

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 1 (44) 2023

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК), по специальностям: 2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов; 2.6.3 Литейное производство; 2.6.4 Обработка металлов давлением. Сведения о журнале содержатся в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Члены ред. совета:

С.В. Денисов – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

А.Н. Емельянин – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

И.Е. Илларионов – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

А.А. Казаков – д-р техн. наук, проф.,
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

В.М. Колокольцев – президент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук, проф.

З. Конопка – д-р техн. наук, проф.,
Ченстоховский технологический
университет, Польша

О. Островский – д-р техн. наук, проф.,
UNSW, Австралия

А.М. Песин – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М. Дабала – д-р техн. наук, проф.,
Университет Падуи, Италия

П. Тандон – д-р техн. наук, профессор
и руководитель машиностроения, Индийский
институт информационных технологий, дизайна
и производства PDPM, Джабалпур, Индия

Р.П. Кардосо – д-р техн. наук, проф.,
Федеральный университет Санта-Катарины,
Бразилия

Е. В. Агеев – д-р техн. наук, проф.,
Юго-Западный государственный университет

В.Б. Деев – д-р техн. наук, проф.,
НИТУ МИСиС, Москва, Россия

А.А. Попов – д-р техн. наук, проф.,
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

В.М. Салганик – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

О.Ю. Шешуков – д-р техн. наук, проф.,
ГУ ИМетРАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Главный редактор:

А.С. Савинов – директор института
металлургии, машиностроения
и материалобработки, д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Научный редактор:

Н.Ш. Тютеряков – канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Технический редактор:

Ю.А. Извеков – проф., канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

К.И. Рудь

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

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.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-74213 от 02.11.2018 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 315
Тел.: (3519) 29-84-64.
E-mail: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

Адрес типографии:

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

Адрес издателя:

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

Выход в свет 29.03.2023. Заказ 93. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 1 (44) 2023

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 journals can be found into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

Editorial Board Members

Chairman:

V.A. Bigeev – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Honorary Board Members:

S.V. Denisov – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
A.N. Emelyushin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
I.Y. Illarionov – D.Sc., Professor,
Chuvash State University
A.A. Kazakov – D.Sc., Associate Professor,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
V.M. Kolokoltsev – D. Sc., Professor,
President of Nosov Magnitogorsk State Technical
University
Z. Konopka – D.Sc., Professor,
Czestochowa University of Technology, Poland
O. Ostrowski – D.Sc., Professor,
University of New South Wales, Australia
A.M. Pesin – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
M. Dabala – D.Sc., Professor, University of Padova,
Italy
P. Tandon – D. Sc., Professor & Head of Mechanical
Engineering, PDPM Indian Institute of Information
Technology, Design and Manufacturing, Jabal-
pur, India

R.P. Cardoso – D. Sc., Professor,
Federal University of Santa Catarina, Brazil
E.V. Ageev – D.Sc., Professor, Southwest State University
V.B. Deev – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow, Russia
A.A. Popov – D.Sc., Professor,
Institution of Higher Professional Education «Ural Federal
University named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin»
V.M. Salganik – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
O. Ju. Sheshukov – D.Sc., Professor,
alloys Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N.Yeltsin»

Editor-in-Chief:

A.S. Savinov – Director of Metallurgy Mechanical
Engineering and Materials Processing Institute D.Sc., Nosov
Magnitogorsk State Technical University

Scientific Editor:

N.S. Tyteriakov – Ph.D., Nosov Magnitogorsk State
Technical University

Technical Editor:

Y.A. Izvekov – Professor, Ph.D., Nosov Magnitogorsk
State Technical University
K.I. Rud

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2023

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

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

Registration certificate PI # FS 77-74213 dated November 02, 2018 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.
E-mail: TTaPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

Printing office:

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

Editorial office:

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

Publication date 29.03.2023. Order 93. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Решетова И.В., Сенькин К.В. ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ МЕЖДУ ОПЕРАЦИЯМИ СМЕШИВАНИЯ И ОКОМКОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АГЛОШИХТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА... 4	
Баранов А.Н., Ёлшин В.В., Колодин А.А. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРЕНИЯ ЗОЛОТА В ЦИАНИСТЫХ РАСТВОРАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ КИСЛОРОДА	11
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	18
Фирстов А.П. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕСЧАНО-МАСЛЯНЫХ СМЕСЕЙ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ	18
Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ	24
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	30
Железков О.С., Лизов С.Б., Макаров Б.Б. СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ТОРЦЕВЫХ ВЫСТУПОВ ОСАЖИВАЕМОЙ ШАЙБЫ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ	30
Тухветова Л. М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Константинов Д.В. К АНАЛИЗУ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ШЕСТИГРАННОГО ПРОФИЛЯ.....	34
Сухонослова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАРАМЕТРА ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ.....	39

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Sibatullin S.K., Kharchenko A.S., Sysoev V.I., Magasumov G.Z., Kurguzov K.V., Senkin K.V. INFLUENCE OF WATER DISTRIBUTION BETWEEN MIXING AND PELLETIZING OPERATIONS ON GAS-DYNAMIC PROPERTIES OF SINTER CHARGE AND QUALITY INDICATORS OF IRON ORE SINTER	4
Baranov A.N., Elshin V.V., Kolodin A.A. ELECTROCHEMICAL STUDIES OF GOLD DISSOLUTION IN CYANIDE SOLUTIONS AT VARIOUS OXYGEN CONCENTRATIONS	17
FOUNDRY	18
Firstov A.P. STUDIES OF SAND-OIL MIXTURES IN THE FLUIDIZED BED	18
Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Trofimova E.A. WAYS TO INCREASE THE SPECIAL PROPERTIES OF COMPLEX-ALLOYED WHITE CAST IRON.....	24
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	30
Zhelezkov O.S., Lizov S.B., Makarov B.B. POWER PARAMETERS OF THE STAMPING PROCESS OF THE END PROJECTIONS OF THE DEPOSITED WASHER OF FRICTION JOINTS	33
Tukhvetova L.M., Stolyarov A.Yu., Korchunov A.G., Ogneva E.M., Konstantinov D.V. ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE TOOL DURING HEXAGONAL PROFILE DRAWING	34
Sukhonosova T.G., Yarullin A.R., Novak V.S. IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE PRESSURE PARAMETER IN THE WORKING SPACE OF A HEATING FURNACE	39

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.337.111

Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Решетова И.В., Сенькин К.В.

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ МЕЖДУ ОПЕРАЦИЯМИ СМЕШИВАНИЯ И ОКОМКОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АГЛОШИХТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА

Аннотация. В лаборатории кафедры металлургии и химических технологии ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» проведены исследования по влиянию распределения воды между операциями смешивания и окомкования на газодинамические свойства аглошихты, показатели хода процессов агломерации и качества железорудного агломерата для шихтовых условий аглофабрик ПАО «ММК».

Установлено рациональное соотношение расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем в операциях смешивания и окомкования шихты, равное 80:20 %, при ее влажности 9,5%.

Данное соотношение обеспечивало более высокие показатели прочности сырых гранул. Величина выхода фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм составляла 47,5%, что на 15,5% отн. выше средней величины показателя выхода годного, полученного в опытах при соотношении влаги между операциями смешивания и окомкования: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100 %.

Рациональное соотношение распределения влаги на этапах смешивания и окомкования, равное 80:20 %, обеспечивало при спекании агломерационной окомкованной шихты максимальную удельную производительность (по классу +5 мм), равную 1,442 т/(м²·ч), что на 3,7% выше средней удельной производительности в опытах при соотношении влаги между операциями смешивания и окомкования: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100 %.

Ключевые слова: агломерация, агломерат, крупность шихты, окомкование, влажность шихты, удельная производительность, прочность аглошихты, качество агломерата

Постановка проблемы

Наиболее высокие технико-экономические показатели доменной плавки достигаются при применении агломерата с повышенными физико-механическими свойствами в холодном и горячем состояниях [1, 2]. Качество получаемого агломерата и производительность агломерационной машины зависит от различных факторов: химического и компонентного состава шихты [3-6], параметров ее смешивания и окомкования [7, 8], режимов загрузки ее компонентов на паллеты [9, 10], высоты спекаемого слоя [3], режимов охлаждения готового агломерата [11-13].

Оптимизация параметров смешивания и окомкования агломерационной шихты повышает однородность качества получаемого агломерата, прочность образующихся гранул, однако смешивание шихты при любом времени обработки не обеспечивает абсолютно однородную смесь. Предельная степень однородности зависит от физико-химических свойств материалов, соотношения между количествами компонентов смеси и характера движения материала в смесителе. Практически важным является максимальное приближение к теоретической предельной степени однородности для заданных шихтовых условий [14]. Существенными факторами, оказывающими влияние на прочность гранул и, следовательно, производи-

тельность агломашин и качество агломерата, являются время пребывания материала в смесителе и окомкователе, скорость их вращения, влажность компонентов шихты и распределение воды между смесителем и окомкователем при проведении соответствующих операций [15-17].

В связи с этим для шихтовых условий ПАО «ММК» целесообразно выявление рационального соотношения воды между операциями смешивания и окомкования для повышения показателей качества готового агломерата и увеличения производительности агломерационной машины.

Методы и материалы

В лаборатории кафедры металлургии и химических технологий ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» проводили исследования по влиянию соотношения влаги между операциями смешивания и окомкования при различной степени увлажнения шихты на газодинамические свойства аглошихты, показатели агломерационного процесса и качества железорудного агломерата.

Исследуемое соотношение распределения влаги между операциями смешивания и окомкования было следующим: 90:10; 80:20; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100%. Для каждого из соотношений выявили оптимальную влажность шихты. Состав шихты включал следующие компоненты: возврат – 25%, рудная смесь – 75%. Основность шихты по CaO/SiO₂ была равной

1,6 ед. Спекание агломерата производили при содержании углерода 4%.

Увлажнение агломерационной шихты осуществляли исходя из летнего периода времени года, когда на аглофабрику поступает концентрат с влажностью до 6,5%. В производственных условиях такой концентрат закладывают в штабеля на складах с аглорудой и известью, где происходит физическое и химическое взаимодействие между компонентами. Поскольку в лаборатории использовали воздушно-сухой концентрат, то для моделирования «летних условий» его доувлажняли до влажности 6,5% в барабане (предварительное увлажнение).

Смешивание, увлажнение и последующее окомкование компонентов шихты проводили в одном агрегате – смесителе-окомкователе, который представляет собой пустотелый цилиндрический барабан диаметром по рабочей поверхности 320 мм и длиной 125 мм, оснащенный шестью полочками. Скорость вращения барабана составляла 32 об/мин.

Окомкованные гранулы сырой шихты подвергали испытаниям на прочность при сжатии и сбрасывании с высоты 300 мм. Для этого отбирали гранулы фракций 5-12 и 3-5 мм и проводили параллельные испытания с обеими фракциями. Для испытания на сжатие сырые гранулы по одной помещали на стальную пластину и сверху прикладывали при помощи соединенного с динамометром штока, на конце которого была жестко закреплена вторая стальная пластина,

нарастающее усилие. При превышении предела прочности гранулы на сжатие стрелка динамометра фиксировала величину раздавливающего усилия, после чего измеряемое значение приложенной нагрузки убывало, а гранула деформировалась. При испытаниях на сбрасывание определенное количество гранул монофракции 5-12 мм / 3-5 мм помещали в мешочек и сбрасывали с высоты 300 мм / 10 раз, после чего производили рассев и оценивали содержание фракции + 5 мм / +3 мм в процентах по отношению к исходному числу гранул.

Агломерат спекали в аглочаше (1) (рис. 1) внутренним диаметром 70 мм и высотой 300 мм, сделанной из стальной трубы, устанавливаемой во фланец вакуум-камеры (13) на решетку из стального диска с отверстиями диаметром 2,5 мм (3).

Установка оборудована: хромель-алюмелевой термопарой (11) для замера температуры в вакуум-камере (9), которая демонстрировала значения на пирометре (12), и термометром (6); тягонапоромером (5) со спиртовым заполнением для определения объема аглогаза, отсасываемого из вакуум-камеры с помощью вакуумного насоса (2), подключенному к ЛАТРу (15), по перепаду давления на шайбе прибора (4); водяным манометром для замера разрежения в вакуум-камере (10); водяным манометром для замера перепада разрежения на шайбе (7); отходящие газы охлаждаются в бутылках (8).

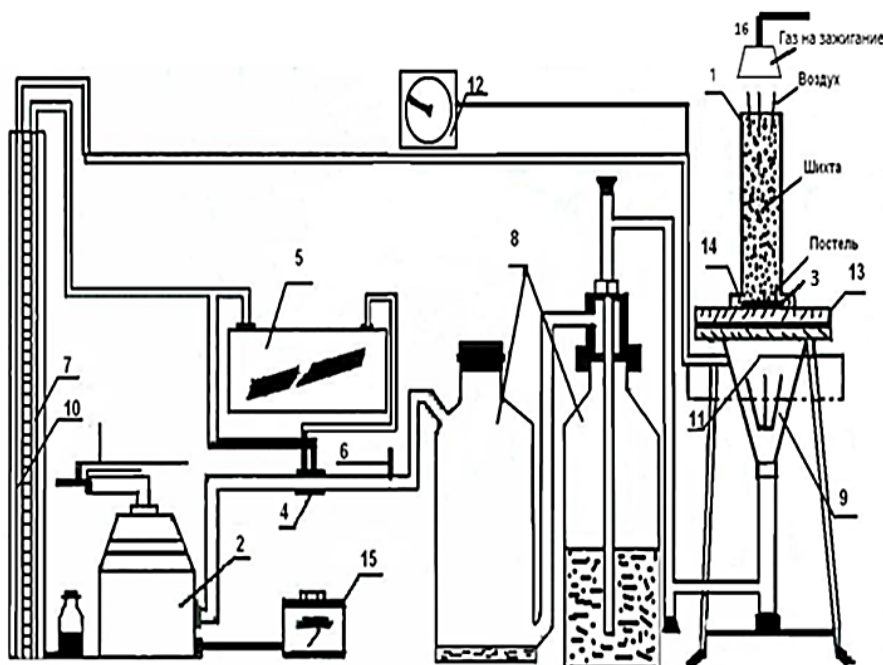


Рис. 1. Лабораторная установка для спеканий агломерата:

- 1 – спекательная чаша; 2 – вакуум-насос; 3 – решетка; 4 – калиброванная шайба для измерения перепада давления; 5 – тягонапоромер; 6 – ртутный термометр; 7, 10 – водяные манометры; 8 – стеклянные бутылки; 9 – вакуум- камера; 11 – хромель-алюмелевая термопара; 12 – потенциометр; 13 – верхний фланец вакуум-камеры; 14 – влажный асбест; 15 – автотрансформатор

Убедившись в герметичности установки, на аглочашу надевали теплоизоляционный цилиндрический кожух с зазором между наружной поверхностью аглочашки и внутренней поверхностью кожуха. Теплоизоляционный кожух уменьшал потери тепла при спекании во внешнее пространство, способствовал образованию более однородной структуры аглоспека по высоте.

В качестве постели использовали возврат фракции 3-5 мм, высота слоя составляла 25 мм. На выровненную поверхность шихты насыпали 30 г коксика класса 2-3 мм, предназначенного для зажигания. Высота слоя коксика после выравнивания составляла около 15 мм.

Зажигали спекаемый слой шихты с помощью зажигательного горна (16), предварительно центрируя его относительно оси аглочашки и располагая так, что нижняя кромка горна находится над верхним срезом аглочашки на высоте около 5 мм. Продолжительность зажигания составляла 2 мин.

Результаты и обсуждение

Согласно предварительным экспериментам, проведенным в лаборатории кафедры МиХТ, для приведенных шихтовых условий установили оптимальную влажность при различном распределении расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем. При вводе 90% воды в барабан-смеситель и 10% в барабан-окомкователь от ее общего расхода оптимальное ее содержание в шихте составляло 9%. При распределении влаги между операциями смешивания и окомкования в соотношениях 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 и 0:100% оптимальным содержанием влаги было 9,5%.

В табл. 1 приведены результаты окомкования агломерационной шихты при различном распределении расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем для условий рациональной влажности.

Из анализа табл. 1 следует, что наиболее высокую прочность гранул наблюдали при распределении расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем в соотношении 80:20%. Выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм составлял 47,5%, что выше на 8,8 и 5,3% отн. по сравнению с распределением расхода воды между операциями смешивания и окомкования в соотношении 90:10 и 60:40 соответственно. Дальнейшее увеличение влажности при проведении окомкования в условиях одновременного уменьшения доли вла-

ги от общего расхода воды при операции смешивания снижало прочностные характеристики окомкованных гранул по данному показателю.

Для условий оптимального распределения влажности между операциями смешивания и окомкования агломерационной шихты (80:20%) содержание в сырой окомкованной шихте нежелательных фракций +8 мм и 0-2 мм при этом относительно невелико и составляет в сумме лишь 5,9% (26,8% при соотношении 90:10%; 11,0% – 60:40%; 10,8% – 40:60%; 10,6% – 20:80%; 24,4% – 0:100%). В результате при соотношении 80:20% обеспечивается повышенная однородность сырой окомкованной шихты по крупности, равной 0,81, в то время как для остальных изученных соотношений однородность по крупности находится в диапазоне от 0,61 до 0,77.

Результаты спеканий опытных агломератов представлены в табл. 2. Рациональное соотношение распределения влаги на этапах смешивания и окомкования, равное 80:20%, обеспечивало при спекании агломерационной окомкованной шихты максимальную удельную производительность (по классу +5 мм), равную 1,442 т/(м²·ч), что на 3,7% выше средней удельной производительности в опытах при соотношении влаги между операциями смешивания и окомкования: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100%.

Максимальную производительность достигали за счет повышенной однородности шихты по крупности, которая предотвращала образование крупных каналов при спекании, обеспечивая более равномерное распределение просасываемого воздуха по объему шихты через разветвленную сеть каналов с относительно узким поперечным сечением. В результате повышался выход годного агломерата и удельная производительность. В опыте с оптимальным распределением влаги между операциями смешивания и окомкования обеспечивали выход годного (по классу +5 мм), равный 87,2%. Сопротивление годного агломерата удару (+5 мм) при испытании его в холодном состоянии составляло 71,7%.

Таким образом, установили, что в процессе смешивания и окомкования агломерационной шихты рациональное соотношение влаги составляло 80:20%, при влажности шихты 9,5%. Данное распределение воды между барабанами для смешивания и окомкования шихты обеспечивало более высокие показатели прочности сырых гранул, повышенную однородность окомкованной шихты, максимальную производительность агломерационной установки.

Результаты окомкования агломерационной шихты при рациональной влажности для различного распределения расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем

Наименование показателей	Распределение расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем, %					
	90:10	80:20	60:40	40:60	20:80	0:100
Содержание влаги, %	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Сопrotивление сырых гранул сжатию, (гс/ гранула) по фракциям:						
5-12 мм	151,0	146,0	145,0	142,0	142,0	110,0
3-5 мм	115,0	121,7	121,1	121,0	120,0	90,0
Выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм	70,0 / 43,3	73,3 / 47,5	70,0 / 45,0	70,0 / 45,0	70,0 / 42,5	45,0 / 25,0
Выход фракции +3 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 3-5 мм с высоты 300 мм	76,7 / 50,0	80,0 / 70,0	80,0 / 70,0	80,0 / 60,0	80,0 / 55,0	60,0 / 25,0
Содержание, %, по классам крупности окомкованной шихты, мм:						
+8	7,9	0,7	6,0	4,4	2,9	1,8
5-8	24,2	26,6	36,8	29,0	33,2	18,0
3-5	31,6	50,7	36,0	40,2	41,0	25,6
2-3	17,4	16,9	16,2	19,9	15,1	31,9
2	18,9	5,2	5,0	6,4	7,7	22,6
Однородность шихты по крупности $O_{ш}$	0,61	0,81	0,77	0,77	0,75	0,66

Таблица 2

Результаты спеканий агломерата при рациональной влажности шихты для различного распределения расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем

Наименование показателей	Распределение расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем, %					
	90:10	80:20	60:40	40:60	20:80	0:100
Содержание влаги, %	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Выход годного (по классу +5 мм), %	85,1	87,2	87,1	87,2	86,0	84,5
Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,409	1,442	1,436	1,428	1,418	1,256
Показатели прочности агломерата, %:						
- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	73,5	71,7	72,4	72,4	72,9	73,4
- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	23,4	25,2	23,5	23,9	23,9	23,7
- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,8	3,1	4,1	3,6	3,2	3,0
Скорость спекания, мм/мин	20,1	20,4	20,9	19,3	20,1	18,5
Кoэффициент сопротивления сырой шихты	7,4	5,7	4,6	5,1	5,3	8,1
Кoэффициент сопротивления шихты в момент зажигания	12,4	10,8	9,9	11,1	10,9	14,5
То же в момент окончания спекания	8,1	7,6	8,1	7,2	8,2	10,0
То же в момент окончания опыта	3,3	3,0	3,3	3,0	3,1	3,9
Максимальная температура в вакуум-камере, °С	637	648	670	580	650	605
Продолжительность спекания, мин	13,0	12,8	12,5	13,0	13,0	14,0
Продолжительность опыта, мин	21,3	21,0	20,0	20,5	21,0	23,0
Продолжительность охлаждения аглоспека, мин	8,3	8,2	7,5	7,5	8,0	9,0
Скорость охлаждения аглоспека (снижения температуры газового потока в вакуум-камере от максимальной до 150°С), град/мин	58,4	60,6	69,6	56,9	50,6	50,6
Усадка спекаемого слоя, %	10,4	12,1	8,3	9,4	12,5	12,5

Выводы

В лаборатории кафедры металлургии и химических технологии ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» проведены исследования по влиянию распределения воды между операциями смешивания и окомкования на газодинамические свойства аглошихты, показатели хода процессов агломерации и качества железорудного агломерата для шихтовых условий аглофабрик ПАО «ММК».

