

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 2 (57) 2026

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 Metallurgy 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. Емелюшин – 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. Шещуков – 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 материалообработки, 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», 2026

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: TTaPEoMP@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 30.06.2026. Заказ 191. Тираж 500 экз.

Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 2 (57) 2026

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. Ostrovski – 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,
Jabalpur, 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”, 2026

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 30.06.2026. Order 191. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ

И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....4

Женин Е.В., Шаповалов А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ИЗВЕСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА.....4

Щитиков А.А., Засов Н.Е., Столяров А.М., Юдин Д.В.

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИВКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО ТИПА.....11

Харченко А.С., Павлов А.В., Сибгатуллин С.К., Харченко Е.О., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Вакуленко А.И.

ДЕЙСТВИЕ НА ХОД ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ОКАТЫШЕЙ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ВЗАМЕН КОНЦЕНТРАТАМ СКАРНОВОГО ТИПА, ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ДОЛЕ В ШИХТЕ.....16

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....24

Зубков А.А., Туркин И.С., Феоктистов Н.А.,

Ахметов И.И., Кузяев Е.А., Юмабаев А.А.,

Штыленко Е.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК МЕТОДОМ ЛГМ.....24

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....32

Касаткина Е.Г., Мезин И.Ю., Понурко И.В.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ПЛАТИНИТОВОЙ ПРОВОЛОКИ 32

ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА40

Конев С.В., Осипова О.А., Кенарь Е.В., Козлов Р.А.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛЯХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....40

ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА 48

Лаговская Е.В., Фидаров Б.Ф., Глубокова Л.Г.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГУСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....48

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS

Zhenin E.V., Shapovalov A.N.

THE INFLUENCE OF LIME SIZE ON THE AGGLOMERATION PROCESS RESULTS

Shchitikov A.A., Zasov N.E., Stolyarov A.M., Yudin D.V.

PECULIARITIES OF CASTING LOW-CARBON ALLOY STEEL ON SLABS OF CURVED TYPE

Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Sibagatullin S.K., Kharchenko E.O., Sysoev V.I., Magasumov G.Z., Vakulenko A.I.

EFFECT ON THE COURSE OF THE BLAST FURNACE PROCESS OF PELLETS PRODUCED FROM FERROUS QUARTZITES INSTEAD OF SKARN-TYPE CONCENTRATES, AT A NOMINAL SHARE IN THE CHARGE

FOUNDRY

Zubkov A.A., Turkin I.S., Feoktistov N.A., Akhmetov I.I., Kuzyaev E.A., Yumabayev A.A., Shtylenko E.D.

RESEARCH OF ALTERNATIVE MODEL MATERIALS FOR CASTING BY THE LGM METHOD

PROCESSING OF METALS BY PRESSURE

Kasatkina E.G., Mezin I.Yu., Ponurko I.V.
**FORMATION OF CONSUMER PROPERTIES
PLATINITE WIRE**

**METALLURGICAL PRODUCTION
EQUIPMENT**

Konev S.V., Osipova O.A., Kenar E.V., Kozlov R.A.
**COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE
EFFICIENCY OF DETERMINING STRESSES
IN MODELS OF SOLID BODIES
BY THE POLARIZATION-OPTICAL METHOD**

**AND THE FINITE ELEMENT
METHODS**

**MAN-MADE WASTE OF METALLURGICAL
PRODUCTION**

Lagovskaya E.V., Fidarov B.F., Glubokova L.G.
**PROSPECTIVE DIRECTIONS AND METHODS
FOR IMPROVING THE EFFICIENCY
OF THICKENING EQUIPMENT IN MODERN
MINING AND METALLURGICAL PRODUCTION
CONDITIONS**

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.1

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-4-10)

Женин Е.В., Шаповалов А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ИЗВЕСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. Представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния крупности извести, вводимой в смесь железорудных компонентов агломерационной шихты, на показатели аглопроцесса и качество агломерата.

Установлено, что при относительно постоянных условиях проведения экспериментов показатели окомкования, аглопроцесса и прочности агломерата при использовании более крупной извести (10-20 мм) ухудшаются. Полученные результаты объясняются, главным образом, повышением неравномерности распределения извести по объему шихты, что отражается на результатах окомкования (увеличении доли крупных фракций 5-10 и +10 мм) и снижении прочности гранул (как в сыром состоянии, так и в процессе спекания). Прямым следствием является повышенная усадка слоя спекаемой шихты и падение газопроницаемости, что отражается как на вертикальной скорости спекания и удельной производительности, так и на тепловых условиях спекания и прочностных показателях агломерата.

Ключевые слова: агломерационная шихта, агломерационный процесс, крупность извести, результаты окомкования, показатели спекания, качество агломерата

Введение

В настоящее время на металлургических предприятиях России и мира агломерат производят с применением извести [1-4], наличие которой в агломерационной шихте повышает её комкуемость, способствуя упрочнению гранул и увеличению газопроницаемости слоя спекаемой шихты, следствием чего является повышение скорости спекания и производительности агломашин.

В зависимости от шихтовых условий, свойств и технологии введения извести существует оптимальный её расход в агломерационную шихту, который для различных предприятий составляет от 20 до 80 кг/т [1-11]. При этом эффективность использования извести зависит от её химического и гранулометрического состава, способа введения и расхода, а также гранулометрического и вещественного состава шихты и условий её подготовки к спеканию. Поэтому в различных шихтовых и технологических условиях повышение удельной производительности агломашин при увеличении расхода извести может изменяться от 1,5 до 6 отн.% [1-11] на каждые 10 кг/т дополнительно введенной извести. Кроме интенсификации аглопроцесса, увеличение расхода извести ведет к снижению расхода известняка, что позволяет сократить расход твердого топлива на 0,5-1,5% на каждые 10 кг/т дополнительно введенной извести [1-3]. Кроме того, введение извести в концентрат на горно-обогатительных комбинатах позволяет решить задачу по предотвращению смерзания влажных концентратов при их транспортировке в зимних условиях [12-14].

Таким образом, оптимальные условия использования извести подбираются в каждом

конкретном случае индивидуально, с учетом качественных характеристик извести (крупности и степени обжига), получаемого эффекта и дополнительных затрат.

Постановка задачи исследования

Качество извести определяется её способностью к образованию мельчайших (менее 10 мкм) частиц гидрата, обладающих вяжущими свойствами и адсорбирующих на своей поверхности воду. Вяжущие свойства извести определяются продолжительностью гашения и выходом при гашении известкового теста. В свою очередь, указанные факторы зависят, главным образом, от степени завершенности процесса диссоциации карбоната кальция (степени обжига извести), то есть содержания активного СаО [2, 5, 15]. При этом при постоянстве состава известняка качество извести, оцениваемое в первую очередь содержанием активного СаО, определяется технологическими возможностями обжигового агрегата, в зависимости от которого содержание активного СаО может колебаться от 60-70% при использовании конвейерных обжиговых машин до 85% и более при обжиге извести во вращающихся печах и печах кипящего слоя [3]. Поэтому на практике добавка извести невысокого качества в количестве 4-5% от массы шихты (50-60 кг/т спека) позволяет повысить производительность агломашин максимум на 12-15% [2, 11, 15, 16], в то время как применение высококачественной извести с расходом до 6% (до 70 кг/т спека) обеспечивает практически пропорциональное увеличение производительности аглопроцесса на 40-45% [1-5] (до 6% на каждые дополнительные 10 кг/т извести). При этом дальнейшее увеличение расхода извести мало

влияет на прирост производительности, что, с одной стороны, связано с достижением предела по упрочнению гранул и повышению газопроницаемости, а с другой – обусловлено ухудшением температурно-временных условий формирования агломерата и снижением выхода годного.

Другим, не менее важным, показателем качества извести является её крупность. Данные о влиянии начальной крупности извести на показатели аглопроцесса и качественные характеристики агломерата свидетельствуют о прогрессивном их улучшении с уменьшением крупности [1, 2, 5-7, 17]. Кроме того, агломерат, полученный с использованием крупнокусковой извести (до 10 мм и более), включает значительное количество неусвоенных расплавом частиц (крупностью 1-1,5 мм), что негативно сказывается на его прочностных свойствах и атмосферной стойкости. При этом при выборе крупности извести приходится учитывать технологические ограничения обжигового агрегата, а также затраты на дробление. Кроме того, дробление известняка и извести сопряжено с пылеобразованием. Таким образом, применение извести без учета её качества не только не обеспечивает ожидаемого роста производительности и качества агломерата, но и может негативно отразиться на показателях производства. Поэтому целью настоящей работы является изучение влияния крупности извести, вводимой в смесь железорудных компонентов агломерационной шихты, на показатели аглопроцесса и качество агломерата при спекании руд и концентратов Курской магнитной аномалии (КМА).

Методика исследования

В соответствии с целью настоящего исследования спланирован комплекс лабораторных экспериментов, предусматривающий проведение опытов по окомкованию и спеканию агломерационной шихты с использованием извести различной крупности (0-10 и 10-20 мм), вводимой в смесь железорудных компонентов агломерационной шихты с расходом 45 кг/т, что соответствует современной практике потребления извести [1-11, 18-22]. Смешивание железорудных материалов с известью осуществляли в барабанном окомкователе в течение 3 мин (до однородного цвета) с последующей

выдержкой штабеля в течение 3 сут при температуре 25°C в герметичной таре.

Лабораторные эксперименты проводили с использованием материалов, состав которых представлен в табл. 1.

Состав опытной шихты рассчитывали исходя из получения агломерата с основностью по отношению CaO/SiO_2 на уровне 1,9 ед. при содержании MgO – 2,1%. Соотношение концентрата и аглоруды в рудной смеси – 80 и 20% соответственно. Расход коксика поддерживали на постоянном уровне, обеспечивающем содержание углерода в шихте на уровне 3,7% и получение агломерата с содержанием FeO на уровне 11-12%. Подготовку шихты к спеканию проводили в идентичных условиях по времени операций смешивания, окомкования и увлажнения с оценкой влажности окомкованной шихты и результатов окомкования: гранулометрический состав и прочность гранул на раздавливание в сыром состоянии и после нагрева до 300°C. Влажность окомкованной шихты доводили до оптимального уровня, обеспечивающего максимальную газопроницаемость слоя спекаемой шихты (при использовании холодной шихты). Спекание проводили в аглочаше диаметром 210 мм при поддержании постоянной высоты слоя шихты на уровне 500 мм. По завершении аглопроцесса и охлаждения спека до 100°C, производили его выгрузку из чаши с определением массы спека, гранулометрического состава, прочности на сбрасывание и во вращающемся барабане, а также химического состава агломерата. Таким образом обеспечивались сопоставимые условия окомкования и спекания, что позволяет проводить объективную оценку результатов исследования.

Результаты лабораторных экспериментов

Усредненные условия и результаты лабораторных экспериментов сведены в табл. 2-4. Представленные данные свидетельствуют о сопоставимых условиях проведения экспериментов, что подтверждается поддержанием постоянной влажности аглошихты, стабильными тепловыми условиями спекания (оценивались по максимальной температуре газов в конце спекания и содержанию FeO в агломерате) и низкими отклонениями от установленных параметров по основности и содержанию MgO в агломерате.

