound acid), as well as a depletion of acid that can still react with metals (so called free acid) takes place. In this way, the pickling medi-

um loses its effectiveness and must be replaced or refreshed, although it still contains a significant amount of unspent acid [28]. The best pickling effect can be achieved within a range of 35 to 70% of the saturation concentration of the appropriate metal salts. **Table 2** depicts the typical concentration range of sludge, spent acid, and rinse water.

Table 2

Composition of waste streams from stainless steel rolling plants [29–31].

	Sludge	Spent acid	Rinse water
Fe	18 wt. %	28–45 g/l	0.5 g/l
Cr	40 wt. %	5–15 g/l	0.05 g/l
Ni	2.5 wt. %	3–10 g/l	0.02 g/l
F ⁻	0.5 wt. %	15–80 g/l	0.5 g/l
NO ₃ ⁻		100–180 g/l	1 g/l
Free acid		3 mol/l	0.02 mol/l

Precipitated metal salts as well as detached scale are dispersed in spent pickling solutions [2]. According to Ito et al. the particle size ranges from <0.5 µm up to 30 µm [33] and the concentrations of suspended solids is between 9 mg/L to 800 mg/L [34]. Measurement of the particle size distribution showed a time depending increase of the particle size (median value) from 9 to 53 µm. Accordingly, the sedimentation velocity amounts to ca. $3.1 \cdot 10^{-4}$ m/s [33].

Characterisation of the sludge particles revealed following composition [33]:

SS304: Mainly Fe₂O₃, FeCr₂O₄; the total Cr content was about 30 %.

SS405: FeO, FeCr₂O₄, Cr₂O₃; the total Cr content was about 40%.

Today, the disposal of spent acid and rinse water is still often done using precipitation neutralization with lime milk, a dispersion of solid Ca(OH)₂ in water. The generated neutralization sludge is de-watered in chamber filter presses and then dumped. The main disadvantages of precipitation neutralization are the loss of valuable metals as well as still active acid, and high costs of neutralization chemicals and disposal.

Regeneration

Up to 50% of the total acid purchased ends up in the waste products generated by pickling lines, such as metal oxide containing sludge, spent acids, acidic gases, and wastewater from rinsing processes [35]. These wastes must be treated to meet the respective environmental standards. Accordingly, acid regeneration technologies contribute to reduced operating costs and reduced environmental impact of pickling lines. They can be divided into partial and total regeneration of the components. Partial regeneration

denotes those processes, which aim at the recovery of the free acid only. These include diffusion dialysis, electrodialysis, crystallization, and acid-retardation.

Total regeneration denotes those processes that aim at the recovery of both, free acid and bound acid. The technical and economic suitability of a specific partial or total regeneration process depends on the type of acid and the amount of pickling acid to be treated.

For the treatment of nitric / hydrofluoric acid containing pickling solutions, diffusion dialysis, retardation, and pyrohydrolysis are of particular technical relevance. The advantages and disadvantages, as well as any development prospects of these processes are briefly described below.

In the recent past, several reviews have been published with focus on the treatment of spent acidic solutions in the metal finishing industry [36] or on spent pickling solutions from steel processing [30]. Agrawal and Sahu [36] only focus on the treatment of different acidic waste solutions containing hydrochloric acid and sulfuric acid. Regel-Rosacka [30] considers the 3 most important steel pickling solutions. However, she makes errors in the description of the characteristics of regeneration methods. E.g., she wrongly denotes retardation as a process for metal recovery. Actually, a direct recovery of the acids is possible with retardation, while dissolved metals are transferred into the by-product. Metal recovery from the byproduct would be feasible only with additional technology. Furthermore, she stresses that pyrohydrolysis (spray roasting) serves for acid recovery only. In fact, pyrohydrolysis is a process for the total recovery of both, free acids and metals dissolved in spent acid (bound acids). And pyrohydrolysis is only one part of a process chain.

1. Pre-Treatment

To prevent blocking or mechanical damages of subsequent treatment steps as well as blocking of the pickling tanks, the suspended solids must be removed continuously from the pickling solution. Today, mainly four technologies are industrially applied, namely

- Sedimentation in external sedimentation tanks or lamella clarifiers. Sedimentation is affected by the high specific liquid gravity of the solution and convection currents due to the high temperature. Another specific disadvantage of sedimentation is the high water content of the slurry withdrawn from the bottom of the sedimentation tank [34].

- Multi-media filters, which can be used to re-

move particles up to 1 μm . For the application in acid recovery, the applied filter material must be resistant to chemical attack. Multimedia filters consist of at least two layers, a coarse particulate material serves for the removal of the multitude of suspended solids, and a finer layer which serves for the removal of traces of suspended solids. During operation, the suspended solids accumulate in the filter material, which leads to an increasing pressure drop. Accordingly, the filter must be back-washed. Generally, operating costs of multimedia filters are low, because the filter media does not need to be replaced [34, 37].

- Cartridge filtration using filter clothes. The feed is pressed perpendicular through the filter cloth surface, thus the rejected particles build up a dense filter cake, which acts as a separate filter medium with a small cut-off. According to the resulting flux decline or pressure, the cartridge filter is back-washed with compressed air or with a mixture of filtrate and compressed air [38].

- Microfiltration. With a membrane cut-off of 0.1–0.2 μm about 99% of the particle load of typical pickling solutions be removed. Microfiltration results in a particle free filtrate (permeate) stream and a retentate stream (suspension), which contains nearly all of the removed particles. The maximum concentration of particles in the retentate is restricted due to the density of the generated suspension [39–41].

2. Partial Regeneration

With the help of partial regeneration, the consumption of fresh nitric and hydrofluoric acid, can be significantly reduced. However, metal containing waste solutions are generated, which have to be treated. All in all, partial regeneration has a positive impact on the operating costs of pickling lines and on the environment.

According to literature, the most important partial regeneration processes for spent stainless steel pickling solutions are diffusion dialysis and retardation. Other processes which are often mentioned are electrodialysis (ED) and nanofiltration (NF) and extraction. However, these processes have never been used as single plants in large rolling mills.

2.1. Diffusion dialysis

Diffusion dialysis (DD) for acid recovery is a membrane separation process, the driving force of which is a concentration gradient on either side of special anion exchange membranes. The membrane stack consists of a multitude of compartments formed by anion exchange membranes, which allow

acids to permeate from the spent acid solution into a clean phase, but which retain dissolved metals due to their charge and the selectivity of the membrane. The depleted feed (dialysate) leaves the upper part of the stack as an effluent containing high concentrations of metal salts and a low concentration of remaining acid [42].

With DD about 80–90% of the free acid from nitric acid containing spent pickling solutions can be recovered, the metal rejection is between 71% [43] and 93–97% [44]. The total amount of wastewater cannot be reduced with DD, as about 1 m^3 of spent acid generates about 1 m^3 wastewater [45].

The separation behavior of a DD membrane can be influenced by different operating parameters, such as flow velocity, feed concentration, temperature and differences in hydrostatic pressure between diffusate and dialysate. Fluoride has a stronger affinity to iron in the complexed compounds of the mixed acid and gradually replaces nitrate. Thus, a nitric acid recovery of > 100 % becomes possible [46, 47]. Furthermore, these effects can be explained by the concentration depending diffusivity of HNO_3 through the membrane [47].

Kun et al. [48] investigated diffusion dialysis on lab scale for the recycling of spent pickling liquors based on nitric acid. They observed that acid recovery rate decreased with the increase of feed flow rate and acid concentration. The acid recovery rate was more than 80% and metal rejection was more than 95% at equivalent volume flows of feed and water.

2.2. Retardation

Generally, acid retardation is a fully automated process comprising two major steps: In the first step, spent pickling solution is passed through a resin bed consisting of strongly alkaline anion exchangers, which adsorb the contained acid, while the remaining de-acidified metal salt solution – referred to as byproduct – leaves the resin bed. The byproduct forms a waste stream, which needs to be treated. As soon as the adsorption capacity of the resin is exhausted, the second step is started: The acid bound to the resin is released with desalted water due to osmotic pressure differences. Afterwards, the described cycle is repeated. Typically, the total cycle comprising acid adsorption, acid desorption and solution displacement last between 3 and 5 minutes. The total volume of the waste solution is not reduced. Similar to diffusion dialysis 1 m^3 of spent acid generates about 1 m^3 wastewater [20, 49].

With the help of retardation, about 98% of nitric acid and 80–90% of the fluoric acid could be recovered, metal removal was 80–90% [49].

2.3. Electrodialysis

Electrodialysis (ED) is a membrane process for the enrichment of charged substances (here: metals, protons, nitrate, fluoride) in aqueous solutions applying ion-selective membranes - alternating anion exchange membranes AEM and cation exchange membranes CEM – in an electric field. The electrodialysis module consists of alternating anion-selective and cation-selective membranes (ion exchange membranes) which are separated by so-called spacers. Under the influence of a direct current electric field the anions are transported through the anion exchange membranes and the cations are transported through the cation exchange membranes, while the respective ions are rejected by membranes with the same charge. Thus, in adjacent chambers alternately a concentration and dilution occurs. Electrodialysis allows both, the recovery and concentration of acids and the separation of metals from a solution. The recovery of nitric acid is about 80%. Industrial-scale investigations showed that the nitrate content in the wastewater generated as a byproduct of retardation or diffusion dialysis could be reduced by 55% [50–52]. However, recovery of the costly hydrofluoric acid was only about 5%-10%. This is explained by the formation of undissolved HF and a multitude of complexed salts with different electric charges [53–56].

To prevent damage of the membrane stack, fluoride resistant electrodes have to be used. ED is not suitable for the direct treatment of spent acids, as – due to Faraday's law – the applied power is proportional to the intended concentration difference between feed and product. However, ED can be used to further decrease the nitrate content of retardation byproduct or diffusion dialysis dialysate. In the European stainless steel industry, there are 2 large-scale electrodialysis plants in operation, which help to reduce the eutrophication of the receiving waters [57].

A variation of conventional ED is electrodialysis with bipolar membranes (EDBM), which can be used to convert dissolved salts into their corresponding acids and bases, as bipolar membranes promote water splitting. The membrane stack consists of bipolar membranes in conjunction with conventional cation and anion exchange membranes. EDBM requires an applied current density between 500 and 1500 A/m² [58]. The industrial-scale application of EDBM is shown in chapter 2.3.

Negro et al. [59] describe a two-stage process for the treatment of a stainless steel pickling acid based on HNO₃ and HF. In the first stage, diffusion dialysis serves for the recovery of about 97% of HNO₃ and 50% of HF. While the diffusate is fed

back to the pickling line; KOH is fed to the dialysate, which is acid depleted and contains nearly all of the dissolved metal salts of the initial solution, forming metal hydroxide sludge. The sludge is separated from the neutralized solution and drained. The neutralized solution is split in an EDBM plant into mixed acid - which is fed back to the pickling bath - and base solution – which serves for neutralizing the DD dialysate.

Disadvantages of bipolar ED are especially the high energy demand, as the current density is comparatively high (about 100 mA/cm²) and proton permeation through the bipolar membranes.

2.4. Extraction

Solvent extraction is a separation technique based on the partition equilibrium of substances between two immiscible liquid phases - an aqueous phase (spent acid) and an organic phase composed of an extractant and an organic solvent. Basically, extraction is divided into 3 steps:

- Mass transfer of the desired component from the initial aqueous to the organic phase (extraction)
- Removal of impurities from the organic phase into the aqueous phase (scrubbing)
- Mass transfer of the desired component from the organic phase to another aqueous phase (re-extraction or stripping) in order to recover the extractant.

The initial aqueous phase depleted of the desired component is referred to as raffinate.

3. Total regeneration

A major limitation of partial regeneration processes is that they can only recover free acids, while a significant part of hydrofluoric acid and the dissolved metals cannot be recovered since they are lost as metallic fluoride salts in the waste solutions that must be treated by neutralization-precipitation to meet the respective legal limits. Thus, several processes were developed with the aim to recover both, free and bound acid.

3.1. Pyrohydrolysis

The most important total regeneration processes in terms of installed plants are based on thermal processes, namely pyrohydrolysis, which is based on several high temperature chemical reactions [60], s. **Table 3**.

In the high temperature reactor, the metal salts are transferred into solid metal oxides, the respective respective acids are transferred to the gaseous phase. Accordingly, they need to be recovered from the flue gas of the reactor in absorption col-

umns. Drawback of pyrohydrolysis is the decomposition of a part of the nitric acid leading to the formation of NOx [61]. In a downstream oxidation column these NOx gases are converted into HNO₃. Thus, the total recovery rate is increased substantially [60]. However, remaining NOx in the exhaust gas must be eliminated by catalytic treatment (denitrification) which results in the formation of harmless N₂ [62].

For the pyrohydrolytic regeneration of spent pickling solutions containing HNO₃ and HF, two basic reactor principles are applied, spray roaster and fluidized bed reactor [63]. The Austrian company Andritz provides the spray roaster concept (Pyromars), the German company Steuler provides the fluidized bed technology with integrated downstream nanofiltration to achieve a higher HNO₃ recovery (STAR process) [64]. CMI UVK provides both, spray roasters and fluidized bed reactors. Spray roasters and fluidized bed reactors especially differ in size and quality of the generated oxides. Thermal regeneration processes allow the recovery of up to 99% HF and up to 90% of HNO₃, if nanofiltration is applied prior to the thermal processes. Up to 99% of Fe, Cr and Ni are recovered in the generated oxide, which can be reused in the steel smelting process.

Due to the higher recovery rate of the expensive fluoric acid, pyrohydrolysis can be a more economic option compared to retardation. The disadvantage of the thermal processes is the considerable technical and financial effort for installation and operation. Thus, economic operation of pyrohydrolysis is only feasible for spent acid volume flows > 0.3 m³/h or a required metal discharge of about 100 kg/h [64].