Установлено рациональное соотношение расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем в операциях смешивания и окомкования шихты, равное 80:20%, при ее влажности 9,5%.

Данное соотношение обеспечивало более высокие показатели прочности сырых гранул. Величина выхода фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм, составляла 47,5%, что на 15,5% отн. выше средней величины показателя выхода годного, полученного в опытах при соотношении влаги между операциями смешивания и окомкования: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100 %.

Рациональное соотношение распределения влаги на этапах смешивания и окомкования, равное 80:20 %, обеспечивало при спекании агломерационной окомкованной шихты максимальную удельную производительность (по классу +5 мм), равную 1,442 т/(м²·ч), что на 3,7% выше средней удельной производительности в опытах при соотношении влаги между операциями смешивания и окомкования: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80 и 0:100%.

Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-1064.2022.4.

Список источников

1. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.П. Чернов, В.А. Бегинюк // Черные металлы. 2017. № 8. С. 27-33.
2. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 37-44.
3. Влияние компонентного состава и высоты слоя шихты на качество агломерата, расход топлива и производительность агломерационных машин ПАО «НЛМК» / Ю.А. Фролов, С.В. Филатов, Л.И. Каплун, О.А. Семенов, В.Г. Михайлов, Л.Ю. Гилева // Металлург. 2020. № 4. С. 21-29.
4. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Gushchin D.N. Aspects of sintering the magnesian iron ore concen-

- trate in blends with magnetite concentrates // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2021. Т. 56. № 5. С. 1089-1101.
5. Влияние содержания железа в шихте на выход годного агломерата при спекании смеси концентратов ОАО «ММК» и ССГПО / Д.Н. Гушин, А.С. Харченко, А.А. Бородин, Н.А. Бидненко, К.В. Сенькин, А.В. Турук // Теория и технология металлургического производства. 2012. № 12. С. 21-26.
 6. Исследование влияния ввода железомagneзиальной руды в агломерационную шихту на показатели доменной плавки / А.С. Харченко, С.Р. Миникаев, У.Ж. Игликова, А.А. Полинов, Д.Н. Гушин, С.К. Сибгатуллин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 9. С. 910-920.
 7. Фролов Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Ч. 2. Смешивание и окомкование агломерационной шихты // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 5 (1409). С. 40-49.
 8. Окомкование шихты из руд КМА в одноцилиндрическом барабане 12,5×3,2 м, установленном на агломашине с площадью спекания 312 м² / Г.В. Коршиков, Л.Н. Богдановский, С.И. Шаров и др. // Сталь. 1971. № 6. С. 481 – 484.
 9. Совершенствование операции загрузки шихты на агломерационные машины ПАО «ММК». Ч. 2. Формирование рационального профиля слоя шихты по ширине агломашин / Ю.А. Фролов, Д.М. Чукин, А.А. Полинов, Л.Г. Емельянов, М.А. Цыгалов // Металлург. 2022. № 1. С. 11-15.
 10. Совершенствование операции загрузки шихты на агломерационные машины ПАО «ММК». Ч. 1. Стабилизация потока шихты при загрузке на агломашин / Ю.А. Фролов, Д.М. Чукин, А.А. Полинов, Л.Г. Емельянов, М.А. Цыгалов, В.Е. Котышев // Металлург. 2021. № 10. С. 11-18.
 11. Охлаждение агломерата с различным содержанием железа / Д.Н. Гушин, К.В. Сенькин, А.С. Харченко, М.И. Сибгатуллина, З.Р. Миникаева // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 2 (15). С. 35-37.
 12. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И., Каплун Л.И. Анализ охлаждения агломерата на линейном охладителе // Сталь. 2017. № 2. С. 2-9.
 13. Фролов Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Ч. 8. Охлаждение агломерата на агломерационной конвейерной машине // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 11 (1415). С. 32-43.
 14. Коршиков Г.В. О теории и практике агломерационного производства // Сталь. 2018. № 1. С. 12-19.
 15. Пузанов В. П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. Екатеринбург: УРО РАН, 2001. 634 с.

16. Коротич В. И., Фролов Ю.А., Бездержский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2003. 400 с.
17. Влияние скорости вращения барабана-окомкователя на газодинамические свойства и прочность гранул окомкованной агломерационной шихты / Д.М. Чукин, В.И. Сысоев, К.В. Кургузов [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2021. № 20. С. 4-13.

Сведения об авторах

Сибгатуллин Салават Камилович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Сысоев Виктор Иванович – аспирант, заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Магасумов Газиз Загирович – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: gmagasumov@gmail.com

Кургузов Константин Вячеславович – студент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kurguzov.kostya@mail.ru

Сенькин Константин Васильевич – начальник агломерационной лаборатории центральной лаборатории контроля, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INFLUENCE OF WATER DISTRIBUTION BETWEEN MIXING AND PELLETIZING OPERATIONS ON GAS-DYNAMIC PROPERTIES OF SINTER CHARGE AND QUALITY INDICATORS OF IRON ORE SINTER

Sibagatullin Salavat K. – ScD, professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 10tks@mail.ru

Kharchenko Alexander S. – ScD, head of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: as.mgtu@mail.ru

Sysoev Viktor I. – head of laboratories of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Magasumov Gaziz Z. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: gmagasumov@gmail.com

Kurguzov Konstantin V. – undergraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk city, Russia, E-mail: kurguzov.kostya@mail.ru

Senkin Konstantin V. – head of the sinter laboratory of the Central Control Laboratory of PJSC “MMK”, Magnitogorsk city, Russia

Abstract. A research on the influence of water distribution between mixing and pelletizing operations on gas-dynamic properties of sinter charge, agglomeration process indicators and quality of iron ore sinter for the compositions of the sinter blends used at the sinter plants of PJSC “MMK” was carried out at the laboratory of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University.

A rational proportion between water consumption rates in the mixing and pelletizing drums during mixing and pelletizing operations was established equaling to 80:20 at the charge moisture of 9.5 %.

This proportion provided higher green pellets strength indicators. The yield of +5 mm pellets after 10 drops of the green pellets of 5-12 mm size from a height of 300 mm was 47.5 % that is 15.5 % (rel.) higher than the average val-

ue of the yield of suitable sinter which was obtained in the experiments at the ratio between water consumption rates in mixing and pelletizing operations of 90:10; 60:40; 40:60; 20:80, and 0:100.

The rational proportion between water consumption rates in the mixing and pelletizing operations of 80:20 provided the highest specific productivity (by the +5 mm particle size class) equaling to $1.442 \text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ while sintering pelletized sinter charge. This value is 3.7 % higher than the average specific productivity value obtained in the experiments which were carried out at the following ratios between water consumption rates in the mixing and pelletizing operations: 90:10; 60:40; 40:60; 20:80, and 0:100 %.

Keywords: Sintering, sinter, grain size of pelletized charge, pelletizing, moisture content of sinter charge, shrinkage, specific productivity

Ссылка на статью:

Влияние распределения воды между операциями смешивания и окомкования на прочностные свойства аглошихты и показатели качества железорудного агломерата / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.И. Сысоев, Г.З. Магасумов, И.В. Решетова, К.В. Сенькин // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 4-10.

Sibatullin S.K., Kharchenko A.S., Sysoev V.I., Magasumov G.Z., Kurguzov K.V., Senkin K.V. Influence of water distribution between mixing and pelletizing operations on gas-dynamic properties of sinter charge and quality indicators of iron ore sinter. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 4-10.

УДК 56.011.56

Баранов А.Н., Ёлшин В.В., Колодин А.А.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРЕНИЯ ЗОЛОТА В ЦИАНИСТЫХ РАСТВОРАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ КИСЛОРОДА

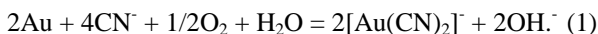
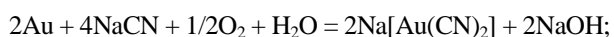
Аннотация. Статья посвящена одной из актуальных задач для золотодобывающей промышленности. Растворение золота в цианистых растворах протекает по электрохимическому механизму, при котором ионизация атомов золота и восстановление кислорода до перекиси водорода происходит не в одном акте, а в результате двух сопряженных реакций – анодной реакции окисления золота и катодной реакции восстановления кислорода. В связи с этим для изучения процессов растворения золота применяются электрохимические исследования путем снятия потенциодинамических поляризационных кривых с использованием современных потенциостатов, позволяющих снимать циклические поляризационные кривые при различной скорости поляризации. В литературе имеются сведения о электрохимических исследованиях растворения золота в смеси кислот серной и соляной, где показано, что при анодной поляризации золота имеется зона активного растворения золота и область формирования пассивного состояния, что приводит к снижению силы тока, а значит, и растворению золота при достижении потенциала начала пассивации, затем полной пассивации и перепассивации. В настоящее время эти сведения отсутствуют для растворения золота в цианистых растворах при различных концентрациях кислорода. Проведенные исследования позволили впервые определить зависимости изменения тока и потенциала пассивации от концентрации цианида и кислорода и построить зависимости изменения тока от концентрации цианида и кислорода и потенциала от концентрации цианида и кислорода. Полученные зависимости позволяют оптимизировать процесс растворения золота на золотоизвлекательных фабриках.

Ключевые слова: золото, цианирование, электрохимические исследования, потенциостат, пассивация, ток, потенциал

Введение

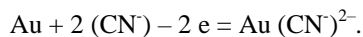
Основным методом извлечения золота из рудного сырья в настоящее время остаётся процесс цианирования. Сущность этого процесса заключается в выщелачивании благородных металлов с помощью разбавленных растворов цианистых солей щелочных или щелочноземельных металлов в присутствии кислорода воздуха [1].

При цианировании золото окисляется кислородом воздуха до Au (+1) и переходит в раствор в виде комплексных анионов $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. В общем виде химизм процесса достаточно точно соответствует реакции:



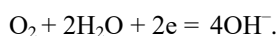
Рассмотрим эту реакцию с позиций электрохимической коррозии металлов. Электрохимическая коррозия – это взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительных компонентов среды протекают не в одном акте и скорости их зависят от электродного потенциала металла [2].

Анодная реакция растворения золота



Электродный потенциал реакции $E = -0,5$ В, а стандартный потенциал золота равен 1,691 В.

Катодная реакция



Электродный потенциал реакции равен $E_0 = 0,9$ В, а стандартный потенциал выделения кислорода 1,2 В.

По такому механизму протекает коррозия металлов и происходит, например, взаимодействие металлов с кислотами. Согласно современным представлениям, этот процесс является электрохимическим и подчиняется общим закономерностям электрохимической коррозии металлов. В соответствии с этим растворение золота в цианистых растворах можно рассматривать как результат действия короткозамкнутого гальванического элемента, одним из электродов которого является частица золота, а другим – какой-либо электропроводный минерал, в который эта частица вкраплена [3–5]. Электрохимические исследования широко используются для оценки скорости коррозии стали [6, 7].

Как известно, существует оптимальное соотношение концентраций цианида и кислорода, обеспечивающее максимальную скорость растворения при фиксированной концентрации одного из реагентов. Повышение концентрации другого реагента ведет к увеличению скорости процесса только до тех пор, пока соотношение концентраций не достигнет определенного значения, дальнейшее повышение концентрации не дает прироста скорости выщелачивания [8–11]. Также известно, что уменьшение концентрации одного из реагентов приводит не только к снижению скорости растворения, но и к пассивированию поверхности золота [12–14].

На рис. 1 приведена типичная анодная поляризационная кривая пассивирующегося металла [3].

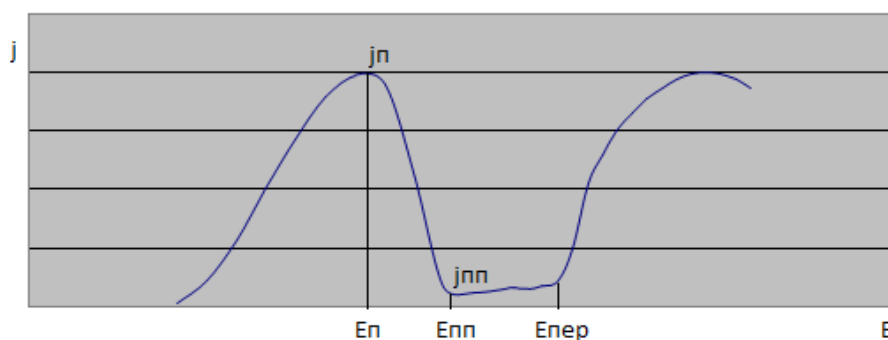


Рис. 1. Анодная поляризационная кривая для пассивирующегося металла:

$E_{п}$ – потенциал начала пассивации; $E_{пп}$ – потенциал полной пассивации; $E_{пер}$ – потенциал перепассивации; $j_{п}$ – плотность тока пассивации; $j_{пп}$ – плотность тока полной пассивации

Для золота известны поляризационные кривые растворения в смеси соляной и серной кислоты [6, 12], где потенциал пассивации $E_{п} = 0,9$ В. Потенциал перепассивации $E_{пер} = 1,4$ В, а максимальная плотность тока $J_{п} = 2$ мкА/см². Для цианистых растворов с различной концентрацией кислорода эти сведения отсутствуют.

Таким образом, необходимо провести электрохимические исследования растворения золота и определить потенциалы пассивации золота в цианистых растворах и найти зависимость растворения золота от соотношения концентрации цианид : кислород [15]. Для этого нами разработана установка и методы проведения исследований.

Материалы и методы исследований

Снятие потенциостатических поляризационных кривых осуществлялось с помощью потенциостат-гальваностата марки ПИ-50-PRO производства ООО «Элинс».

Для проведения эксперимента была изготовлена установка (электролизер). Она представляет собой емкость с крышкой, выполненной из органического стекла. Емкость имеет размеры 120×120×80 мм и объем внутреннего пространства 500 мл. В основании емкости сделано круглое углубление диаметром 30 мм для установки магнита. В крышке выполнено 5 отверстий: 3 отверстия диаметром 20 мм – для сравнительного, измерительного и платинового электродов; 1 отверстие диаметром 30 мм – для датчика измерения растворенного кислорода; 1 отверстие диаметром 10 мм – для отвода газа или установки датчика температуры. В боковой стенке сделаны отверстия для подвода газа и системы барботирования. Для отвода кислорода из раствора в ячейку подавался газ аргон, для нагнетания кислорода – сжатый воздух.

Для проведения опытов были подготовлены растворы с концентрацией NaCN 20, 40, 80, 140, 200, 260, 320, 380, 440 и 500 мг/л с рН = 10,0 – 10,5. Приготовление растворов проводилось путём разбавления крепкого раствора NaCN.

Рабочий золотой электрод представлял из себя пластиковую ПВХ-трубку диаметром 12 мм. На одном из концов закреплена пластина из золота 999 пробы диаметром 8,5 мм, площадью 0,567 см². Внутри трубки проходит соединительный проводник. Он с одной стороны припаян к золотой пластине, а с другой выведен для присоединения к измерительному прибору. Перед каждой серией опытов золотая пластина тщательно шлифовалась до блеска.

Методика исследований

В измерительную ячейку помещалось три электрода: вспомогательный (платиновый электрод марки ЭПВ-1), сравнительный электрод (хлорсеребряный электрод ЭВП-08), рабочий золотой электрод и датчик концентрации растворенного кислорода WTW FDO 925. Золотой электрод помещался на максимально возможную глубину до вращающегося магнита мешалки. Для перевода протекания реакции в кинетическую область и минимизации влияния подвода и отвода реагентов скорость оборотов устанавливалась на 650 об/мин. При данной скорости вращения обеспечивалось равномерное перемешивание без образования завихрений и воронок.

В ячейку наливался раствор 450 мл с определенной концентрацией NaCN. Исходная концентрация кислорода в растворе составляла 7,5 мг/л. С помощью потенциостата осуществлялся съем поляризационной кривой. На потенциостате выставляли область поляризации от 100 до 1000 мВ в прямом и обратном направлении при скорости развертки 3,74 мВ/с. Время снятия поляризационной кривой составляло $900/3,74 = 241$ с в прямом направлении и столько же времени в обратном направлении. Это позволило получить циклические поляризационные кривые. После снятия показаний в раствор подавался газ аргон для отвода кислорода из раствора до определенной концентрации. Повторно снималась поляризационная кривая. Затем концентрация кислорода снижалась путем пропускания аргона через раствор и снова снималась поляризационная кривая. Таким образом, концентрация кислорода ступенчато снижалась до сле-

дующих значений: 7,5; 5; 2; 1,3; 0,8; 0,4; 0,05 мг/л. При каждом изменении концентрации кислорода снималась поляризационная кривая в растворах с различной концентрацией цианида. По окончании опыта раствор сливался, ячейка промывалась. Золотой электрод зачищался от пленки окислов и тщательно шлифовался. Опыт повторялся для раствора со следующей концентрацией NaCN.

Результаты исследований и их обсуждение

Таким образом, для всех подготовленных растворов с различной концентрацией были получены серии циклических потенциодинамических поляризационных кривых [16]. На рис. 2 приведены результаты типичной насыщенной хлорсеребряного электрода сравнения (НХСЭС) в растворе 250 мг/дм³. Для количественного определения растворения золота и сравнения с результатами других исследований необходимо пересчитать на плотность тока, для этого силу тока в мкА надо разделить на площадь золотого электрода 0,567 см² и тогда получим, например, максимальную плотность тока $180/0,567 = 317,5$ мкА/см² = 3,17 А/м². Потенциал, мВ, измеряли относительно НХСЭС, который равен 226 мВ относительно водородного электрода.

Для пересчета относительно водородного электрода необходимо прибавить 226 мВ к потенциалу относительно НХСЭС. Таким образом, максимальная плотность на рис. 3 равна току $j = 180/0,567 = 317,5$ мкА/см²,

при потенциале пассивации относительно водородного электрода $E_p = 452 + 226 = 678$ мВ. Потенциал полной пассивации равен $600 + 226 = 826$ мВ. Потенциал перепассивации $E_{pp} = 998 + 226 = 1204$ мВ.

Согласно литературным данным пассивация наступает в результате образования окисной пленки Au(OH)₃. При достижении потенциала E_{pp} снималась обратная кривая «ток-потенциал» и получили циклограммы при различной концентрации кислорода. Такие циклограммы характерны и для других металлов [8]. Они свидетельствуют о том, что, при снижении потенциала не происходит депассивация окисной пленки, а при достижении 400 мВ сменяется полярность тока (электрод становится катодом и протекает реакция восстановления Au(OH)₃ при потенциале 275 мВ, затем катодный ток снижается до нуля и при потенциале 225 мВ полярность электрода меняется, протекает катодный ток и устанавливается потенциал 100 мВ соответствующий начальному потенциалу чистого золота, при этом сила тока снижается. Следующая поляризационная кривая снималась при изменении концентрации кислорода путем продувки аргоном без зачистки электрода. Это свидетельствует о том, что при возвращении потенциала электрода к исходному окисная пленка на электроде растворялась сама другую концентрацию кислорода путем продувки аргоном и снимали другую циклическую поляризационную кривую при скорости развертки 3,74 мВ/с.