Таблица 1

Химический состав шихтовых материалов

Содержание, %	Концентрат	Руда	Доломит	Известняк	Известь
Fe	67,40	53,90	0,70	0,92	1,55
SiO_2	4,38	8,64	2,54	1,27	1,85
CaO	1,23	4,37	30,9	53,07	90,80
Al_2O_3	0,25	0,80	0,58	0,50	0,76
MgO	0,30	0,44	19,4	0,61	1,08
S	0,023	0,036	0,011	0,010	0,034
P_2O_5	0,025	0,046	0,022	0,040	0,051
П.п.п.	0,56	9,12	45,46	42,36	3,06

Таблица 2

Усредненные результаты окомкования

Наименование показателя		Значения показателей при крупности извести	
		0-10 мм	10-20 мм
Влажность аглошихты, %		7,64	7,67
Содержание классов, %	+10 мм	3,8	5,1
	5-10 мм	30,9	32,6
	3-5 мм	31,0	30,4
	1-3 мм	25,5	23,1
	0-1 мм	8,7	8,8
Средний диаметр гранул, мм		4,59	4,80
Прочность сырых гранул, гр.		142,9	138,2
Прочность сухих гранул, гр.		193,8	176,1

Таблица 3

Усредненные параметры и результаты спекания

Наименование показателя		Значения показателей при крупности извести	
		0-10 мм	10-20 мм
Относительная усадка слоя, %		11,1	11,3
Разрежение в вакуум-камере, кПа	до зажигания	8,7	8,6
	после зажигания	11,6	12,3
	в конце спекания	8,2	8,1
Максимальная температура в вакуум-камере, °С		425	413
Продолжительность спекания, мин		18,86	19,22
Скорость спекания, мм/мин		26,52	26,01
Выход годного (+5 мм) из спека после сбрасывания (по ГОСТ 25471-82), %		84,9	83,2
Производительность по годному агломерату (после сбрасывания), т/м ² в час		2,000	1,918

Таблица 4

Усредненные показатели гранулометрического состава, механической прочности и химического состава агломерата

Наименование показателя		Значения показателей при крупности извести	
		0-10 мм	10-20 мм
Фракционный состав агломерата после сбрасывания по ГОСТ 25471-82, %	+40 мм	22,11	19,74
	20-40 мм	20,32	20,19
	10-20 мм	24,08	23,09
	5-10 мм	18,38	20,15
	0-5 мм	15,11	16,84
Прочность по ГОСТ 15137-77, %	Удар	70,94	68,92
	Истирание	4,86	5,45
Фактический состав агломерата, %	Fe общ.	57,34	57,40
	FeO	12,35	11,95
	MgO	2,12	2,10
Основность по отношению CaO/SiO ₂ , ед.		1,92	1,91

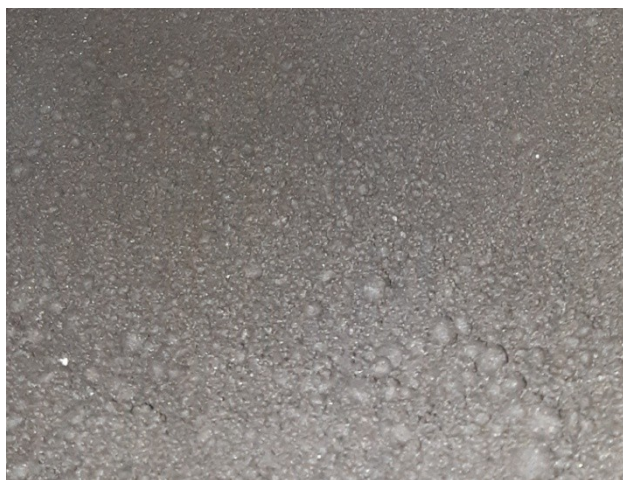
На основании полученных результатов сделаны выводы по окомкованию и спеканию агломерационной шихты с применением извести различной крупности.

Выводы по результатам окомкования. Оценка гранулометрического состава окомкованной шихты при использовании извести различной крупности

показывает, что применение более крупной извести ведет к росту доли фракций 5-10 и +10 мм при одновременном снижении доли фракций 1-3 и 3-5 мм. Указанные изменения гранулометрического состава агломерационной шихты приводят к увеличению среднего диаметра гранул с 4,59 до 4,80 мм.

Влияние крупности извести на гранулометрический состав окомкованной шихты можно визуально оценить по фотоматериалам (рис. 1), на которых представлены характерные

фотографии шихты, полученной при использовании извести крупностью 0-10 мм (рис. 1, а) и 10-20 мм (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Характерные фотографии окомкованной шихты при использовании извести крупностью 0-10 мм (а) и 10-20 мм (б)

Кроме явного увеличения доли крупных фракций, в агломерационной шихте с использованием крупной извести встречаются куски гашеной извести, не вовлеченной в процесс окомкования. Последнее свидетельствует о снижении равномерности распределения извести по объему шихты, что ухудшает эффективность работы извести в качестве интенсификатора окомкования. Соответственно, шихта с меньшим количеством извести имеет пониженную комкуемость, однако это не приводит к увеличению доли мелочи (0-1 мм), а отражается в первую очередь в снижении средней прочности гранул. Так, средняя прочность на раздавливание сырых гранул снизилась с 142,9 до 138,2 гр., а «горячая» прочность гранул (после нагрева до 300°C) уменьшилась 193,8 до 176,1 гр. Подтверждением более высокой неравномерности распределения извести крупностью 10-20 мм по объему шихты является увеличение относительного колебания прочности гранул до 35 % (от средней величины), в то время как в экспериментах с известью 0-10 мм колебания прочности не превышали 20 отн. %.

Таким образом, основной причиной снижения средней прочности гранул шихты при использовании более крупной извести является уменьшение однородности распределения гидратированной извести по объему шихты. Это приводит к формированию малопрочных гранул с недостатком частиц коллоидных размеров, обеспечивающих пластичность шихты и плотную упаковку частиц в гранулах. А упрочнение гранул с избытком гидратов кальция ограничивается лабораторными условиями, а

также постепенным приближением к максимальной плотности упаковки частиц в гранулах.

Выводы по результатам спекания. Влияние крупности извести на результаты окомкования шихты отразилось на параметрах и показателях спекания. Так, увеличение среднего диаметра гранул и количества крупных фракций в окомкованной шихте при незначительном снижении прочности сырых гранул привело к повышению газопроницаемости слоя шихты до зажигания, о чем говорит уменьшение средней величины разрежения под колосниковой решеткой с 8,7 до 8,6 кПа. Однако после зажигания газопроницаемость слоя спекаемой шихты с крупной известью ухудшилась, о чем свидетельствует рост разрежения после зажигания с 11,6 до 12,3 кПа.

Основной причиной потери газопроницаемости в процессе спекания является снижение прочности гранул, следствием чего является уплотнение слоя шихты в результате воздействия динамического и статического давления газового потока и собственного веса шихты. Это подтверждается увеличением относительной усадки слоя шихты. Результатом уплотнения слоя шихты и падения газопроницаемости является снижение вертикальной скорости спекания с 26,5 до 26 мм/мин.

Повышенная усадка опытной шихты, приводящая к снижению газопроницаемости спекаемого слоя, приводит к неравномерности распределения газового потока и тепловых условий спекания по сечению агломерируемой шихты. Кроме того, из-за повышения доли крупных фракций в окомкованной шихте с использованием крупной

известии увеличивается требуемое время для её прогрева и, соответственно, ухудшаются условия по вовлечению крупных гранул шихты в расплав. Все это в совокупности приводит к образованию в спекаемом слое участков непропека, обладающих пониженной прочностью, следствием чего является уменьшение выхода годного (после сбрасывания) и увеличение содержания мелочи. Так, выход годного агломерата из спека после сбрасывания уменьшился с 84,9 до 83,2 %.

Прямым следствием наблюдаемого уменьшения выхода годного и скорости спекания в экспериментах с более крупной известью является снижение удельной производительности по годному агломерату, которая составила в среднем 1,92 против 2 т/м² в час в условиях использованием мелкой извести.

Барабанная прочность агломерата. Результаты опытных спеканий показывают, что при использовании извести крупностью 10-20 мм холодная прочность агломерата ухудшилась:

- средняя прочность на удар снизилась с 70,94 до 68,92 %;

- истираемость выросла с 4,86 до 5,45 %.

Причины ухудшения показателей барабанной прочности обусловлены менее благоприятными условиями пропекаания агломерируемой шихты. Это связано, главным образом, с увеличением времени на прогрев более крупных гранул, результатом чего является неполное вовлечение спекаемой шихты в расплав и появление участков непропека.

Заключение

Сопоставление результатов лабораторных спеканий агломерационной шихты с применением извести различной крупности позволяет заключить, что при относительно постоянных условиях проведения экспериментов показатели окомкования, аглопроцесса и прочности агломерата при использовании более крупной извести (10-20 мм) ухудшаются. Полученные результаты объясняются, главным образом, повышением неравномерности распределения извести по объему шихты, что отражается на результатах окомкования (увеличении доли крупных фракций 5-10 и +10 мм) и снижении прочности гранул (как в сыром состоянии, так и в процессе спекания). Прямым следствием является повышенная уминка слоя спекаемой шихты и падение газопроницаемости, что отражается как на скорости спекания и производительности, так и на тепловых условиях спекания и прочностных показателях агломерата.

Поскольку процесс окомкования агломерационных шихт не поддается полному моделированию в лабораторных условиях, полученные в настоящем исследовании результаты необходимо рассматривать как ориентировочные, требующие уточнения в процессе опытно-промышленных испытаний. Вполне вероятно, что при

более интенсивном энергетическом воздействии на агломерируемую шихту в производственных условиях, негативные моменты с ухудшением результатов окомкования (и спекания), отмеченные в лабораторных условиях, будут проявляться в значительно меньшей степени.