Spent acid is not the only acidic wastewater that is generated during pickling. Due to carry over of pickling acid into the subsequent rinsing zones of pickling lines, the rinsing water quality decreases. Andritz invented the ZEMAP process for the treatment of spent rinsing water as an addition to the PYROMARS process. Spent rinsing water is neutralized by ammonium in a first step, which results in the formation of soluble ammonium salts, such as NH₄F and NH₄NO₃. The neutralized solution is fed to the pyrohydrolysis reactor as well. The ammonium salts decompose under the given process parameters and the metal salts form metal oxides [60].

3.2. Kawasaki Process

The Kawasaki process was initially invented by Nisshin Steel Corp. Kawasaki Steel developed it further and in 1982 they commissioned an industrial-size regeneration plant with a capacity of 24 m³/day spent acid at their Chiba site. Basically, the process comprises following stages, s. **Table 4**:

In a first step, Fe³⁺ is selectively extracted from the spent pickling acid using 30% D2EHPA and 70% n-paraffin (in table 2 the extractant is abbreviated as HR). During subsequent stripping, Fe³⁺ extracted in the organic phase reacts with NH₄HF₂ (aq) and forms a ferric ammonium fluoride complex (NH₄) FeF₆ in the aqueous phase, which precipitates as crystals. These crystals are decomposed at about 500°C and form solid Fe₂O₃ and gaseous fluoride, which is removed from the flue gas by absorption. The iron depleted spent acid (raffinate of the 1st extraction) is mixed with HCl. Thus, nickel and chromium chloride is formed and HNO₃ is released. In a next step, HF and HNO₃ are extracted from the resulting solution using 70% TBP and 30% n-paraffin. From this organic phase, the mixed acids are stripped by water and can be recycled back to the pickling line. The acid depleted, metal salt enriched solution (raffinate of the 2nd extraction) is neutralized, this causes metal hydroxide precipitation. The hydroxides are separated and mixed with sulfuric acid. Then, they undergo a chemical conversion, during which mixed metal oxides are generated that can be re-used. Iron extraction of the process was about 95%, nitric acid recovery was about 95%, and hydrofluoric acid recovery was about 70% [65].

3.3. OPAR-Prozess

Outokumpu's acid recovery process (OPAR) was developed for a capacity of 1.4 m³/h spent acid and was commissioned in their Tornio site in 1985. In a first process step concentrated sulfuric acid (80–85%) is added to the spent mixed acid at an elevated temperature of 160–180°C. This leads to the precipitation of metal sulfates. The solution is fed to a vacuum evaporator, where HF and HNO₃ are separated from the remaining solution. The metal salts are afterwards removed by fractionated precipitation. The recovery of nitric acid and hydrofluoric acid is 95% and 99%, respectively [66].

3.4. Allied Signal Corp. process at Washington Steel

Washington Steel implemented a regeneration system based on bipolar electrodialysis (EDBM) supplied by Allied-Signal Corp., s. **Table 5**.

Table 3

Simplified reactions of pyrohydrolysis processes, after [60]

Process step	Unit operation	Reaction
Reactor	Evaporation	$H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$ $HNO_3(aq) \rightarrow HNO_3(g)$ $HF(aq) \rightarrow HF(g)$
	Chemical conversion	$FeF_3 + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6HF$ $CrF_3 + 3H_2O \rightarrow Cr_2O_3 + 6HF$ $NiF_2 + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6HF$ $2HNO_3 \rightarrow NO_2 + NO + O_2 + H_2O$ $NO_2 \leftrightarrow NO + 1/2 O_2$
Acid adsorber	Absorption	$HNO_3(g) \rightarrow HNO_3(aq)$ $HF(g) \rightarrow HF(aq)$
Oxidation column	Chemical conversion	$NO + 1/2 O_2 \leftrightarrow NO_2$
Catalytic de-nitrification (Denox)	Chemical conversion	$2NO_2(g) + O_2 + 4NH_3(g) \leftrightarrow 3N_2(g) + 6H_2O(g)$ $4NO(g) + O_2 + 4NH_3(g) \rightarrow 4N_2(g) + 6H_2O(g)$

Table 4

Simplified reactions of the Kawasaki Steel process, after [65]

Process step	Unit operation	Reaction
Iron separation from the spent acid	Fe Extraction	$FeF_2^+ + 3\overline{HR} \rightarrow \overline{FeR_3} + H^+ + 2HF$ $FeF_2^+ + \overline{HR} \rightarrow \overline{FeF_2R} + H^+$
	Fe Stripping	$\overline{FeR_3} + 3NH_4HF_2 \rightarrow 3\overline{HR} + (NH_4)_3FeF_6$ $\overline{FeF_2R} + 3NH_4HF_2 \rightarrow \overline{HR} + (NH_4)_3FeF_6 + 2HF$
Iron oxide formation from the crystals generated after stripping	Thermal decomposition at about 500 °C	$(NH_4)_3FeF_6 + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow 3NH_4F + \frac{3}{2}F_2 + \frac{1}{2}Fe_2O_3$
	Absorption	$2F_2 + 2H_2O \rightarrow 4HF + O_2$
Acid recovery from the iron depleted solution (raffinate of the 1 st extraction)	Chemical conversion	$Cr(NO_3)_3 + 3HCl \rightarrow CrCl_3 + 3HNO_3$ $Ni(NO_3)_2 + 2HCl \rightarrow NiCl_2 + 2HNO_3$
	Acid extraction	$HNO_3 + \overline{TBP} \leftrightarrow \overline{HNO_3 \cdot TBP}$ $HF + \overline{TBP} \leftrightarrow \overline{HF \cdot TBP}$
	Acid stripping	$\overline{HNO_3 \cdot TBP} \leftrightarrow HNO_3 + \overline{TBP}$ $\overline{HF \cdot TBP} \leftrightarrow HF + \overline{TBP}$
Ferrite formation from the iron and acid depleted solution (raffinate of the 2 nd extraction)	Neutralisation	$(3-x-y)Fe^{2+} + xCr^{3+} + yNi^{2+} + (6+x)OH^-$ $\rightarrow Ni_yFe_{3-x-y}Cr_x(OH)_{6+x}$ $H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O$
	Chemical conversion	$Ni_yFe_{3-x-y}Cr_x(OH)_{6+x} + \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{4}\right)O_2$ $\rightarrow Ni_yFe_{3-x-y}Cr_xO_4 + \left(3 + \frac{x}{2}\right)H_2O$

HR = extractant comprising D2EHPA and n-paraffin

overbars denote components in the organic phase

TBP = tributyl phosphate

Table 5

Simplified reactions of the Allied Signal Corp. EDBM Process at Washington Steel [67]

Process step	Unit operation	Reaction
Neutralisation of spent acid	Chemical conversion	$2\text{KOH} + \text{HF} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{KF} + \text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{FeF}_3 + 3\text{KOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{KF}$ $\text{CrF}_3 + 3\text{KOH} \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{KF}$ $\text{NiF}_2 + 2\text{KOH} \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{KF}$
EDBM of the neutralized solution	Electro chemical conversion	$\text{KF} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KOH} + \text{HF}$ $\text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KOH} + \text{HNO}_3$
Conventional ED of the EDBM diluate	Concentration / dilution	

In an initial step, spent acid is mixed with KOH to promote neutralization of the solution, and to release fluoride from bound acid. This way, metal hydroxides are generated which precipitate, while KF is dissolved. After separation of the hydroxide particles, the neutralised solution is fed into a 3 chamber EDBM that is operated batch wise in order to achieve a high efficiency. In the EDBM stack, the KF containing solution is split into KOH and mixed acid, while the initial solution is depleted (diluate). The generated mixed acid is fed back to the pickling line, while the generated KOH serves for neutralizing the spent acid. The EDBM diluate is then treated in a conventional ED to recover a higher concentrated KF solution that is also fed to the EDBM feed. The ED diluate is used for rinsing the filtered hydroxide sludge. The whole process aims at closed loops of the respective solutions. Between 1989 and 1990 about 1.5 Mio. Gallons/year of spent pickling acid were processed and about 90% of the employed acids could be recovered. This led to a ROI < 3 years [67].

Summary

In the production chain of stainless steels, pickling is a particularly quality determining step. Pickling with aqueous acid solutions comprising HNO_3 and HF has the largest industrial relevance. During the pickling process, a portion of the scale layer and parts of the base metal are dissolved and form metal salts, the concentration of which increases gradually in the pickling solution. At the same time, the concentration of the free acid decreases. Both effects lead to a decrease of pickling efficiency, so that upon reaching a certain concentration of dissolved metals the pickling bath must be regenerated or discarded. This entails a comprehensive sewage or concentrate treatment. Several commercial processes based on either the recovery of acid or the total recovery of acids and dissolved metals are available.

Their application depends on country-specific conditions, such as energy costs or the infrastructure for further processing of the recovered metal oxides.

This collaboration was made possible by the kind support of the Erasmus+ mobility project

References

1. R. Kirchheim, B. Heine, H. Fischmeister, S. Hofmann, H. Knote, U. Stolz: The passivity of iron-chromium alloys. *Corros. Sci.* 29 (1989) 899–917.
2. D.M. Price, G.L. Horter: Waste minimization in stainless steel pickling solutions: A study to model dissolution kinetics of the chromium-depleted surface. *Metal Finishing* 2 (1994) 60–65.
3. A. W. Loginow, J. F. Bates: Influence of Alloying Elements on the stress corrosion behavior of austenitic Stainless Steel, *Corrosion* 25 No. 1 (1969) 15–22.
4. D.P. Moon: Role of reactive elements in alloy protection. *Materials Science and Technology* 5 No. 8 (1989) 754–764.
5. T.A. Mamvura, S. E. Iyuke, J. D. Cluett and A. E. Paterson: Soil Films in the Beverage Industry: A Review. *J. Inst. Brew.* 117 No. 4 (2011) 608–616.
6. E.A.Kenik, J.T.Busby, M.N.Gussev, P.J.Maziasz, D.T.Hoelzer, A.F.Rowcliffe, J.M.Vitek: Structure and mechanical properties of improved cast stainless steels for nuclear applications. *Journal of Nuclear Materials* 483 (2017) 35–43.
7. H. Kim, H. Jang, G. O. Subramanian, C. Kim, C. Jang: Development of alumina-forming duplex stainless steels as accident-tolerant fuel cladding materials for light water reactors. *Journal of Nuclear Materials* 507 (2018) 1–14.
8. T. J. Mesquita, E. Chauveau, M. Mantel, N. Bouvier, D. Koschel: Corrosion and metallurgical investigation of two supermartensitic stainless steels for oil and gas environments. *Corrosion Science* 81 (2014) 152–161.
9. M. Corradi, A. Di Schino, A. Borri, R. Rufini: A review of the use of stainless steel for masonry repair and reinforcement. *Construction and Building Materials* 181 (2018) 335–346.
10. D. Addari, B. Elsener, A. Rossi: Electrochemistry and surface chemistry of stainless steels in alkaline media simulating concrete pore solutions. *Electrochimica Acta* 53 (2008) 8078–8086.