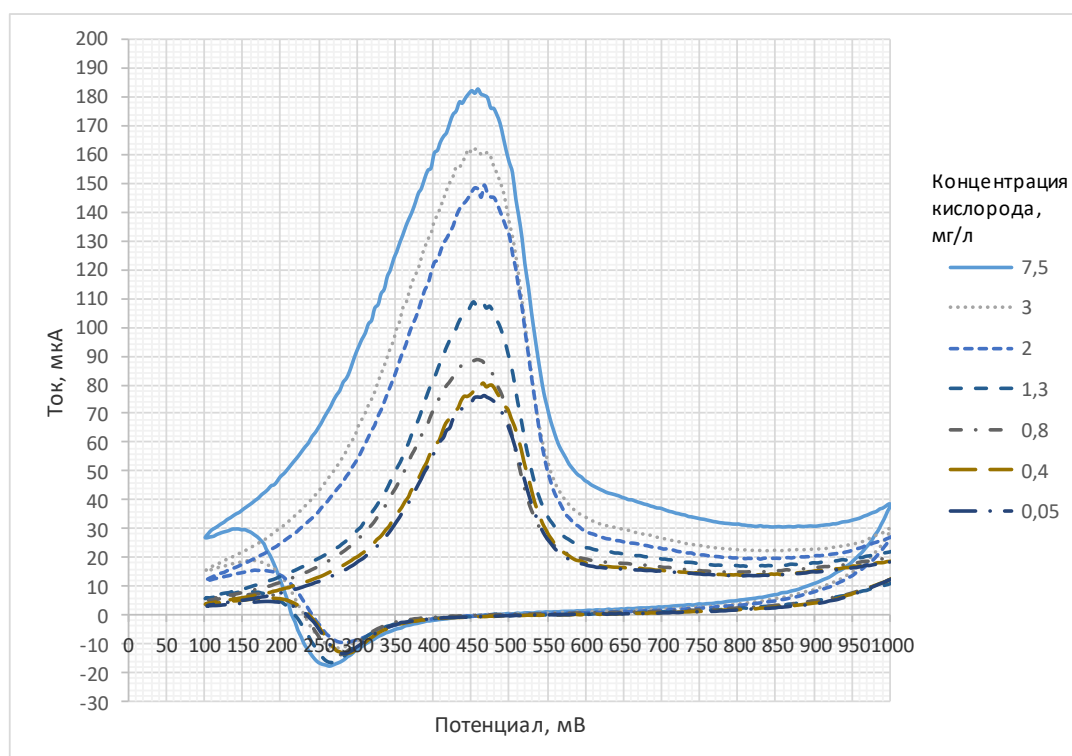


Рис. 2. Циклические потенциодинамические поляризационные кривые при скорости развертки потенциала 3,74 мВ/с, концентрации NaCN 200 мг/дм³ и концентрации кислорода 0,05–7,5 мг/дм³

Известна поляризационная кривая для золота в растворе смеси соляной и серной кислот, на которой также отмечается пассивация золота [8, 12]. Для золота известны поляризационные кривые растворения в смеси соляной и серной кислоты, где потенциал пассивации $E_{\text{п}} = 0,9$ В. Потенциал перепассивации $E_{\text{пер}} = 1,4$ В, а максимальная плотность тока $J_{\text{п}} = 2$ мкА/см². Потенциалы пассивации и перепассивации практически совпадают с растворением золота в цианистых растворах, а плотность тока в кислотах на порядок ниже $317/2 = 158$ раз. Это свидетельствует о том, что растворение золота в цианистых растворах в 158 раз выше, чем в хлоридно-серноокислых растворах. Электрохимические исследования можно использовать для определения кинетики растворения золота при определении активности используемого реагента на золото извлекательных фабриках. Обычно эти исследования проводятся гравиметрическим методом или методом вращающегося кольца, которые учитывают диффузионный контроль растворения металлов [3, 17].

Имеются сведения [18], что электрохимическими методами определяемая скорость растворения металлов значительно выше, чем гравиметрическим. Возможно, это свидетельствует о том, что при снятии поляризационных кривых при высоких скоростях развёртки 3,74 мВ/с мы определяем кинетическую скорость растворения золота, а скорость диффузии здесь

отсутствует, что следует учитывать при рассмотрении механизма растворения золота. Аналогичные результаты получены нами при исследовании ингибиторов коррозии [19]. Скорость коррозии металлов, определяемая весовым методом (г/м²ч) значительно меньше электрохимической (А/м²).

На рис. 3, 4 приведены зависимости тока и потенциала от концентрации цианида, которые получены в результате снятия поляризационных кривых при различных концентрациях цианида. Из рис. 3 можно определить, что увеличение концентрации NaCN выше 320 мг/дм³ при концентрации кислорода 7,5 мг/дм³ не приводит к росту тока, а следовательно, скорости растворения. Таким образом, оптимальным соотношением концентрации цианида и кислорода будет 320 и 7,5 мг/дм³. При этом снижение концентрации кислорода вплоть до 3 мг/дм³ не сильно сказывается на скорости растворения.

Начиная с концентрации O₂ 2 мг/дм³ наблюдаются существенные снижения тока, причём чем выше концентрация NaCN, тем выше снижение. Снижение доли кислорода в растворе до 2 мг/л и ниже и дальнейшее восстановление кислорода до 7,5 мг/дм³ не приводит к восстановлению скорости растворения (тока), что говорит об образовании нерастворимых веществ на поверхности золота – пассивирующих пленок.

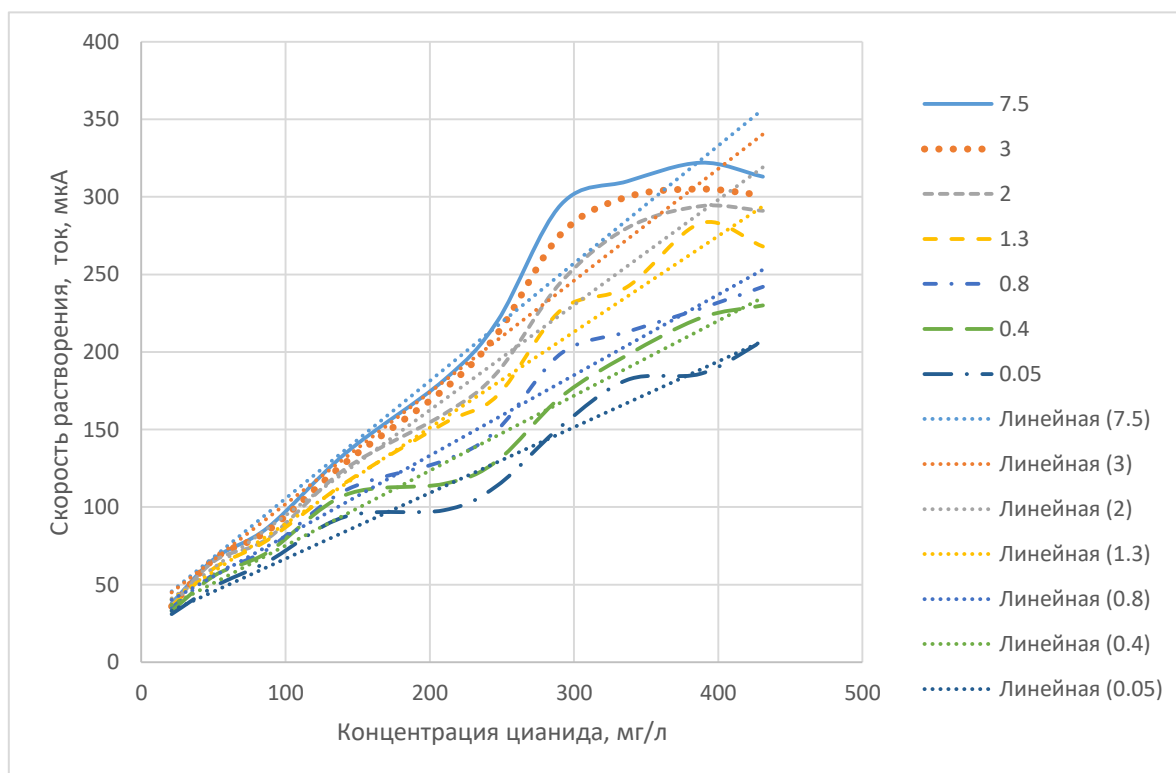


Рис. 3. График зависимости скорости растворения (тока) от концентрации NaCN при различных концентрациях кислорода (мг/ дм³) при потенциале пассивации

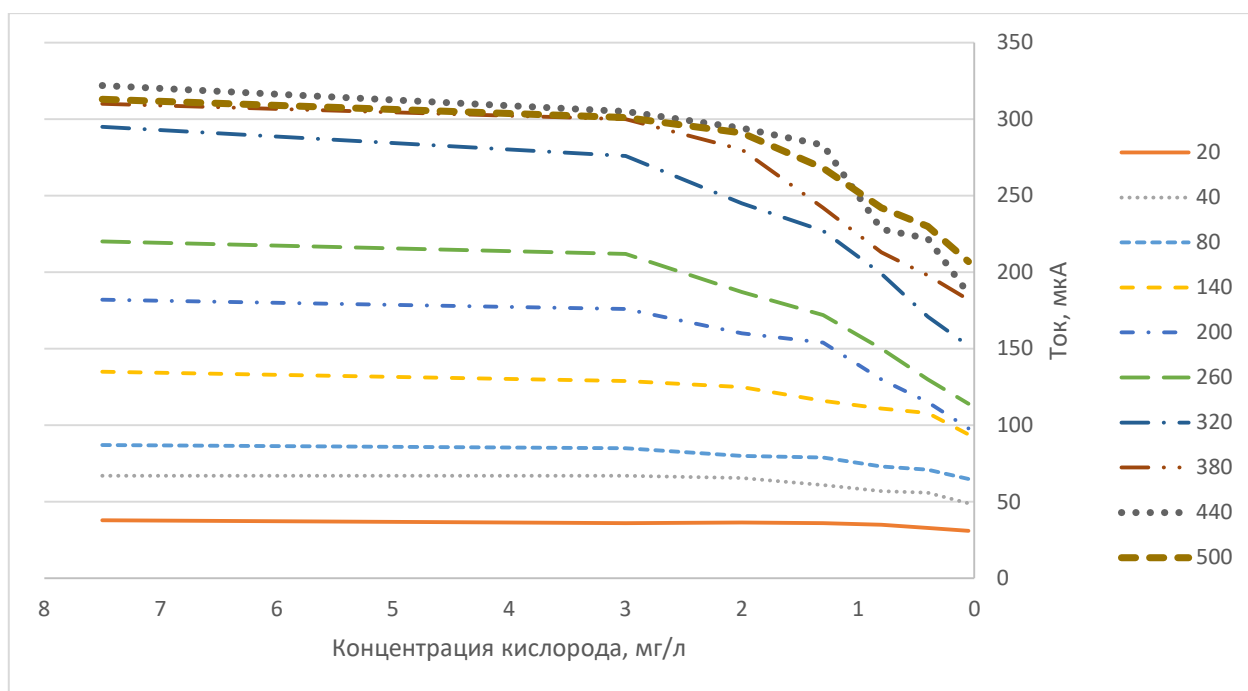


Рис. 4. График зависимости тока (при потенциале пассивации) от концентрации кислорода при различных концентрациях NaCN (мг/дм³)

Растворы с концентрацией цианида от 140 мг/л и ниже менее подвержены влиянию низкого содержания кислорода. В данном случае можно говорить о безопасной концентрации цианида в 100–120 мг/л, которая не приведет к образованию пассивирующих пленок, даже при низких концентрациях кислорода. Рассматривая потенциалы пассивации на рис. 4 видно, что он возрастает с ростом концентрации цианида, при этом сохраняется высокий ток растворения (см. рис. 3). Но при снижении концентрации кислорода потенциал пассивации снижается и при одинаковой концентрации цианида золото начинает пассивироваться. Что и сказывается на скорости растворения, её резком снижении (см. рис. 4). До концентрации цианида 320 мг/л потенциал пассивации не растет, а остается практически на одном уровне. Снижение концентрации кислорода на потенциал пассивации практически не влияет, а значит, скорость образования пассивирующих пленок не изменяется. Пассивирующая пленка $Au(OH)_3$ может растворяться в щелочных растворах при pH = 12 с образованием $HAuO_2^-$, а в кислых растворах образуется Au^{+3} . С увеличением потенциала более 3 В возможно образование пассивирующей пленки AuO_2 (диаграмма Пурбе для системы золото-вода) [20]. Таким образом, проводя электрохимические исследования с образованием пассивирующих пленок, целесообразно на поверхности золота снять дифрактограммы, чтобы определить фазовый состав пленки, что позволит более глубоко понять механизм выщелачивания золота.

Электрохимические исследования широко используются при поиске ингибиторов коррозии [3]. И

поэтому их можно рекомендовать для исследований по выщелачиванию золота с учетом имеющегося опыта контроля скорости коррозии с применением ингибиторов коррозии [3, 19]. Поэтому предлагаем для этого использовать портативный коррозиметр, например «Эксперт 004» компании «ЭкониКС-Эксперт».

Прибор автоматически определяет скорость коррозии в мм/год. В настоящее время такие коррозиметры используются для экспресс-оценки эффективной защиты оборудования из стали на АНХК при дозировании ингибитора коррозии.

Заключение

Проведены электрохимические исследования растворения золота в цианистых растворах при различной концентрации кислорода путем снятия циклических потенциодинамических кривых на потенциостате. Полученные поляризационные зависимости на рис. 3, 4 позволяют определить потенциалы пассивации и ток пассивации. Известно, что ток пассивации, пересчитанный на плотность тока согласно закону Фарадея, характеризует количество растворенного золота, это описывает кинетику выщелачивания, что позволяет контролировать и оптимизировать процесс выщелачивания на золотодобывающих предприятиях. Для этого предлагается снимать поляризационные кривые на отобранной пробе раствора, в котором идет выщелачивание золота, и определяется, сколько необходимо добавить цианида и кислорода. Снятие поляризационных кривых на золотоизвлекательных фабриках достаточно сложная задача, поэтому оперативно управлять этим процессом проблематично. Для

этого предлагается использовать портативный коррозиметр «Эксперт 004» компании «Эконикс-Эксперт».

Список литературы

- Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Металлургия, 1975. 224 с.
- Баранов А.Н. Коррозия и защита металлов : учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 178 с.
- Алексеев А.А., Баранов А.Н. Коррозионные исследования поведения золота в цианистых растворах // Сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск, 2017. С. 27-29.
- Abdelaaziz Azizi, Catalin Florin Petre, Caroline Olsen, Faïçal Larachi. Electrochemical behavior of gold cyanidation in the presence of a sulfide-rich industrial ore versus its major constitutive sulfide minerals // Hydrometallurgy, 2010, vol. 101, pp. 108–119.
- Филиппова Е.В. Применение ионообменной электросорбции для извлечения коллоидного золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. № 1. С. 15-19.
- Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.
- Лобова П.А., Баранов А.Н. Коррозионный мониторинг как средство управления целостностью трубопроводов в нефтехимической промышленности // Системы. Методы и технологии. №1. 2014. С 103-106.
- Особенности цианистого выщелачивания золота в цикле измельчения / В.В. Елшин, А.А. Колодин, А.Е. Овсюков и др. // Металлург. 2013. №7. С. 86-90.
- Щадов И.М., Филиппова Е.В. Перспективы применения новой экологозащитной технологии при переработке золотосодержащих техногенных образований // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 12. С. 24-27.
- Филиппова Е.В. Разработка и апробация новой экологозащитной геотехнологии на золоторудном предприятии Забайкальского края // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 7. С. 172–182.
- Филиппова Е.В. Новая комплексная технология отработки техногенных отходов, позволяющая повысить экологическую безопасность // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 192-197.
- Управление процессом и прогнозирование выщелачивания сырья с применение гидроакустического излучателя / Л.С. Стрижко, Ш. Бобозода, А.О. Новаковская, Ш.К. Бобоев // Системы. Методы. Технологии. 2014. №4(24). С. 115-122.
- Дорошков В.И., Баранов А.Н. Тиосульфатное выщелачивание золота // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск, 2017. С. 27–29.
- Лавров А.Ю. Повышение эффективности освоения рудных месторождений на основе использования инновационных геотехнологий с фотоэлектрохимической активацией компонентов технологических систем // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 2 (92). С. 31-37.
- Sherryl Robertson, Matthew Jeffrey, Hongguang Zhang, and Elizabeth Ho. An Introductory Electrochemical Approach to Studying Hydrometallurgical Reactions // Metallurgical and materials transactions B. 2005, vol. 36B, pp. 313 – 325.
- Frantkenhal R. P., Thompson L. E.– J. Elektrochem. Soc. 1976. vol. 123, №66, p. 799.
- Исследования коррозионной стойкости легированного поверхностного слоя составом CRxCu после плазменного напыления / В.Ч. Нгуен, Н.А. Астафьева, А.Е. Балановский, А.Н. Баранов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т.17. №5 (197). С. 215-220.
- Рыбалка К.В., Бекетова А.Д., Давыдов А.Д. Оценка скорости коррозии стали AISI 1016 анализом поляризационных кривых и методом измерения омического сопротивления // Электрохимия. 2021. Т.57. №1. С. 19–24.
- Баранов А.Н. Теоретические основы коррозии и антикоррозионная защита технологического оборудования : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. 214 с.
- Справочник химика. В 7 т. Т. 3 / под общ. ред. Б.П. Никольского. М.: Химия, 1964. 1004 с.

Сведения об авторах

Баранов Анатолий Никитич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: a_baraniow@mail.ru. ORCID: 0000-0001-5336-6522

Ёлшин Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: dean_zvf@istu.edu.

Колодин Алексей Александрович – старший преподаватель кафедры автоматизации и управления, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: kolodin@istu.edu. ORCID: 0000-0003-4451-4014.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ELECTROCHEMICAL STUDIES OF GOLD DISSOLUTION IN CYANIDE SOLUTIONS AT VARIOUS OXYGEN CONCENTRATIONS

Baranov Anatoly N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Non-ferrous Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: a_baraniow@mail.ru.

Elshin Viktor V. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: dean_zvf@istu.edu.

Kolodin Alexei A. – senior lecturer of the Department Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: kolodin@istu.edu.

Abstract. The article is devoted to one of the urgent tasks for the gold mining industry. The dissolution of gold in cyanide solutions proceeds by an electrochemical mechanism, in which the ionization of gold atoms and the reduction of oxygen to hydrogen peroxide occurs not in one act, but as a result of two conjugate reactions. Anodic gold oxidation reaction and cathodic oxygen reduction reaction. In this regard, electrochemical studies are used to study the processes of gold dissolution by removing potentiodynamic polarization curves using modern potentiostats that allow to remove cyclic polarization curves at different polarization rates. In the literature there is information about electrochemical studies of gold dissolution in a mixture of sulfuric and hydrochloric acids, where it is shown that during anodic polarization of gold there is a zone of active dissolution of gold and a region of formation of a passive state, which leads to a decrease in the current strength, and hence the dissolution of gold when the passivation potential is reached, then complete passivation and passivation. Currently, this information is not available for the dissolution of gold in cyanide solutions at different oxygen concentrations. The conducted studies made it possible for the first time to determine the dependences of current changes and passivation potential on the concentration of cyanide and oxygen and to construct triple diagrams of current changes on the concentration of cyanide and oxygen and potential on the concentration of cyanide and oxygen. The obtained dependences make it possible to optimize the process of gold dissolution at gold recovery factories.

Keywords: gold, cyanidation, electrochemical studies, potentiostat, passivation, current, potential.

Ссылка на статью:

Баранов А.Н., Ёлшин В.В., Колодин А.А. Электрохимические исследования растворения золота в цианистых растворах при различных концентрациях кислорода // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 11-17.
Baranov A.N., Elshin V.V., Kolodin A.A. Electrochemical studies of gold dissolution in cyanide solutions at various oxygen concentrations. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 11–17.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.742.487

Фирстов А.П.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕСЧАНО-МАСЛЯНЫХ СМЕСЕЙ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Аннотация. Публикации по применению песчано-масляных смесей относятся к сороковым годам XX века. Наличие большого количества растительных масел как связующего компонента в стержневых смесях вносит некое замешательство при выборе их для применения в производстве. В литейном производстве в большей степени применяют подсолнечное, льняное масла и сопутствующие продукты переработки различных растительных масел.

Масляные связующие позволяют получать стержни высокого качества с высокой газопроницаемостью, пластичностью, выбиваемостью, они негигроскопичны и могут храниться длительное время, не меняя своих характеристик. Газотворная способность стержней невелика, так как количество связующего относительно мало и колеблется в пределах 1,5–3%. Их доступность, распространенность и дешевизна позволяют еще раз обратить на них внимание.

При этом с перечисленными достоинствами песчано-масляные смеси имеют и недостатки: низкая прочность в сыром состоянии, тем самым вводится необходимость применения в технологии получения стержней драйверов; обязательная сушка этих стержней, которая идет при температуре 200–230°C с продолжительностью 1–4 ч, что увеличивает технологическое время изготовления стержня; соблюдение точной технологии сушки стержней (при более низкой температуре длительность сушки увеличивается, а при более высокой идет обугливание масла, приводящее к потере необходимой прочности).

В настоящее время опять возрастает интерес к растительным жирам как к экологически чистым связующим для литейного производства.

Целью данной работы является возрождение незаслуженно забытых песчано-масляных связующих с возможностью процентного снижения их в стержневой смеси, что приведет к упразднению или уменьшению перечисленных выше недостатков.

Ключевые слова: песчано-масляная смесь, кипящий слой, скорость псевдоожижения, растительное масло, прочность

Введение

Натуральные растительные масла применяются в литейном производстве в качестве связующего материала довольно давно и являются наиболее качественными по отношению к другим связующим [2–6].

В настоящее время опять возрастает интерес к растительным жирам как к экологически чистым связующим для литейного производства [1, 7–10].

Одна из причин возросшего роста – это возможность снижения количества связующего в составе стержневой смеси без потерь основных свойств связующего. Для снижения количества связующего (подсолнечное масло) нужно создать ситуацию, в которой будут поставлены условия всестороннего контакта компонентов.

Идея активного перемешивания веществ была взята при сушке песка в аппаратах кипящего слоя [8].

Экспериментальная часть

В лаборатории литейного производства (НТИ (филиала) УрФУ) была разработана экспериментальная установка для приготовления стержневой смеси.

Установка (рис. 1) состоит из корпуса 1, системы подачи воздуха, системы подачи связующего. Система подачи связующего состоит из баллона для связующего, насоса высокого давления, системы трубопро-

водов, системы распыления связующего. Система подачи воздуха состоит из компрессора 2, который соединен трубопроводом с газораспределительной решеткой 4, через которую беспрепятственно проходит воздух. Расход воздуха осуществляется с помощью регулятора расхода воздуха 3.