Список источников

1. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. 400 с.
2. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
3. Фролов Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология. М.: Металлургиздат, 2016. 672 с.
4. Жилкин В.П., Доронин Д.Н. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация. / под общ. ред. Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. 292 с.
5. Применение извести на аглофабриках СССР. Обзорная информация / Смородинников А.В., Колесанов Ф.Ф., Климова Н.С. и др. М.: Черметинформация, 1978. Серия 3. Вып. № 2. С. 1-34.
6. Гурин П.И., Хлапонин Н.С., Осипенко А.М. Эффективность применения извести при агломерации шихты высокой основности // Сталь. 1981. № 9. С. 9-12.
7. Савельев С.Г., Чижилова В.М. Применение извести при окисковании железорудного сырья // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 1986. № 3. С. 2-14.
8. Совершенствование технологии агломерации мелкозернистых концентратов / Бургов В.Н., Мирко В.А., Головкин В.К., Кабанов Ю.А. // Металлург. 1985. № 6. С. 22-24.
9. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В. Совершенствование технологии использования извести в аглопроизводстве в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т.1. С.88-92.
10. Оптимизация расхода извести при вводе в аглошихту с целью повышения качества агломерата / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, О.А. Семенов и др. // Сталь. 2014. № 10. С. 7-9.
11. Исследование эффективности использования извести при производстве агломерата АО «Уральская Сталь» / Шаповалов А.Н., Зубов С.П., Майстренко Н.А., Берсенева И.С. // Сталь. 2017. № 6. С. 2-6.
12. Расчетно-теоретический анализ процесса профилирования известью железорудного концентрата / Пыхтеева К.Б., Тлеугабулов Б.С.,

- Волков Д.Н., Меламуд С.Г. // Черные металлы. 2016. № 4. С. 19-24.
13. Исследование возможности предотвращения смерзания концентрата путем его офлюсования / Федина В.В., Никитченко Т.В. Тимофеева А.С., Деева С.Г. // Металлург. 2020. № 11. С.18-23.
 14. Шаповалов А.Н. Влияние предварительного известкования на смерзаемость железорудного концентрата // Теория и технология металлургического производства. 2024. №2(49). С. 27-32.
 15. Применение в агломерационной шихте извести разной степени обжига / С.Г. Савельев, Р.Д. Каменев, О.Г. Федоров и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1980. №3. С.24-26.
 16. Bao G. The Influence Analysis of Quicklime Quality on Output and Quality of Sinter in Bao Steel. Metallurgical Engineering, 2018, 5(3), 131-136.
 17. Влияние фракционного состава извести на газодинамические свойства и прочность гранул окомкованной агломерационной шихты / Чукин Д.М., Сысоев В.И., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Магасумов Г.З., Щелоков Н.С., Шинкарук Б.Б., Куц А.А. // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2021. № 20. С. 13-21.
 18. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В., Братковский Е.В. Применение серпентинитомagneзитов халиловского месторождения в агломерационном производстве // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2011. № 3. С. 25-29.
 19. Влияние извести на спекание аглошихты / Куркин В.М., Табаков М.С., Кашкаров Е.А., Гуркин М.А., Деткова Т.В., Решеткин С.В. // Металлург. 2007. № 8. С. 49-52.
 20. Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская Сталь» / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 34-40.
 21. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Damien Paul O'Dea et al. Influence of Binder Dosage on Granule Structure and Packed Bed Properties in Iron Ore Sintering Process. ISIJ International. 2016, vol. 56, no. 11, pp. 1920-1928.
 22. Демидова Н.В., Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В. Совершенствование технологии производства агломерата в условиях АО «Уральская Сталь» // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2017. Вып. 10 (1414). С.65-71.

Сведения об авторах

Женин Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE INFLUENCE OF LIME SIZE ON THE AGGLOMERATION PROCESS RESULTS

Zhenin Evgeniy V. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Shapovalov Alexey N. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Abstracts. The results of laboratory experiments on the study of the influence of the size of lime supplied to the mixture of iron ore components of the agglomeration charge on the performance of the agglomeration process and sinter quality are presented.

It was found that under relatively constant experimental conditions, the indicators of pelletizing, agglomeration process and sinter strength when using coarse lime (10-20 mm) deteriorate. The obtained results are explained mainly by the increase in the uneven distribution of lime throughout the volume of the batch, which affects the results of pelletizing (an increase in the proportion of large fractions of 5-10 and +10 mm) and a decrease in the strength of the

granules (in the raw state and during the sintering process). A direct consequence is an increased softening of the sintered charge layer and a drop in gas permeability, which affects both the sintering rate and specific productivity, as well as the thermal conditions of sintering and sinter strength properties.

Keywords: sinter charge, agglomeration process, lime size, pelletizing results, sintering indicators, sinter strength

References

1. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhsky G.N. Agglomeration of ore materials. Scientific publication. – Yekaterinburg: USTU-UIP, 2003. – 400 p. (in Russ.)
2. Puzanov V.P., Kobelev V.A. Introduction to the technologies of metallurgical structure formation. – Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. – 501 p. (in Russ.)
3. Frolov Yu.A. Agglomeration. Technology. Heat engineering. Management. Ecology. – M.: Metallurgy Publishing House, 2016. – 672 p. (in Russ.)
4. Zhilkin V.P., Doronin D.N. Agglomerate production. Technology, equipment, automation. / Under the general editorship of G.A. Shalaev. – Ekaterinburg: Ural Center for PR and Advertising, 2004. – 292 p. (in Russ.)
5. Smorodinnikov A.V., Kolesanov F.F., Klimova N.S., et al. Application of lime at sintering plants of the USSR. Review information. – Moscow: Chernetinformatsiya, 1978. Series 3. Issue No. 2. pp. 1-34. (in Russ.)
6. Gurin P.I., Khlaponin N.S., Osipenko A.M. Efficiency of lime application in agglomeration of high-basicity charge. Steel, 1981. No. 9. pp. 9-12. (in Russ.)
7. Saveliev S.G., Chizhikova V.M. Use of lime in agglomeration of iron ore raw materials. Bulletin of scientific, technical and economic information "Ferrous metallurgy". 1986. No.3. 2-14. (in Russ.)
8. Burgov V.N., Mirko V.A., Golovkin V.K., Kabanov Yu.A. Improving the technology of agglomeration of fine-grained concentrates. Metallurgist, 1985. No. 6. pp. 22-24. (in Russ.)
9. Shapovalov A.N., Ovchinnikova E.V. Improving the technology of lime use in sintering production under the conditions of Ural Steel JSC. Actual problems of modern science, technology and education, 2014. Vol. 1. pp. 88-92. (in Russ.)
10. Filatov S.V., Kurunov I.F., Semenov O.A. et al. Optimization of lime consumption when introducing it into the sinter batch in order to improve the sinter quality. Steel, 2014. No. 10. pp. 7-9. (in Russ.)
11. Shapovalov A.N., Zubov S.P., Maistrenko N.A., Bersenev I.S. Study of the efficiency of lime use in the production of sinter at JSC Ural Steel. Steel. 2017. No. 6. pp. 2-6. (in Russ.)
12. Pykhteeva K.B., Tleugabulov B.S., Volkov D.N., Melamud S.G. Calculation and theoretical analysis of the process of lime treatment of iron ore concentrate. Chernye Metally. 2016. № 4. 19-24. (in Russ.)
13. Fedina V.V., Nikitchenko T.V. Timofeeva A.S., Deeva S.G. Study of the possibility of preventing concentrate freezing by fluxing it. Metallurgist, 2020. No. 11. P.18-23. (in Russ.)
14. Shapovalov A.N. Effect of lime pretreatment on freezing of iron ore concentrate. Theory and technology of metallurgical production. 2024. No. 2 (49). 27-32. (in Russ.)
15. Saveliev S.G., Kamenev R.D., Fedorov O.G. et al. Use of lime of varying degrees of calcination in sinter charge. News of Universities. Ferrous metallurgy. 1980. No. 3. pp. 24-26. (in Russ.)
16. Bao G. The Influence Analysis of Quicklime Quality on Output and Quality of Sinter in Bao Steel. Metallurgical Engineering. 2018. 5(3). 131-136.
17. Chukin D.M., Sysoev V.I., Yudin D.V. et al. Influence of the fractional composition of lime on the gas-dynamic properties and strength of pellets of agglomerated charge. Technologies of Metallurgy, Mechanical Engineering, and Material Processing. 2021. No. 20. pp. 13-21. (in Russ.)
18. Shapovalov A.N., Zavodany A.V., Bratkovsky E.V. Application of serpentine-magnesites from the Khalilovo deposit in agglomeration production. News of universities. Ferrous metallurgy. 2011. No. 3. pp. 25-29. (in Russ.)
19. Kurkin V.M., Tabakov M.S., Kashkarov E.A. et al. The influence of lime on the sintering of sinter mixture. Metallurgist. 2007. No. 8. pp. 49-52. (in Russ.)
20. Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Use of local mineral resources at the sintering plant of the "Ural steel". Bulletin of G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2016. Vol. 14. № 1. 34-40. (in Russ.)
21. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Damien Paul O'Dea et al. Influence of Binder Dosage on Granule Structure and Packed Bed Properties in Iron Ore Sintering Process. ISIJ International. 2016. Vol. 56, No. 11, pp. 1920-1928.
22. Demidova N.V., Shapovalov A.N., Ovchinnikova E.V. Improvement of the technology of agglomerate production in the conditions of JSC Ural Steel. Bulletin of scientific, technical and economic information "Ferrous metallurgy". 2017. No. 10 (1414). 65-71. (in Russ.)

Ссылка на статью:

Женин Е.В., Шаповалов А.Н. Исследование влияние крупности извести на результаты агломерационного процесса // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-4-10)
Zhenin E.V., Shapovalov A.N. The influence of lime size on the agglomeration process results. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-4-10)

Щитиков А.А., Засов Н.Е., Столяров А.М., Юдин Д.В.

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИВКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО ТИПА

Аннотация. В работе проведен статистический анализ массива производственных данных из 28-ми плавов разливки низкоуглеродистой легированной стали марки 10ХНДП на слябовых МНЛЗ криволинейного типа. Отливались слябы одинаковой толщины 250 мм и разной ширины: 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим разливки) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим).

Использование двухручьевого режима разливки было преобладающим – в 71,4 % случаев. Самой востребованной оказалась ширина сляба 1650 мм (39,3 % заготовок). По результатам химического анализа металла 77-ми проб рассчитана температура ликвидус стали, изменявшаяся в интервале от 1516 до 1519 °С. Приведены усредненные данные о параметрах температурно-скоростного режима разливки металла: температуре стали перед разливкой, перегреве металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус, скорости вытягивания сляба из кристаллизатора. В результате корреляционно-регрессионного анализа выявлены статистически значимые убывающие линейные зависимости скорости вытягивания сляба из кристаллизатора от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус. Установлено, что определяющим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа – количество ручьев для отливки слябов. Для четырёхручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки и продолжительности разливки металла одной плавки примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей двухручьевого режима. Наибольшая суммарная весовая скорость разливки и наименьшая продолжительность разливки металла одной плавки стали марки 10ХНДП достигнуты при отливке слябов сечением 250×1270 мм в четыре ручья.

Ключевые слова: сталь, разливка, МНЛЗ, технология, параметры

В качестве традиционной низкоуглеродистой легированной стали [1] выбрана конструкционная сталь марки 10ХНДП. Легированная хромоникелефосфористая с медью сталь применяется в строительстве и машиностроении. Она отличается неограниченной свариваемостью и повышенной стойкостью против атмосферной коррозии изделий, эксплуатирующихся на открытом воздухе без дополнительных средств защиты от коррозии. Листовой прокат из этой стали обычно представляет собой горячекатаные листы толщиной от 5 до 9 мм.

В соответствии с требованиями ГОСТ 19281-2014 сталь марки 10ХНДП должна иметь следующий химический состав, мас. %:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N
0,08–	0,17–	0,30–	≤	0,07–	0,5–	0,3–	0,3–	0,08	≤
0,12	0,37	0,60	0,020	0,12	0,8	0,6	0,5	–	0,00
								0,15	8

Отличительной особенностью этой стали является повышенное содержание фосфора, обычно считающегося вредной примесью, и алюминия наряду с хромом, никелем и медью.