11. A. Fattah-alhosseini, S. Vafaeian: Passivation behavior of a ferritic stainless steel in concentrated alkaline solutions. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 4, Issue 4, (2015) 423–428.
12. R.C. Makkus, A.H.H. Janssen, F.A. de Bruijn, R.K.A.M. Mallant: Use of stainless steel for cost competitive bipolar plates in the SPFC. *J Power Sources*, 86 (1–2) (2000), pp. 274–282.
13. H. Wang, J.A. Turner: Ferritic stainless steels as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells *J Power Sources*, 128 (2) (2004) 193–200.
14. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2018_English_Public.pdf. (Accessed: 04.08.18).
15. C.O.A. Olsson, D. Landolt: Passive Films on Stainless Steels: Chemistry, Structure and Growth. *Electrochimica Acta* 48 (2003) 1093–1104.
16. D. Henriet: Stainless steel surface treatments. pp. 823–847. In: P. Lacombe, B. Baroux, G. Beranger (eds.): *Stainless Steels*. Les Editions de Physique, Les Ulis Cedex A, France, 1993.
17. A. Bornmyr, J. Toesch, F. Winkler: *Pickling Handbook - Surface treatment of stainless steels*, 2nd edit., Centrumtryck, Sweden, 2009.
18. D. Lindell, R. Pettersson: Pickling of process-oxidised austenitic steels in HNO₃-HF mixed acid. *Steel Research Int.* 81 (2010) 542–551.
19. W. Fredriksson, S. Malmgren, T. Gustafsson, M. Gorgoi, K. Edström: Full depth profile of passive films on 316L stainless steel based on high resolution HAXPES in combination with ARXPS. *Applied Surface Science* 258 (2012) 5790–5797.
20. R. Rituper: *Beizen von Metallen*, Leuze Verlag, Sauglau (1993).
21. B.S. Covino, J.V. Scalera, T.J. Driscoll, J.P. Carter: Dissolution behaviour of 304 stainless steel in HNO₃/HF mixtures. *Metall Trans A* 1986;17A:137–49.
22. L.F. Li, P. Caenen, M. Daerden, D. Vaes, G. Meers, C. Dhondt, et al.: Mechanism of single and multiple step pickling of 304 stainless steel in acid electrolytes. *Corros Sci.* 47 (2005) 1307–1324.
23. D.P. Whittle, G.C. Wood: Complex scale formation on an iron-18% chromium alloy. *J. Electrochem Soc* 114 (1967) 986–993.
24. J.B. Stephenson, G.L. Horter, H.H. Dewing: Iron removal and the complexity of stainless steel pickling liquors, in J.E. Dutrizac, A.J. Monhemius: *Iron control in hydrometallurgy*, Ellis Horwood Ltd., 571–581, Chichester 1986.
25. J.B. Stephenson, J.C. Hogan, R.S. Kaplan: *Recycling and Metal Recovery Technology for Stainless Steel Pickling Liquors*. *Environmental Progress* 3 No. 1 (1984) 50–53.
26. F. Mancía: Treatment plant for continuous regeneration of stainless steels exhaust pickling solutions based on HNO₃-free process, European Commission contract No. 7215-PP/003, Final Report, Brussels 2002.
27. L. Narvaez, E. Cano, J.M. Bastidas: Effect of ferric ions in AISI 316L stainless steel pickling using an environmentally friendly H₂SO₄-HF-H₂O₂ mixture, *Materials and Corrosion* 54 (2003) 84–87.
28. N.Y. Ghare, K.S. Wani, V.S. Patil: A review on methods of recovery of acid(s) from spent pickle liquor of steel industry. *Journal of Environmental Science & Engineering* 55 (2) (2013) 253–266.
29. F. Rögner, M. Sartor, A. Bán, D. Buchloh, T. Reichardt: Metal recovery from spent stainless steel pickling solutions. *Resources, Conservation and Recycling* 60 (2012) 72–77.
30. [M. Regel-Rosocka: A review on methods of regeneration of spent pickling solutions from steel processing 2010.
31. J.L. Gálvez, J. Dufour, C. Negro, F. López-Mateos: Fluoride Speciation in Stainless Steel Pickling Liquor. *ISIJ International* 46 No. 2 (2006) 281–286.
32. [A. Singhal, V.K. Tewari, S. Prakash: Characterization of stainless steel pickling bath sludge and its solidification/stabilization. *Building and Environment* 43 (2008) 1010–1015.
33. M. Ito, R. Tachibana, K. Fukushima, Y. Seino, A. Yamamoto, Y. Kawabata: Characteristics and production mechanism of sulfuric acid and nitric-hydrofluoric acid pickling sludge produced in manufacture of stainless steel. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 31(4) (1998) 589–595.
34. <http://www.ecotec.com/techpapers/TP%20147%20Mixed%20Acid.pdf>. (Accessed: 04.08.18).
35. <http://www.scanacon.com/en-us/home/> (Accessed: 04.08.18).
36. A. Agrawal, K.K. Sahu: An overview of the recovery of acid from spent acidic solutions from steel and electroplating industries. *Journal of Hazardous Materials* 171 (2009) 61–75.
37. Mixed acid recovery with the APU acid sorption system, *ECO TEC Technical paper* 147 (1997) (Accessed: 04.08.18).
38. <http://www.scanacon.com/en-us/products/overview/acid-solids-separation/> (Accessed: 04.08.18).
39. <https://engineering.steuler.com/en/acid-regeneration> (Accessed: 19.08.18).
40. <http://www.scanacon.com/en-us/products/overview/acid-solids-separation/> (Accessed: 19.08.18).
41. F. Rögner, D. Buchloh, T. Reichardt, J. Schmidt, F. Knaup: Total regeneration of mixed pickling acids from stainless steel processing. *Stahl und Eisen* 10 (2009) 69–73.
42. A. Deutsche, Diffusion dialysis – an economical technology for recovery of acids from pickling processes, in: *Report, OSMOTA Membrantechnik GmbH, Germany*, 1992.
43. D. Baley: Recycling of pickle liquor with diffusion dialysis. *Stainless Steel Nov./Dec.* (2003) 10–11.
44. [\http://www.purecycle.com/right.html (Accessed: 18.08.18).
45. Sturm, W.: *Rückgewinnung von Rohstoffen und Wasser aus Abwässern am Beispiel chemischer Oberflächenbehandlungsanlagen*; Proceedings: Colloquium Produktions-integrierter Umweltschutz, 2./4.09.1996, Bremen.
46. Oh, S.-J.; Moon, S.-H.; Davis, T.: Effects of metal ions on diffusion dialysis of inorganic acids, *Journal of Membrane Science* 169 (2000) 95–105.
47. Z. Palaty, A. Zakova: Transport of nitric acid through the anion exchange membrane Neosepta-AFN, *Desalination* 160 (2004) 51–66.
48. W. Kun, W. Wei and X. Wei-hong, Recovery of nitric acid from pickling solution of steels by diffusion dialysis. *Membrane Science and Technology* 6 (2010) 62–65. (In Chinese).

49. Recovery of stainless steel pickle liquors: Purification vs. Regeneration, ECO TEC Technical Paper 158 (2002). <http://www.eco-tec.com> (Accessed: 10.09.18).
50. Rapp, H.-J.: Säureaufbereitung in kombinierten Prozessen mit Elektrodialyse; Preprints: 8. Aachener Membrankolloquium, 27./29.03.2001, Aachen.
51. H.J. Rapp, F. Rögner, M. Sartor, T. Reichardt: Regeneration of stainless steel pickling solutions by a multi-stage process consisting of retardation, electrodialysis and membrane electrolysis. Filtech 2009, Preprints Vol. II 521–528, Wiesbaden (2009).
52. S. Lunner: Possible Methods for complete recovery of acids and metals from mixed acid pickling of stainless steel, in Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metall Processing: Technical and Economic Aspects, 16.-20.06.2002, Lulea, Vol. 1 (2002) 529-541.
53. J.B. Stephenson, G.L. Horter, H.H. Dewing: Iron removal and the complexity of stainless steel pickling liquors, in J.E. Dutrizac, A.J. Monhemius: Iron control in hydrometallurgy, Ellis Horwood Ltd., 571-581 Chichester 1986.
54. L.A. Fernando: Solution chemistry of HNO₃/HF pickle mixtures, Metallurgical Transactions B, Vol. 21B (1990) 5-9.
55. R.G. Reddy, S. Wang, B. Chen: Solubility of iron in spent pickling solutions, Minerals & Metallurgical Processing 102 (1993) 102–107.
56. D.M. Price, G.L. Horter: Waste minimization in stainless steel pickling solutions: A study to model dissolution kinetics of the chromium-depleted surface, Metal Finishing Febr. (1994) 60–65.
57. Per Nymark: Picked Recycling of Nitric Acid from Waste Pickling Acid by Electrodialysis. EU research project LIFE00 ENV/S/000853 http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=1853&docType=pdf (Accessed: 19.08.2018).
58. G. Pourcelly: Electrodialysis with Bipolar Membranes: Principles, Optimization, and Applications. Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 38, No. 8 (2002) 919–926. From Elektrokimiya, Vol. 38, No. 8 (2002) 1026–1033.
59. C. Negro, M.A. Blanco, F. Lopez-Mateos, A.M.C.P. DeJong: Free acids and chemicals recovery from stainless steel pickling baths. Sep. Sci. Technol. 36 (2001) 1543–1556.
60. F. Baerhold, J. Starcevic, K. Reichert: Reduction of nitrates in stainless steel pickling. Millennium Steel 2006. 238–239.
61. W. Wukovits, W. Kamer, A. Lebl, M. Harasek, A. Friedl: Simulation and optimization of the reactive absorption of HF/HNO₃ during pickling acid regeneration. In: S. Pierucci (Editor): European Symposium on Computer Aided Process Engineering – 10; 2000, 919–924.
62. W. F. Kladnig: New Development of Acid Regeneration in Steel Pickling Plants. Journal of iron and steel research, International. 15 No. 4 (2008) 01–06.
63. D. Mayr, L. Coronardo: Processes for acid-recovery of pickling and oxide quality improvement for the steel industry SEASI Quarterly 32 (2003) 28–36.
64. F. Rögner, D. Buchloh, T. Reichardt, J. Schmidt, F. Knaup: Total regeneration of mixed pickling acids from stainless steel production. Stahl und Eisen 10 (2009) 69–73.
65. T. Watanabe, M. Hoshino, K. Uchino, Y. Nakazato: A New Acid and Iron Recovery process in Stainless Steel Annealing and Pickling Line. Kawasaki Steel Technical report No. 14 (March 1986) 72-82.
66. T. Koivunen: Stainless steel pickling acid recovery, Metallurg. Plant Technol. 1 (1987) 65–66.
67. C. McArdle, J.A. Piccani, G.G. Thornburg: AQUATECH Systems' pickle liquor recovery process – Washington Steel reduces waste disposal costs and liability, Iron and Steel Engineer 68 No. 5 (1991) 39–43.

Received 24/04/19

Accepted 22/05/19

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 669.1

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-38-48>**СТОЙКАЯ НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ. ОБЗОР СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ КИСЛОТЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛИНИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАВЛЕНИЯ**Рёгенер Ф.¹, Леднова Ю.А.², Андрианова М.Ю.², Леднов А.В.³¹Институт разработки химических процессов и проектирования производств, Кёльн, Германия²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: alednov@mail.ru

Аннотация. Стали проходят несколько этапов обработки, чтобы достичь желаемого состояния доставки. Свойства и качество нержавеющей стали в основном определяются качеством поверхности изделия. В высокотемпературных процессах, таких как отжиг, прокатка и ковка, на поверхности стали образуются окислы толщиной от 5 до 10 мкм, состоящие из оксидов и гидратов оксидов. Кроме того, под слоем окислы

содержание хрома в сплаве истощается за счет диффузионных эффектов, что приводит к снижению химической стабильности. Таким образом, химическое удаление как слоя окислы, так и слоя, обедненного хромом, в процессах травления является фундаментальным шагом для достижения чистых и однородных поверхностей. Большинство сталей протравливают как минимум один раз, обычно несколько раз.

Сильные минеральные кислоты обычно применяются в качестве травильных сред. Для травления нержавеющей стали обычно используют смеси азотной и плавиковой кислот - так называемые смешанные кислоты. В результате химической реакции происходит обогащение травильной среды отслоившимися частицами окислы, растворенными солями металлов (связанной кислотой), а также истощение активной кислоты (свободной кислоты). Таким образом, травильная среда теряет свою эффективность и должна быть заменена или обновлена. Это приводит к значительным выбросам потоков кислых отходов, которые необходимо обработать в соответствии с правилами. Потоки отходов содержат значительное количество растворенных тяжелых металлов, нитратов и свободной кислоты. Обычно применяется нейтрализация осадков, однако это приводит к потере растворенных ценностей. Кроме того, образуется значительное ко-

личество нейтрализующего осадка, который необходимо утилизировать, поскольку он представляет собой опасные отходы. По экологическим и экономическим причинам следует избегать потери ценностей. По этой причине травильные средства постоянно регенерируются на современных линиях травления. Акцент может быть сделан только на извлечении кислоты - это называется частичной регенерацией. Или на комбинированном извлечении кислоты и металла - это называется полной регенерацией.

Ключевые слова: чистовая обработка нержавеющей стали, травление, травление кислотой, удаление окислы, извлечение кислоты, извлечение металла.

Это сотрудничество стало возможным благодаря любезной поддержке проекта мобильности Erasmus +.

Поступила 24.04.19

Принята в печать 22.05.19

For citation

Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V. Sustainable stainless steel – A review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 38–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-38-48>

Образец для цитирования

Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V. Sustainable stainless steel – A review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 38–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-38-48>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

UDC 669.01

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-49-54>

TRANSFORMATIONS OF FINE STRUCTURE AND CARBON ATOMS DISTRIBUTION IN 100-M DIFFERENTIALLY HARDENED RAILS UNDER LONG TERM OPERATION

Yuriev A.A.¹, Gromov V.E.², Grishunin V.A.², Ivanov Yu.F.^{3,4}, Qin R.⁵, Tang G.⁶,
Kononov S.V.⁷, Semin A.P.²

¹LTD «Evraz – Integrated West Siberian metallurgical combine», Novokuznetsk, Russia

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁴Institute of High Current Electronics SD RAS, Tomsk, Russia

⁵School of Engineering and Innovation, The open University, Milton Keynes, Great Britain

⁶Tsinghua University, Pekin, China

⁷Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract. Using the methods of transmission electron microscopy, the authors of this paper show that the lamellar perlite grains, ferrite-perlite grains and structurally free ferrite grains constitute the main morphological components of category DT350 differentially hardened rails. The level of mechanical properties and the quality of steel rails comply with the Russian standard GOST R 51685-2013. The authors looked at the evolution of the carbide phase and the redistribution of carbon atoms in the surface layers of differentially hardened rails (the passed tonnage is 691.8 million tons) at the depth reaching 10 mm along the rail head centre line and the rail web. The authors found two complementary mechanisms of carbide phase transformation taking place in the surface layers when the rails are in operation: (1) cutting mechanism of cementite particles with the following departure in the bulk ferrite grains or plates (in the perlite structure); (2) cutting mechanism of cementite particles followed by their dissolution, transfer of carbon atoms onto dislocations (in Cottrell atmospheres and dislocation nuclei), transfer of carbon atoms by dislocations in the bulk ferrite grains (or plates) with the following repeated formation of nanosized cementite particles. The first mechanism stands for changing linear dimensions and morphology of carbide particles. The elemental composition of cementite does not see any significant changes. And the structural changes in the carbide can follow the second mechanism. The main cause of cementite dissolution is related to the energy of carbon atoms localized in dislocation nuclei and subgrains, which is higher compared with the cementite lattice. The binding energy 'carbon atom – dislocation' is 0.6 eV, and in cementite it can sometimes be 0.4 eV. It was found that the carbon atoms that stayed in the cementite lattice are located on the lattice defects, i.e. dislocations, grain and subgrain boundaries.

Keywords: Cementite, perlite, fraction, carbon atoms, rails, mechanisms, operation.