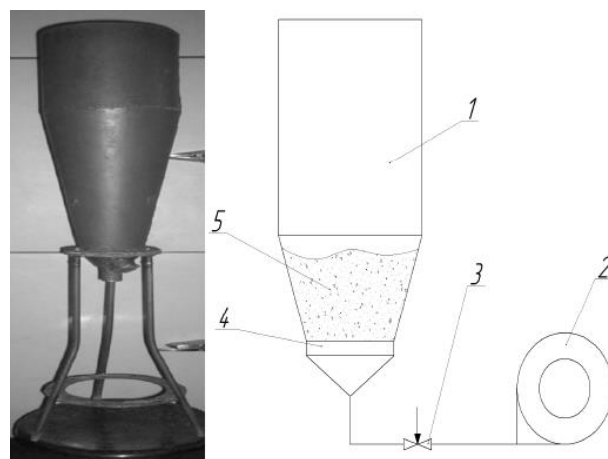


Рис. 1. Установка (а) и схема рабочей емкости (б) для приготовления смеси в кипящем слое:
1 – корпус; 2 – компрессор; 3 – регулятор расхода воздуха; 4 – газораспределительная решетка; 5 – песок

Приготовление смеси происходит в резервуаре 1. Песок 5 помещается в резервуар через загрузочное

окно, связующее заливается в баллон. Компрессор 2 создает давление в пустотелом коробе и смесь в резервуаре 1 находится во взвешенном состоянии, в это же время из системы распыления подается связующее. Загрузка установки при лабораторных испытаниях составляет 0,3–1,5 кг.

Для удобства и большей точности исследования возможностей получения смесей методом осаждения связующего в кипящем слое в баллон заливалося определенное количество связующего. Регулировалась скорость воздуха во время подачи связующего и время кипения смеси после подачи связующего.

Теория, материалы и методы исследования

Сущность процесса перемешивания состоит в том, чтобы из песка и связующего получить однородную смесь, все зерна песка которой были бы покрыты тонким, равномерным слоем связующего. Условия активного перемешивания создают аппараты кипящего слоя.

Чтобы повысить процесс обволакивания песчинок с минимальным количеством связующего, необходимо обеспечить усиленное омывание высушиваемого материала потоком воздуха.

Превращение слоя песка под влиянием восходящего воздуха, когда твердые частицы переходят во взвешенное состояние и напоминают по свойствам жидкость [11]. Процесс псевдооживления происходит при движении газа через слой сыпучего материала. При этом частицы становятся подвижными, хорошо перемешиваются в пределах объема загрузочного устройства, тем самым выравнивая поле концентраций и температур.

Различают три состояния слоя сыпучего материала [12, 13]. При небольшой скорости движения газа слой твердых частиц остается неподвижным (рис. 2, линия 1). При таком режиме идет процесс фильтрации. При большой скорости наблюдается режим уноса твердой фазы (рис. 2, линия 3). В этом режиме осуществляют процессы пневмо- и гидротранспорта.

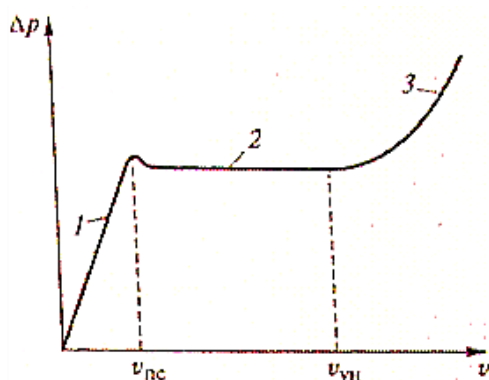


Рис. 2. Зависимость перепада давлений в слое сыпучего материала от скорости продувки газа при различных состояниях этого материала [12]: 1 – неподвижный слой; 2 – псевдооживление; 3 – унос твердых частиц; $v_{нс}$ – скорость начала псевдооживления; $v_{ун}$ – скорость уноса

В определенном диапазоне значений скорости воздуха существует третье состояние сыпучего слоя (песка) – так называемое псевдооживленное (рис. 2, линия 2). В этом режиме слой уже перестает быть неподвижным, но унос еще не наступает. Частицы уже не соприкасаются друг с другом, а свободно витают в воздухе, но из аппарата не уносятся, такую зону называют «зоной кипящего слоя».

Таким образом, стоит вопрос по определению оптимальных свойств смесей, полученных методом осаждения.

Результаты исследования

Для определения критической скорости оживления пользуются расчетным методом [14].

Расчет критических скоростей проводят по формуле

$$\omega_{кр}^p = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d_3}, \quad (1)$$

где $Re_{кр}$ – число Рейнольдса в момент начала псевдооживления и начала уноса;
 ν – кинематическая вязкость, m^2/c ;
 d_3 – эквивалентный диаметр частиц, м.

Число Рейнольдса определяют по формуле Тодеса, с привлечением критерия Архимеда и проницаемости слоя.

По формуле (2) рассчитывается параллельно число Рейнольдса [15] с последующим нахождением скорости начала псевдооживления и начала уноса:

$$Re = 0,153 \cdot Ar^{0,714}. \quad (2)$$

Расчет позволил определить критические скорости начала псевдооживления и начала уноса, которые равны $\omega_{кр,псев} = 0,1 м/с$ и $\omega_{кр,унос} = 0,4 м/с$ соответственно.

Таким образом, для получения кипящего слоя нужно придерживаться скорости подачи в интервале 0,1–0,4 м/с, но для получения заранее положительного результата предлагается на изготовленной установке получать песчано-масляную смесь со скоростью в пределах 0,2–0,35 м/с.

Интервал вычислений достаточно большой, и теперь встает вопрос определения оптимального значения скорости воздушного потока. Для проверки этого предположения готовились смеси при четырех разных режимах оживления, исследование проводилось на смесях с содержанием связующего 0,5 и 1% с временем кипения 5 с. Из готовых смесей отбиралось десять проб, и из полученных данных высчитывали коэффициент однородности (ГОСТ 23409.3–78, ГОСТ 25470–82). По результатам основных описательных статистик находили оптимальную скорость кипящего слоя применительно к данной установке. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Как мы видим из табл. 1 и 2, при скорости ожигения $\omega = 0,3$ м/с коэффициент однородности имеет наибольшее значение с минимальными статистическими значениями, это говорит о том, что при данной скорости ожигения существуют оптимальные условия для качественного распределения связующего.

Из исследуемых смесей были изготовлены образцы для проверки их на прочность при разрыве в сухом состоянии. Полученные данные сведены в табл. 3.

Если сравнить данные по коэффициенту однородности из табл. 1 и 2 с данными по прочности из табл. 3, то можно заметить, что прочность на разрыв в сухом состоянии находится в прямой зависимости от равномерности распределения связующего, т.е. с увеличением однородности распределения увеличивается и прочность.

Диаграмма на рис. 3 наглядно показывает, что максимальная прочность наблюдается при скорости потока воздуха, равной 0,3 м/с.

Сухая прочность получена достаточно высокая при малых концентрациях связующего и может являться конкурентоспособной с песчано-масляными смесями на основе льняного масла, даже при концен-

трации 1%. При пониженной скорости потока воздуха (<0,3 м/с) наблюдается пониженная сухая прочность, вероятнее всего снижение обосновано неполным покрытием зерен песка связующим. При высокой скорости потока воздуха (> 0,3 м/с) начинается унос песчинок.

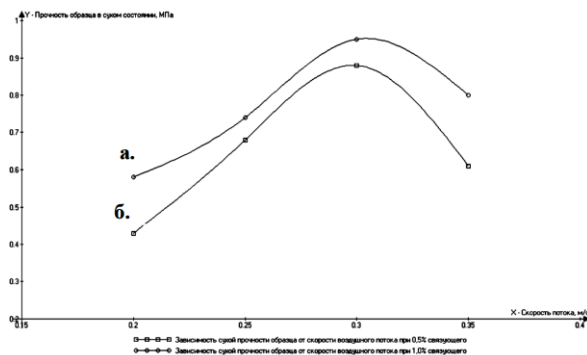


Рис. 3. Зависимость сухой прочности образца от скорости воздушного потока при содержании связующего в смеси 0,5 % (а) и 1,0 % (б)

Таблица 1

Однородность распределения для смесей с 0,5 % связующего

Скорость, м/с	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент однородности
0,2	76,7	8,756	30,193	69,8
0,25	106,7	10,328	57,378	62,6
0,3	28,0	5,325	28,748	71,25
0,35	30,0	5,477	32,219	67,8

Таблица 2

Однородность распределения для смесей с 1 % связующего

Скорость, м/с	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент однородности
0,2	498,9	22,336	45,583	54,42
0,25	288,9	16,997	28,328	71,6
0,3	40,0	6,325	16,644	83,37
0,35	130,0	11,402	21,513	78,48

Таблица 3

Прочность на разрыв в сухом состоянии для смесей с различным содержанием связующего при заданных режимах кипящего слоя

Содержание связующего, %	Скорость, м/с	Прочность на разрыв в сухом состоянии, МПа
0,5	0,2	0,43
0,5	0,25	0,68
0,5	0,3	0,88
0,5	0,35	0,61
1	0,2	0,64
1	0,25	0,7
1	0,3	0,95
1	0,35	0,72

Для того чтобы исследовать, как влияет продолжительность кипячения на однородность распределения связующего по зернам песка, готовилась смесь с подсолнечным связующим, равным 1%. Исследование проводилось для режима с наилучшими показателями распределения связующего $\omega = 0,3$ м/с, для проверки были выбраны интервалы времени в 5, 10 и 15 с. Полученные результаты представлены в табл. 4.

После обработки полученных данных получается, что однородность распределения связующего остается практически неизменной, но, как видно, прочность на разрыв в сухом состоянии падает. Это происходит потому, что из-за малой толщины пленок подсолнечного масла, которое выступает в качестве связующего, реакция полимеризации происходит быстрее. Увеличивая зону контакта связующего с кислородом при псевдоожигении получаем: чем больше время этого контакта, тем быстрее происходит полимеризация и снижается прочность смеси, так как подсолнечное масло теряет свою связующую способность. Встает задача связать полученные данные с нахождением зависимости прочности на разрыв в сухом состоянии относительно раз-

личного времени кипячения смеси в установке с различным содержанием связующего в песчано-масляной смеси. Данные по этим расчетам представлены в табл. 5.

С помощью компьютерной программы STATISTICA v.10.0.RU оценивали параметры множественной регрессии, где зависимой переменной являлась прочность на разрыв в сухом состоянии (МПа), а независимыми переменными были содержание связующего в смеси (%) и время кипячения, с. Полученные данные приведены в табл. 6.

При аналитическом анализе получено уравнение, с помощью которого можно предсказывать предел прочности на растяжение в сухом состоянии при коэффициенте регрессии $R = 0,9$:

$$y = 1,014 - 0,047x_1 - 0,018x_2. \quad (3)$$

В ходе исследования наблюдалось, что с увеличением содержания связующего ($> 1\%$), вводимого в смесь, его распределение по объему смеси ухудшалось (шло образование комков). При содержании связующего 1,5 % смесь прекращала кипеть.

Таблица 4

Влияние дополнительного кипячения на свойства смеси

Время дополнительного перемешивания, с	Коэффициент однородности	Прочность на разрыв в сухом состоянии, МПа
5	83,87	0,95
10	84,2	0,81
15	82,75	0,76

Таблица 5

Зависимость прочности смеси на разрыв в сухом состоянии от содержания связующего при заданных режимах кипячения

Содержание связующего в смеси, %	Время кипячения, с	Прочность на разрыв в сухом состоянии, МПа
0,5	5	0,88
0,5	10	0,77
0,5	15	0,72
1	5	0,95
1	10	0,81
1	15	0,73
1,5	5	0,84
1,5	10	0,71
1,5	15	0,68

Таблица 6

Итоги множественной регрессии

Итоги регрессии для зависимой переменной: Прочность на разрыв в сухом состоянии, МПа (Таблица данных 1) $R = ,90054419$ $R^2 = ,81097985$ Скоррект. $R^2 = ,74797313$ $F(2,6) = 12,871$ p						
Связующий член	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t(6)	p-знач.
	–	–	1,014444	0,053947	1,8044	0,000001
Содержание связующего в смеси, %	–0,226003	0,177492	–0,046667	0,036650	–1,2733	0,250012
Время кипячения, с	–0,871724	0,177492	–0,018000	0,003665	–1,9113	0,002680

По данным табл. 5 видно, что при различном содержании связующего в смеси ее прочность на разрыв в сухом состоянии существенно не изменяется, хотя наблюдается его спад. Это говорит о том, что при меньшем содержании связующего его распределение по объему смеси лучше, чем при большем содержании. В связи с этим можно говорить о том, что за счет осаждения связующего на зерна песка, что дает его более качественное распределение, можно получить необходимую прочность смеси с меньшим содержанием связующего, чем при приготовлении смеси традиционными методами перемешивания (механическими), которая равна 1,5%, но все же при содержании связующего ниже 1% закономерность к понижению прочности существует.

Заключение

Таким образом, оптимальные характеристики при получении качественной песчано-масляной смеси в кипящем слое будут следующие:

– песчано-масляная смесь в кипящем слое должна иметь скорость потока воздуха, равную $0,3 \pm 0,05$ м/с, с временем перемешивания (кипения), равным 5–6 с, с максимальной прочностью;

– песчано-масляная смесь в кипящем слое не должна превышать 1% связующего, с однородностью песка не ниже 80%, для получения заведомо положительного эффекта.

Список источников

1. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси с жидким стеклом. М.: Машиностроение, 1965. 332 с.
2. Евангулов М.Г. Формовочное дело. Для литейщиков, формовщиков и учеников литейного дела. М.; Л.: Огиз – Гос. науч.-техн. изд-во, 1931. 238 с.

Сведения об авторах

Фирстов Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургических технологий, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского Федерального Университета, г. Нижний Тагил, Россия. E-mail: first55@mail.ru

3. Берг П.П. Формовочные материалы и смеси. Для мастеров чугунолитейных цехов. М.; Свердловск: Машгиз, 1944. 156 с.
4. Воронин Г.Н. Литейное дело. Т. 1. Л.; М.: Госмашметиздат, тип. «Красный печатник», 1932. 140 с.
5. Аксенов П.Н. Формовочное дело. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во и 1-я тип. Машгиза, 1949. 250 с.
6. Куманин И.Б., Лясс А.М. Связующие материалы для стержней. М.: Оборонгиз, 1949. 272 с.
7. Гуляев Б.Б., Корнюшкин О.А., Кузин А.В. Формовочные процессы. Л.: Машиностроение, Лен. отд., 1987. 264 с.
8. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
9. Зюзько И.В. Технологические свойства стержневых смесей на основе органических связующих типа 4ГУ // Омский научный вестник. 2009. 1(77). С. 18–20.
10. Гуляев Б.Б., Кривицкий В.С. Технологические свойства формовочных смесей / под. ред. Б.Б. Гуляева // Труды XII совещания по теории литейных процессов. М.: Наука, 1968. С. 7–15.
11. Новый справочник химика и технолога : справ. издание / ред. А. В. Москвин. СПб.: Профессионал, 2006. 1464 с.
12. Гельперин Н. И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. М.: Химия, 1967. 664 с.
13. Бувевич Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. М.: Химия, 1984. 133 с.
14. Мухленов И. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя. Л.: Химия, 1986. 352 с.
15. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Стройиздат, 1954. 298 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDIES OF SAND-OIL MIXTURES IN THE FLUIDIZED BED

Firstov Alexander P. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies, Nizhny Tagil Institute of Technology (Branch) Ural Federal University, Nizhny Tagil, Russia. E-mail: first55@mail.ru.

Abstract. Publications on the use of sand-oil mixtures date back to the forties of the XX century. The presence of a large amount of vegetable oils, as a binding component in core mixtures, introduces some confusion when choosing them for use in production. Sunflower, linseed oil and related products of processing of various vegetable oils are used to a greater extent in the foundry.

Oil binders make it possible to obtain high-quality rods with high gas permeability, plasticity, knockability, are non-hygroscopic and can be stored for a long time without changing their characteristics. The gas-producing capacity of the rods is small, because the amount of binder is relatively small and ranges from 1,5 to 3%. Their availability, prevalence and cheapness allows you to pay attention to them once again.

At the same time, with the listed advantages of sand-oil mixtures, they have their drawbacks: low strength in the raw state, thereby introducing the need for the use of driers in the technology of obtaining rods; mandatory drying of these rods, which takes place at a temperature of 200÷230°C with a duration of 1÷4 hours, which increases the technological time for the manufacture of the rod; compliance with the exact technology drying rods: at a lower temperature, the drying time increases, and at a higher temperature, the oil is charred, leading to the loss of the necessary strength.

Currently, interest in vegetable fats as environmentally friendly binders for foundry production is growing again.

The purpose of this work is to revive undeservedly forgotten sand-oil binders with the possibility of a percentage reduction in their core mixture, and their percentage reduction in the composition of mixtures will lead to the abolition or reduction of the above disadvantages.

Keywords: sand-oil mixture, fluidized bed, fluidization rate, vegetable oil, strength.

Ссылка на статью:

Фирстов А.П. Исследования песчано-масляных смесей в кипящем слое // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 18-23.

Firstov A.P. Studies of sand-oil mixtures in the fluidized bed. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 18-23.

УДК 669.131.2:669.046.516.4

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Аннотация. Возрастающие требования к качеству, повышение механических и эксплуатационных свойств изделий в металлургии и машиностроении требуют разработки новых эффективных способов управления процессами структурообразования при получении изделий, так как именно структура материала определяет его свойства. Конкурентоспособность изделий из чугунов на рынке можно улучшить путем повышения механических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время разработано большое количество технологических способов, обеспечивающих улучшение свойств железистоуглеродистых сплавов, в большинстве своем они направлены на совершенствование структуры материалов.

В статье рассмотрены различные методы воздействия: микролегирование, модифицирование, рафинирование и скорость кристаллизации на структурно-фазовый состав и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов. Кроме того, описана зависимость специальных свойств чугунов от структурно-фазового состава. Представлено влияние химических композиций на структуру и свойства белых чугунов. Описано совместное влияние хрома, марганца, никеля, и титана на специальные свойства чугунов, таких как жароизносостойкость и износостойкость. Приведено процентное содержание легирующих элементов в сплаве для наилучшего достижения специальных свойств. Приведены факторы, влияющие на жароизносостойкость и абразивную износостойкость комплексно-легированных белых чугунов.

Подтверждена актуальность применения бора в качестве микролегирующей и модифицирующей добавки для повышения свойств комплексно-легированных белых чугунов, выявлены концентрационные интервалы содержания бора и его влияние на структуру и свойства этих чугунов. Дополнительная обработка базового чугуна бором существенно улучшает износостойкость и повышает твердость металла. Микролегирование чугуна бором повышает его технологические и эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: микролегирование, модифицирование, рафинирование, кристаллизация, структура, износостойкость, комплексно-легированный белый чугун, белый жароизносостойкий чугун, окислительная стойкость, ростоустойчивость

Комплексно-легированные белые чугуны используются для изделий, работающих в условиях повышенного износа и высоких температур. Они обладают высокими механическими свойствами в сочетании со стойкостью к окислению при повышенных температурах и абразивному износу. Композиционное и дисперсионное упрочнение чугуна, которое гарантирует данные свойства, достигается благодаря стабильной микроструктуре, которая состоит из вязкой металлической основы и высокотвердых первичных, эвтектических и вторичных карбидов.

Жаростойкость чугуна оценивается по двум свойствам: стойкости к образованию окалины и ростоустойчивости. Такие свойства чугуна зависят от следующих факторов: рабочей среды отливки, температуры нагрева во время работы, вида нагрева (непрерывный или периодический), скорости нагрева и охлаждения. Также на жаростойкие свойства отливок влияет характер металлической основы (металлической массы) – ее окисляемость, степень однородности, склонность к образованию внутренних напряжений, плотность и газонасыщенность. Оценка стойкости легированного чугуна к высокотемпературной газовой коррозии сводится к определению толщины защитного слоя, образующегося на поверхности металла в результате реакции металла с компонентами агрессивной среды [1, с. 176-177].

При циклических механических и термических нагрузках долговечность отливок нельзя оценивать только по окислительной и ростоустойчивости, так как не только эти показатели определяют срок службы

отливок. Температурные колебания изменяют объемные размеры отливок, а окислительные процессы постепенно влияют на прочностные свойства чугуна. Долговечность отливок, устойчивых к образованию окалины, связана с жаростойкими характеристиками чугуна [1].

Условия эксплуатации оборудования в горнодобывающей, перерабатывающей и металлургической промышленности характеризуются высокими рабочими температурами и износом. Потеря массы в процессе эксплуатации и окисление – первостепенные причины выхода из строя таких изделий. Сложногеометрические узлы и детали традиционно производятся из белых чугунов, что обусловлено не только экономической целесообразностью, но и, как правило, единственно возможным способом, включающим в себя заливку в формы. Специзделия, которые работают в сложных условиях, должны обладать повышенными особыми характеристиками, и не менее важными высокими механическими и технологическими свойствами. Испытания показали, что углеродистые стали и серые чугуны менее износостойки, чем белые чугуны [2, с. 26-27].