Непрерывная разливка стали марки 10ХНДП осуществляется на слябовых МНЛЗ криволинейного типа [2].

В работе проведен статистический анализ массива производственных данных из 28-ми плавов.

Разливка стали производилась на слябовых МНЛЗ №1-4 криволинейного типа [3-5], конструктивно различающихся тем, что МНЛЗ №1 и 4 являются комбинированными с возможностью работы

как в двух-, так и в четырёхручьевого режимах, в то время как МНЛЗ №2 и 3 – машины с постоянными четырьмя ручьями. Сведения о количестве плавов стали марки 10ХНДП, разлитой на разных машинах, представлены на рис. 1.

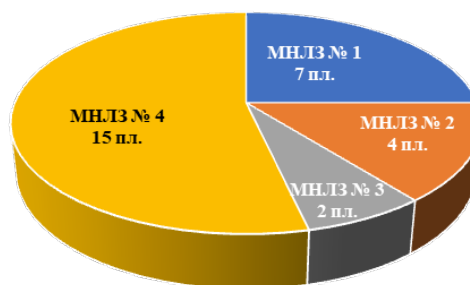


Рис. 1. Данные о количестве металла, разлитого на разных МНЛЗ (указаны номер МНЛЗ и число плавов)

Из рис. 1 видно, что наибольшее количество металла было разлито на МНЛЗ №4 – 15 плавов или 53,6% от общего количества. На машинах №1-3: 7 плавов (25%), 4 плавки (14,3%) и 2 плавки (7,1%) соответственно.

Отливались слябы одинаковой толщины 250 мм и разной ширины: 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим разливки) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим). Данные о количестве плавов с отливкой слябов разной ширины приведены на рис. 2.

Использование двухручьевого режима разливки было преобладающим – в 71,4% случаев. Самой

востребованной оказалась ширина слэба 1650 мм (39,3% заготовок).

Информация о среднем химическом составе стали марки 10ХНДП приведена на рис. 3.

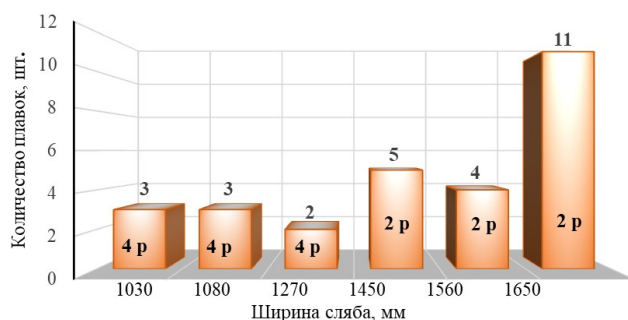


Рис. 2. Количество плавов металла с отливкой слэбов разной ширины по двухручьевому (2 р) и четырехручьевому (4 р) режимам

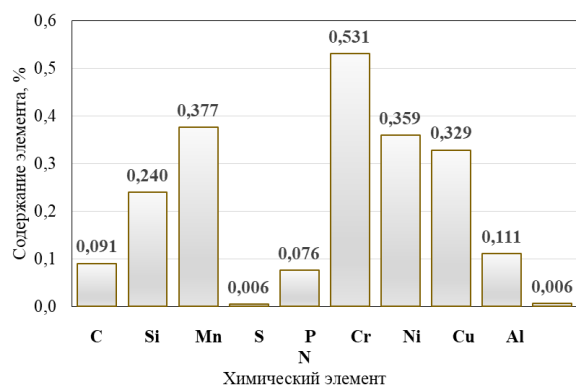


Рис. 3. Средний химический состав стали марки 10ХНДП

Содержание химических элементов полностью соответствовало требованиям ГОСТ 19281-2014.

С использованием формулы

$$t_{\text{ликв}} = 1536,6 - 86 \cdot [C] - 8 \cdot [Si] - 5 \cdot [Mn] - 25 \cdot [S] - 30 \cdot [P] - 1,5 \cdot [Cr] - 4 \cdot [Ni] - 5 \cdot [Cu] - 5 \cdot [Al] - 90 \cdot [N] \quad (1)$$

и результатов химического анализа металла 77-ми проб рассчитана температура ликвидус стали (рис. 4). Из рис. 4 следует, что температура ликвидус изменялась в достаточно узком диапазоне – от 1516 до 1519°C, что свидетельствует о примерном постоянстве химического состава металла и в среднем равнялась 1517,5°C.

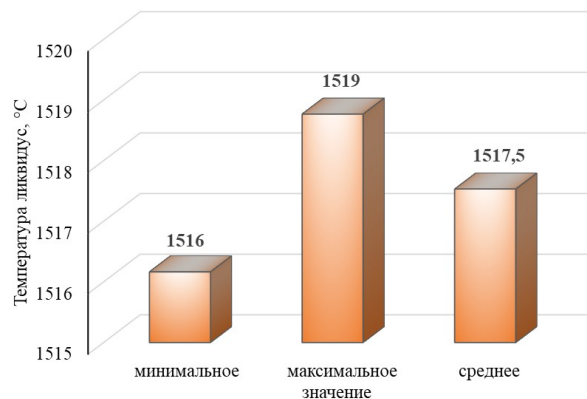


Рис. 4. Расчетные значения температуры ликвидус стали

Усредненные данные о параметрах температурно-скоростного режима разливки металла: перегреве металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус и линейной скорости вытягивания слэба из кристаллизатора (скорости разливки) представлены в таблице.

Усредненные значения параметров температурно-скоростного режима разливки стали марки 10ХНДП

Параметр	Режим разливки					
	Двухручьевой			Четырехручьевой		
Количество данных, шт.	53	53	23	23	23	23
Перегрев металла, °C	мин.	18	14			
	макс.	36	33			
	ср.	28	28			
Скорость разливки, м/мин	мин.	0,58	0,57	0,56	0,56	0,59
	макс.	0,84	0,85	0,81	0,81	0,81
	ср.	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69

Температура стали марки 10ХНДП перед разливкой изменялась в интервале от 1532 до 1554°C. Значения параметров температурно-скоростного режима разливки для двухручьевого и четырехручьевого вариантов являются очень близкими. Можно отметить лишь небольшое (примерно на 0,01 м/мин) превышение средней скорости разливки металла при четырехручьевом режиме. Зависимости скорости разливки металла для двух- и четырехручьевого режимов от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус показаны на рис. 5 и 6.

Линейные убывающие зависимости описываются следующими уравнениями:

$$v = 0,8248 - 0,0061 \cdot \Delta t, n=106, r = -0,4937, r_{0,001} = 0,3211; \quad (2)$$

$$v = 0,8876 - 0,0075 \cdot \Delta t, n=92, r = -0,6711, r_{0,001} = 0,3379. \quad (3)$$

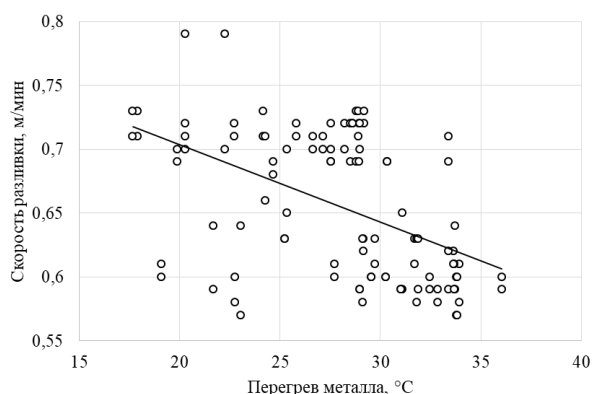


Рис. 5. Зависимость скорости разливки металла в два ручья от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

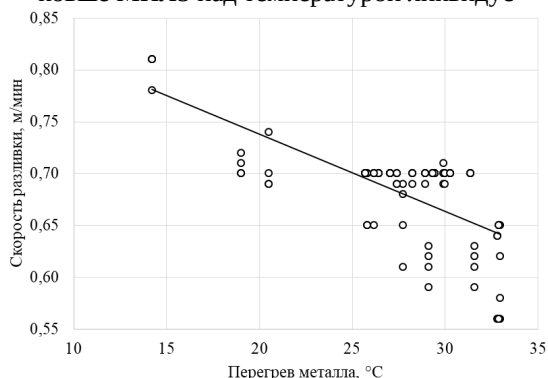


Рис. 6. Зависимость скорости разливки металла в четыре ручья от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

Сравнение расчетных значений коэффициентов парной корреляции (r), взятых по модулю, с их критическими значениями (r_{α}), зависящими от количества данных (n) и выбранного уровня ошибки ($\alpha=0,001$) [6], показывает, что выявленные зависимости являются статистически значимыми с вероятностью 99,9%.

Для оценки эффективности разливки металла на МНЛЗ важными параметрами являются суммарная весовая скорость разливки и продолжительность разливки металла одной плавки, сведения о которых представлены на рис. 7 и 8, из которых видно, что определяющим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа, а именно количество ручьев для отливки слябов. Для четырехручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки (5,73 т/мин) и продолжительности разливки металла одной плавки (63,5 мин) примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей для двухручьевого режима (3,87 т/мин и 93,4 мин).

Для получения максимальной суммарной весовой скорости разливки (в среднем 6,7 т/мин) и

минимальной продолжительности разливки металла одной плавки (в среднем 54 мин) сталь марки 10ХНДП наиболее предпочтительно разливать на МНЛЗ криволинейного типа в слябы с размерами поперечного сечением 250×1270 мм в четыре ручья.

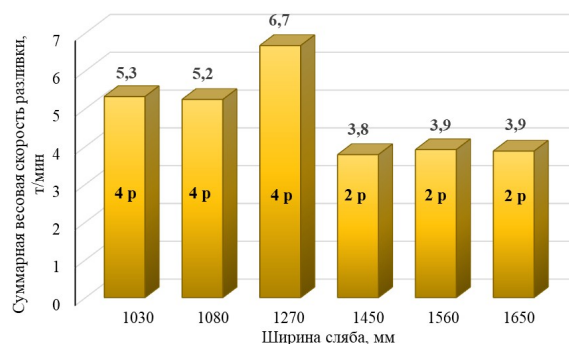


Рис. 7. Средняя суммарная весовая скорость разливки стали марки 10ХНДП

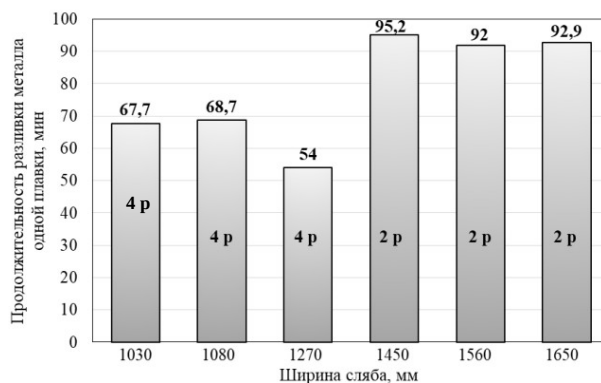


Рис. 8. Средняя продолжительность разливки металла одной плавки при отливке слябов разной ширины по двухручьевому (2 р) и четырехручьевому (4 р) режимам

Заключение

Особенности разливки низкоуглеродистой легированной стали марки 10ХНДП на слябовых МНЛЗ криволинейного типа (массив производственных данных из 28 плавки) заключаются в отливке слябов шириной 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим) при одинаковой толщине заготовки 250 мм.