Introduction

The processes of formation and evolution of structural phase state and properties of rail surface layers under long service conditions represent a complicated complex of interrelated scientific and technical problems. The importance of information in this field is determined by the depth of understanding of fundamental problems of solid state physics, on the one hand, and the practical importance of the problem, on the other hand.

In the modern condition of high loads on axis and speeds of movement the rail surface layers undergo the severe plastic deformations under long

service conditions resulting in the formation of structural phase states with atypically high microhardness and nanoscale grain sizes. In a relatively small number of papers [1–6] it is shown that already after the passed tonnage of 100–300 mln.t the cementite plates are either bent or fractured, and at the interphase boundaries the extremely high dislocation density is observed, cementite dissolution and austenite formation occur at the expense of the reverse $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation [1–6]. These processes result in the redistribution of carbon and it is finally reflected on the level of mechanical properties [7–10].

As the mass production of 100m differentially hardened rails began only 4 years ago in Russia, the determination of nature and evolution laws of carbide phase, fine structure and carbon atoms

© Yuriev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F.,
Qin R., Tang G., Kononov S.V., Semin A.P., 2019

distribution in the head of these rails under long service conditions is of high priority and practical importance.

The majority of the used techniques of cementite phase evolution analysis lack the enough degree of locality. It does not permit to follow the evolution of the plate taken individually. Electron diffraction microscopy is the most developed method of aiming analysis of structural phase state of a material to date. This method enables to carry out simultaneously the complex analysis of the morphology and defect structure (the light field image method), phase composition (dark field method combined with imaging and indexing of electron-diffraction patterns) with the enough (for the problem being analyzed in the paper) degree of locality [11]. Carbon quantity in α - and γ -base solid solutions is usually estimated by the relative change in crystal lattice parameter of these phases [12]. The estimates of carbon quantity in carbide particles are made on the basis of the chemical composition of the carbide, the type of crystal lattice and the volume fraction of carbide phase particles in steel.

The purpose of the research is the determining and analyzing of the evolution mechanisms of carbide phase, fine structure and carbon atoms redistribution in rails under long service conditions by methods of layer-by-layer transmission electron diffraction microscopy [TEM] and X-ray phase analysis.

Materials and methods of study

The samples of differentially hardened rails DT 350 manufactured at the joint stock company «EVRAZ-WSMC» after the passed tonnage of 691.8 mln. t brutto at the experimental ring JSC «VNIIZhT» were used as the test material. According to the classification given in the paper [13] it corresponds to the severe plastic deformation. In the content of all chemical elements revealed as a result of the verifying analysis of chemical composition of rails metal it satisfies the requirements of Russian Standard R 51685–2013.

The study of phase composition and defect substructure of rails were performed by methods of electron diffraction microscopy [14–19]. The test foils were manufactured by methods of electrolytic thinning of plates cut out by electric spark method at the distance of 0.2 and 10mm from the tread surface along the central axis and along the fillet (**Fig.1**). The study of crystal lattice state was realized by method of X-ray phase analysis.

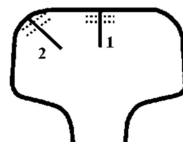


Fig.1 Diagram of rail sample preparation when studying its structure by methods of optical and electron diffraction microscopy. The solid lines designate the directions along the central axis (1) and the fillet (2); the dotted lines designate the sites of location of metal layers used for foils preparation (0.2 and 10mm from the surface)

Results and Discussion

The estimation of quality after long service conditions showed that by the level of mechanical properties (**Table 1**), content by nonmetallic inclusions, macro- and microstructure the quality of metal satisfied the requirements of Russian Standard R 51685–2013 for rails of DT 350 category. The main morphological components of rail steel are the lamellar pearlite grains, the grains of ferrite-pearlite mixture and the grains of structurally – free ferrite.

The relative grain content of structurally – free ferrite amounted to 5% (note that the relative content of ferrite grains is practically independent of the distance to the tread surface) at 10 mm distance from tread surface; the grains of ferrite-carbide mixture – 5%; the balance – pearlite grains. At 2 mm distance from tread surface the relative content of grains of ferrite-carbide mixture increased by 10% in the surface layer (the layer adjacent to tread surface) it amounted to 35%. It is evident that these transformations of the structure were realized at the expense of fracture of lamellar pearlite grains. The studies of structural morphology of rails' surface layer showed that the relative content of pearlite grains, where the lamellar structure retained, amounted to 25%; the balance – pearlite grains in which the cementite plates were cut into separately located particles by the sliding dislocations. These particles have the globular shape and their average sizes range within 30–50nm.

Two mechanisms of cementite plate fracture under deformation of pearlite structure steel are mainly discussed in scientific literature [20–28]. The first mechanism consists in the cutting of the plates by moving dislocations and carrying out the carbon atoms by them to ferrite to the field of stress dislocations. Estimations given in the research [20] show that in this case the maximum effect of cementite disintegration can not increase the tenth parts of a percent from the available quantity of cementite.

Table 1

Mechanical properties of rails after passed tonnage
of 691.8 mln.t

Material	Yield point, $\sigma_{0.2}$, N/mm ²	Ultimate strength, σ_b , N/mm ²	Elongation unit per length, δ , %	Contraction ratio, ψ , %	Impact toughness KCU at temperature +20°C, J/cm ²
DT 350	820	1270	11.5	40	34
Requirements of Russian standard R 51685 – 2013 for DT 350 category rails not less	800	1180	9.0	25.0	15.0

The second mechanism consists in the pulling of carbon atoms by dislocations from the carbide phase lattice with the formation of Cottrell atmospheres due to the substantial difference of average energy of carbon atom bonds with dislocations (0.6eV) and atoms of iron in cementite lattice (0.4eV) in the plastic deformation process. The diffusion of carbon occurs in the stress field formed by dislocation substructure that is formed around cementite plates. In this case the degree of cementite disintegration must be determined by the value of dislocation density and the type of substructure. So, according to the author's opinion [20, 21] the model of cementite disintegration may be presented in the following way. The plastic deformation of pearlite steel causes the formation of cellular substructure with cell boundaries located near the interphase boundary «cementite-ferrite». With the presence of thermodynamic stimulus (the bonding energy of carbon atoms with dislocations is higher than that with iron atoms in cementite) the carbon atoms, whose mobility is initiated by plastic deformation, are transferred from the cementite surface layers to the dislocations localized at the interphase boundary.

The first process occurring by the mechanism of carbide particles cutting and pulling their fragments apart is accompanied only by the change in their linear sizes and morphology (Fig.2). The change in elemental composition of cementite in the process of fragmentation is minimal. During the occurrence of the second process (the action of the mechanism of dissolution «at the site») quite a different picture is observed. At the initial stage of transformation the cementite plates of pearlite colony are entangled by the sliding dislocations (Fig.3). It is accompanied by breaking the cementite plates into separate weakly disoriented fragments. Then, with the increase in the degree of plastic deformation of the material the change in

the carbide structure may occur due to the pulling of the carbon atoms out of cementite lattice.

The second transformation stage of cementite plates of pearlite colony being realized by the mechanism of dissolution at the site and consisting in the pulling the carbon atoms out the cementite crystal lattice is accompanied by the change in defect substructure of carbide that is caused by the penetration of sliding dislocations from the ferrite crystal lattice to the cementite crystal lattice (Fig.4). Therefore, at this stage of cementite plates dissolution the interphase boundaries « α -phase / cementite» play a particular role. The coherent and half-coherent boundary [22] facilitate the penetration of dislocations from α -phase into cementite and inversely, and thereby it favours the fracture and dissolution of carbide. The large-angle incoherent interphase boundary stabilizes the carbide structure and leaves the possibility only for diffusion mass transfer. That is why the cementite plates in pearlite colony break down and the spherical particles of cementite retain at the boundaries of grains and subgrains.

The revealed quantitative regularities of change in the parameters of tread surface structure in the center of the head enabled us to analyze the carbon distribution in the structure of steel. The estimates concerning the content of carbon atoms on the structural elements of steel were made on the basis of the expressions generalized in table 2. The results of the estimates made are presented in table 3.

The estimates made showed that the operation of rail steel was accompanied by the essential redistribution of carbon atoms in the surface layer of rails. If in the initial state the main quantity of carbon atoms was concentrated in cementite particles then, after the operation of rails the site of carbon location, along with the cementite particles, was the crystal structure defects of steel (the dislocations, boundaries of grains and subgrains).

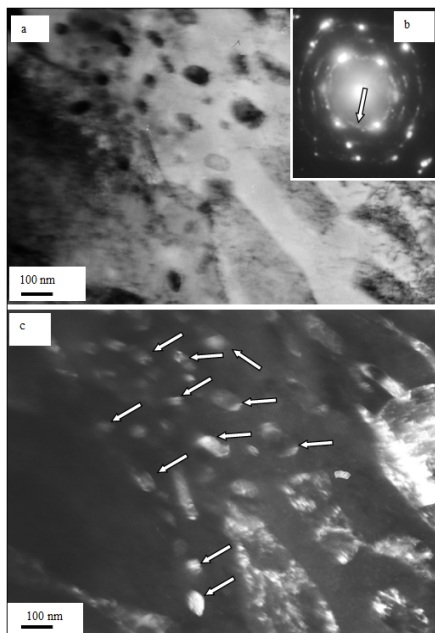


Fig.2 Electron microscopy image of tread surface structure

a – light field; b– microelectron of pattern; c – dark field obtained in reflection [012] Fe₃C; in (b) the arrow designate the reflection of obtaining of dark field (c); in (c) cementite particles.

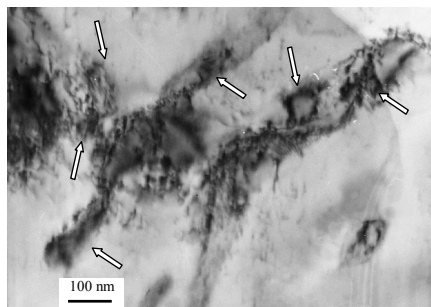


Fig.3 TEM image of pearlite colony structure being formed on dissolution of cementite plates by mechanism 'at the site'; (the first stage of transformation process of cementite plates of pearlite colony). The arrows designate the frag-ments in cementite plates

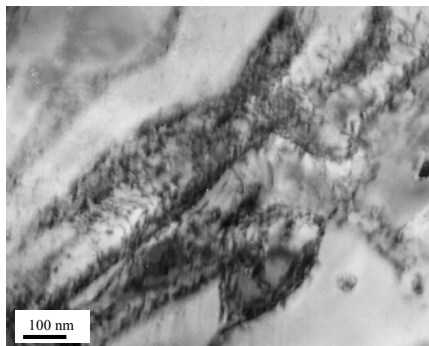


Fig.4 TEM image of the second stage of transformation process of cementite plates of pearlite colony being realized by mechanism 'at the site'

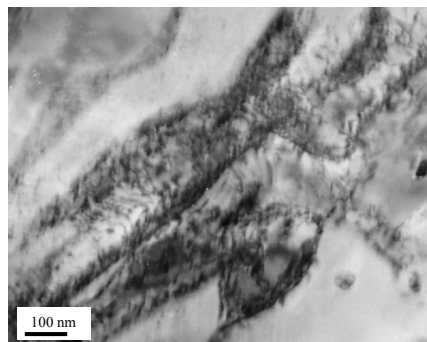


Fig.5 TEM image of the third stage of transformation process of cementite plates of pearlite colony being realized by mechanism of dissolution 'at the site'. The arrows designate the nanodimensional particles of carbide phase in the structure of cementite plates.

Table 2

Analysis method of carbon distribution in steel

Sites of carbon location	Estimate expressions	Literary source
α -iron base solid solution	$\Delta C_{\alpha} = \Delta V_{\alpha} \frac{a_{\alpha} - a_{\alpha}^0}{39 \pm 4} \cdot 10^3$ *	[32, 33, 34]
Particles of carbide phases	$\Delta C(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07 \cdot \Delta V_i$	[32, 14, 35]
Elements of defective structure	$\Delta C_d = C_0 - \Delta C_{\alpha} - \Delta C(\text{Fe}_3\text{C})$	[32, 35]

*Here ΔV_{α} , ΔV_i – volume fraction α -Fe and carbide phases, respectively; a_{α} – present day parameter of α -phase lattice; $a_{\alpha}^0 = 0.28668$ nm; $a_{\alpha} = 0.28782$ nm; C_0 – average content of carbon in steel.

Table 3

Carbon distribution in rail steel structure after passed tonnage of 691.8 mln.t brutto

Structural elements	Carbon concentration, weight %		
	Surface	2 mm from the surface	10 mm from the surface
Cementite particles	0.33	0.71	0.75
α -Fe crystal lattice	0.0284	0.0	0.0
Defects of crystal structure	0.3816	0.03	0.0

Conclusion

By methods of modern physical material science the studies of structure, phase composition, defect substructure and redistribution of carbon atoms being formed at different distances along the central axis and the fillet in the head of 100-m differentially hardened rails after long service were carried out and the fracture mechanisms of lamellar pearlite were analyzed. The structure of rail steel is presented by pearlite grains of lamellar morphology, and the grains of ferrite – carbide mixture and structurally free ferrite.

It is shown that the long service life of rails is accompanied by the occurrence of two processes of structural transformation and the phase composition of lamellar pearlite colonies simultaneously: (1) the cutting of cementite plates and (2) the dissolution of cementite plates. The first process being realized by the mechanism of carbide particles cutting and pulling of their fragments apart is accompanied only by the change in their linear sizes and morphology. The second process of cementite plates fracture of pearlite colonies is realized by the escape of carbon atoms from cementite crystal lattice to dislocations in consequence of which the phase transformation of rail metal is possible. It is noted that carbon atoms being leaved the cementite crystalline lattice are located at the defects of steel crystalline lattice (dislocations, grain and subgrain boundaries).