Износ, вызванный сложными механическими, теплофизическими и химическими процессами на поверхностях деталей, находящихся в контакте друг с другом или с внешней средой, является одной из основных причин выхода данных деталей из строя при нормальных и повышенных температурах. Интенсивность этих процессов в значительной степени зависит от структуры поверхности и условий эксплуатации изделий. При этом оба фактора взаимосвязаны, то есть

определенная оптимальная структура соответствует конкретным условиям эксплуатации [3, с. 4].

От количества и типа карбидной фазы легированных белых чугунов зависят механические свойства и их износостойкость. Высокая износостойкость белых чугунов в основном обусловлена повышенным содержанием первичных карбидов MC и эвтектических карбидов, таких как $(Fe, Cr)_7C_3$, в преимущественно аустенитной или мартенситной матрице [4, 5]. Параметры карбидной фазы, а именно ее размер, объемная доля и форма, существенно влияют на износостойкость чугунов. Также прочное соединение карбидов с металлической основой сплава значительно повышает износостойкость. При одинаковом количестве карбидов чугун с пластинчатой и скелетообразной формой карбидов менее износостойкий, чем сплав с шаровидными карбидами. Матрица износостойкой отливки должна быть достаточно прочной, чтобы хорошо сопротивляться истиранию, и достаточно вязкой, чтобы предотвратить выпадение карбидов. Наиболее благоприятна в этом отношении аустенитно-мартенситная матрица, так как мартенсит хорошо сопротивляется износу, а аустенит препятствует выпадению карбидов. Чугуны обладают высокой износостойкостью при условии, что чугуны имеют однотипные карбиды и их металлическая основа однородна [2, 5, 6].

Количество карбидной фазы в белом чугуне определяется в первую очередь содержанием углерода, а затем типом и количеством карбидообразующих элементов. Также важно влияние легирующего элемента на количество (объемную долю), тип, дисперсность, морфологию и структуру образующихся эвтектик. Карбиды являются важной фазой в чугунах, их объемная доля может достигать 40% [2, 5-9]. Высокая доля карбидных фаз приводит к повышению твердости и, в то же время к хрупкости сплава вследствие снижения пластичности. Карбиды с большим размером отслаиваются от матрицы сплава в процессе эксплуатации, что снижает износостойкость.

Основными технологическими методами улучшения специальных свойств, влияющих на свойства комплексно-легированного чугуна, являются:

- соблюдение температурного режима при плавке и разливке металла в формы, а также контроль кристаллизации сплава;
- рафинирование и раскисление;
- модифицирование и микролегирование;
- термическая обработка, как наиболее эффективный инструмент управления процессами получения требуемых структур металлических матриц.

Режим и характер кристаллизации комплексно-легированных белых чугунов оказывают существенное влияние на их структурно-фазовое состояние. Морфология первичного аустенита напрямую связана с режимом затвердевания чугуна. В чугуне, затвердевающему по эндогенному режиму (кристаллы зарождаются и растут внутри сплава), затвердевшая структура показывает второй тип дендритной морфологии (равноос-

ные дендриты). В белом чугуне влияние морфологии аустенита на прочность сплава более важно, в то время как в сером чугуне большую роль играет количество дендритов. Скорость охлаждения расплава во время кристаллизации является наиболее важным фактором, влияющим на морфологию и количество первичных карбидов, дендритов аустенита и эвтектики. Увеличение скорости охлаждения во время кристаллизации и применение направленной кристаллизации изменяют характеристики структуры, такие как размер и взаимное расположение структурных составляющих [10]. Таким образом, варьируя условия охлаждения, можно управлять структурным состоянием и специальными свойствами чугунов.

Процессы структурообразования чугунов можно разделить на две фазы: формирование первичной микроструктуры, которое происходит при кристаллизации чугуна, и формирование вторичной микроструктуры, связанное с превращением аустенита при охлаждении из литого состояния или при термической обработке.

Кристаллизация в чугуне может развиваться следующими путями: 1) в два этапа с образованием первичных фаз (избыточных карбидов и дендритов твердого раствора) и последующей эвтектической кристаллизацией; 2) в один этап, когда химический состав чугуна близок к эвтектическому или, в случае переохлаждения, соответствует квазиэвтектическому. В целом направление развития процессов кристаллизации зависит от химического состава сплава, скорости охлаждения, модифицирования и микролегирования. При кристаллизации комплексно-легированных белых чугунов путем воздействия металлургических факторов изменяется тип, форма, размеры избыточных карбидов и эвтектик, которые наряду с металлической матрицей определяют свойства чугунов [11].

Одним из эффективных методов улучшения механических и специальных свойств чугунов является рафинирование. Данный метод позволяет получать сплавы наилучшего качества за счет снижения содержания вредных примесей и газов до минимума. Сочетание рафинирования и модифицирования активно влияет на степень чистоты сплава, размер зерна, состав и морфологию избыточных фаз, что сказывается на всем спектре свойств [12].

Особое значение имеет вопрос об оптимальном легировании белых чугунов, которое должно обеспечивать наиболее благоприятную структуру и совокупность требуемых свойств. В этом случае внимание уделяется изучению взаимосвязи «состав – структура – свойства» [13].

При эксплуатации белых чугунов при повышенной рабочей температуре велика вероятность деградации структуры, то есть изменения структурно-фазового состава [14-17]. Чтобы избежать этого явления, белый чугун легируют такими элементами, как Cr, Mn, Ni и Ti [18].

При легировании чугуна хромом резко повышается жаростойкость, что связано с образованием на по-

верхности прочной и тугоплавкой пленки оксида хрома. Влияние никеля и марганца проявляется в общем улучшении структуры отливок, формировании стабильной аустенитной структуры металлической матрицы. Модифицирование титаном обеспечивает чугуны требуемые жаростойкость и жаропрочность за счет стабилизирующего воздействия. При содержании хрома в оксидном слое более 30% образуется непрерывный плотный оксидный слой с хорошей адгезией к основному металлу, который препятствует дальнейшему окислению сплава [19, 20].

Хром в количестве 15-20% необходим для образования в структуре белого чугуна первичных карбидов тригонального типа M_7C_3 , что обеспечивает высокую износостойкость и жаростойкость отливок. При содержании хрома менее 15% в структуре чугуна образуются наряду с карбидами M_7C_3 карбиды типа M_3C , снижается содержание хрома в металлической основе, образуются продукты распада аустенита, что снижает жаростойкость и износостойкость чугуна. При содержании хрома, превышающим 20%, в структуре чугуна появляются крупные первичные карбиды, что приводит к обеднению металлической основы хромом, снижению жаростойких и износостойких свойств [21]. При кристаллизации аустенитной хромистокарбидной эвтектики карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$ в отличие от ледебурита с карбидами типа M_3C не образуют непрерывную фазу, а располагаются в виде изолированных тригональных карбидов в аустенитной основе. Карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$ более твердые и более дисперсные, что придает чугуны высокую износостойкость и прочность. Микротвердость карбидов $(Cr,Fe)_7C_3$ составляет 12000-15000 МПа, значительно превышая микротвердость кварца (10000 МПа) - наиболее часто используемого абразива, в то время как твердость карбидов цементита Fe_3C или $(Fe,Cr)_3C$ близка к микротвердости кварца и составляет 8000-11000 МПа. Это объясняет высокую износостойкость высокохромистого чугуна в условиях эксплуатации [2].

Углерод в белых чугунах обычно содержится в диапазоне 1,7-3,6%. Содержание углерода 1,7-2,5% в чугунах позволяет образовываться карбидам типа M_7C_3 , которые способствуют повышенной износостойкости чугуна. При введении в чугун углерода в количестве менее 1,7% объемная доля карбидов уменьшается, снижая износостойкость, а при содержании более 2,5% металлическая основа обедняется хромом, что отрицательно сказывается на жаростойкости чугуна. Увеличение содержания углерода (выше 3,6%) приводит к образованию крупных заэвтектических карбидов в структуре чугуна, что также приводит к снижению износостойкости [22].

Значительное повышение окалиностойкости и ростоустойчивости может быть достигнуто комплексным легированием чугуна хромом и никелем. Никель как аустенитообразующий элемент увеличивает растворимость углерода (карбидов хрома) в аустените, что приводит к увеличению содержания хрома в твердом

растворе и повышает окалиностойкость сплава [22]. Никель в количестве 1,0 - 2,0% в сочетании с марганцем способствует образованию стабильной однофазной аустенитной структуры металлической основы и повышает жаростойкость чугуна [23].

Легирование чугуна марганцем в количестве 3,5-5,0% приводит к образованию стабильной аустенитной структуры металлической основы. Увеличение содержания марганца более 5,0% приводит к обеднению металлической основы чугуна углеродом и хромом, что снижает жаростойкость и износостойкость. При содержании марганца менее 3,5% стабильность аустенита снижается [5].

Титан в количестве 0,2-0,6% устраняет столбчатое строение отливок, способствует измельчению дендритов аустенита и эвтектических колоний, модифицирует чугун, что позволяет получать однородные механические свойства по толщине отливок, стабилизирует структуру. Известно, что во время кристаллизации сплавов на основе железа, содержащих титан, он выделяется, прежде всего, в виде карбидов или карбонитридов. Титан имеет особенность переохлаждать расплавленный чугун, что способствует образованию карбидов титана. При содержании титана менее 0,2% стабилизирующее влияние будет незначительное, так как невелико количество карбидов титана (TiC). При содержании титана свыше 0,6% в чугуне образуются пленочные включения оксидов титана больших размеров, которые располагаются по границам аустенитных зерен, что снижает износостойкость чугуна [24, с. 42-66, 25-28].

Модифицирование чугуна, наряду с легированием, является одним из методов получения высококачественных отливок со специальными свойствами. Модифицирование повышает твердость, износостойкость и жаростойкость отливок, в основном за счет измельчения структуры и устранения трансформации [29].

Согласно работе П.А. Ребиндера, модификаторы, а именно примеси, вводимые в расплав, оказывают двойное действие. Модификаторы первой группы образуют в расплаве высокодисперсную взвесь отдельных частиц, которые становятся центрами кристаллизации [30]. Модификаторы второй группы адсорбируются на гранях зарождающихся кристаллов и препятствуют их росту. При этом введение избыточного количества добавки может привести к укрупнению зерна, наступающему в результате эффекта перемодифицирования [31, с. 14-17].

Известно, что дополнительная обработка чугуна бором значительно улучшает износостойкость и повышает твердость металла. Как поверхностно-активный элемент, бор оказывает сильное влияние на процессы кристаллизации чугуна, измельчает зерно и осуществляет дополнительное раскисление металла. Поскольку бор, адсорбируясь на поверхности растущих кристаллов, снижает тепловыделение при кристаллизации, происходит увеличение переохлаждения.

Это способствует увеличению дисперсности эвтектик (межкарбидному расстоянию в них). Бор также изменяет состояние границ зерен и пограничных слоев, что положительно влияет на свойства чугуна. На основании этих изменений бор относится к модификаторам второго рода. Микролегирование чугуна бором улучшает его технологические и эксплуатационные свойства при одновременном снижении содержания в чугуне хрома, марганца, никеля и других элементов. Однако исследования показали, что при обработке чугуна бором необходимо соблюдать осторожность, поскольку уже при присадке 0,03% бора чугун приобретает хрупкий излом при комнатной температуре, а его износостойкость практически остается без изменений. Для повышения эксплуатационных характеристик белых чугунов их целесообразно модифицировать бором в пределах 0,005–0,02% [24].

Применение легирования, микролегирования, модифицирования и рафинирования позволяет продлить срок службы деталей, изготовленных из белых чугунов и повысить долговечность оборудования металлургического, горнодобывающего и обогащательного, коксохимического производств, работающего в условиях повышенных температур и абразивного износа.

По результатам проведенного литературного обзора в российской и зарубежной литературе была подтверждена актуальность темы о возможности применении бора в качестве микролегирующей и модифицирующей добавки для повышения свойств комплекснолегированных белых чугунов, а также выявлены концентрационные интервалы содержания бора и его влияние на структуру и свойства этих чугунов. Бор способствует устранению столбчатого строения кристаллов твердого раствора и диспергированию карбидной фазы, увеличению микротвердости структурных составляющих, упрочнению металлической матрицы, увеличению износостойкости при содержании его в чугуне не менее 0,005% и не более 0,03%.

Список источников

1. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
2. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
3. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. Москва, 1984. 103 с.
4. Сильман Г.И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 7 (601). С. 94-100.
5. Шейнман Е.Л. Абразивный износ. Обзор американской печати // *Трение и износ*. 2005. Т. 26. № 1. С. 100-111.
6. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны: структура и свойства. М.: Металлургия, 1983. 176 с.
7. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. М.: Машиностроение, 1980.
8. Артеменко Ю.А., Рьжков Е.В., Болотин Н.С. Вопросы регулирования микроструктуры износостойких наплавленных сплавов // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2012. №15. С. 6-8.
9. Влияние структуры на износостойкость белых чугунов / М.Е. Гарбер [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1968. № 11. С. 48–52.
10. Повышение износостойкости хромистых чугунов. / В.М. Ильюшенко, П.Ю. Дувалов, К.Э. Барановский, И.Б. Проворова, Е.В. Розенберг // *Литье и металлургия*. 2016. № 2 (83). С. 5-9.
11. Макаренко К.В. Рациональное структурирование графитизированных чугунов // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2014. № 2 (104). С. 196-205.
12. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Повышение свойств отливок из чугуна специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 1 (33). С. 23-29.
13. Колокольцев В.М., Конопка З., Петроченко Е.В. Структура и свойства белых чугунов разных систем легирования // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 19-23.
14. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron, *J. Metall. Mater. Trans. A*, 2013, vol. 44, pp. 1665-1671.
15. Yoganandh J., Natarjan, S., and Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal assay, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 2534-2540.
16. Bedolla-Jacuinde A., Arias L., and Hernández B. Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2003, vol. 12, no. 4, pp. 371-382.
17. Janus A. Effect of chemical composition on number of eutectic colonies in Ni–Mn–Cu cast iron, *Arch. Foundry Eng.*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 51-56.
18. Тен Э.Б., Рожкова Е.В., Конюхова А.И. Термодинамические предпосылки легирующего эффекта при модифицировании низкохромистого чугуна // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2013. № 11. С. 51-54.
19. Гарбер М.Е., Цыпин И.И. Основы подбора составов и структуры износостойких отливок из белого чугуна // *Литейное производство*. 1970. № 2. С. 2–6.
20. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.В. Особенности формирования структуры белых чугунов и их классификация // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2007. № 1 (17). С. 97-105.

21. Структурно- и неструктурно-чувствительные свойства хромистых чугунов / А. А. Кириллов, В. Д. Белов, Е. В. Рожкова и др. // Черные металлы. 2007. № 9. С. 7-13.
22. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ взаимосвязи химического состава, условий охлаждения при затвердевании с особенностями строения сплавов, окисленной поверхности и свойствами комплексно-легированных белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 50-53.
23. Нетребко В.В. Особенности образования карбидов и распределения Cr, Mn и Ni в белых чугунах // Литье и металлургия. 2015. № 3 (80). С. 40-46.
24. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
25. Служебные характеристики микролегированных и модифицированных белых чугунов / М.М, Яшминский, К.С. Радченко, Г.Е. Федоров, Е.А. Платонов // Литье и металлургия. 2013. №4. С. 29-34.
26. Емелюшин А.Н. Влияние титана и бора на износостойкость чугуна, предназначенного для механической обработки неметаллических материалов инструмента из хромистых чугунов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2000. № 2. С. 28-29.
27. Васенко Ю.А. Моделирование износостойкости чугуна, легированного титаном, по данным пассивного эксперимента // Технологический аудит и резервы производства. №2(2). 2011. С. 3-8.
28. Jumaev A. A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2018. 12. P.7575-7577.
29. Повышение жаростойкости хромистого чугуна ЧХ8 / Тен Э.Б., Левин М.И., Рожкова Е.В., Конюхова А.И. // Литейщик России. 2015. № 2. С. 35-38.
30. Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Состояние вопроса модифицирования, микролегирования и рафинирования белых чугунов // Технологии металлургии, машиностроения и материалов обработки. 2020. № 19. С. 152-159.
31. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1993. 416 с.

Сведения об авторах

Петроченко Елена Васильевна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: evp3738@mail.ru

Молочкова Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: opetrochenko@mail.ru

Трофимова Евгения Александровна – аспирантка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: e_troff@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

WAYS TO INCREASE THE SPECIAL PROPERTIES OF COMPLEX-ALLOYED WHITE CAST IRON

Petrochenko Elena V. – doctor of technical sciences, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evp3738@mail.ru

Molochkova Olga S. – candidate of technical sciences, associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: opetrochenko@mail.ru

Trofimova Evgeniya A. – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: e_troff@mail.ru

Abstract. Increasing quality requirements, improving the mechanical and operational properties of products in metallurgy and mechanical engineering require the development of new effective ways to control the processes of structure formation in the manufacture of products, since it is structure of the material that determines its properties. The competitiveness of cast iron products in the market can be increased by improving the mechanical and performance characteristics. At present, a large number of technological methods have been developed to improve the properties of iron-carbon alloys, most of them are aimed at upgrading the structure of materials.

The article discusses various methods of influence: microalloying, modification, refining and crystallization rate on the structural-phase composition and special properties of complex-alloyed white cast irons. In addition, the dependence of the special properties of cast irons on the structural-phase composition is described. The influence of chemical compositions on the structure and properties of white cast irons is presented. The joint influence of chromium, manga-

nese, nickel, and titanium on the special properties of cast irons, such as heat resistance and wear resistance, is described. The percentage of alloying elements in the alloy is given to best achieve special properties. The factors influencing the heat-wear resistance and abrasive wear resistance of complex-alloyed white cast irons are given.

The relevance of the use of boron as a microalloying and modifying additive to improve the properties of complex-alloyed white cast irons has been confirmed, the concentration ranges of boron content and its effect on the structure and properties of these cast irons have been identified. Additional processing of base cast iron with boron significantly improves wear resistance and increases the hardness of the metal. Microalloying of cast iron with boron improves its technological and operational properties

Keywords: microalloying, modification, refining, crystallization, structure, wear resistance, complex-alloyed white cast iron, white heat-resistant cast iron, scale resistance, growth resistance

Ссылка на статью:

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Пути повышения специальных свойств комплексно-легированных белых чугунов // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 24-29.
Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Trofimova E.A. Ways to increase the special properties of complex-alloyed white cast iron. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 24-29.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.97

Железков О.С., Лизов С.Б., Макаров Б.Б.

СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ТОРЦЕВЫХ ВЫСТУПОВ ОСАЖИВАЕМОЙ ШАЙБЫ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. В строительстве, тяжелом машиностроении и авиастроении широко используются фрикционные соединения с высокопрочными крепежными изделиями. Надежность и работоспособность конструкций с фрикционными соединениями зависит от усилия затяжки применяемого крепежа. В отечественной промышленности усилие затяжки контролируется либо по крутящему моменту, который измеряется с помощью тарированного динамометрического ключа, либо по углу поворота гайки на конечном этапе закручивания. Вышеотмеченные методы контроля усилия затяжки обладают повышенной трудоемкостью. За рубежом широко применяются фрикционные соединения с контролем усилия затяжки крепежа по деформированию отдельных элементов. В Японии и США используются высокопрочные болты с контролем усилия затяжки по скручиванию торцевого элемента. Другой эффективный способ контроля усилия затяжки фрикционных соединений заключается в использовании специальной шайбы с торцевыми осаживаемыми выступами, которые в процессе затяжки деформируются. Контроль усилия затяжки осуществляют путем замера зазора между шайбами. Зазор измеряют в процессе затяжки крепежа специальным щупом. Используя метод конечных элементов на базе программного комплекса «DEFORM-3D», выполнено моделирование процесса штамповки выступа шайбы, осаживаемого при затяжке. Механические свойства материала штампуемой заготовки (сталь 35) задавались из базы данных программного комплекса, а штамповый инструмент (матрица и пуансон) рассматривались как абсолютно твердые тела. По результатам выполненных расчетов построен график зависимости усилия F штамповки осаживаемого выступа шайбы от перемещения Δh пуансона. Для аппроксимации полученной кривой $F = f(\Delta h)$ использовался полином 5-й степени.

Ключевые слова: фрикционные соединения, высокопрочные крепежные изделия, болт, гайка, шайба, усилие затяжки крепежа, моделирование процесса штамповки, метод конечных элементов, усилие штамповки

Введение

В настоящее время в строительстве и тяжелом машиностроении, а также в авиационной промышленности находят широкое применение фрикционные соединения с высокопрочными крепежными изделиями (болты, гайки и шайба) [1, 2]. Работоспособность и надежность собираемых конструкций существенно зависят от усилия затяжки крепежа [3], которое регламентируется соответствующей нормативно-технической документацией. Поэтому при монтаже конструкций в обязательном порядке контролируется усилие затяжки. Для контроля усилия используются различные технические подходы и решения.

В отечественной промышленности контроль усилия затяжки высокопрочных болтов фрикционных соединений, в основном, осуществляется либо по крутящему моменту, прикладываемому к специально применяемому динамометрическому ключу, либо по углу закручивания гайки на конечном этапе монтажа [4]. Применяемые методы обладают повышенной трудоемкостью, носят субъективный характер и не всегда обеспечивают требуемую точность регламентированного усилия затяжки.