Двухручьевого режим разливки являлся преобладающим – в 71,4% случаев. Самой востребованной оказалась ширина сляба 1650 мм (39,3% заготовок). Расчетные значения температуры ликвидус изменялись в достаточно узком диапазоне: от 1516 до 1519°C. Сталь перед разливкой имела температуру 1532–1554°C. В результате корреляционно-регрессионного анализа установлены статистически значимые зависимости линейной скорости разливки от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой

ликвидус. Лимитирующим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа, а именно количество ручьев для отливки слэбов.

Для четырехручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки (5,73 т/мин) и продолжительности разливки металла одной плавки (63,5 мин) примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей двухручьевого режима (3,87 т/мин и 93,4 мин). Максимальная суммарная весовая скорость разливки и минимальная продолжительность разливки металла одной плавки стали марки 10ХНДП достигаются при отливке слэбов с размерами поперечного сечения 250×1270 мм в четыре ручья.

Список источников

1. Иванников Е.В. Конструкционные стали и сплавы для заданных изделий. Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. 83 с.
2. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.
3. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Непрерывная разливка стали. Машины непрерывного литья заготовок. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
4. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24–27.
5. Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В. Качество непрерывнолитого металла, разлитого разными способами // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3 (50). С. 4–8.
6. Кнотек М., Войта Р., Шефц И. Анализ металлургических процессов методами математической статистики. М.: Металлургия, 1968. 212 с.

Сведения об авторах

Щитиков Александра Андреевич – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Засов Никита Евгеньевич – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Столяров Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: sam52.52@mail.ru

Юдин Данил Владиславович – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PECULIARITIES OF CASTING LOW-CARBON ALLOY STEEL ON SLABS OF CURVED TYPE

Shchitikov Alexander A. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zasov Nikita E. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Stolyarov Alexander M. – ScD, professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Yudin Danil V. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Statistical analysis of an array of production data from 28 castings of low-carbon alloyed steel of grade 10KhNDP on slabs of curved type. Slabs of the same thickness of 250 mm and different widths were cast: 1030, 1080 and 1270 mm (four-stream casting mode) and 1450, 1560, 1650 mm (two-stream mode). The use of a two-stream casting mode was predominant – in 71.4% of cases. The most popular was the slab width of 1650 mm (39.3% of the blanks). Based on the results of chemical analysis of the metal of 77 samples, the liquidus temperature of steel was calculated, which varied in the interval from 1516 to 1519 °C. Averaged data on parameters of temperature-speed mode of metal casting are given: steel temperature before casting, metal overheating in intermediate ladle of continuous casting machine above liquidus temperature, speed of slab drawing from crystallizer. As a result of

correlation and regression analysis, statistically significant decreasing linear dependences of the rate of pulling the slab out of the crystallizer on the overheating of the metal in the intermediate ladle of the CCM above the liquidus temperature were revealed. It has been established that the determining factor of high casting efficiency is the design features of curved-type castings - the number of slabs casting streams. For a four-way casting mode, the average values of the total casting speed and the duration of casting the metal of one melt approximately 1.5 times favorably differ from similar indicators of a two-way mode. The highest sum-mare casting speed and the shortest duration of metal casting of a single melt of steel of grade 10KhNDP were achieved when casting slabs with a cross-section of 250×1270 mm in four streams.

Keywords: steel, casting, continuous casting machine, technology, parameters

References

1. Ivannikov E.V. Structural steels and alloys for specified products. Lipetsk: Publishing House of Lipetsk State Technical University, 2017. 83 pp.
2. Parshin V.M., Bulanov L.V. Continuous steel casting. Lipetsk: NLMK, 2011. 221 pp.
3. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. Continuous steel casting. Continuous casting machines. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2020. 192 p.
4. On methods of influencing the process of forming a steel continuously cast billet / Doubted Basu, A.M. Stolyarov, M.V. Potapova, S.V. Didovich // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2014. №1 (45). S. 24-27.
5. Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V. Quality of continuously cast metal spilled in different ways//Theory and technology of metallurgical production. 2024. №3 (50). S. 4-8.
6. Knotek M, Vojta R, Schefz I. Analysis of metallurgical processes by methods of mathematical statistics. M.: Metallurgy, 1968. 212 pp.

Ссылка на статью:

Особенности разливки низкоуглеродистой легированной стали на слябовых МНЛЗ криволинейного типа / Щитиков А.А., Засов Н.Е., Столяров А.М., Юдин Д.В. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 11-15. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-11-15](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-11-15)
Shchitikov A.A., Zasov N.E., Stolyarov A.M., Yudin D.V. Peculiarities of casting low-carbon alloy steel on slabs of curved type. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 11-15. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-11-15](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-11-15)

Харченко А.С., Павлов А.В., Сибатуллин С.К., Харченко Е.О., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Вакуленко А.И.

ДЕЙСТВИЕ НА ХОД ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ОКАТЫШЕЙ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ВЗАМЕН КОНЦЕНТРАТАМ СКАРНОВОГО ТИПА, ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ДОЛЕ В ШИХТЕ

Аннотация. Исследовали два периода работы доменной печи объемом 1370 м³ длительностью 31 и 30 номинальных суток. Особенностью первого периода было преимущественное использование окатышей, произведенных в Соколовско-Сарбайском горно-производственном объединении из концентрата скарнового типа, во втором – произведенные в Михайловском ГОКе из железистых кварцитов. Рассчитанными показателями диагностировали действие этого на различные стороны развивающихся в доменной печи процессов. В частности, выявили следующее: развитие прямого восстановления Fe из FeO снизилось на 1,7 абс. %; степень восстановления водородом увеличилась на 2,4 абс. %; средняя степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока от горизонта фурм до поверхности шихты снизилась на 1,92 отн. %; рост динамического напора поднимающихся от горна к колошнику печных газов, приведенного к пустому сечению в рабочих условиях по температуре и давлению, составил: у поверхности слоя шихты – 2,58, в нижней части заплечиков – 3,03%; длительность движения кокса до зоны горения уменьшилась на 0,59%; кинетическая энергия истечения дутья из фурм увеличилась на 3,35 %; протяженность рыхлой части фурменного очага к осевой части горна возросла на 0,64%.

На рассмотренной доменной печи при увеличении доли окатышей из железосиликатного концентрата с 7,02 до 25,45%, исключении окатышей из магнетитового концентрата от 12,23%, без изменения удельного расхода скипового кокса повысили производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна.

Ключевые слова: металлургический процесс, чугун, кокс, окатыши, магнетит, концентрат, железистый кварцит, восстановление, теплопередача, движение газов, движение материалов к горну

Введение

В современных условиях исследование металлургического процесса важно для совершенствования технологий промышленности России [1]. Окатыши относятся к основным компонентам среди шихтовых материалов при её осуществлении [2-5].

Выявлена роль растрескивания окатышей применением методологии клеточных автоматов [3]. Проведением исследования получено, что снижение окисленности железа в пористой структуре окатышей происходит в две стадии. На первой стадии процесса скорость восстановления зависит исключительно от поверхности контакта фаз, а после полного восстановления материала поверхности определяется диффузией внутри минеральной составляющей окатыша.

Установлено, что прочность окатышей при восстановлении снижается до 0,21±0,40 от исходной прочности на сжатие, а минимальная прочность наблюдается при степени восстановления 20-40% [4]. Показано, что показатель пластичности при индентировании фазы титаномагнетита (магнетита) в неофлюсованных обожжённых окатышах выше, чем у титаногематита (гематита), свидетельствуя о большей склонности последнего к созданию внутренних напряжений, приводящих к образованию микротрещин [5]. Послойная укладка окатышей перед их обжигом, когда более крупные располагаются наверху, даёт повышение прочности на сжатие до 15-

20% [6]. Разрушение обожжённых окатышей под действием внешних механических сил происходит в зависимости от морфологии фаз – при высоком содержании железорудных компонентов (97% и более) – по железосодержащим минералам; при низком содержании (менее 95%) – по силикатной связке [7]. Использование бенто-полимерных связующих повышает вязкость водной суспензии на стадии окомкования и уменьшает число трещин в обожжённых окатышах [8]. При малой длительности обжига железорудных окатышей уровень температуры процесса на формирование прочностных свойств является преобладающим, с увеличением времени нахождения окатыша в зоне максимальных температур значимость температурного фактора снижается [9]. Представлены результаты физического моделирования шлаковых связей, которые могут образовываться в процессе обжига окатышей с использованием известняка или доломита в качестве флюсов [10]. Показана повышенная роль касательных напряжений при подготовке железорудного сырья, включающего обожжённые окатыши, к металлургическому процессу [11]. Изучена прочность окатышей, полученных с использованием в качестве сырья железистых кварцитов Михайловского ГОКа, красного шлама, обожжённого нефтяного кокса [12]. Окатыши, окомкованные с использованием сапонита в качестве связующего, имели после обжига прочность на сжатие, в 2,83 раза превышающую показатель образцов с бентонитом [13].

Разработана методика расчета теплообмена в слое обжигаемых офлюсованных окатышей применительно к конвейерной машине, позволяющая определять температуры материала и газа в слое, что достигается использованием граничных условий и путем интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен [14]. Установлено, что окатыши, полученные с частичной диссоциацией гематита, по сравнению с окатышами, полученными по технологии интенсивного нагрева, имеют более высокие показатели механической прочности, истираемости и прочности при восстановлении [15]. Математическим моделированием оценено влияние на температуру газа в периферийной, осевой зонах колошника доменной печи и рудном гребне изменения параметров, характеризующих режимы загрузки материалов, включающих окатыши, и дутья в интервале эквивалентной крупности кокса 50,0-57,5 мм [15].

На доменной печи уральского металлургического предприятия, оснащенной лотковым загрузочным устройством, реализовали преимущество железорудного сырья, включающего железорудные окатыши, эквивалентной крупностью 11,7 мм по сравнению с 11,4 мм, для чего корректировкой режима загрузки сырья уменьшили его содержание в шихте, поступающей со станций угловых положений лотка № 9-11, в среднем от 100 до 96,4% с увеличением его доли на станциях № 6-8 от 43,7 до 45,4% [17].

Для повышения положительного действия крупности кокса на ход доменной плавки рассмотрены рациональные режимы загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошника с корректировкой параметров дутья [18]. Предложено усовершенствовать тепловую схему обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа, включая забор части нагнетаемого подогретого воздуха горения дымососами и направление в начало зоны охлаждения [19]. Предложены пути решения проблем в области технологии упрочняющего обжига железорудных окатышей на обжиговой машине конвейерного типа [20]. Рассмотрена модификация технологии «дуплекс-процесс Ромелт» для плавки высокоокисленного железосодержащего материала и проведены расчеты показателей плавки [21, 22]. Представлены инструменты для совершенствования режимов производства окатышей с использованием автоматизированных систем управления технологическими процессами на промышленном предприятии [23]. Выявлена роль однородности по крупности материалов для предупреждения образования тугоплавкого «Промежуточного слоя» в печах Ванюкова [24] и настыли в печах взвешенной плавки [25].