References

- Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels. Steel tech, 2008. Vol. 3, No. 1, pp. 19–23.
- Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. Acta Materialia. Vol. 54, pp. 1689–1669.
- Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A. V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. Materials Science and Engineering A, 2013. Vol. 581, pp. 81–89.
- Gavriluk V.G. Decomposition of cementite in pearlite steel due to plastic deformation. Materials Science and Engineering A, 2003. Vol. 345, pp. 81–89.
- Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. Acta Materialia, 2011. Vol. 59, pp. 3965–3977.
- Gavriluk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. Scripta Materialia, 2001. Vol. 45, pp. 1469–1472.
- Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels. Steel tech, 2008. vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
- Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. Acta Materialia, 2006. Vol. 54, pp. 1659–1669.
- Gavriluk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. Scripta Materialia, 2001. Vol. 45, pp. 1469–1472.
- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. Microstructure of quenched rails. Cambridge: CISP Ltd, 2016, 156 p.
- Gromov V.E., Kozlov E.V., Bazaikin V.I. et al. Physics and mechanics of drawing and die forging. Moscow: Nedra, 1997, 293 p.
- Lakhtin Yu.M. Physical metallurgy and thermal treatment of metals. Moscow: Metallurgiya, 1977, 407 p.
- Glezer A.M. On the nature of ultrahigh plastic (megaplastic) strain. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2007, vol. 71, no. 12, pp. 1722–1730.
- Thomas G, Gorindge M.J. Transmission electron microscopy of materials. Moscow: Intekst, 1983, 320 p.
- Hirsh P, Hovv A, Nicolson P. Electron microscopy of thin crystals. Moscow: Mir, 1968, 574 p.
- Utevskii L.M. Deffraction electron microscopy in material science. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p.
- Ray F. Egerton Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005, 211 p.
- Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials - New York: Springer, 2014, 717 p.
- Barry Carter C., David B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
- Gavriluk V.G., Gertsiken D.S., Polushkin Yu.A., Falchenko V.M. Mechanism of decomposition of cementite in the plastic deformation of steel. Fizika, 1981, vol. 51, no. 1, pp. 147–152.
- Gridnev V.N, Gavriluk V.G. Cementite decomposition under plastic deformation of steel. Metallofizika, 1922, vol. 4, no. 3, pp. 74–87.
- Male R.F., Hagel U.K. Austenite – pearlite transformation. Uspehi fiziki metallov, V.3. Moscow: Metallurgiya, 1960, pp. 88–156.
- Belous Kh.V, Cherepin V.T. Changes in carbide phase of steel under the effect of cold plastic deformation. F.M.M., 1962. Vol. 14, No. 1, pp. 48–54.
- Gavriluk V.G. Distribution of carbon in steel. Kiev: Naukova Dumka, 1987, 207 p.
- Smirnov O.M, Lazarev V.A. Diffusion and redistribution of carbon in iron and its alloys in the process of deformation. FMM, 1983. Vol. 56, No. 1, pp. 115–119.
- Gromov V.E., Yuriev A.A., Ivanov Y.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Semin A.P., & Sundeev, R.V. Defect substructure change in 100-m differentially hardened rails in long-term operation. Materials Letters, 2017. Vol. 209, pp. 224–227.

27. Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. Microstructure of quenched rails. Cambridge CISP Ltd, 2016, 157 p.
28. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yuriev A.A. Metal structure and properties gradients of surface layers of differentially quenched rails after long term operation. Fundamental problems of modern material science, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 297–305.
29. Ivanov Yu.F., Komet E.V., Kozlov E.V., Gromov V.E. Hardened structural steel: structure and mechanisms of hardening. Novokuznetsk: SibSIU, 2010, 174 p.
30. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite. Met. Trans, 1971, vol. 2, no. 10, pp. 2783–2790.
31. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1818–1820.
32. Ivanov Yu.F., Popova N.A., Gladyshev S.A., Kozlov E.V. Interaction of carbon with defects and carbo-formation processes in structural steels. Collection of papers "Interaction of defects of crystal lattice and properties". Tula: TulPI, 1986, pp. 100–105.

Received 07/11/18

Accepted 10/12/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 669.01

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-49-54>

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ УГЛЕРОДА В 100-М ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Юрьев А.А.¹, Громов В.Е.², Гришунин В.А.², Иванов Ю.Ф.^{3,4}, Qin R.⁵, Tang G.⁶, Коновалов С.В.⁷, Семин А.П.²¹ ООО «Евраз – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», Новокузнецк, Россия² Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия⁴ Институт сильноточной электроники СОРАН, Томск, Россия⁵ Школа Техники и Инноваций, Открытый университет, Милтон-Кинс, Великобритания⁶ Университет Цзинхуа, Пекин, Китай⁷ Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация. Используя методы просвечивающей электронной микроскопии, показано, что зерна пластинчатого перлита, зерна феррито-перлитной смеси и зерна свободного феррита являются основными морфологическими составляющими дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350. Уровень механических свойств и качество стальных рельсов удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Изучена эволюция карбидной фазы и перераспределение атомов углерода в поверхностных слоях дифференцированно закаленных рельсах (пропущенный тоннаж 691,8 млн т) на глубине до 10 мм вдоль центральной оси и шейки головки рельса. Установлено действие двух взаимодополняющих механизмов трансформации карбидной фазы в поверхностных слоях стали при работе при эксплуатации рельсов: (1) режущий механизм частиц цементита с последующим перемещением в объем ферритных зерен или пластин (в структуре перлита); (2) режущий механизм и последующее растворение частиц цементита, перенос атомов углерода на дислокации (в атмосферах

Коттрелла и дислокационных ядрах), перемещение дислокациями атомов углерода в объем ферритных зерен (или пластин) с последующим повторным образованием наноразмерных частиц цементита. Первый механизм сопровождается изменением линейных размеров и морфологии частиц карбида. Изменение элементного состава цементита не является существенным. Изменение структуры карбида может происходить по второму механизму. Основной причиной растворения цементита является энергетическое преимущество локализации атомов углерода в ядрах дислокаций и субзернах по сравнению с решеткой цементита. Энергия связи «атом углерода - дислокация» составляет 0,6 эВ, а в некоторых случаях в цементите она составляет 0,4 эВ. Установлено, что атомы углерода, оставшиеся в кристаллической решетке цементита, расположены на дефектах кристаллической решетки стали (дислокации, границы зерен и субзерен).

Ключевые слова: цементит, перлит, фракция, атомы углерода, рельсы, механизмы, эксплуатация.

Поступила 07.11.18

Принята в печать 10.12.18

For citation

Yuriev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F., Qin R., Tang G., Kononov S.V., Semin A.P. Transformations of fine structure and carbon atoms distribution in 100-m differentially hardened rails under long term operation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 49–54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-49-54>

Образец для цитирования

Yuriev A.A., Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F., Qin R., Tang G., Kononov S.V., Semin A.P. Transformations of fine structure and carbon atoms distribution in 100-m differentially hardened rails under long term operation // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. №2. С. 49–54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-49-54>

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 534.014.3

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>

РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКИЕ МОЩНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

Попов И.П.

Курганский государственный университет, Курган, Россия

Аннотация. Рассматриваются разновидности механической мощности в вибрационных процессах. При работе вибрационных машин развивается кинетическая энергия за счет движения массивных тел и тепловая за счет трения. Их производные определяют различные виды механической мощности – переменную реактивную и неотрицательную тепловую. Дуально-инверсным аналогом реактивной механической мощности является реактивная электрическая мощность. Тепловой механической мощности соответствует электрическая активная мощность. **Целью работы** является теоретическое описание разновидностей мощности, имеющей место при работе вибрационных машин. Задача заключается в аналитическом представлении энергетического аспекта вибрационных явлений. Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием механической реактивной мощности на качество тока питающей сети (появление гармоник с частотой механических колебаний, трансформация механической реактивной мощности в электрическую реактивную мощность и др.). Рассмотрение основано на том, что в удовлетворительном приближении перемещение массивного рабочего органа вибромеханизма можно считать гармоническим. Так же как активная мощность в электротехнике, определяется механическая диссипативная мощность $P = FV \cos \varphi$, где φ представляет собой разность фаз колебаний представленных величин. Так же как реактивная мощность в электротехнике, определяется механическая реактивная (инерционная) мощность $Q_i = FV \sin \varphi$. В электротехнике принято, что P – это среднее значение, а Q – амплитуда. Здесь все обстоит точно так же. Так же как в электротехнике, определяется полная мощность $S = \sqrt{Q^2 + P^2} = FV$. Она находится как умножение действующих значений величин. Представлены комплексное и векторное описания диссипативной и реактивных мощностей. Материальным воплощением виртуальных вращающихся векторов в вибрационных процессах являются кривошпини вращательно-линейных преобразователей.

Ключевые слова: реактивная мощность, активная мощность, полная мощность, комплексное представление, векторное представление.

Введение

Механическая мощность является производной энергии по времени. При работе вибрационных машин [1, 2] развивается кинетическая энергия за счет движения массивных тел и тепловая за счет трения. Их производные определяют различные виды механической мощности – переменную реактивную и неотрицательную тепловую.

Дуально-инверсным аналогом реактивной механической мощности является реактивная электрическая мощность. Тепловой механической мощности соответствует электрическая активная мощность [3, 4].

Целью работы является теоретическое описание разновидностей мощности, имеющей место при работе вибрационных машин.

Задача заключается в аналитическом представлении энергетического аспекта вибрационных явлений.

Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием механической реактивной мощности на качество тока питающей сети (появление гармоник с частотой механических колебаний, трансформация механической реактивной мощности в электрическую реактивную мощность и др.).

Реактивная инерционная и активная тепловая мощности

В удовлетворительном приближении перемещение массивного рабочего органа вибромеханизма можно считать гармоническим

$$x = l \sin \omega t,$$

© Попов И.П., 2019

где x – координата; l – амплитуда; ω – круговая частота.

Скорость определяется как производная перемещения

$$v = \dot{x} = l\omega \cos \omega t = V_m \cos \omega t.$$

Здесь

$$V_m = l\omega - \text{максимальное значение.}$$

Из электротехники известно, что действующее значение меньше

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{l\omega}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

В соответствии с вторым законом Ньютона сила определяется как

$$f_a = m\ddot{x} = -l\omega^2 \sin \omega t. \quad (2)$$

Сила трения равна

$$f_\mu = \mu \dot{x} = \mu l\omega \cos \omega t. \quad (3)$$

Здесь μ – коэффициент трения.

Сумма этих сил имеет вид

$$\begin{aligned} f &= f_a + f_\mu = -l\omega^2 \sin \omega t + \mu l\omega \cos \omega t = \\ &= l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \left(\frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \cos \omega t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{m\omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \sin \omega t \right). \end{aligned}$$

Пусть

$$\varphi = \arctg \frac{m\omega}{\mu}. \quad (4)$$

При этом формулу для силы можно записать в виде

$$\begin{aligned} f &= l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} (\cos \varphi \cos \omega t - \sin \varphi \sin \omega t) = \\ &= l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cos(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Максимальное значение

$$F_m = l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}.$$

Соответственно действующее

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Мощность определяется следующим образом:

$$s = f v = l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cos(\omega t + \varphi) l\omega \cos \omega t =$$

$$\begin{aligned} &= 0,5 l^2 \omega^2 \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ &= F V [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ &= F V (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cos \varphi - \sin 2\omega t \sin \varphi) = \\ &= F V \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) - F V \sin \varphi \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Так же как активная мощность в электротехнике, определяется механическая диссипативная мощность

$$P = F V \cos \varphi. \quad (7)$$

φ представляет собой разность фаз колебаний представленных величин.

Так же как реактивная мощность в электротехнике, определяется механическая реактивная (инерционная) мощность

$$Q_i = F V \sin \varphi. \quad (8)$$

В электротехнике принято, что P – это среднее значение, а Q – амплитуда. Здесь все обстоит точно также.

Так же как в электротехнике, определяется полная мощность

$$S = \sqrt{Q_i^2 + P^2} = F V. \quad (9)$$

Она находится как умножение действующих значений величин.

С учетом (1), (5) и (8)

$$\begin{aligned} Q_i &= F V \sin \varphi = \\ &= \frac{l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{m\omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} = \frac{m l^2 \omega^3}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

В то же время

$$\begin{aligned} f_a v &= -l m \omega^2 \sin \omega t l \omega \cos \omega t = -0,5 l^2 m \omega^3 \sin 2\omega t = \\ &= -F_a V \sin 2\omega t = -Q_i \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (11)$$

(см. (6) и (10)).

С учетом (1), (5) и (7)

$$\begin{aligned} P &= F V \cos \varphi = \\ &= \frac{l\omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} = \frac{\mu l^2 \omega^2}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

В то же время

$$\begin{aligned} f_\mu v &= \mu l \omega \cos \omega t l \omega \cos \omega t = \\ &= 0,5 \mu l^2 \omega^2 (1 + \cos 2\omega t) = \\ &= F_\mu V (1 + \cos 2\omega t) = P (1 + \cos 2\omega t) \end{aligned} \quad (13)$$

(см. (6) и (12)).

С учетом (9), (10) и (12)

$$S = FV = \frac{l\omega\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} = \frac{l^2\omega^2\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{2}.$$

Реактивная деформационная мощность

Далее рассматриваются силы при линейной упругой деформации [5–8]. Инертность во внимание не принимается.

Сила определяется как

$$f_k = kx = kl \sin \omega t, \quad (14)$$

k – жесткость.