За рубежом находят широкое применение фрикционные соединения с высокопрочными крепежными изделиями, контроль затяжки которых осуществляют по деформированию отдельных элементов крепежа. В Японии и США широко используются высокопроч-

ные болты с контролем усилия затяжки по скручиванию торцевого элемента болта [5, 6]. Такие болты выполняются с полусферической головкой, гладким и резьбовым участками. На конце резьбового участка выполняется торцевой элемент в виде многогранника, за который осуществляется закручивание болта. Между резьбовым участком и торцевым элементом выполняется цилиндрическая канавка строго определенных размеров. При окончательной затяжке резьбового соединения гайка остается неподвижной, а кручение осуществляют за торцевой многогранный элемент и при достижении определенного крутящего момента, а следовательно и усилия затяжки, происходит скручивание торцевого элемента по цилиндрической канавке.

Другой широко применяемый за рубежом эффективный способ контролируемой затяжки фрикционных соединений заключается в деформировании торцевых выступов специальной шайбы и замера возникающего зазора [7]. Крепежные детали для контроля усилия затяжки по деформированию выступов осаживаемой шайбы представлены на рис. 1.

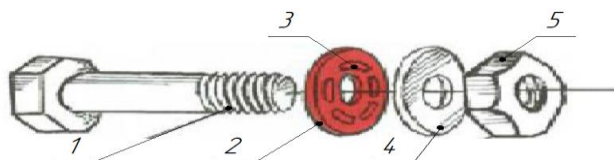


Рис. 1. Крепежные детали для контроля усилия затяжки по деформированию выступов осаживаемой шайбы

Процесс сборки и контроль усилия затяжки осуществляются следующим образом. Высокопрочный болт 1 вставляется в отверстие соединяемых деталей. Со стороны резьбового участка болта одеваются специальная шайба с торцевыми осаживаемыми выступами 3 и плоская шайба 4, а затем закручивается гайка 5. При закручивании гайки 5 выступы 3 шайбы 2 деформируются. Контроль усилия затяжки осуществляется по зазорам между шайбами 2 и 4, которые замеряются с помощью щупа.

На рис. 2 детально представлены некоторые разновидности шайб с осаживаемыми выступами.

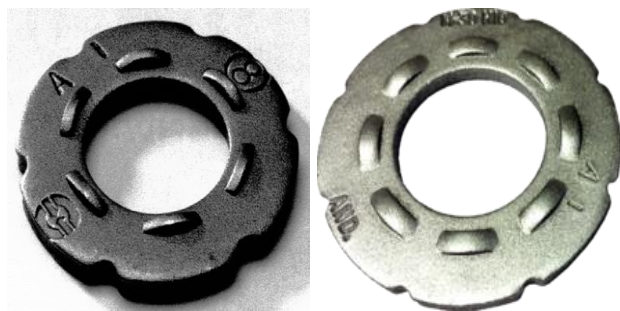


Рис. 2. Разновидности шайб с осаживаемыми выступами

При выборе кузнечно-прессового оборудования и проектировании технологического инструмента для реализации процесса штамповки шайб с торцевыми осаживаемыми выступами необходима информация об усилиях, возникающих в процессе деформирования [8]. Моделирование процесса штамповки торцевого выступа шайбы осуществлялось с использованием программного комплекса «DEFORM-3D», в основу которого положен метод конечных элементов [9, 10].

Так как в известных конструкциях шайб количество осаживаемых выступов может быть различным (на рис. 1 их 5, а на рис. 2 их 6 и 7), то для сокращения времени расчета рассматривался процесс штамповки одного торцевого выступа шайбы. Схема процесса деформирования представлена на рис. 3.

При конечно-элементном моделировании процесса штамповки выступа шайбы заготовка 1 размещалась на торцевой поверхности матрицы 2, у которой выполнено центральное отверстие 3. Пуансону 4, который размещался соосно отверстию 3 матрицы, сообщалось движение вниз. Механические свойства материала заготовки 1 задавались из базы данных программного комплекса «DEFORM-3D», которые были близки к свойствам стали 35, применимой при изготовлении шайб. Инструмент (матрица 2 и пуансон 4) рассматривался как абсолютно твердые тела.

По результатам расчетов построен график зависимости усилия деформирования F от перемещения Δh пуансона, который представлен на рис. 4.

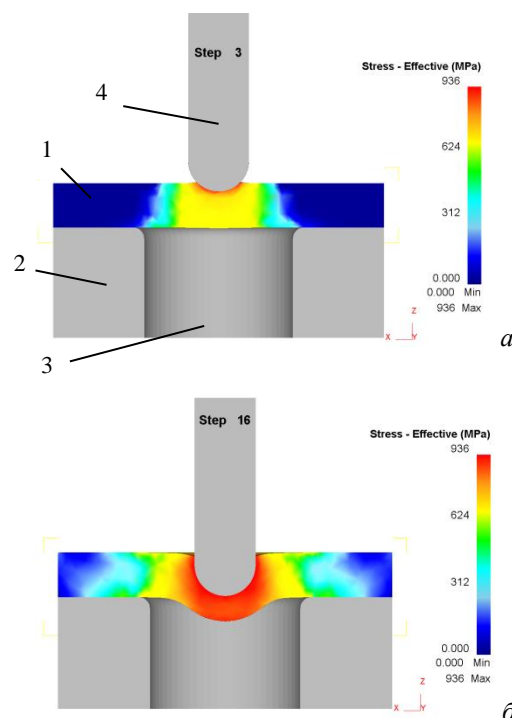


Рис. 3. Схема процесса штамповки и поля интенсивности напряжений при формировании торцевого осаживаемого выступа шайбы: а – начальный этап деформирования; б – конечный этап деформирования

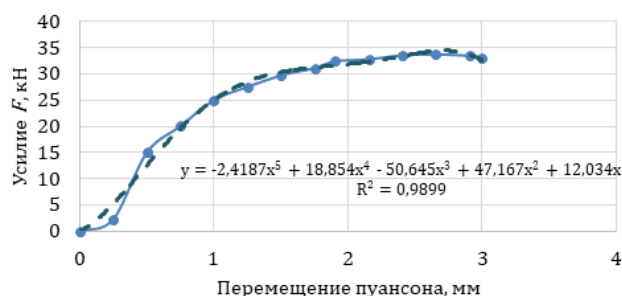


Рис. 4. Изменение усилия F штамповки при формировании выступа шайбы

Для аппроксимации полученной кривой использовался полином 5-й степени в виде уравнения

$$F = -2,4187(\Delta h)^5 + 18,854(\Delta h)^4 - 50,645(\Delta h)^3 + 47,167(\Delta h)^2 + 12,034(\Delta h). \quad (1)$$

Уравнение (1) достаточно точно описывает зависимость $F = f(\Delta h)$, так как коэффициент детерминации имеет высокое значение ($R^2 = 0,9899$).

Для обобщения полученных результатов и возможности их использования при анализе процессов деформирования выступов, подобных вышеизложенному, вводились безразмерные параметры: относительное удельное усилие p штамповки и относительное перемещение e_i пуансона, для определения которых использовались следующие зависимости.

Относительное удельное усилие

$$p = \frac{F}{\sigma_s A}, \quad (2)$$

где σ_s – предел текучести материала заготовки;
 A – площадь поперечного сечения пуансона.

Относительное перемещение пуансона

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h}{h}, \quad (3)$$

где Δh – перемещение пуансона на i -м этапе деформирования;
 h – высота исходной заготовки.

Используя безразмерные параметры (2) и (3), выполнены соответствующие расчеты и построен график зависимости относительного удельного усилия p от относительного перемещения пуансона ε_i , который представлен на рис. 5.

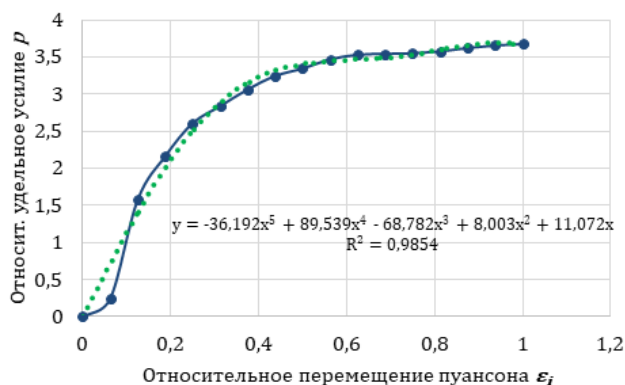


Рис. 5. Зависимость относительного усилия p от относительного перемещения пуансона ε_i

Полученная зависимость $p = f(\varepsilon_i)$ аппроксимировалась полином 5-й степени в виде уравнения

$$p = -36,192 \varepsilon_i^5 + 89,539 \varepsilon_i^4 - 68,782 \varepsilon_i^3 + 8,003 \varepsilon_i^2 + 11,072 \varepsilon_i. \quad (4)$$

Уравнение (4) достаточно точно описывает зависимость $p = f(\varepsilon_i)$, так как коэффициент детерминации имеет высокое значение ($R^2 = 0,9854$).

Полученные результаты исследований могут быть использованы при совершенствовании технологических процессов изготовления шайб с осаживаемыми торцевыми выступами, при выборе оборудования для их штамповки и при проектировании технологического инструмента.

Выводы

1. Выполнен анализ известных способов контроля усилия затяжки высокопрочных крепежных изделий, применяемых при сборке фрикционных соединений. Отмечена эффективность применения способов контроля затяжки по деформируемому элементу (болты со скручивающимся торцевым хвостовиком и шайбы с осаживаемыми выступами).

2. По результатам конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса «DEFORM-3D» установлены закономерности изменения усилий штамповки выступа осаживаемой шайбы в зависимости от перемещения пуансона. Полученные зависимости с высокой точностью аппроксимированы полиномом 5-й степени.

3. Результаты выполненных исследований рекомендуется использовать при проектировании технологического инструмента для штамповки шайб с осаживаемыми выступами и выборе кузнечно-прессового оборудования для реализации процесса изготовления шайб в условиях ОАО «ММК-Метиз».

Список литературы

1. Мокринский В.И., Железков О.С. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий / Сер. Метизное производство. Вып. 2. М.: Ин-т Черметинформация, 1990. С. 22.
2. Крепежные изделия для современного машиностроения / И.А. Воробьев, С.В. Овчинников, Г.В. Бунатян и др. Нижний Новгород: МПК-сервис, 2016. 520 с.
3. Каптелин С.Ю. Контроль натяжения высокопрочных болтов при устройстве фрикционных соединений // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 2. С. 33-37.
4. Гладштейн Л.И., Бабушкин В.М., Какулия Б.Ф. Высокопрочные болты для строительных стальных конструкций с контролем натяжения по срезу торцевого элемента // Труды ЦНИИПС им. Мельникова. Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 5. С. 11-13.
5. JSS 11-09-1966: Society of Steel Construction of Japan – Sets of Torshear Type High Strength Bolt, Hexagon Nut and Plain Washers for Structural Joints.
6. Tan, W., 2004. Installation Behavior of ASTM F1852 Twist-Off Type Tension Control Bolts. Department of Civil Engineering, University of Toronto.
7. ASTM F959/F959M-2017. Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for Use with Structural Fasteners, Inch and Metric Series. docs.cntd.ru. / 01.12. 2017
8. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 112-114.

9. Norrie D.H., de Vries G. The Finite Element Method – Fundamentals and Applications. Academic Press. New York, 1973. 322 p.
10. Сегерлинд Л.Д. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 240 с.

Сведения об авторах

Железков Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ferumoff@mail.ru

Лизов Салимжан Бурамбаевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

Макаров Богдан Борисович – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nexusbionics@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

POWER PARAMETERS OF THE STAMPING PROCESS OF THE END PROJECTIONS OF THE DEPOSITED WASHER OF FRICTION JOINTS

Zhelezkov Oleg S. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru.

Lizov Salimgan B. – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

Makarov Bogdan B. – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nexusbionics@yandex.ru.

Abstract. Friction joints with high-strength fasteners are widely used in construction, heavy machinery and aircraft construction. The reliability and operability of structures with friction joints depends on the tightening force of the fastener used. In the domestic industry, the tightening force is controlled either by the torque, which is measured using a calibrated torque wrench, or by the angle of rotation of the nut at the final stage of tightening. The above-mentioned methods of controlling the tightening force have increased labor intensity. Friction joints with control of the tightening force of fasteners for deformation of individual elements are widely used abroad. In Japan and the USA, high-strength bolts are used with the control of the tightening force on the twisting of the end element. Another effective way to control the tightening force of friction joints is to use a special washer with end-mounted protrusions that deform during tightening. The tightening force is controlled by measuring the gap between the washers. The gap is measured during the tightening of the fastener with a special probe. Using the finite element method based on the "DEFORM-3D" software package, the modeling of the stamping process of the washer protrusion, which is deposited during tightening, is performed. The mechanical properties of the material of the stamped workpiece (steel 35) were set from the database of the software package, and the die tool (matrix and punch) they were considered as absolutely solid bodies. Based on the results of the calculations performed, a graph of the dependence of the punching force F of the deposited protrusion of the washer on the movement of the punch is constructed. To approximate the resulting curve $F = f(\Delta h)$, a polynomial of the 5th degree was used.

Keywords: friction joints, high-strength fasteners, bolt, nut, washer, fastener tightening force, modeling of the stamping process, finite element method, stamping forces.

Ссылка на статью:

Железков О.С., Лизов С.Б., Макаров Б.Б. Силовые параметры процесса штамповки торцевых выступов осаживаемой шайбы фрикционных соединений // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 30-33.
Zhelezkov O.S., Lizov S.B., Makarov B.B. Power parameters of the stamping process of the end projections of the deposited washer of friction joints. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 30-33.

Тухветова Л. М., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Константинов Д.В.

К АНАЛИЗУ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ШЕСТИГРАННОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования напряжённно-деформированного состояния, возникающего в инструменте, при волочении шестигранного профиля по схеме «шестигранник-шестигранник». Целью работы являлось исследование влияния угла рабочей зоны волочильного инструмента и величины единичной деформации на возникающие в инструменте контактные напряжения, интенсивность напряжений, а также величину упругой деформации. В качестве используемого метода было выбрано конечно-элементное моделирование в программном комплексе Abaqus. Новизна полученных результатов состоит в получении уникальных данных о локализации напряжений в теле волочильного инструмента для специфичного вида длинномерных изделий. В результате проведённого анализа установлено, что уменьшение угла рабочей зоны волочильного инструмента приводит к локализации контактных напряжений в области вершин шестигранника, а также к увеличению интенсивности напряжений. По этой причине с точки зрения повышения стойкости инструмента волочение шестигранных профилей следует вести при увеличенных углах рабочей зоны волоки. Использование увеличенных углов приведёт к уменьшению длины рабочей зоны волоки, что, в свою очередь, будет благоприятно влиять на условия трения в очаге деформации. Также установлено, что уменьшение величины единичной деформации создаёт более благоприятные условия напряжённно-деформированного состояния инструмента, а именно приводит к уменьшению отрицательного действия контактных напряжений.

Ключевые слова: волочение, калиброванная сталь, напряжённно-деформированное состояние, волока, инструмент, конечно-элементное моделирование

Введение

Процесс волочения шестигранного профиля имеет определённые особенности по сравнению с волочением круглого профиля. Это связано в первую очередь с более существенной неравномерностью деформации. С одной стороны, диапазон готовых размеров шестигранного профиля, получаемых методом волочения, составляет более 17 мм и при этом используются заготовки размером более 20 мм. Для процесса волочения проката такого диапазона размеров характерно проявление масштабного фактора, обусловленного существенной неравномерностью свойств исходной заготовки. С другой стороны, получение готового размера шестигранных профилей обеспечивается процессом деформации проката при малых степенях пластической деформации, что приводит к её существенной неравномерности.

В практике получение готового шестигранного профиля осуществляется методом последовательного волочения заготовки шестигранного сечения. Как отмечают авторы работ [1, 2], сравнивая различные схемы деформации проката шестигранного профиля, наиболее благоприятной с точки зрения напряжённно-деформированного состояния является схема волочения из круга в шестигранник методом комбинированного волочения. Данный метод был разработан Славиным В.С. и др. [3], заключается в последовательном деформировании круглого проката сначала через роликовую, а затем через монолитную волоку. В работе [4] описан способ и приведён анализ процесса получения шестигранного профиля с использованием волоки, имеющей выступы на гранях. Данный способ не

нашёл широкого применения ввиду сложности подготовки технологического инструмента.

Независимо от метода окончательное формирование шестигранного профиля осуществляется в монолитной волоке. При этом инструмент при волочении шестигранных профилей является «слабым звеном», накладывая на процесс существенные ограничения по скорости и, соответственно, по производительности. Это связано с тем, что из-за высокой протяжённости по абсолютной величине очага деформации при волочении больших профилируемых размеров существенное влияние на процесс оказывают реактивные силы трения. В связи с этим стойкость волочильного инструмента существенно снижается. При этом процесс его (инструмента) изготовления очень сложен и трудоёмок – доводка твердосплавных заготовок шестигранных фильер до необходимых размеров осуществляется вручную. Таким образом, анализ напряжённно-деформированного состояния инструмента при волочении шестигранных профилей заслуживает особого внимания.

На сегодняшний день благодаря развитию комплексов конечно-элементного моделирования появилась возможность проводить анализ напряжённного состояния инструмента, в частности при волочении. Так, авторами работы [5] проводился анализ напряжённного состояния алмазного волочильного инструмента при волочении тонкой круглой проволоки, в работе [6] исследовалась упругая деформация волоки при волочении круглой калиброванной стали. При этом работ, посвящённых анализу напряжённного состояния в волочильном инструменте при изготовлении шестигранного профиля, на сегодняшний день недостаточно.

Целью настоящей работы является анализ напряжённного состояния волочильного инструмента

при волочении шестигранного профиля в монолитной волоке в зависимости от угла рабочей зоны и величины единичной деформации.

Метод и материалы

Анализ напряжённого состояния, возникающего в волочильном инструменте, проведён для компьютерного эксперимента, описанного в работе [7]:

- исследованию подвергался твердосплавный инструмент, используемый при волочении шестигранного профиля, из стали марки 38ХС, выбор данной марки стали обусловлен как наиболее критичной с точки зрения практики процесса волочения;

- при моделировании изменялся рабочий угол волоки (16, 18, 20 градусов) и степень относительной деформации (единичного обжатия) 10 и 12%.

Компьютерное моделирование проводилось в комплексе Simulia Abaqus с применением решателя Standard (Static General). Модели как инструмента, так и обрабатываемой заготовки были упругопластическими. Общее количество элементов модели волочильного инструмента – 115 893.

Результаты и их анализ

На рис. 1-3 приведён анализ напряженного состояния волочильного инструмента, а также упругих деформаций в зависимости от угла рабочей зоны при величине единичной деформации 10%.

Анализ полученных данных показывает, что распределение контактных напряжений при угле рабочей зоны волоки 16° характеризуется меньшими абсолютными значениями, но имеет высокую локализацию в области ребер шестигранника, что может быть причиной неравномерного износа инструмента. Вследствие подобного распределения контактных напряжений распределение интенсивности напряжений при угле рабочей зоны волоки 16° также локализовано в области ребер шестигранника. При углах больше 16° ярко выраженных локализаций как напряжений Мизеса, так и упругих деформаций не наблюдается.

На рис. 4-6 приведён анализ напряженного состояния волочильного инструмента, а также упругих деформаций в зависимости от величины единичной деформации при угле рабочей зоны 18°.