Представленные исследования указывают на целесообразность их продолжения рассмотрением

действия на ход металлургического процесса использования окатышей, произведенных из железистых кварцитов, взамен концентратов скарного типа.

Условия

Исследовали два периода работы доменной печи объемом 1370 м³ длительностью 31 и 30 номинальных суток. В первом периоде использовали окатыши, произведенные в Соколовско-Сарбайском горнопромышленном объединении (ССГПО) из магнетитового концентрата, во втором – произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата. Их применяли в доменной плавке совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССГПО. Доля окатышей в железорудной части шихты первого периода составила 34,35, второго – 32,39% (табл. 1).

Таблица 1

Параметры загрузки доменной печи

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Расход, кг/т чугуна:		
кокса (сухого, скипового)	408,6	408,6
агломерата: фабрики №2	23	5
фабрики №3	795	791
фабрики №5	178	22
неочищенного	96	52
складированного	182	221
окатышей: Михайловский ГОК	116	420
ССГПО	202	0
Лебединский ГОК	25	98
металлодобавок	35	41
марганцевой руды	19,4	27,1
кварцита	0,5	0
фракции кокса 25-40 мм	0	1,9
Отсев мелочи перед загрузкой		
в скипы, кг/т чугуна:		
агломерата	24,5	27,3
кокса	16,3	18,7
Количество перешихтовок	38	24

Выплавленный чугун имел состав, представленный в табл. 2, а шлак – в соответствии с табл. 3. Комплекс обновлённых условий привёл к следующему изменению состава чугуна (+ увеличение, – уменьшение), отн. %:

Si	-9,9
Mn	+29,4
S	+11,1
Ti	+24,4
P	+5,6
Cr	+42,9
C	+0,3

Таблица 2

Содержание компонентов в чугуне

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание в чугуна, %:		
Si	0,684	0,616
Mn	0,337	0,436
S	0,018	0,020
Ti	0,041	0,051
P	0,054	0,057
Cr	0,028	0,040
C	4,770	4,783

Таблица 3

Содержание компонентов в шлаке и основность

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание в шлаке, %:		
SiO ₂	39,66	40,47
Al ₂ O ₃	10,34	9,09
CaO	38,52	38,51
MgO	8,73	9,51
MnO	0,43	0,56
FeO	0,26	0,27
S	0,61	0,60
TiO ₂	0,65	0,93
Na ₂ O	0,680	0,543
K ₂ O	0,797	0,736
Основность шлака:		
CaO/SiO ₂	0,971	0,951
(CaO+ MgO)/SiO ₂	1,191	1,186
(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	0,945	0,969

Результаты исследования

Показатели хода восстановления, обеспечившего формирование химического состава чугуна, шлака, доменного газа, представлены в табл. 4. Степень эндотермического прямого восстановления по Павлову (углеродом из FeO до Fe) уменьшилось на 1,7 абс.% при снижении степени восстановления газом CO на 0,7 абс.% за счёт роста степени восстановления водородом на 2,4 абс.%.

Таблица 4

Показатели хода восстановления по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:		
углеродом	26,5	24,8
монооксидом углерода	33,3	32,6
водородом	41,2	42,6
Степень использования газа-восстановителя, %:		
CO	42,7	42,4
H ₂	46,5	46,4
Соотношение степеней использования H ₂ и CO	1,09	1,10

При этом использование CO на восстановление ухудшилось на 0,3 абс.%, а водорода – на 0,1 абс.% в условиях роста степени восстановления Fe из FeO газами на 1,7 абс.%, обеспеченного увеличением расхода топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна. Эти изменения свидетельствуют о смещении части процессов восстановления из нижней ступени интенсивного теплообмена в область повышенных температур зоны замедленного теплообмена. Такое смещение уменьшало потребление мелочи кокса на восстановление, что действовало в направлении увеличения поступления её в горн, повышая гетерогенность и, соответственно, совокупную

вязкость расплава.

Переход на окатыши Михайловского ГОКа сопровождался понижением общего перепада давления газов по высоте на 1,80%, степени уравнивания шихты подъёмной силой газового потока на 1,92 отн. % (табл. 5). Основными причинами невозможности ведения процесса при прежнем уровне этих параметров являлись рост вязкости гетерогенного расплава и неравномерное увеличение подъёмной силы движущихся от горна к колошнику печных газов (см. табл. 5).

Таблица 5

Показатели взаимного сопротивления движению потоков шихты и газа

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Общий перепад давления газа, кПа	111	109
Степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока, %	41,7	40,9
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м/с:		
у поверхности шихты	1,61	1,68
в распаре	1,54	1,56
в нижней части заплечиков	2,69	2,74
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м ² :		
у поверхности шихты	2,40	2,51
в распаре	0,93	0,95
в нижней части заплечиков	1,65	1,70

Рост их динамического напора составил: у поверхности столба шихты – 2,58, в распаре – 2,15, в нижней части заплечиков – 3,03%.

Перераспределение процессов в объёме печи привело к увеличению проплава сырья на 2,82% согласно табл. 6.

Таблица 6

Показатели интенсивности движения потоков

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Производство чугуна и шлака на 1 м ³ объёма печи, т/сут	4,173	4,296
Интенсивность по топливу (сухому коксу+природному газу), кг/(м ³ ·сут)	1545	1566
Интенсивность по сырью, кг/(м ³ ·сут)	4960	5100
Интенсивность по дутью (расчётному), м ³ /(м ³ ·мин)	2,107	2,126
Интенсивность по газу, м ³ /(м ³ ·мин):		
колошниковому	3,718	3,767
фурменному	3,428	3,488
в распаре	3,524	3,583
в шахте	3,621	3,674

Оно сопровождалось ростом показателей интенсивности, %:

- по дутью.....0,90;
- по топливу.....1,36;
- по колошниковому газу.....1,32.

Горн печи заполнялся продуктами плавки согласно табл. 7 в условиях роста расчётной вязкости гетерогенного шлака от 0,615 до 0,690 Па·с.

Таблица 7

Показатели интенсивности накопления продуктов плавки в горне

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Интенсивность накопления продуктов плавки в горне, м ³ /мин	1,010	1,063
Степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса, %	94,1	98,4
Интенсивность орошения кокса продуктами плавки, т/т	3,483	3,540

Величина изменения этих показателей составила:

- интенсивность накопления продуктов плавки в горне увеличилась на 5,25%;
- степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса увеличилась на 4,57 отн. %;
- интенсивность орошения кокса продуктами плавки возросла на 1,64%.

Наряду с параметрами, представленными выше, на это влияло качество кокса, прочностные свойства и реакционную способность которого характеризуют табл. 8 и 9.

Таблица 8

Показатели прочности и реакционной способности кокса, %

Период	M25	M10	CSR	CRI
I	89,61	7,62	48,70	33,90
II	89,62	7,61	44,10	35,80

Уменьшение горячей прочности кокса CSR на 9,44% повышало образование мелкой фракции в высокотемпературной зоне печи.

Таблица 9

Ситовый состав кокса по периодам и классам крупности

Период	Класс крупности, мм				
	+80	60-80	40-60	25-40	-25
I	13,70	38,70	39,80	6,10	1,70
II	15,60	40,10	36,60	6,10	1,70

Эквивалентная по поверхности крупность кокса увеличилась от 61,82 до 64,03 мм (3,57%), средневзвешенная – от 63,31 до 64,65 мм (2,12%). Оценили однородность кокса по соотношению эквивалентной ($f_{\text{экв}}$) и средневзвешенной ($f_{\text{срв}}$) крупности, считая, что $f_{\text{экв}} > f_{\text{срв}}$ свидетельствует о

большей значимости действия крупности на тепло и массообмен внутри кусков, а $f_{\text{экв}} < f_{\text{срв}}$ – на газо- и гидродинамику между кусками кокса. В периоде II по сравнению с периодом I отношение $f_{\text{экв}}/f_{\text{срв}}$ увеличилось от 0,98 до 0,99, приближаясь к рациональной величине 1,0.

Горение топлива по количеству образовавшегося газа, его составу и температуре соответствовало табл. 10, а по характеристикам движения газовой смеси – табл. 11.

Таблица 10

Показатели горения топлива в печи по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Длительность движения кокса от уровня засыпи до зоны горения, час	3,39	3,37
Интенсивность горения кокса, кг/мин	787	800
Выход фурменного газа, м ³ /т чугуна	1673	1691
Состав фурменного газа, %:		
CO	36,6	36,8
H ₂	20,1	20,7
N ₂	43,3	42,5
Теоретическая температура горения, °C	1992	1975

Таблица 11

Показатели движения газовой смеси в фурмах

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Масса газовой смеси на одну фурму, кг/с	0,373	0,377
Скорость газовой смеси на выходе из фурм, м/с:		
в нормальных условиях	209	211
в рабочих условиях	313	316
Кинетическая энергия газовой смеси, кДж/с	179	185
Протяжённость рыхлой части фурменного очага, мм	1087	1094

Длительность движения кокса от уровня засыпи до зоны горения уменьшилась на 0,59%, с повышенной прочностью окатышей из железосиликатного концентрата. Интенсивность горения кокса увеличилась на 0,34% в соответствии с ростом потребности в нём для повышения производительности. Выход фурменного газа на единицу массы чугуна возрос на 1,08%, а содержание восстановителей в нём увеличилось на 1,85 отн. %.

Рост концентрации водорода на 2,99%, его количества на 3,56%, поступления CO из фурменной зоны на 1,63% и снижение температуры, развиваемой в фурменных очагах (на 0,85% по табл. 10), обеспечили уменьшение степени развития эндотермической реакции прямого восстановления железа из оксидов.

Протяжённость рыхлой части фурменных очагов в пределах 1087-1094 мм (см. табл. 11) обеспечивала беспрепятственный сход кокса, поступившего к их

границам, в зону развития реакций горения вследствие действия механизма саморегулирования их размеров. Параметры движения газозооушной смеси в фурмах способствовали повышению доли периферийной части зоны потока материалов, движущихся от колошника к горну, по сравнению с центральной частью [26]. Кроме этого, на перераспределение зоны потока действовало увеличение крупности кокса [18].

Теплообмен по высоте печи происходил согласно табл. 12. Переход от периода I к II сопровождался увеличением расхода тепла на проведение процессов в определяющей зоне на 0,72% (табл. 12) преимущественно вследствие увеличения выноса его в верхнюю ступень теплообмена на 1,15%. Рост по этой причине экстремума градиента потерь напора газов вверху шахты вынуждал снизить степень уравнивания шихты подъемной силой газового потока (согласно табл. 5), затрудняя улучшение работы печи по расходу кокса и производительности.