Сумма сил, принимаемая во внимание (3), равна

$$\begin{aligned} f &= f_k + f_\mu = kl \sin \omega t + \mu l \omega \cos \omega t = \\ &= l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2} \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}} \sin \omega t + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu\omega}{\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}} \cos \omega t \right). \end{aligned}$$

Пусть

$$\varphi = \arctg \frac{k}{\mu\omega}.$$

При этом формулу для силы можно записать в виде

$$\begin{aligned} f &= l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2} (\sin \varphi \sin \omega t + \cos \varphi \cos \omega t) = \\ &= l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2} \cos(\omega t - \varphi). \end{aligned}$$

Максимальное значение

$$F_m = l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}.$$

Соответственно действующее

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Мощность определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} s &= f v = l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2} \cos(\omega t - \varphi) l \omega \cos \omega t = \\ &= 0,5 l^2 \omega \sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] = \\ &= FV [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] = \\ &= FV (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cos \varphi + \sin 2\omega t \sin \varphi) = \\ &= FV \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + FV \sin \varphi \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (16)$$

По аналогии (6), (7) и (12) тепловая мощность

равна

$$\begin{aligned} P &= FV \cos \varphi = \\ &= \frac{l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{\mu\omega}{\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}} = \frac{\mu l^2 \omega^2}{2}. \end{aligned}$$

С учетом (15), (1), (8) и (16) реактивная деформационная мощность имеет вид

$$\begin{aligned} Q_d &= FV \sin \varphi = \\ &= \frac{l\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}} = \frac{kl^2\omega}{2}. \end{aligned} \quad (17)$$

В то же время

$$\begin{aligned} f_k v &= kl \sin \omega t l \omega \cos \omega t = 0,5 kl^2 \omega \sin 2\omega t = \\ &= F_k V \sin 2\omega t = Q_d \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (18)$$

(см. (16) и (17)).

Полная механическая мощность находится как

$$S = FV = \sqrt{Q_d^2 + P^2} = \frac{l^2\omega\sqrt{k^2 + \mu^2\omega^2}}{2}.$$

Реактивная гравитационная мощность

Момент силы при отклонении математического маятника от положения равновесия определяется как

$$m_j = mgL\alpha.$$

Здесь L – длина подвеса; α – отклонение (град).

При этом

$$\alpha = \alpha_0 \sin \omega t.$$

Производная отклонения

$$\dot{\alpha} = \alpha_0 \omega \cos \omega t = \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t.$$

Механическая мощность

$$\begin{aligned} q_g &= m_j \dot{\alpha} = mgL\alpha_0 \sin \omega t \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t = \\ &= 0,5 m \alpha_0^2 \sqrt{Lg^3} \sin 2\omega t. \end{aligned}$$

Реактивная гравитационная мощность равна

$$Q_g = 0,5 m \alpha_0^2 \sqrt{Lg^3}.$$

Комплексное представление

Гармоническую величину можно представлять в виде комплексной амплитуды вектора в комплексной плоскости для нулевого момента времени.

Комплексная скорость при инертной нагрузке равна

$$\dot{V}_m = V_m e^{j\pi/2}.$$

Имеется в виду, что

$$v = V_m \cos \omega t = \operatorname{Re} \dot{V}_m.$$

При переходе к действующим величинам

$$\dot{V} = V e^{j\pi/2}, \quad \dot{F} = F e^{j(\pi/2+\varphi)}.$$

Так же как в электротехнике, для определения полной мощности необходимо умножить силу не на саму скорость, а на сопряженный ей вектор

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F}^* \dot{V} = F e^{j(\pi/2+\varphi)} V e^{-j\pi/2} = F V e^{j(\pi/2+\varphi-\pi/2)} = \\ &= F V e^{j\varphi} = F V \cos \varphi + j F V \sin \varphi = P + j Q_i. \end{aligned}$$

Над комплексными величинами, не являющимися изображениями гармонической функции, точка не ставится, такие величины подчеркиваются.

Реактивная деформационная мощность имеет обратный знак

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F}^* \dot{V} = F e^{j(\pi/2-\varphi)} V e^{-j\pi/2} = F V e^{j(\pi/2-\varphi-\pi/2)} = \\ &= F V e^{-j\varphi} = F V \cos \varphi - j F V \sin \varphi = P - j Q_d. \end{aligned}$$

Нетрудно убедиться, что

$$P = \operatorname{Re} \dot{F}^* \dot{V}, \quad Q = \operatorname{Im} \dot{F}^* \dot{V}.$$

Представление с использованием трехмерных векторов

Гармонические скорости и силы допускают векторное представление, при котором они являются проекциями на выбранную ось в плоскости виртуального вращения.

Подобно комплексному представлению гармонических величин можно отождествить с проекциями вращающихся векторов (в рассматриваемом случае \mathbf{F} и \mathbf{V}) на ортогональные оси в фазовой плоскости вращения. Формулы мощностей приобретают компактный вид

$$P = (\mathbf{F}, \mathbf{V}), \quad Q = [\mathbf{F}, \mathbf{V}], \quad S^2 = (\mathbf{F}, \mathbf{V})^2 + [\mathbf{F}, \mathbf{V}]^2.$$

Материальным воплощением виртуальных вращающихся векторов в вибрационных процессах являются кривошипные вращательно-линейных преобразователей.

Заключение

В настоящей работе представлено математическое описание механических колебательных процессов под действием внешнего силового гармонического воздействия. Развиваемая при этом механическая мощность помимо диссипативной составляющей содержит другие виды мощности – инерционную, деформационную и гравитационную. Потоки последних трех видов мощности являются обратимыми – источник внешнего воздействия и объект, совершающий колебания, обмениваются между собой любым из этих видов мощности. В этой связи все виды механической мощности являются аналогами электрических видов мощности – активной и реактивной. По этой же причине полная механическая мощность определяется аналогично полной электрической мощности.

Указанные виды механической мощности допускают комплексное и векторное представления. Вращающиеся векторы при линейных колебаниях могут быть ассоциированы с кривошипами привода, преобразующего вращательное движение в возвратно-поступательное.

Список литературы

1. Попов И.П., Кубарева С.Ю. Автобалансировка вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144>
2. Попов И.П. Моделирование биинертного осциллятора // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. / под общ. ред. В.С. Мхитаряна. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С. 188–192.
3. Wang, X., Sun, G., Wang, L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.). 2016. Vol. 31. No. 4. P. 717–721.
4. Protescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. Mater. Mech. 2015. No. 10. P. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezheng Xue, Xiangdong Ding and Turab Lookman. Phase transformations in Titanium: Anisotropic deformation of ω phase. Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.500. P. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042
6. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.

7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // *Petrochemical Equipment*. 2015. Vol. 44. P. 58–63.
8. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей ма-

шин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>.

Поступила 04.02.19

Принята в печать 28.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>

REACTIVE AND FULL MECHANICAL POWER OF VIBRATION MACHINES

Igor P. Popov – Assistant Professor

Kurgan State University. E-mail: ip.popov@yandex.ru

Abstract. The types of mechanical power in vibration processes are under study. When vibration machines work, kinetic energy is generated due to the movement of massive bodies and thermal energy is produced due to friction. Their derivatives define different types of mechanical power: variable reactive and nonnegative thermal types. A dual-inverse analogue of reactive mechanical power is reactive electrical power. Thermal mechanical power corresponds to the electrical active power. **The aim of this paper** is to give a theoretical description of the varieties of power that occur during the operation of vibration machines. The task is an analytical representation of the energy aspect of vibration phenomena. The relevance of the study is due to the negative effect of mechanical reactive power on the quality of supply current (the appearance of harmonics with the frequency of mechanical vibrations, the transformation of mechanical reactive power into electrical reactive power, etc.). The study is based on the fact that in a satisfactory approximation the movement of a massive working body of the vibration mechanism is deemed to be harmonic, just as active power of electrical engineering is determined by the mechanical dissipative power $P = FV \cos \varphi$, where φ is the phase difference of oscillations of the presented values, just as reactive power of electrical engineering is determined by the mechanical reactive (inertial) power $Q_i = FV \sin \varphi$. In electrical engineering it is assumed that P is an average value, and Q is the amplitude. Everything is the same in this case, just as in electrical engineering total power is determined: $S = \sqrt{Q_i^2 + P^2} = FV$. It is calculated as a multiplication of the effective values of the quantities. Complex and vector descriptions of dissipative and reactive power are presented. The tangible embodiment of virtual rotating vectors in vibration processes are cranks of rotational and linear transducers.

Keywords: reactive power, active power, full power, complex representation, vector representation.

References

1. Popov I.P., Kubareva S.Yu. Automatic balancing vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144> (In Russ.)
2. Popov I.P. Modeling a bi-inert oscillator. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh: sb.nauch.tr.* [Application of mathematics in economical and technical studies: collection of papers]. Edited by Mkhitarian V.S. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, pp.188-192. (In Russ.)
3. Wang X., Sun G., Wang L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. *J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.)*. 2016, vol. 31, no. 4, pp. 717–721.
4. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. *Mater. Mech.* 2015, no. 10, pp. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezhen Xue, Xiangdong Ding, Turab Lookman. Phase transformations in titanium: anisotropic deformation of ω phase. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol.500, p. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042/
6. Lux R., Kletzin U., Geinitz V., Beyer P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*, vol. 47, no. 7, July 2014, pp. 78–83.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process. *Petrochemical Equipment*, 2015, vol. 44, pp. 58–63.
8. Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139> (In Russ.)

Received 04/02/19

Accepted 28/02/19

Образец для цитирования

Попов И.П. Реактивная и полная механические мощности вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>

For citation

Popov I.P. Reactive and full mechanical power of vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО НАСОСА

Найгерт К.В.¹, Целищев В.А.²

¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. Как известно, объемный метод регулирования приводной системы является наиболее энергетически эффективным. В классических гидравлических системах организация объемного метода – дорогостоящее инженерное решение, но магнитореологические приводы позволяют минимизировать разницу в стоимости реализации объемного и дроссельного регулирования. Поэтому в статье описывается способ повышения эффективности характеристик магнитодинамических насосов путем применения винтовых управляющих электромагнитных полей. Представлено оригинальное запатентованное конструктивное решение сформулированной задачи и разработан алгоритм повышения эффективности рабочего процесса за счет оптимизации геометрии проточной части. Конструктивное решение повышения эффективности магнитодинамического насоса реализуется за счет управления потоком магнитореологической рабочей среды путем наложения внешних динамических винтовых электромагнитных полей, что генерирует в ней гидродинамические эффекты и сообщает потоку радиальную составляющую скорости, формируя винтовую траекторию движения частиц магнитореологической жидкости. Винтовые управляющие поля индуцируются каскадом блоков электромагнитного управления, которые состоят из элементов дифференциальной обмотки, расположенных по окружности. Благодаря этому происходит инициация вращательно-поступательного движения магнитореологической жидкости. Разработанная численная модель позволяет повысить эффективность рабочего процесса и состоит из магнитодинамической и гидродинамической частей. Применение данной численной модели дает возможность рационализировать характеристики магнитодинамического насоса. Приведен пошаговый алгоритм повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса, описывающий последовательность определения требуемых параметров и закономерностей. Рационализация компонентов скорости проведена при помощи параметра, характеризующего интенсивность вращения потока. В результате численного эксперимента получены статические характеристики магнитодинамического насоса при различных значениях параметра, характеризующего интенсивность вращения потока.

Ключевые слова: магнитодинамический насос, эффективность рабочего процесса, винтовые электромагнитные поля, гидродинамические эффекты.

Введение

Огромную популярность за последние десятилетия приобрели магнитореологические системы. Это связано с их хорошими динамическими характеристиками и большой глубиной регулирования, а также с простотой реализации в магнитореологических контурах объемного метода регулирования, применение которого в классических гидравлических системах требует существенных материальных затрат. Основным устройством, от которого зависит динамика магнитореологического привода при объемном методе регулирования, является насосный агрегат. Широко используемые на сегодняшний день магнитодинамические насосы обладают низким коэффициентом полезного действия в зонах гравитационных полей и неприспособленны к высоким рабочим давлениям. Данные недостатки напрямую связаны с их конструктивными особенностями. Прежде

всего, это конструктивная реализация линейного ускорения потока, приводящая к низким показателям мощности, малой производительности и большим габаритам. Также линейный способ транспортировки среды не защищает от явлений произвольного обратного тока рабочей среды через рабочую полость магнитодинамического насоса в случае резкого скачка давления в системе. Конструкции существующих магнитодинамических устройств представлены в [1–9].

Существующие конструкции магнитодинамического насоса обладают малой мощностью и относительно большими габаритами, а также не способны исключить непроизводительное протекание жидкости в рабочей камере и не применимы в магнитореологических контурах высокого давления. Это делает актуальным задачу повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса.

Исследовательская работа посвящена созданию конструкции магнитодинамического насоса, способного при малых габаритах обеспечить зна-

чительные перепады давления и разработке методики его расчета, позволяющей производить рационализацию его геометрических параметров.

Конструктивное решение повышения эффективности магнитодинамического насоса

Значительная длина рабочих зон подавляющего большинства магнитодинамических насосов связана с реализацией в них линейного ускорения рабочей среды. Поэтому применение винтовой проточной части рабочих зон существенно снижает линейные габариты устройства и повышает его производительность. Генерируемый гидродинамический вихрь также является надежной защитой от обратного тока рабочей среды при скачках давления в системе.

Предлагаемая конструкция магнитодинамического насоса реализует ускорение магнитореологической среды по винтовой траектории.

Винтовые управляющие электромагнитные поля в магнитодинамических устройствах обеспечивают простоту реализации реверсивного режима и возможность генерации магнитодинамических и гироскопических эффектов. Данные эффекты позволяют создавать значительные перепады давления и повышать кинетическую энергию магнитных частиц при равных значениях вольт-амперной характеристики в сравнении с классическими конструкциями магнитодинамических устройств с линейными рабочими зонами.