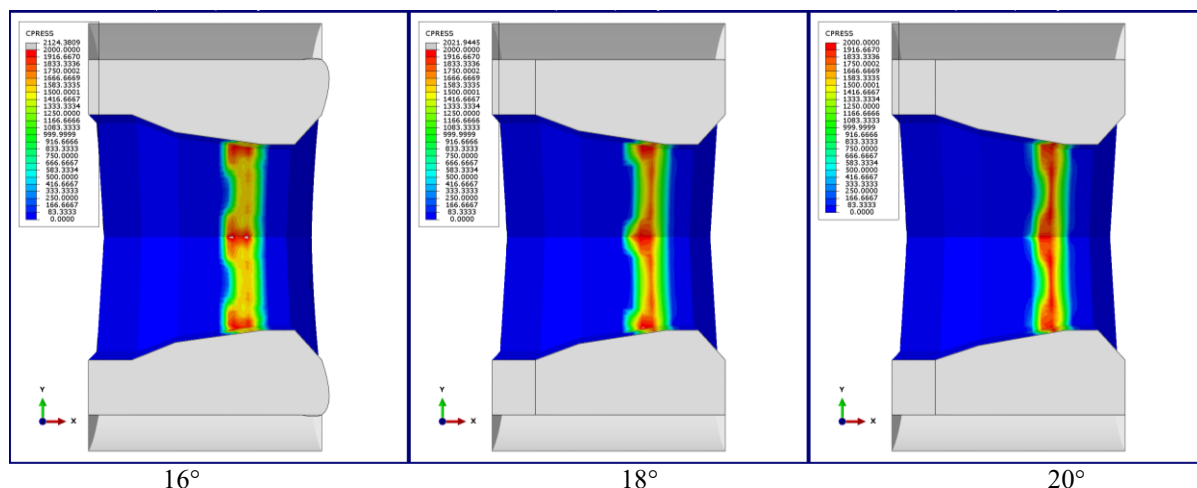


Рис. 1. Распределение контактных напряжений в волочильном инструменте в зависимости от угла рабочей зоны

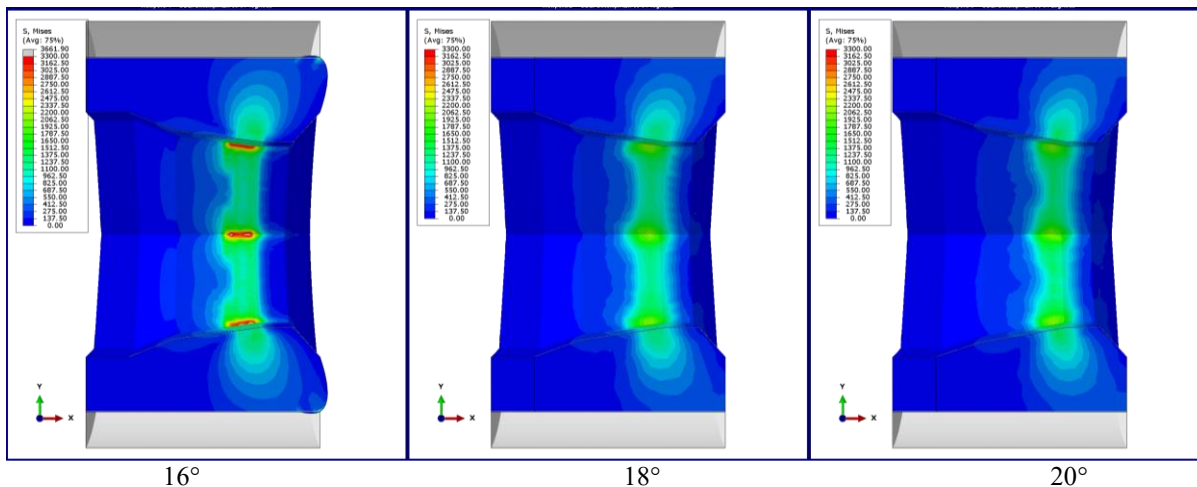


Рис. 2. Распределение напряжений Мизеса в волочильном инструменте в зависимости от угла рабочей зоны

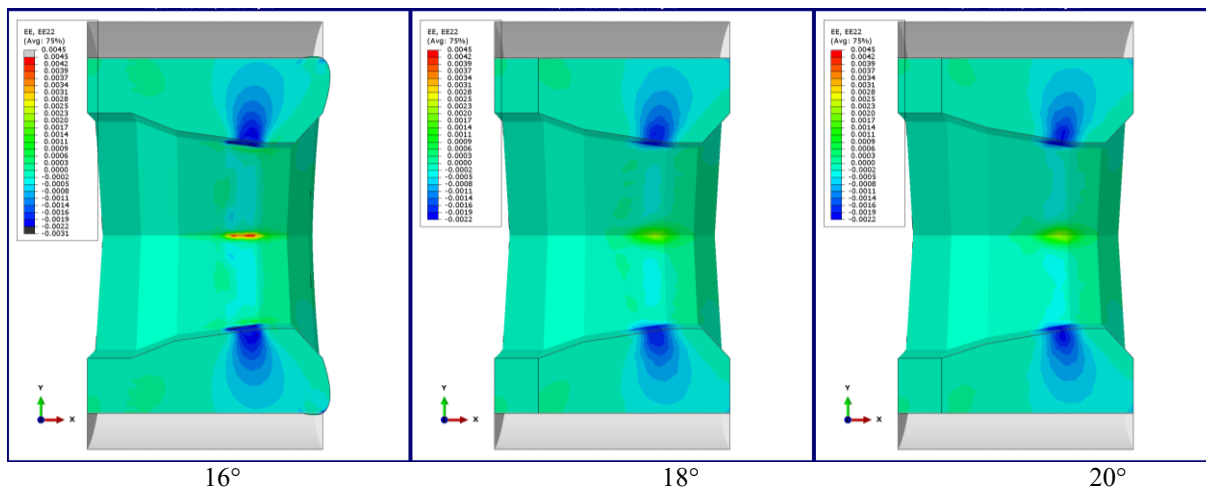


Рис. 3. Распределение упругих деформаций в волочильном инструменте в зависимости от угла рабочей зоны

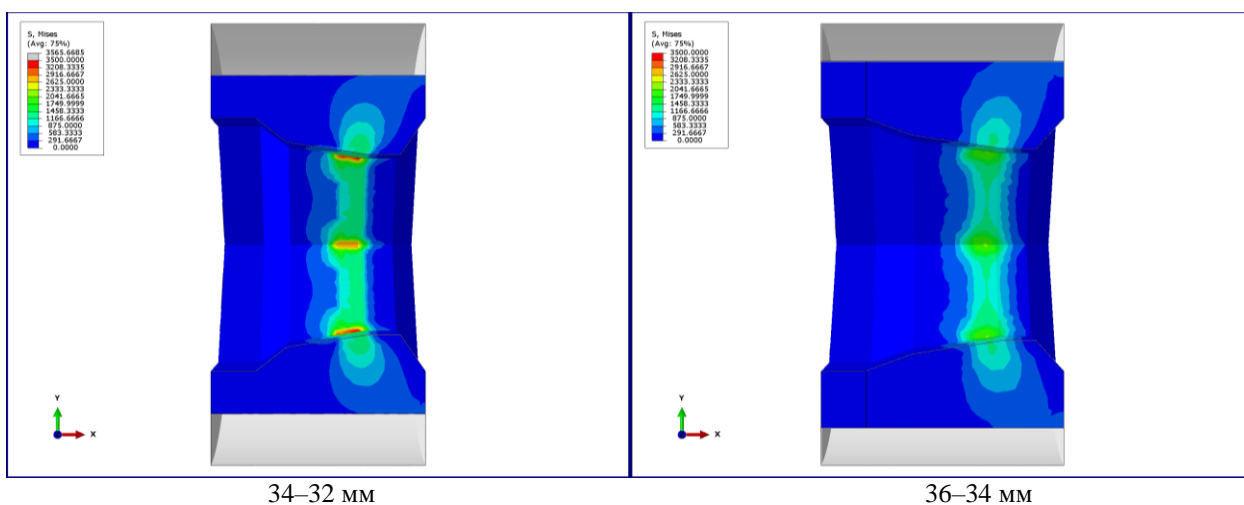


Рис. 4. Распределение напряжений Мизеса в волочильном инструменте с различными степенями деформации

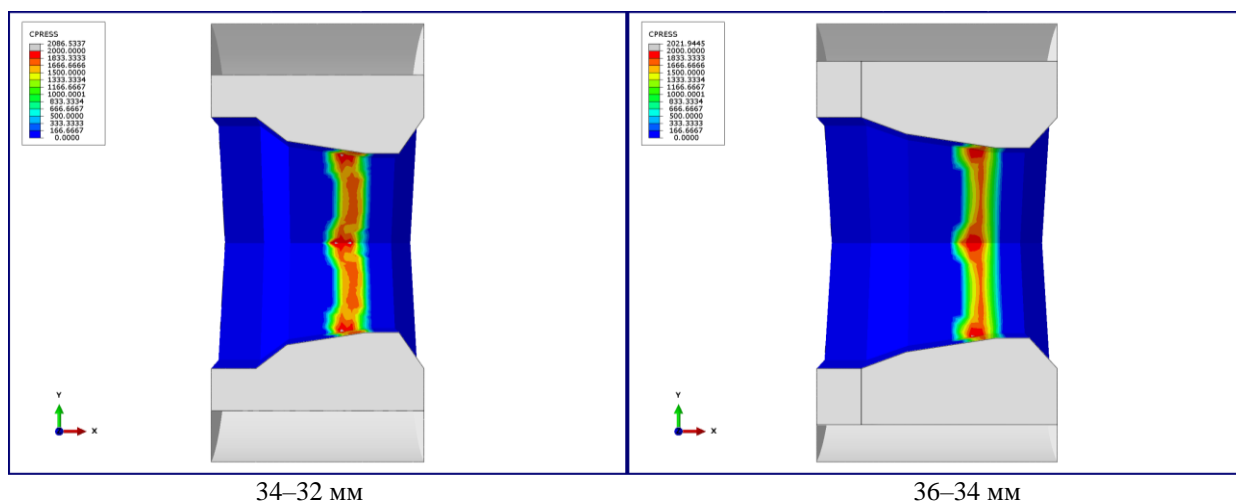


Рис. 5. Распределение контактных напряжений в волочильном инструменте с различными степенями деформации

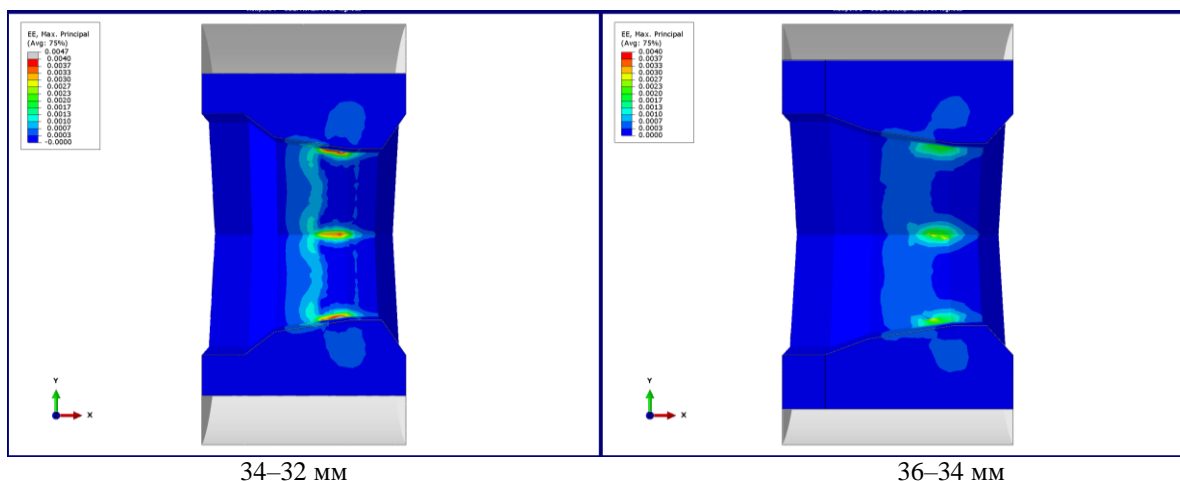


Рис. 6. Распределение упругих деформаций в волочильном инструменте с различными степенями обжатия

Из данных, приведённых на рис. 4-6, установлено, что напряженно-деформированное состояние инструмента при волочении с 34 до 32 мм менее благоприятное, так как также имеет ярко выраженный локализованный характер, что потенциально может стать причиной более быстрого разрушения инструмента или его износа.

Заключение

В результате проведённого анализа установлено, что уменьшение угла рабочей зоны волочильного инструмента приводит к локализации контактных напряжений в области вершин шестигранника, а также к увеличению интенсивности напряжений. По этой причине с точки зрения повышения стойкости инструмента волочение шестигранных профилей следует вести при увеличенных углах рабочей зоны волокна. Использование увеличенных углов приведёт к уменьшению длины рабочей зоны волокна, что, в свою очередь, будет благоприятно влиять на условия трения в очаге деформации. Также установлено, что уменьшение величины единичной деформации создаёт более благоприятные условия напряженно-деформированного состояния инструмента, а именно приводит к уменьшению отрицательного действия контактных напряжений.

Сведения об авторах

Тухветова Луиза Марсовна – ведущий специалист сталепроволочного производства, ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tukhvetova.lm@mmk-metiz.ru

Столяров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник технологического центра – главный технолог, ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Список литературы

1. Гун Г.С., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г. Анализ технологических схем волочения шестигранного профиля // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2013. С. 96-102
2. Опыт производства калиброванной стали с шестигранным поперечным сечением / С.Е. Носков, Е.А. Пудов, Л.П. Ряхова, В.М. Одинаева, Н.С. Ясюкевич // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2011. С. 53-57.
3. Славин В.С., Вершигора С.М., Пантелеев В.С. Комбинированная технологическая схема производства калиброванного шестигранного проката // *Сталь*. 2007. № 2. С. 91-93.
4. Железков О.С., Малоканов С.А., Платов С.И. Напряженно-деформированное состояние и формоизменение при волочении шестигранных профилей из круглой заготовки // *Черные металлы*. 2016. №4. С.31-35
5. Порубов А.В., Мельникова Т.Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния технологического инструмента для тонкого волочения // *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*. 2014. Т. 1. С. 37-41.
6. Моделирование упругой деформации волокна с использованием CAE системы DEFORM-3D / А.Г. Корчунов, Д.А. Шеметова, В.Ю. Бабенцева, А.Г. Ульянов // *Механическое оборудование металлургических заводов: Межрегиональный сборник научных трудов под ред. А.Г. Корчунова*. Магнитогорск, 2012. С. 62-67.

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: agkorchunov@mail.ru

Огнева Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, специалист УМД, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: fekla_med@mail.ru

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, специалист УМД, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: const_dimon@mail.ru, +7-982-30-7777-0

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE TOOL DURING HEXAGONAL PROFILE DRAWING

Tukhvetova Luiza M. – leading specialist of steel wire production, OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tukhvetova.lm@mmk-metiz.ru

Stolyarov Alexey Yu. – Ph.D., head of the technology center - chief technologist, OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Korchunov Alexey G. – D.Sc., Professor, Head of Design and operation of metallurgical machines and equipment Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru

Ogneva Ekaterina M. – Ph.D., Specialist of International Affairs Office, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fekla_med@mail.ru

Konstantinov Dmitry V. – Ph.D., Specialist of International Affairs Office, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: const_dimon@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of numerical simulation of the stress-strain state that occurs in the tool during drawing a hexagonal rod by “hexagon-hexagon” scheme. The aim of the work was to study the influence of the angle of the working zone of the drawing tool and the magnitude of a single deformation on the contact stresses arising in the tool, the stress intensity, and the magnitude of elastic deformation. Finite element modeling in the Abaqus software package was chosen as the method used. The novelty of the results is in obtaining unique data on the localization of stresses in the body of a drawing tool for a specific type of long metal products. As a result of the analysis, it was found that a decrease in the angle of the working area of the drawing tool leads to the localization of contact stresses in the region of the hexagon vertices, as well as to an increase in stress intensity. For this reason, from the point of view of increasing tool lifecycle, the drawing of hexagonal profiles should be carried out at increased angles of the working area of the die. The use of increased angles will lead to a decrease in the length of the working area of the die, which in turn will favorably affect the friction conditions in the deformation zone. It has also been established that a decrease in the value of a single strain creates more favorable conditions for the stress-strain state of the tool, namely, it leads to a decrease in the negative effect of contact stresses.

Key words: drawing, steel rods, stress-strain state, tool, finite element modeling.

Ссылка на статью:

К анализу напряжённо-деформированного состояния инструмента при волочении шестигранного профиля / Л.М. Тухветова, А.Ю. Столяров, А.Г. Корчунов, Е.М. Огнева, Д.В. Константинов // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 34-38.
Tukhvetova L.M., Stolyarov A.Yu., Korchunov A.G., Ogneva E.M., Konstantinov D.V. Analysis of the stress-strain state of the tool during hexagonal profile drawing. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 34-38.

УДК 621.78-98

Сухоносова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАРАМЕТРА ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Аннотация. В статье рассмотрены основные этапы идентификации статических и динамических свойств параметра процесса автоматического регулирования давления в рабочем пространстве методической печи. Сложность определения значений параметров управляемого процесса вызвана несколькими факторами: непрерывностью работы печей; невозможностью проведения активных экспериментов для определения действительных характеристик: на давление в печи влияет открытие заслонок для загрузки и выгрузки металла. Проведен анализ экспериментальных данных, получена аналитическая статическая характеристика зависимости давления в печи от положения шиберов в дымоходе. Предложено три варианта моделирования динамики процесса. Параметры моделей определялись графическим способом, методом Орманса и методом оптимизации с помощью надстройки MS Excel «поиск решения». Проведен сравнительный анализ точности моделирования динамических свойств управляемого параметра с использованием интегрального квадратичного критерия. Представлены результаты расчетов параметров типового контура регулирования давления в печи. Полученная модель позволяет проводить компьютерные эксперименты по исследованию поведения систем автоматического регулирования давления в рабочем пространстве печи для разных начальных условий, выбирать в соответствии с поставленной задачей оптимальные способы и законы регулирования.

Ключевые слова: методическая печь, давление в печи, идентификация, математическая модель, динамические параметры объекта, регулирование давления в печи, метод Орманса

Введение

Для эффективного автоматического управления технологическим процессом необходимо иметь не только точную и достоверную информацию о текущем состоянии технологического объекта, но и математическое описание, иначе говоря, модель объекта управления. Одна из основных задач автоматического управления заключается в подборе параметров настройки регулятора под конкретный технологический объект с заданными ограничениями и известными режимами работы [1]. Для облегчения расчета настроек регулятора в настоящее время используется математическое моделирование, а для создания математической модели необходимо определить динамические параметры объекта.

Сложность создания математической модели непрерывного технологического процесса, которым является нагрев металла перед прокаткой в методических печах, обуславливается тем, что по технологии нет возможности подавать тестирующие воздействия для снятия экспериментальных статических характеристик или кривых разгона [2]. В работе рассмотрена идентификация параметров объекта системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве методической печи стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» в ситуации отсутствия возможности проведения активных экспериментов.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные по изменению давления в рабочем пространстве нагревательной печи и положения шиберов в дымоходе

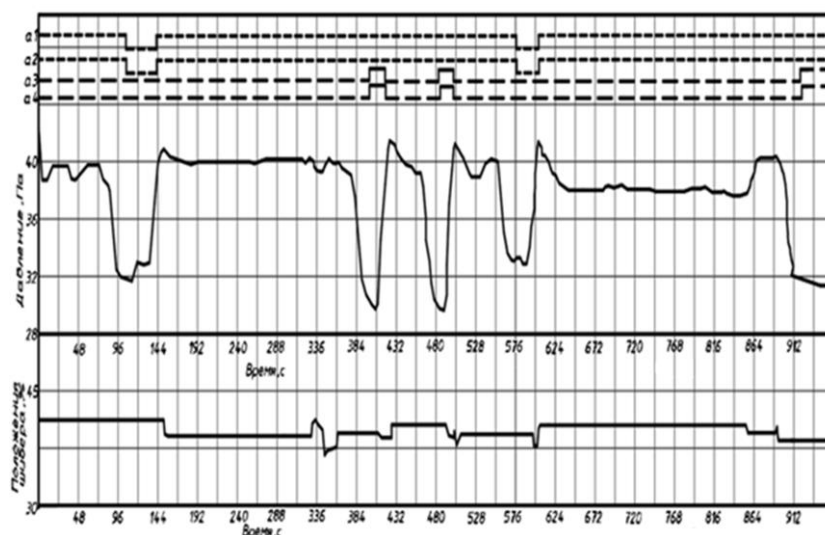


Рис. 1. Экспериментальные графики изменения параметров газодинамического режима методической печи стана 2000 ПАО «ММК»

© Сухоносова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С., 2023

для стана 2000 ПАО «ММК». На указанном рисунке сигналы a1 и a2 – это левая и правая заслонки со стороны загрузки печи. Высокому уровню сигналов a1, a2 соответствуют закрытые заслонки со стороны загрузки, а низкому уровню сигналов a1, a2 – открытие заслонок для загрузки металла в печь. Сигналы a3 и a4 – это левая и правая заслонки со стороны выгрузки. Высокому уровню сигналов a3, a4 соответствуют открытые заслонки для выгрузки металла, а низкому уровню – закрытые заслонки.

По рис. 1 очевидно, что основным возмущающим фактором, влияющим на давление в рабочем пространстве печи, является открытие заслонок на загрузке и выгрузке. Причем открытие окон со стороны выгрузки приводит к большему падению давления. Это вызвано тем, что датчики давления находятся в последней по ходу металла зоне печи.

При закрытых заслонках контур регулирования давления находится в автоматическом режиме работы. На время открытия заслонок автоматический режим работы регулятора блокируется, и расчет управляющего воздействия и изменение положения вала исполнительного механизма на шибере в дымовом тракте приостанавливаются и остаются такими же, какими были до открытия заслонок. Через 5–10 с после закрытия заслонок вновь включается автоматический режим работы контура.

Математическое моделирование статических и динамических свойств объекта управления

Для определения динамических параметров объекта управления был выделен участок на предпоследней минуте наблюдений (см. рис. 1). На указанном участке не было влияния возмущающих факторов, и управляющее воздействие X изменилось практически ступенчато и оставалось постоянным на всем протяжении роста управляемой величины Z . Поэтому переходный процесс на указанном участке аналогичен кривой разгона, а значит, можно выполнить графические построения для определения динамических параметров объекта (рис. 2).

Динамические параметры объекта, определенные графически: время запаздывания $\tau_3 = 2,5$ с, постоянная времени $T_0 = 6$ с, коэффициент передачи объекта $K_{об} = 2,98/(-1,16) = -2,57 \text{ \%}/\text{Па}$ [3].

Для моделирования переходных процессов в контуре автоматического управления необходимо задать статическую характеристику объекта, отражающую зависимость между входной управляющей и выходной управляемой величиной в установившемся режиме работы [3].