Таблица 12

Показатели тепловой работы печи по периодам

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Соотношение теплоемкостей потоков шихты и газа:		
- в нижней части печи (с температурами более 850 °C)	1,766	1,752
- в верхней части печи (с температурами менее 850 °C)	0,795	0,777
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне, МДж/т чугуна	2795	2815
Перенос тепла газами из определяющей расход кокса зоны по высоте печи в верхнюю ступень теплообмена, %	26,0	26,3

Поступление серы в чугун и её распределение соответствовало табл. 13.

Таблица 13

Показатели распределения серы между чугуном и шлаком

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Содержание серы в чугуне, %	0,018	0,020
Поступало серы в доменную печь, кг/т чугуна	3,14	3,10
Основность шлака по $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$	0,95	0,97
Коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком после их выпуска и разделения	33,9	30,0
Основность шлака по $(CaO+\alpha MgO)/(SiO_2+\beta Al_2O_3)$	1,18	1,18
Равновесный коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком в условиях горна	33,7	32,9
Расчётная вязкость гетерогенного шлака,	0,615	0,690

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
действующая на коэффициент распределения серы, Н·с/м ²		

В условиях работы с повышенным расходом окатышей Михайловского ГОКа выплавлялся чугун с более высоким содержанием серы на 11,1 отн.%. Основными действовавшими на это факторами были ухудшение условий перехода серы в компоненты шлака при движении материалов от середины шахты до горна и рост вязкости гетерогенного шлака на 12,2%, предупреждение которого возможно снижением неустойчивости теплового состояния печи и промывкой горна [27].

Результатом изложенных особенностей хода процессов являются показатели, приведенные в табл. 14.

Таблица 14

Удельный расход кокса, топлива-восстановителя и производительность

Наименование показателя	Периоды	
	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	408,6	408,6
Суммарный расход кокса (скипового и фракции 25-40 мм в составе железорудного сырья), кг/т чугуна	408,6	410,2
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	159,0	163,4
Расход всего топлива-восстановителя, кг/т чугуна	525,94	530,78
Удельная производительность, т/ (м ³ ·сут)	2,950	2,970

Таким образом, на рассмотренной доменной печи объемом 1370 м³ осуществили замену окатышей, произведенных в ССГПО из магнетитового концентрата, на произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата, без изменения расхода скипового кокса, увеличив производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна – долю окатышей Михайловского ГОК повысили с 7,02 до 25,45%, исключив окатыши ССГПО от 12,23%. Их проплавляли совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССГПО.

Заклучение

На доменной печи объемом 1370 м³ заменили окатыши, произведенных в ССГПО из магнетитового концентрата, на произведенные в Михайловском ГОКе из железосиликатного концентрата, без изменения удельного расхода скипового кокса, увеличив производительность печи на 0,68%, потребление суммарного кокса на 1,6 кг/т, всего топлива-восстановителя на 4,84 кг/т чугуна – долю окатышей Михайловского ГОК повысили с 7,02 до

25,45%, исключив окатыши ССГПО от 12,23%. Их проплавливали совместно с агломератом, спечённым с преимущественным использованием концентрата ССГПО.

Выявили следующие основные изменения хода процессов:

- развитие прямого восстановления Fe из FeO снизилось на 1,7 абс. %;
- степень восстановления водородом увеличилась на 2,4 абс. %;
- средняя степень уравнивания материалов подъёмной силой газового потока от горизонта фурм до поверхности шихты снизилась на 1,92 отн. %;
- рост динамического напора поднимающихся от горна к колошнику печных газов, приведенного к пустому сечению в рабочих условиях по температуре и давлению, составил: у поверхности слоя шихты – 2,58, в нижней части заплечиков – 3,03%;
- длительность движения кокса до зоны горения уменьшилась на 0,59%;
- кинетическая энергия истечения дутья из фурм увеличилась на 3,35%;
- протяженность рыхлой части фурменного очага к осевой части горна возросла на 0,64%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки высшего образования России (проект FZRU-2026-0003).

Список источников

1. Григорович К.В. Современное сталеплавильное производство: тенденции и вызовы // Международная научная конференция имени академика А.М. Самарина. М.: Интерконтакт Наука, 2025. С. 31-45.
2. Малышева Т.Я., Долинская О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. М.: «МИСиС», 2004. 424 с.
3. Исследование взаимодействия восстановительных газов с окатышами методом клеточных автоматов / Берсенева И.С., Сабиров Э.Р., Плаксин И.Д., Спирин Н.А. // Кокс и химия. 2026. № 1. С. 16-24.
4. Особенности разрушения окатышей при восстановительно-тепловой обработке / Берсенева И.С., Брагин В.В., Чесноков Ю.А., Груздев А.И., Сабиров Э.Р., Спирин Н.А. // Metallurg. 2025. № 3. С. 49-54.
5. Микромеханические свойства структурно-фазовых составляющих неофлюсованных обожжённых титаномагнетитовых окатышей / Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Витькина Г.Ю., Вязникова Е.А., Роговая С.А. // Metallurg. 2025. № 9. С. 21-26.
6. Повышение качества железорудных окатышей за счёт управления их сегрегацией по высоте слоя / Бардавелидзе Г.Г., Груздев А.И., Пигарев С.П., Берсенева И.С., Спирин Н.А. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2025. № 2. С. 15-21.
7. Влияние морфологии железорудных фаз в окатышах на характер их разрушения / Брагин В.В., Берсенева И.С., Берсенева Е.С., Сивков О.Г., Загайнов С.А. // Сталь. 2025. № 1. С. 2-9.
8. Берсенева И.С., Усольцев Д.Ю., Солодухин А.А. / Генезис трещин в железорудных окатышах и оценка путей повышения их прочности // Сталь. 2025. № 10. С. 2-8.
9. Влияние температуры и времени на процесс спекания в железорудных окатышах / Никитченко Т.В., Тимофеева А.С., Шокова С.Б., Степанова И.С. // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол: МИСиС, 2023. С. 95-100.
10. Исследование шлаковых связей, образующихся при обжиге железорудных окатышей / Никитченко Т.В., Тимофеева А.С., Федина В.В., Шокова С.Б., Степанова И.С. // Metallurg. 2024. № 9. С. 17-20.
11. Повышение эффективности подготовки сырья для металлургических переделов / Никитин А.Г., Баженов И.А., Курочкин Н.М. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67. № 5. С. 612-615.
12. Поиск оптимальных условий окомкования железистых кварцитов с использованием добавок из красного шлама и обожжённого кокса / Лебедев А.Б., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю. // Обогащение руд. 2024. № 5. С. 44-51.
13. Сравнение степени влияния сапонита и бентонита на прочность при сжатии железорудных окатышей / Сластников М.А., Лебедев А.Б. // Prospects and Key tendencies of science in contemporary world. Proceedings of LIV International Multidisciplinary Conference. Madrid, Spain, 2025. С. 154-157.
14. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Разработка метода расчёта теплообмена применительно к обжигу железорудных окатышей на конвейерной машине // Металлы. 2024. № 2. С. 11-17.
15. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Анализ влияния режимов обжига на металлургические свойства железорудных окатышей // Сталь. 2024. № 7. С. 9-15.
16. Математическое моделирование влияния эквивалентной крупности кокса на изменение температурного режима по радиальным зонам доменной печи для различных параметров загрузки и дутья / Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 2. С. 41-49.
17. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сибатуллин С.К.,

- Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // Черные металлы. 2024. № 3. С. 22-27.
18. Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащённой лотковым загрузочным устройством в условиях ПАО «ММК» / Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 4 (51). С. 4-8.
 19. Модернизация обжиговых машин второго поколения ОК-306 / Селезнев В.С., Шатохин Е.М., Киреенков А.Н., Чукин Д.М., Катаев А.П., Котышев В.Е., Буткарев А.А. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2025. 468 с.
 20. Мальцева В.Е., Селезнев В.С., Чукин Д.М. Термообработка сырых окатышей и схемы обжиговых машин. М.: Металлургиздат, 2023. 720 с.
 21. Тараненко М.Е., Мальцева В.Е. Окускование и металлургия. Существующие подходы автоматизации технологических процессов на производстве. Курск: ЗАО «Университетская наука», 2024. 215 с.
 22. Переработка гематитовой руды дуплекс-процессом Ромелт / Валавин В.С., Похвиснев Ю.В., Макеев С.А., Зайцев А.К. // Металлург. 2023. № 7. С. 12-18.
 23. Processing of hematite ore by Romelt duplex process / Valavin V.S., Pokhvisnev Y.V., Makeev S.A., Zaytsev A.K. // Metallurgist. 2023. T. 67. № 7-8. С. 899-907.
 24. Изучение свойств атипичного продукта «Промежуточного слоя» печей Ванюкова при переработке шихты с высоким содержанием техногенных апродуктов / Крупнов Л.В., Пахомов Р.А., Каверзин А.В., Косов Я.И., Малахов П.В. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2025. Т. 31. № 2. С. 5-18.
 25. Оптимизация конструкции распылителя шихты печей взвешенной плавки с использованием методов математического моделирования / Крупнов Л.В., Севагин С.В., Фомичев А.С., Ярцев К.К., Миличенко В.П., Малахов П.В. // Металлург. 2025. № 7. С. 93-102.
 26. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Макарова И.В. Теория, технология и автоматизация доменного процесса. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 142 с.
 27. Результаты физического моделирования загрузки лотковым устройством марганцевой руды в качестве добавки к железорудному сырью / Харченко А.С., Закуцкая Л.А., Потапова М.В., Сибгатуллин С.К. // Черные металлы. 2023. № 5. С. 4-7.

Сведения об авторах

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru ORCID 0000-0002-0454-6399

Павлов Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник доменного цеха, Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия. Email: pavlov.av@mmk.ru

Сибгатуллин Салават Камилович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru ORCID 0009-0004-0220-0126

Харченко Елена Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Сысоев Виктор Иванович – кандидат технических наук, ассистент 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 – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Вакуленко Андрей Игоревич – аспирант, ФГБОУ ВО «ЗГУ им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: vakulenkoaiwork@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECT ON THE COURSE OF THE BLAST FURNACE PROCESS OF PELLETS PRODUCED FROM FERROUS QUARTZITES INSTEAD OF SKARN-TYPE CONCENTRATES, AT A NOMINAL SHARE IN THE CHARGE

Aleksandr S. Kharchenko – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

Aleksandr V. Pavlov – PhD in Engineering, Head of the Blast Furnace Shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. Email: pavlov.av@mmk.ru

Salavat K. Sibagatullin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor in the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

Elena O. Kharchenko – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor in the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: eo.mgtu@mail.ru

Viktor I. Sysoev – PhD (Engineering), Assistant Professor, Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Gaziz Z. Magasumov – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Andrey I. Vakulenko – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Fedorovsky Polar State University», Norilsk, Russia.