Очевидно, что наложение на поток магнитореологической жидкости внешних динамических винтовых электромагнитных полей способно генерировать в ней гидродинамические эффекты за счет сообщения потоку радиальной составляющей скорости и формирования винтовой траектории движения частиц магнитореологической жидкости. Винтовое поле индуцируется каскадом блоков электромагнитного управления. Каскады блоков электромагнитного управления потоком состоят из элементов дифференциальной обмотки, которые расположены по окружности, что инициирует вращательно-поступательное движение магнитореологической жидкости (рис. 1).

Подробное описание конструкции магнитодинамического насоса и принципа его работы описаны в работе [10]. Конструкция магнитодинамического насоса основана на оригинальном методе управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости, опубликованном в работах [10–14].

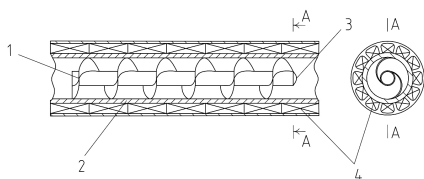


Рис. 1. Магнитодинамический насос: 1 – шнек; 2 – корпус; 3 – обтекатель; 4 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

Численная модель магнитодинамического насоса

Описание рабочего процесса магнитодинамического насоса целесообразно разделить на магнитодинамическую и гидродинамическую части. В рамках решения поставленной задачи значение имеет форма и амплитудно-частотные характеристики управляющего поля. Магнитодинамическую часть представим в следующем виде [15–18].

Винтовое управляющее поле можно описать численными зависимостями, задав цилиндрическую систему координат и винтовую симметрию:

$$r, \varphi, z \\ H = H(r, \varphi - \alpha z). \quad (1)$$

Основной качественный параметр спирали управляющего поля – напряженность, которая выражается через скалярный потенциал:

$$H = \nabla \Phi; \quad (2)$$

$$\Phi = H_I z + \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} h_n I_n(nar) \sin[n(\varphi - \alpha z)], \quad (3)$$

где H_I – напряженность поля блока управления; h_n – амплитуда поля; I_n – функция Инфельда,

$$I_n(x) = i^{-n} J_n(nx); \quad (4)$$

J_n – функция Бесселя первого рода [19],

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos((x) \sin \varphi - n\varphi) d\varphi; \quad (5)$$

α – коэффициент,

$$\alpha = \frac{2\pi}{L}; \quad (6)$$

L – шаг элементов блока управления.

Введем для рассматриваемого управляющего поля следующие компоненты H_r, H_φ, H_z :

$$\begin{aligned} H_r &= \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n' (n\alpha r) \sin[n(\varphi - \alpha z)]; \\ H_\varphi &= \frac{1}{\alpha r} \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]; \quad (7) \\ H_z &= H_I - \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]. \\ I_n' &\text{ — производная функция Инфеляда:} \\ I_n' (n\alpha r) &= \frac{1}{2} [I_{n-1} (n\alpha r) + I_{n+1} (n\alpha r)]. \quad (8) \end{aligned}$$

Векторный потенциал управляющего поля:

$$\begin{aligned} A &= (A_r, A_\varphi, 0), \\ B &= rot A, \\ rot A &= \left[-\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right] \hat{e}_r + \left[\frac{\partial A_r}{\partial z} \right] \hat{e}_\varphi, \quad (9) \\ \hat{e}_r &= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \hat{e}_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

B — магнитная индукция.

Компоненты векторного потенциала управляющего поля:

$$\begin{aligned} A_r &= -\frac{1}{\alpha^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n (n\alpha r) \sin[n(\varphi - \alpha z)]; \\ A_\varphi &= H_I \frac{r}{2} - \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n' (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)], \quad (10) \\ A &= 0. \end{aligned}$$

Уравнение магнитной поверхности

$$\psi = H_I \frac{\alpha r^2}{2} - r \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n' (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]. \quad (11)$$

Геометрические параметры сечения винтового управляющего поля по магнитной линии определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} &= 1, \\ a &= \frac{h_m I_n' (n\alpha r_a)}{\alpha^2 H_I n}, \\ b &= \frac{h_m I_n (n\alpha r_a)}{\alpha^2 H_I r_a}, \quad (12) \\ x &= r - r_a, \\ y &= r_a \left(\varphi - \bar{\alpha} z \right), \\ \bar{\alpha} (r) &= \frac{1}{2\alpha^3 H_I^2} h_m^2 \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right)^2 \left(\frac{1}{2} I_n (n\alpha r) \right). \end{aligned}$$

r_a — радиус оси винтового поля, равный внешнему радиусу корпуса.

Рационализацию рабочего процесса магнитодинамического насоса производим за счет изменения частотных параметров и оценки их влияния на гидродинамические характеристики устройства.

Гидродинамическая модель основана на [20]. Исходя из условия несжимаемости жидкости, справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v &= P_v - \frac{1}{\rho} grad P - \mathcal{G} rot (rot v), \\ P_v &= -\nabla \Pi, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + [\omega v] &= -grad \left(\frac{v^2}{2} + \Pi + \frac{P}{\rho} \right) - \mathcal{G} rot \omega, \quad (13) \\ \omega &= rot v, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (v \nabla) \omega - (\omega \nabla) v &= \mathcal{G} \nabla^2 \omega, \end{aligned}$$

где ω — вектор вихря; P — гидростатическое давление; P_v — вектор плотности объемных сил; v — скорость; ρ — плотность; \mathcal{G} — кинематическая вязкость.

В магнитодинамическом насосе происходит создание перепада давления за счет повышения кинетической энергии частиц жидкой среды, формирования траекторий их движения и генерации вихря во внешних управляющих полях. Задав в рабочей камере условие преобладания сил инерции над силами вязкости, получим следующую систему уравнений для скорости и ее пространственных компонентов:

$$\begin{aligned}
 rotv &= kv, \\
 -\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} &= kv_r, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r} &= kv_z, \\
 \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} &= kv_\varphi, \\
 \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_\varphi \left(k^2 - \frac{1}{r^2} \right) &= 0,
 \end{aligned} \quad (14)$$

где k – параметр, характеризующий интенсивность вращения потока; v_z – осевая компонента скорости; v_r – радиальная компонента скорости; v_φ – окружная компонента скорости,

$$\begin{aligned}
 v_\varphi(r, z) &= U_0(r) + U_\varphi(r, z), \\
 U_0(r) &= v_\varphi(r, 0), \\
 U_\varphi(r, z) &= v_\varphi(r, z) - v_\varphi(r, 0).
 \end{aligned} \quad (15)$$

Введя безразмерные координаты:

$$R = \frac{r}{r_2}; Z = \frac{z}{r_2}; K = kr_2, \quad (16)$$

где r_2 – больший радиус кольцевого канала.

Уравнение окружной компоненты скорости примет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U_\varphi}{\partial R} + U_\varphi \left(K^2 - \frac{1}{R^2} \right) &= -f(R), \\
 f(R) &= \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial (RU_0)}{\partial R} \right) + U_0 K^2.
 \end{aligned} \quad (17)$$

С целью упрощения получения решений функций Бесселя и Неймана для гидродинамической части модели запишем граничные условия исходя из допущения полубесконечности и непроницаемости кольцевого канала:

$$\begin{aligned}
 U_\varphi(R_1, Z) = 0; U_\varphi(R_2, Z) = 0; U_\varphi(R, 0) = 0; U_\varphi(R, \infty) < \infty, \\
 R_1 = \frac{r_1}{r_2}; R_2 = \frac{r_2}{r_2} = 1.
 \end{aligned} \quad (18)$$

Структура потока магнитореологической среды в рабочей зоне представляет собой монолитный винтовой объем – единый вихрь, поэтому, представив в виде ряда, получаем:

$$\begin{aligned}
 U_\varphi(R, Z) &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(Z) G_n(R), \\
 R^2 G_n'' + R G_n' + G_n (\mu_n^2 R^2 - 1) &= 0, \\
 G_n(R) &= Y_1(\mu_n R) - J_1(\mu_n R) Y_1(\mu_n R) / Y_1(\mu_n R_1), \\
 J_1(\mu_n) Y_1(\mu_n R_1) - J_1(\mu_n R_1) Y_1(\mu_n) &= 0, \\
 \Phi_n'' - (\mu_n^2 - K^2) \Phi_n &= -f_n, \\
 f_n &= \int_{R_1}^1 f(R) G_n(\mu_n R) R dR / \int_{R_1}^1 G_n^2(\mu_n R) R dR,
 \end{aligned} \quad (19)$$

где f_n – коэффициенты разложения; μ_n – собственные значения – корни уравнений; Y_n – функция Неймана в общем виде [19],

$$Y_n(x) = \frac{J_n(x) \cos(n\pi) - J_{-n}(x)}{\sin(n\pi)}. \quad (20)$$

$$\text{Здесь } J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x). \quad (21)$$

Течение винтового потока жидкости в кольцевом канале – распределение окружной компоненты скорости примет вид

$$\begin{aligned}
 v_\varphi(R, Z) &= U_0(R) + \\
 + \sum_{n=1}^m \frac{f_n G_n(\mu_n R)}{\mu_n^2 - K^2} &\left[1 - \frac{\cos(Z\sqrt{K^2 - \mu_n^2} - \Phi_n)}{\cos \Phi_n} \right] + \\
 + \sum_{n=m+1}^{\infty} \frac{f_n G_n(\mu_n R)}{K^2 - \mu_n^2} &\left[\exp(-Z\sqrt{\mu_n^2 - K^2} - 1) \right].
 \end{aligned} \quad (22)$$

Алгоритм повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса за счет оптимизации геометрии проточной части

Шаг 1: Примем для магнитодинамической и гидродинамической частей следующее равенство:

$$r_a = r_2. \quad (23)$$

Шаг 2: Для связи магнитодинамической и гидродинамической частей зададим равенство окружной компоненты скорости v_φ и угловой частоты ω_φ :

$$\omega_\varphi = v_\varphi. \quad (24)$$

Шаг 3: Определим для необходимого расхода требуемое значение окружной компоненты скорости v_φ из уравнения расхода через рабочее сече-

ние магнитодинамического насоса:

$$Q = S\omega_{\phi}(r_2), \quad (25)$$

где S – рабочее сечение.

Шаг 4: В соответствии с заданной окружной компонентой скорости найдем значение параметра:

$$K = \frac{2v_{\phi}r_2}{rv_z}. \quad (26)$$

Шаг 5: Оптимизируем характер распределения окружной компоненты скорости $v_{\phi}(R, Z)$, подбирая значения μ_n для различных отношений радиусов R_1 , приведенных в таблицах [20], и определяя на их основе рациональные значения соотношения геометрии кольцевого рабочего сечения.

Шаг 6: Найдем решения функций Бесселя и Инфеляда для магнитодинамической части. Принять $n = 1$.

Шаг 7: Получим решения функций Бесселя и Неймана для гидродинамической части.

Шаг 8: Зададим значение амплитуды управляющего поля и по полученному значению угловой частоты определяем требуемые значения напряженности поля блока управления:

$$H_z = h_m \cos(\omega_{\phi}t + \psi_{\omega}). \quad (27)$$

где ψ_{ω} – начальная фаза.

Шаг 9: По полученным решениям функций Бесселя и Инфеляда, а также параметрам поля, индуцируемого блоком управления, для магнитодинамической части определим требуемые геометрические характеристики винтового управляющего поля.

Шаг 10: Определим параметры магнитного поля пофазно (2).

Шаг 11: Опишем магнитную индукцию блока электромагнитного управления:

$$B = \text{rot}A. \quad (28)$$

Результаты численного эксперимента

Вариант повышения эффективности рабочего процесса осуществим путем рационализации компонентов скорости, проводя согласования их соотношения в системе уравнений скорости и ее пространственных компонентов с учетом геометрических параметров потока, формируемого управляющим полем, и требуемых расходных характеристик магнитодинамического насоса.

Базируясь на геометрических характеристиках винтового управляющего поля, требуемых для достижения желаемого расхода, смоделируем траекторию течения магнитореологической среды в бегущем винтовом поле (рис. 2). С целью экономии времени, требуемого для проведения расчета, рассмотрим один виток траектории. Рационализацию компонентов скорости проще всего произвести, используя параметр характеризующий интенсивность вращения потока k . По винтовой траектории, основываясь на параметре, характеризующем интенсивность вращения потока, определим расходные характеристики магнитодинамического насоса (рис. 3).

Результаты численного эксперимента иллюстрируют существенную зависимость расходных характеристик от интенсивности вращения потока и подтверждают возможность применения ее при моделировании рабочих характеристик магнитодинамических насосов с винтовыми управляющими полями. В подобных устройствах движение магнитореологической среды производится вращательно-поступательно посредством бегущего винтового электромагнитного поля, индуцируемого каскадом блоков управления потоком, которые состоят из элементов дифференциальной обмотки. Управляющее бегущее электромагнитное поле индуцируется каскадом электромагнитов посредством последовательного включения контуров, питающих блоки и элементы дифференциальной обмотки блоков управления потоком, входящих в каскад, при этом включение обмотки каждого последующего блока начинается со смещения на один элемент дифференциальной обмотки, то есть с угловым сдвигом. Очевидно, что параметр, характеризующий интенсивность вращения потока, является мерой скорости переключения элементов дифференциальных обмоток, образующих спираль. Полученные результаты имеют существенное прикладное значение и применимы в инженерной практике.