Для получения соответствующих экспериментальных данных необходимо переходить на дистанционный режим работы и задавать различные по величине тестовые воздействия, что невозможно при принятом режиме работы на непрерывном агрегате, коим является методическая нагревательная печь. Множество экспериментальных точек для расчета

статической характеристики находятся в небольшой окрестности точки, соответствующей номинальному, принятому на производстве режиму работы (см. рис. 1). Поэтому статическую характеристику рассчитали аналитическим путем, что для задач моделирования работы контура управления и расчета настроек регулятора будет вполне достаточно.

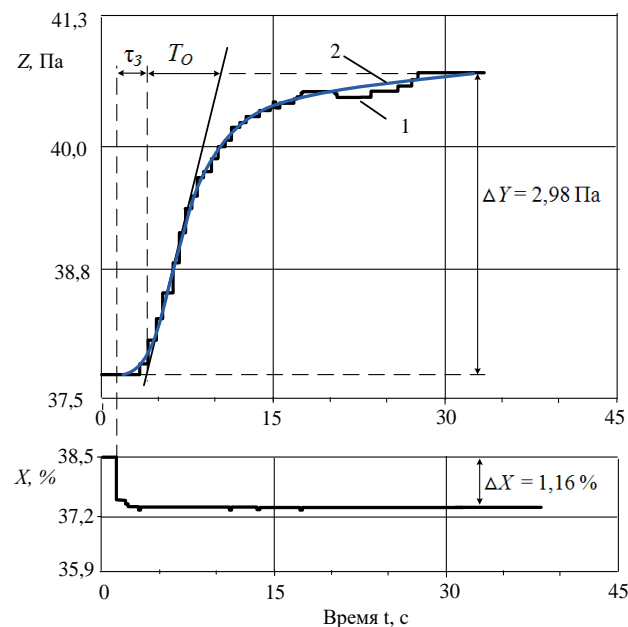


Рис. 2. Экспериментальная кривая разгона: 1 – экспериментальные данные; 2 – сглаженная кривая

Известно, что при открытии шибера дымохода давление в рабочем пространстве печи уменьшается нелинейно и может быть описано полиномом третьей степени, о чем свидетельствуют работы [2, 4–9]. Максимальное избыточное давление не превышает значения 100–120 Па, а в нормальном режиме работы держится на уровне 25–45 Па для данной методической печи. В работе была принята статическая характеристика следующего вида:

$$Y(X) = -0,00029X^3 + 0,0606X^2 - 4,584X + 140,42.$$

Динамические свойства смоделируем последовательным соединением инерционного звена с постоянной времени T_M и звеном запаздывания с временем τ_M . Переходная функция модели первого порядка $h_1(t)$ с запаздыванием примет следующий вид:

$$h_1(t) = \begin{cases} Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X \left(1 - e^{-(t-\tau_M)/T_M} \right), & \text{при } t \geq \tau_M \\ Z(0), & \text{при } t < \tau_M, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔX – приращение входной величины; $Z(0)$ – значение выходной величины в момент подачи управляющего воздействия (см. рис. 2).

Параметры модели определим из двух условий [3]:
 – в точке перегиба переходной характеристики значения выходного сигнала модели и объекта должны совпадать: $h_1(t_k) = Z(t_k)$, где k – точка перегиба;

– в точке k скорость изменения выходного сигнала модели и объекта должны совпадать и быть максимальными для данного процесса: $dZ(t_k)/dt = dh_1(t_k)/dt$.

Для получения второго уравнения из (1) определим скорость изменения выходного сигнала модели при $t \geq \tau_M$:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{K_{об} \Delta X}{T_M} e^{-(t-\tau_M)/T_M}. \quad (2)$$

Введем дополнительный коэффициент d как отношение двух отрезков:

$$d = \frac{Z(t_k) - Z(0)}{Z(t_s) - Z(0)}, \quad (3)$$

где t_s – установившиеся значения выходной величины.

Постоянная времени модели T_M определится

$$T_M = T_{об} (1-d), \quad (4)$$

а время запаздывания τ_M :

$$\tau_M = t_k + T_M \ln(1-d). \quad (5)$$

Максимальная скорость изменения выходной величины в момент времени $t_k = 6,5$ с равна $dZ(t_k)/dt = 0,399$ Па/с, промежуточный параметр $d = 0,47$ и параметры модели $\tau_M = 4,47$ с и $T_M = 3,15$ с. Если максимальная скорость $dZ(t)/dt$ сохраняется на значительном промежутке времени, то точку k следует выбрать в начале данного промежутка.

Представим динамические свойства объекта последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 . Переходная функция модели $h_2(t)$ в этом случае при $t > 0$ примет вид

$$h_2(t) = Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X (1 + C_1 e^{-t/T_1} + C_2 e^{-t/T_2}), \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, определяются как

$$C_1(t) = \frac{T_1}{T_2 - T_1}, \quad C_2(t) = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (7)$$

Для определения параметров T_1 и T_2 воспользуемся методом Орманса [10, 11]. По экспериментальной переходной характеристике определили точку N , соответствующую 70%-му диапазону изменения выходного сигнала: $t_N = 9$ с и $Z_N = 39,8$ Па. Значению по номограмме Орманса $Y_n = 0,23$ соответствует величина $Z^* = 0,35$. Параметры модели второго порядка равны $T_1 = 5,06$ с и $T_2 = 2,44$ с. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

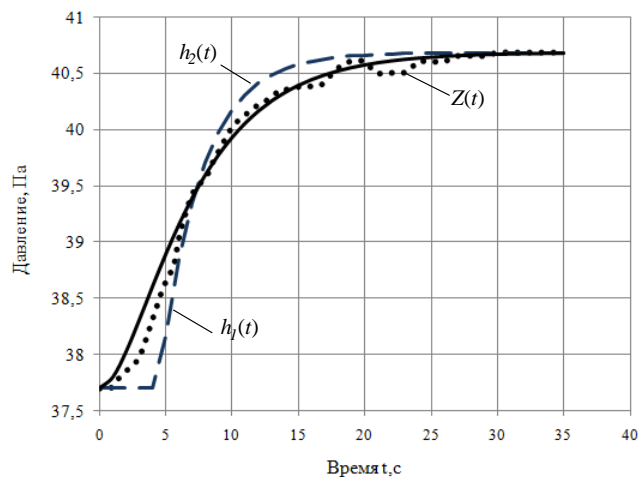


Рис. 3. Сравнительный анализ моделей $h_1(t)$ и $h_2(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Обе полученные модели недостаточно точно аппроксимируют экспериментальные данные. Подберем T_1 и T_2 , используя надстройку MS Excel «поиск решения». Целевую функцию при поиске решения определим по интегральному квадратичному критерию I :

$$I = \frac{1}{n-1} \sum_i [Z(t_i) - h_j(t_i)]^2, \quad (8)$$

где j – номер математической модели; $Z(t_i)$ – экспериментальные значения в моменты времени t_i ; $h_j(t_i)$ – расчетные значения для j -модели; i выбираем от 0 до n таким образом, чтобы t_n было больше или равно времени окончания переходного процесса.

Для модели первого порядка с запаздыванием $h_3(t)$ получили $\tau_M = 5,41$ с и $T_M = 2,76$ с. Для модели второго порядка $h_4(t)$ $T_1 = T_2 = 3,97$ с. Полученные графики представлены на рис. 4 и ближе подходят к экспериментальным данным, чем на рис. 3.

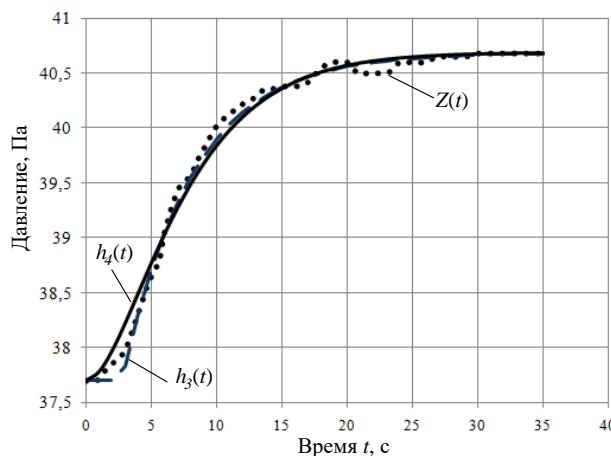


Рис. 4. Сравнительный анализ моделей $h_3(t)$ и $h_4(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Для получения точной модели объекта совсем не обязательно пользоваться машинными методами под-

бора подходящих параметров объекта. На рис. 5 приводятся графики, полученные при использовании модели второго порядка $h_5(t)$ с параметрами, определенными графически по рис. 2 и модели $h_6(t)$.

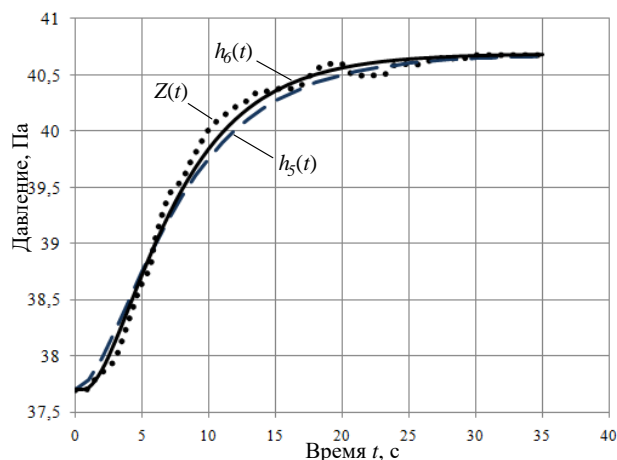


Рис. 5. Сравнительный анализ моделей $h_5(t)$ и $h_6(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Модель $h_6(t)$ – это модель второго порядка $h_2(t)$ с добавлением звена транспортного запаздывания:

$$h_6(t) = Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X \left(1 + C_1 e^{-\frac{t-\tau_ч}{T_1}} + C_2 e^{-\frac{t-\tau_ч}{T_2}} \right), \quad (9)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 определяются по (7), время транспортного запаздывания $\tau_ч = 0,62$ с определено подбором.

Результаты исследования

Результаты расчета интегральной квадратичной ошибки по формуле (8) для всех рассмотренных в работе моделей представлены в табл. 1 для $n = 35$ с шагом $\Delta t = 1$ с.

Таблица 1

Анализ точности моделей давления в рабочем пространстве печи

Номер модели	Параметры модели	I по формуле (8)
$h_1(t)$	По точке перегиба: $T_1 = 3,15$ с; $\tau_3 = 4,47$ с	0,104
$h_2(t)$	Метод Орманса: $T_1 = 5,06$ с; $T_2 = 2,44$	0,085
$h_3(t)$	Поиск решения: $T_1 = 5,41$ с; $\tau_3 = 2,76$ с	0,053
$h_4(t)$	Поиск решения: $T_1 = T_2 = 3,97$ с	0,080
$h_5(t)$	Графический метод: $T_1 = 6$ с; $T_2 = 2,5$ с	0,040
$h_6(t)$	Три звена: $T_1 = 5,06$ с; $T_2 = 2,44$ с; $\tau_ч = 0,62$ с	0,047

Как видим, для рассмотренной кривой разгона наилучшее приближение дает модель второго порядка с графически определенными параметрами $h_5(t)$ и модель с параметрами, рассчитанными по методу Орманса, с добавлением звена транспортного запаздывания $h_6(t)$.

Рассчитанные статические и динамические параметры использовали для моделирования существующей на производстве САУ давлением в рабочем пространстве печи. Моделирование типового контура с пропорционально-интегральным регулятором и исполнительным механизмом постоянной скорости проводилось по методикам, описанным в [11] для начальных значений X и Z , как и на рис. 2. В результате были подобраны следующие параметры настройки: коэффициент передачи регулятора 0,47 %/Па, время издрорма 5,7 с, скорость исполнительного механизма 1,67 %/с, зона нечувствительности 0,8 %. Оптимальный переходный процесс протекает без переуправления и занимает 28 с.

Модель объекта управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи позволяет проводить компьютерные эксперименты по исследованию поведения САУ для разных начальных условий, выбирать в соответствии с поставленной задачей оптимальные способы и законы регулирования. Возможно проводить исследования переходных процессов как для стандартных регуляторов, так и для нетипичных способов управления, например с применением нечеткой логики [9, 12].

Заключение

При анализе полученных математических моделей переходного процесса и экспериментальных данных в САУ давлением в рабочем пространстве нагревательной печи можно сделать вывод, что динамические параметры объекта подобраны достаточно точно. Усложнение способов расчета параметров модели не приводит к повышению точности моделирования поведения объекта и системы автоматического регулирования.

Для моделирования работы контура автоматического управления в области номинальных режимов достаточно иметь аналитическую статическую характеристику. Полученная модель объекта управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи может быть использована для синтеза и расчета оптимальных настроек регуляторов разных типов.

Список литературы

1. Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилева Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 63–69.
2. Парсункин, Б.Н., Самарина И.Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического

- режима нагревательной методической печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 55–60.
3. Сеславин А.И. Теория автоматического управления. Линейные, непрерывные системы. М.: ИНФРА-М, 2022. 314 с.
 4. Свитек А.С. Разработка алгоритма идентификации параметров моделей объектов на примере системы управления температурой // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 140–150.
 5. Безяев В. С., Макарычев П.П. Идентификация параметров моделей объектов методом регрессионного анализа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 1(53). С. 19–27.
 6. Идентификация параметров динамических моделей апериодических объектов / А.М. Шубладзе, А.Д. Модяев, С.В. Федоров, С.И. Кузнецов // Проблемы управления. 2011. № 6. С. 14–20.
 7. Фомин А.В. Жуков П.И. Построение математической модели давления в рабочем пространстве многозонной печи // Промышленные АСУ и контроллеры. 2022. № 1. С. 19–25.
 8. Самарина И.Г., Мухина Е.Ю., Бондарева А.Р. Статистическая модель газодинамического режима методической печи // Современные проблемы науки и пути их решения: сборник научных статей. Вып. 28. В 3 ч. Ч.3. Уфа, 2016. С. 56–59.
 9. Моделирование управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечёткой логики / М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2(5). С. 35–45.
 10. Дубровский И.И., Лукьянов В.Л. Алгоритм реализации метода Орманса для описания объектов управления // Научное обеспечение инноваций: сб. докладов. Т. 6. Белгород, 2014. С. 173–176.
 11. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 272 с.
 12. Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечеткой логики / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова, М.И. Васильев // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1(7). С. 29–34.

Сведения об авторах

Сухоносова Татьяна Геннадьевна – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tgobuhova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1024-1612>

Яруллин Арслан Рамилович – студент кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: arslanarullin12@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2049-3434>

Новак Владимир Сергеевич – студент кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vladimir.novak.02@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE PRESSURE PARAMETER IN THE WORKING SPACE OF A HEATING FURNACE

Sukhonosova Tatiana G. – Assistant Professor (Eng.), Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tgobuhova@gmail.com

Yarullin Arslan R. – bachelor degree student of Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: arslanarullin12@gmail.com

Novak Vladimir S. - bachelor degree student of Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vladimir.novak.02@mail.ru

Abstract. The article considers the main stages of identification of static and dynamic properties of the parameter of the process of automatic pressure control in the working space of a heating furnace. The difficulty of determining the values of the parameters of the controlled process is caused several factors: by the continuity of the furnaces, the impossibility of conducting active experiments to determine the actual characteristics of the object, the furnace pressure is affected by the opening of flue dampers for loading and unloading metal. The analysis of experimental data is carried out, the analytical static characteristic of the object is dependence of the pressure in the furnace on the station of chimney slide valve. Three variants of modeling the dynamics of the controlled process are proposed: first-order inertia with delay, second-order inertia with delay and without delay. The parameters of the models were determined graphically, by the Ormans method and by the optimization method using the MS Excel add-in "solution search". A comparative analysis of the accuracy of modeling the dynamic properties of the controlled parameter using the integral quadratic criterion was carried out. The results of calculations of parameters of a typical pressure control circuit in a heating furnace are presented. The resulting model makes it possible to conduct computer experiments to study the behavior of automatic pressure control systems in the working space of the furnace for different initial conditions, to choose optimal methods and laws of regulation in accordance with the task.

Keywords: methodical furnace, furnace pressure, identification, mathematical model, dynamic objects parameters, furnace pressure control, Ormans method

Ссылка на статью:

Сухонослова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С. Идентификация динамических свойств параметра давления в рабочем пространстве методической печи // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 39-44.
Sukhonosova T.G., Yarullin A.R., Novak V.S. Identification of dynamic properties of the pressure parameter in the working space of a heating furnace. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 39-44.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)
Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-84-64.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «Теория и технология металлургического производства» («*Teoriâ i tehnologiâ metallurgiĉeskogo proizvodstva*») (Аббревиатура: **Teor. tehnol. metall. proizv.**) Периодичность издания – 4 раза в год.

Журнал зарегистрирован в Научной электронной библиотеке, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). ISSN 2311-5378. Не забывайте в библиографических ссылках статей указывать свои труды и труды Ваших коллег для повышения индекса научного цитирования и изданий в целом.

Журнал включает в себя следующие разделы:

1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.
3. Литейное производство.
4. Обработка металлов давлением.

Для публикации статьи в журнале необходимо представить *следующие материалы:*

- электронную версию статьи выслать по электронной почте;
- экспертные заключения о возможности опубликования от всех организаций, сотрудниками которых являются авторы статьи;
- контактный E-mail: , контактный телефон, почтовый адрес для получения экземпляра журнала;
- адрес редакции Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-85-18, E-mail: TТаPEoMP@mail.ru; ttmp@magtu.ru.
- лицензионный договор на передачу прав
- авторская справка

Авторам, представившим статьи для публикации, будет выслан один экземпляр журнала. Материалы, переданные в журнал, редакционной коллегией не возвращаются.

Статьи должны быть выполнены в текстовом редакторе MS Office Word 2007 и оформлены в соответствии со следующими требованиями:

- формат страницы – А4 (210x297мм), отступы: слева, справа и сверху по 18 мм, снизу – 20 мм; нумерация страниц снизу по центру;
- шрифт основного текста – Times New Roman размера 12 пунктов;
- межстрочный интервал – одинарный;
- отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 5 знаков (примерно 10 мм);
- формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается; размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов;
- горизонтальные страницы допускается оформить отдельно от вертикальных страниц статьи, они должны быть также формата А4;
- рисунки должны быть вставлены в текст;
- не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу;
- статья должна включать: УДК, авторов, название, аннотацию, ключевые слова, текст, список литературы, сведения об авторах.
- структура основной части статьи: введение, теория, результаты исследования, заключение. Пример оформления статьи приведен в **(Приложении 1)**.
- аннотация (*Abstracts*) (150-250слов), выполняется курсивом (аннотация должна быть логически выстроена);
- ключевые слова (*Keywords*) (5-15 основных терминов), выполняется курсивом;
- список литературы выполняется в соответствии с требованиями (пример оформления литературы приведен в **(Приложении 2)**);
- сведения об авторах (*Information about authors*) должны включать: Ф.И.О. полностью, должность, место работы, ученая степень, ученое звание, контактный телефон, электронный и почтовый адреса;
- в конце статьи дается английская версия фамилий, инициалов авторов, названия статьи, авторского резюме, ключевых слов, сведений об авторах. **За качество перевода несут ответственность авторы статьи. Использование электронного переводчика не допустимо.**

Редакционная коллегия оставляет за собой право исправлять орфографические ошибки без согласования с авторами.

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА УЗКИХ ГРАНЕЙ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ*Аннотация. 150-250 слов**Ключевые слова: 5-15 основных терминов*

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

IMPROVING THE QUALITY OF NARROW FACES CONTINUOUS SLAB BILLET*Abstract. 150-250 words**Keywords: 5-15 basic terms**References:**Information about authors**Пример оформления литературы***Список литературы**

1. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1 (41). С. 27 – 30.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Влияние температуры разливаемого металла на качество непрерывнолитого сляба и листового проката // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. Вып.12. С. 68–74.
3. Пат. 2061756 РФ, МПК С 21 В 7/00. Доменная печь / Курбацкий М.Н., Манаенко И.П., Монастырков В.П. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Товарищество с ограниченной ответственностью «Техника и технология» (RU). № 9305232/02; заявл. 18.11.93; опубл. 10.06.96, Бюл. № 16. 4 с.: ил.
4. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Севернюк В.В. Работа воздушных фурм доменных печей. Днепропетровск: Пороги, 1997. 120 с.
5. Лукашов Г.Г., Савелов Н.И., Плискановский С.Т. Опыт работы доменных печей на воздушных фурмах различного диаметра // Сталь. 1972. № 7. С. 587-589.
6. Максимов Е.В., Альжанов М.К., Ержанов У.К. Влияние параметров фурмы на перепад газа в доменной печи. // Тез. докл. III Международного конгресса доменщиков. Новокузнецк, 1995. С.120.

На английском языке: Авторы (транслитерация). Название статьи на английском языке. Название журнала курсивом (транслитерация) [Название журнала на английском языке (если есть)]. Выходные данные на английском языке, либо цифровые.

1. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using “Mini whale” effect. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1(37), pp. 24-26.

Ответственный по изданию журнала: канд. техн. наук. Тютеряков Н.Ш.

По всем вопросам обращаться по тел.: +7 (3519)29-85-18, 89049410710, либо по E-mail: ttmp@magtu.ru