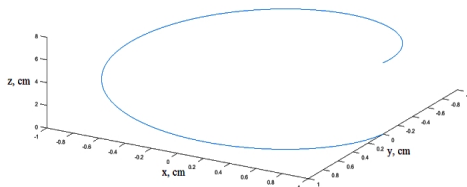


Рис. 2. Траектория движения потока магнитореологической жидкости в винтовом электромагнитном поле (один виток)

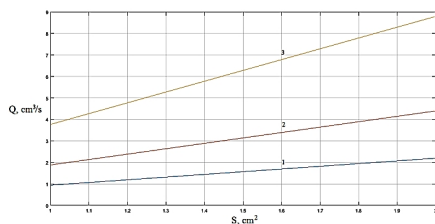


Рис. 3. Статические характеристики насоса: 1 линия – $k=1$; 2 линия – $k=2$; 3 линия – $k=4$

Таким образом, разработанная конструкция магнитодинамического насоса отличается от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства заключается в создании винтового управляющего поля за счет каскада блоков управления, выполненных из сборок дифференциальных индукторов и спирального направляющего аппарата проточной части.

Разработанный метод численного моделирования представленного в работе запатентованного магнитодинамического насоса позволяет рационализировать геометрию проточной части и управляющего поля, что значительно улучшает характеристики рабочего процесса и повышает эффективность устройства.

Заключение

Разработанный метод управления расходными характеристиками магнитореологической среды эффективен и промышленно применим.

Разработан метод рационализации геометрических параметров конструкции магнитодинамического насоса, что дает возможность повысить эффективность рабочего процесса и улучшиться гидродинамические характеристики устройства.

На основе предложенного метода управления расходом создана оригинальная конструкция магнитодинамического насоса.

Результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного конструктивного решения.

Список литературы

1. Пат. 2443911 РФ. Магнитореологическая позиционирующая и виброизолирующая система / В.П. Михайлов и др. Опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
2. Patent US 6116144. Pressure motor for electro-rheological fluids H. Rosenfeldt et. al., Publication date 05.06.2001.
3. Patent US 20110037325. Integrated electromagnetohydrodynamic micropumps and methods for pumping fluids C. Ciocanel, N. Islam, Publication date 17.02.2011.
4. Пат. 2145394 РФ. Магнитожидкостное устройство для

гашения колебаний / В.Н. Бурченков и др. Опубл. 10.02.2000. Бюл. № 4.

5. Пат. 2449188 РФ. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор / А.Б. Корчагин и др. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
6. Пат. 2232316 РФ. Магнитореологический амортизатор / Е.П. Гусев и др. Опубл. 27.10.2003. Бюл. № 30.
7. Пат. 2106551 РФ. Магнитореологический виброгаситель / Ю.Б. Кудряков и др. Опубл. 10.03.1998.
8. Пат. 2354867 РФ. Динамический гаситель / И.А. Яманин и др. Опубл. 10.05.2009. Бюл. № 13.
9. Пат. 2561610 РФ. Магнитореологический амортизатор / Б.А. Гордеев и др. Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.
10. Пат. 2634166 РФ. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком / К.В. Найгерт, С.Н. Редников. Опубл. 24.10.2017. Бюл. № 30.
11. Способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях: пат. заявка 2018130914 РФ / К.В. Найгерт, В.Т. Тутьин, В.А. Целищев. 27.08.2018.
12. Физические основы проектирования магнитореологических систем нового поколения / К.В. Найгерт, В.А. Целищев и др. // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Москва: РАН, 2018. 90 с.
13. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228. 2019.
14. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384. 2019.
15. Магнитные поверхности трёхзаходного винтового магнитного поля, возмущённого гофрированным полем / И.М. Гельфанд, и др. // Журнал технической физики. 1961. Т. XXXI. Вып. 10. С. 1164.
16. Пример тороидального магнитного поля, не обладающего магнитными поверхностями / И.М. Гельфанд, и др. // ДАН СССР. 1962. Т. 143. № 1. С. 81.
17. О структуре тороидального магнитного поля, не обладающего магнитными поверхностями / И.М. Гельфанд, и др. // ДАН СССР. 1963. Т. 148. № 6. С. 1286.
18. Движение частиц в винтовом тороидальном магнитном поле / Морозов А.И. и др. // Журнал технической физики. 1960. Т. XXX. Вып. 3. С. 271.
19. Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены // Высшие transcendентные функции. Т.2. М.: Наука, 1974. 296 с.
20. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

Поступила 25.02.19

Принята в печать 22.03.19

IMPROVING THE MAGNETODYNAMIC PUMP PERFORMANCE

Katarina V. Naigert – PhD (Eng.), Doctoral Student
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: kathy_naigert@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-8779-9729>.

Vladimir A. Tselishchev – DSc (Eng.), Professor,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: pgl.ugatu@mail.ru

Abstract. It is obvious that the volumetric method of regulating the drive system is the most energy efficient. Implementation of the volumetric method is an expensive engineering solution for conventional hydraulic systems, but magnetorheological drives minimize the difference between costs of using volumetric and throttle control methods. Therefore, the paper describes a method for increasing the efficiency of magnetodynamic pumps by applying helical control electromagnetic fields. The authors presented an unconventional patented design solution of the formulated task and created an algorithm for improving the efficiency of the operation by optimizing the flow path geometry. A design solution to increase efficiency of magnetodynamic pumps is implemented by controlling the flow of magnetorheological fluid in the external dynamic helical electromagnetic fields; it generates hydrodynamic effects, transfers the radial velocity component of the flow and forms a helical path of magnetorheological fluid particles. The helical control fields are induced by a cascade of electromagnetic control blocks, which consist of differential winding elements arranged in a circle. It initiates the rotating and reciprocating motion of magnetorheological fluid. A numerical model has been developed to improve the efficiency of its operation and includes magnetodynamic and hydrodynamic parts. The use of this numerical model makes it possible to rationalize the characteristics of magnetodynamic pumps. The paper presents a step-by-step algorithm of improving the efficiency of the magnetodynamic pump operation. The algorithm describes the sequence of determining the required parameters and patterns. Speed components are rationalized by a parameter, which characterizes the intensity of flow rotation. As a result of a numerical experiment, static characteristics of the magnetodynamic pump were obtained for different values of the mentioned parameter.

Keywords: Magnetodynamic pump, efficiency of the operation, helical magnetic fields, hydrodynamic effects.

References

1. Mikhailov V.P. et al. *Magnitореологическая позиционировальная и виброизоляция системы* [Magnetorheological positioning and vibration isolation system]. Patent RF, no. 2443911, 2012.
2. Rosenfeldt H. et al. Pressure motor for electro-rheological fluids. Patent US, no. 6116144, 2001.
3. Ciocanel C., Islam N. Integrated electro-magnetohydrodynamic micropumps and methods for pumping fluids. Patent US, no. 20110037325, 2011.
4. Burchenkov V.N. et al. *Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy* [Magneto-liquid device for dampening oscillations]. Patent RF, no. 2145394, 2000.
5. Korchagin A.B. et al. *Reguliruemyy magnitореологический пневматический амортизатор* [Adjustable magnetic rheological pneumatic shock absorber]. Patent RF, no. 2449188, 2012.
6. Gusev E.P. et al. *Magnitореологический амортизатор* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2232316, 2003.
7. Kudryakov Yu.B. et al. *Magnitореологический виброгаситель* [Magnetorheological vibration damper]. Patent RF, no. 2106551, 1998.
8. Yamanin I.A. et al. *Dinamicheskiy gasitel* [Dynamic damper]. Patent RF, no. 2354867, 2009.
9. Gordeev B.A. et al. *Magnitореологический амортизатор* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2561610, 2015.
10. Naigert K.V., Rednikov S.N. *Magnitореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком* [A magnetorheological drive of direct electromagnetic control of flow characteristics of the hydraulic system with the hydraulic bridge upper circuit]. Patent RF, no. 2634166, 2017.
11. Naigert K.V., Tutynin V.T., Tselishchev V.A. *Sposob upravleniya rashodnymi kharakteristikami magnitореологической жидкости за счет создания гидродинамических и ньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях* [The method of controlling the magnetorheological fluid flow characteristics by creating hydrodynamic and non-Newtonian effects in external dynamic electromagnetic fields]. Patent application RF, no. 2018130914, 2018.
12. Naigert K.V., Tselishchev V.A. et al. Chapter 3. Physical principles of designing a new generation of magnetorheological systems. *Itogi nauki. Vypusk 35: monografiya*. [Results of science. Issue 35: monograph]. Selected papers of the All-Russian Conference on Problems of Science and Technology. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018, 90 p. (in Russ.)
13. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Hardware implementation of automatic control system for new generation magnetorheological supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228, 2019.
14. Naigert K.V., Tselishchev V.A. New generation magnetorheological, magnetodynamic, and ferrofluid control devices with nonstationary electromagnetic fields. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384, 2019.
15. Gelfand I.M. et al. Magnetic surfaces of a three-way helical magnetic field perturbed by a corrugated field. *Zhurnal*

- tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1961, vol. 31, no. 10, p. 1164. (In Russ.)
16. Gelfand I.M. et al. An example of a toroidal magnetic field without magnetic surfaces. *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1962, vol. 143, no. 1, p. 81. (In Russ.)
17. Gelfand I.M. et al. On the structure of a toroidal magnetic field without magnetic surfaces. *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1963, vol. 148, no. 6, p. 1286. (In Russ.)
18. Morozov A.I. et al. Motion of particles in a helical toroidal magnetic field. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1960, vol. 30, no. 3, p. 271. (In Russ.)
19. Bateman H., Erdélyi A. *Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonalnye mnogochleny* [Bessel functions, parabolic cylinder functions, orthogonal polynomials]. Higher Transcendental Functions, vol. 2. Moscow: Nauka, 1974, 296 p. (In Russ.)
20. Mitrofanova O.V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalah yaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in channels of nuclear power plants]. Moscow: FIZMATLIT, 2010, 288 p. (In Russ.)

Received 25/02/19

Accepted 22/03/19

Образцы для цитирования

Найгерт К.В., Целищев В.А. Повышение эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 60–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-60-67>

For citation

Naigert K.V., Tselishchev V.A. Improving the magnetodynamic pump performance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 60–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-60-67>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аль-джумали Мохаммед Жасим Мохаммед – аспирант, Багдад, Ирак. E-mail: aljumaillmohamad@gmail.com

Андреева Мария Юрьевна – доц., кафедра «Гражданское строительство и прикладная экология», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

Бигеев Вахит Абрашинович – д-р техн. наук, проф., кафедра «Технологии металлургии и литейных процессов», институт металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Видрин Александр Владимирович – д-р техн. наук, чл.-корр. Российской академии естественных наук (РАЕН), заместитель генерального директора по научной работе, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»); профессор кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vydrinav@rosniti.ru

Голки Владимир Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: v.i.golik@mail.ru. ORCID 0000-0002-1181-8452

Гришунин Владимир Анатольевич – главный инженер, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. E-mail: vladimir.grishunin@mail.ru

Громов Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. «Естественно-научные дисциплины им. проф. В.М. Финкеля», Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. E-mail: gromov@physics.sibsu.ru

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

Иванов Юрий Федорович – д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия. E-mail: yufi55@mail.ru

Квин Ронгшан – проф. школы инженерии и инноваций, Открытый Университет, Милтон-Кинс, Великобритания.

Коновалов Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Технологии металлов и авиационного материаловедения», Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: ksv@ssau.ru

Леднов Анатолий Викторович – доц., кафедра «Вычислительная техника и программирование», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: alednov@mail.ru

Леднова Юлия Анатольевна – ст. преп., кафедра «Гражданское строительство и прикладная экология», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

Найак Сумаранян – Индийский технологический институт Бомбей, Мумбай, Индия.

Найгерт Катарина Валерьевна – канд. техн. наук, докторант, кафедра «Автомобильный транспорт», Южно-

Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: kathy_naigert@mail.ru. ORCID 0000-0002-8779-9729

Наандекар В.М. – Инженерно-технологический институт Шри Гуру Гобинд Сингх-джи, Наанде, Индия.

Нарасимхан К. – Индийский технологический институт Бомбей, Мумбай, Индия. E-mail: nara@iitb.ac.in

Попов Игорь Павлович – ст. преп. каф. «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», Курганский государственный университет, Курган, Россия. E-mail: ip.popov@yandex.ru

Потапова Марина Васильевна – канд. техн. наук, доц., кафедра «Технологии металлургии и литейных процессов», институт металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: marina.potapova@mail.ru. ORCID 0000-0001-8404-4243

Разоренов Юрий Иванович – д-р техн. наук, проф., проректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Рёгнер Франк – проф., Технический университет Кёльна, Институт разработки химических процессов и проектирования производств, Кёльн, Германия.

Семи Александр Петрович – завед. каф. «Строительные технологии и материалы», Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. E-mail: gromov@physics.sibsu.ru

Столяров Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф., кафедра «Металлургия и химические технологии», институт металлургии, машиностроения и материалообработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: sam52.52@mail.ru. ORCID 0000-0001-8292-3332

Танг Гоу – проф., директор института перспективных материалов университета Цинхуа, Шэньчжэнь, Китай.

Ушаков Сергей Николаевич – зам. генерального директора ПАО «ММК» по сбыту, Магнитогорск, Россия. E-mail: mcm@magtu.ru

Фальке Викарам – Инженерно-технологический институт Шри Гуру Гобинд Сингх-джи, Наанде, Индия.

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

Чебан Антон Юрьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия. E-mail: chebanay@mail.ru

Шкуратов Евгений Александрович – канд. техн. наук, заместитель зав. лабораторией продольной прокатки, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shkuratov@rtural.ru

Юрьев Антон Алексеевич – соискатель каф. «Естественно-научные дисциплины им. проф. В.М. Финкеля», Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. E-mail: ant-yurev@yandex.ru