Abstracts. Two periods of operation of a 1,370 m³ blast furnace, lasting 31 and 30 nominal days, were studied. The first period was characterized by the predominant use of pellets produced at the Sokolovsko-Sarbay Mining and Production Association from skarn concentrate, while the second period utilized pellets produced at the Mikhailovsky Mining and Processing Plant from ferruginous quartzites. Calculated indicators were used to assess the impact of this on various aspects of blast furnace processes. In particular, the following was revealed: the development of direct reduction of Fe from FeO decreased by 1.7% abs; the degree of hydrogen reduction increased by 2.4% abs; the average degree of equilibration of materials by the lifting force of the gas flow from the tuyeres horizon to the charge surface decreased by 1.92% rel; the increase in the dynamic pressure of the gases rising from the hearth to the furnace top, reduced to the empty cross-section under operating conditions in temperature and pressure, was: 2.58% at the charge layer surface, 3.03% at the bottom of the shoulders; the duration of coke movement to the combustion zone decreased by 0.59%; the kinetic energy of blast outflow from the tuyeres increased by 3.35%; the length of the loose part of the tuyere hearth to the axial part of the furnace increased by 0.64%.

In the blast furnace under consideration, with an increase in the proportion of pellets from iron silicate concentrate from 7.02 to 25.45%, the exclusion of pellets from magnetite concentrate from 12.23%, without changing the specific consumption of skip coke, the furnace productivity was increased by 0.68%, the consumption of total coke by 1.6 kg/t, and the total reducing fuel by 4.84 kg/t of pig iron.

Keywords: metallurgical process, pig iron, coke, pellets, magnetite, concentrate, ferruginous quartzite, reduction, heat transfer, gas movement, movement of materials to the furnace.

Ссылка на статью:

Действие на ход доменного процесса окатышей, произведенных из железистых кварцитов взамен концентратам скарного типа, при номинальной доле в шихте / Харченко А.С., Павлов А.В., Сибгатуллин С.К., Харченко Е.О., Сысоев В.И., Магасумов Г.З., Вакуленко А.И. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 16-23. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-16-23](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-16-23)
Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Sibagatullin S.K., Kharchenko E.O., Sysoev V.I., Magasumov G.Z., Vakulenko A.I. Effect on the course of the blast furnace process of pellets produced from ferrous quartzites instead of skarn-type concentrates, at a nominal share in the charge. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 16-23. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-16-23](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-16-23)

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)

Зубков А.А., Туркин И.С., Феоктистов Н.А., Ахметов И.И., Кузьяев Е.А., Юмабаев А.А., Штыленко Е.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК МЕТОДОМ ЛГМ

Аннотация. Традиционное литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) с использованием пенополистирола (ППС) требует изготовления дорогостоящей специализированной оснастки и пресс-форм. Это делает данный метод рентабельным преимущественно в условиях крупносерийного производства, в то время как мелкосерийный выпуск деталей остается слишком дорогим. В статье представлено комплексное исследование процесса литья по газифицируемым моделям с применением 3D-печати для изготовления легких газифицируемых моделей. В качестве модельного материала применялись полилактид (PLA), полилактид низкой плотности (PLA-LW) и полиметилметакрилат (PMMA), из которых 3D-принтером печатались тонкостенные образцы. Выполнена заливка чугуна СЧ20 по моделям из PLA, PLA-LW, PMMA и традиционного ППС. Проведен сравнительный анализ микроструктуры. Для проведения теоретического анализа в системе «форма-модель-отливка» использован программный комплекс «ПолигонСофт». Опробован метод литья с применением печатных 3D-моделей из пластика с последующей заливкой чугуна, что позволяет полностью исключить стадию получения пресс-форм. Установлено, что характеристики отливок на основе печатных 3D моделей не уступают традиционным. Предложенная комбинированная технология существенно снижает временные и финансовые затраты на технологическую подготовку мелкосерийного производства сложных металлических отливок, обеспечивая качество изделий на уровне традиционных процессов литейного производства.

Ключевые слова: литье по газифицируемым моделям (ЛГМ), ПолигонСофт, полилактид (PLA), газопроницаемость, микроструктура отливки

Введение

Классическая технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) обладает рядом неоспоримых преимуществ, к которым относятся высокая размерная точность получаемых отливок, принципиальная возможность воспроизведения деталей сложной пространственной конфигурации, а также устранение операций изготовления и сборки стержней, характерных для традиционного песчаного литья [1].

Однако данная технология сопряжена с существенными технологическими ограничениями. К числу ключевых недостатков относятся длительный цикл изготовления модели, обусловленный значительной продолжительностью процесса сушки нанесенного противопопригарного покрытия, которая может достигать нескольких недель, а также необходимостью производства дорогой пресс-формы. Последний фактор является энергоемким и представляет собой технологически ограничивающее звено, делающее экономически и технологически нецелесообразным изготовление единичной отливки или малой партии с использованием моделей из пенополистирола (ППС).

Данные ограничения формируют актуальный запрос со стороны литейной отрасли на разработку и внедрение новых подходов к производству моделей. В этом контексте значительный потенциал демонстрирует объединение технологии ЛГМ с методами аддитивного производства. В частности,

существуют полимерные материалы для 3D-печати (например, PLA, PLA-LW, PMMA), подверженные термической деструкции, аналогичной газификации ППС.

Тем не менее для перевода таких материалов из разряда экспериментальных в область серийного промышленного использования необходимы комплексные и системные исследования. Эти исследования должны быть направлены на изучение поведения аддитивно изготовленных моделей в полном технологическом цикле ЛГМ, включая их взаимодействие с противопопригарным покрытием и кинетику газовыделения при контакте с расплавом, а также влияние на конечные свойства отливок.

Целью данного исследования является проведение системного анализа и комплексная оценка традиционного и комбинированного методов ЛГМ при получении отливок из серого чугуна. Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) сравнительный анализ технологических процессов получения моделей из ППС, PLA, PLA-LW, PMMA;
- 2) верификация технологических параметров методом компьютерного моделирования в программе «ПолигонСофт»;
- 3) экспериментальное исследование процесса заливки и газификации PLA-моделей в условиях вакуумного ЛГМ;
- 4) оценка качества полученных отливок.

Материалы и методы исследования

Для создания моделей использовались следующие типы пластиков:

- PLA ООО «ТРАЕКТОРИЯ 3Д»;
- PLA-LW ePLA-LW ESUN;
- PMMA REC Cast FOR METAL CAST.

Данные пластики выбраны в силу своих термодеструкционных свойств, в частности температуры начала активного разложения, сопоставимой с температурным режимом процесса заливки чугуна.

В качестве материала для традиционного подхода использовался литейный полистирол марки ПСВ-С (Полистирол, ТУ 2214-033-05762341-2009, с изм. 7, 8) фракция 0,6-1,0 мм, характеризующийся температурой стеклования в диапазоне 80-90°C, началом активной газификации при 275-300°C.

Формовочным материалом во всех случаях служил сухой кварцевый песок Балашейского месторождения фракции 0,63-0,70 мм.

В литейную форму заливали расплав серого чугуна марки СЧ20.

Противопригарное водное покрытие использовалось фирмы «Ставролан ЛФ», разработанное специально для ЛГМ процесса. Оно представляет собой густую суспензию от светло-коричневого до коричневого цвета на водной основе, состоящую из минеральных наполнителей, связующих компонентов и реологических добавок. Плотность при (20±1)°C, 1,55–1,75 г/см³.

Объектом исследования выступила литейная технология с применением модельных материалов для ЛГМ.

Методика. Изготовление моделей из ППС по традиционной технологии выполнялось на универсальной ЧПУ-установке, позволяющей вырезать необходимую фигуру при помощи нагретой струны.

Модели из PLA создавались на 3D-принтере Creality по заданной CAD-модели.

Экспериментальные заливки проводились в лаборатории МГТУ им. Г.И. Носова на лабораторной установке ЛГМ, включающей виброплощадку, систему вакуумирования с рабочим разрежением порядка 0,06 МПа и индукционную тигельную печь. Стандартная процедура включала сборку модельного куста, нанесение противопригарного покрытия окунанием, сушку, послойную засыпку опоки песком фракции 0,63 мм с виброуплотнением, вакуумирование, заливку расплавом серого чугуна марки СЧ20 и последующую выдержку отливки в форме в течение 24 ч.

Для теоретического анализа процесса литья применялся программный комплекс «ПолигонСофт», позволивший провести моделирование гидродинамических процессов заполнения формы расплавом и тепловых полей в системе «форма-модель-отливка». Целью моделирования являлось

научно обоснованное планирование эксперимента и минимизации эмпирического подбора параметров.

Для комплексной оценки влияния материалов модели на процесс ЛГМ была определена газотворность PLA, PLA-LW, PMMA и ППС.

Сравнительный анализ газовыделения моделей

Анализ проводили на анализаторе углерода и воды ELTRA CW-800M MULTIPHASE. Прибор позволяет определять различные виды оксида углерода и паров воды в органических и неорганических материалах. Метод основан на одноступенчатом или многоступенчатом нагреве пробы в печи сопротивления до температуры 1000°C в потоке нейтрального газа или кислорода при определении количества образовавшихся газообразного оксида углерода и паров воды методом инфракрасной абсорбции.

Образец помещали в кварцевую или фарфоровую лодочку, предварительно прокаленную при 1000°C, взвешивали с погрешностью не более ±1 мг и массу вводили в память анализатора. Далее лодочку с навеской перемещали в нагретую часть печи. При температуре 1000°C из образца выделяются газы, которые с потоком азота (кислорода) проходят пылевую ловушку, потом в детектор для анализа воды и затем для удаления воды в осушитель. После этого попадают на инфракрасный твердотельный детектор для анализа углерода, находящегося в виде соединений CO₂. На табло прибора выводятся результаты в процентах.

Метод направлен на определение общего объема газов, выделяющихся единицей массы материала при его нагреве до температур, соответствующих контакту с расплавом. Это ключевой параметр, так как чрезмерное газовыделение из материала в условиях замкнутой формы ЛГМ может привести к формированию газовых раковин в теле отливки или на ее поверхности.

Газотворность Г, см³/г, определяют по формуле

$$G = G(\text{CO}_2) + G(\text{H}_2\text{O}) = \frac{10 \cdot C_1 \cdot m \cdot V}{M(\text{CO}_2)} + \frac{10 \cdot C_2 \cdot m \cdot V_m}{M(\text{H}_2\text{O})}, \quad (1)$$

где G(CO₂) – газотворность за счет образования и выделения диоксида углерода (CO₂) из материала, см³/г; G(H₂O) – газотворность за счет испарения разных видов воды из материала, см³/г;

C₁ – массовая доля диоксида углерода, %;

C₂ – массовая доля воды, %;

m – масса образца, г;

V_m – молярный объем одного моля газа, м³/моль;

M(CO₂) – молярная масса диоксида углерода, моль/г;

M(H₂O) – молярная масса воды, моль/г.

Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Газовыделение ППС и PLA

Материал	Вес модели	$\Gamma(\text{CO}_2)$, см ³ /г	$\Gamma(\text{H}_2\text{O})$, см ³ /г	$\Gamma_{\text{общ}}$, см ³ /г	В эксперименте, всего см ³ /г
ППС	12 г	1291	663	1954	23,448
PLA	33 г	882	633	1515	49,995
Разница (%)	+175%	-31,7%	-4,5%	-22,5%	+113%

PLA-LW		870	598	1468	
PLA-LW 190 °C		880	660	1540	
PLA-LW 210 °C		765	428	1193	
PLA-LW 250 °C		782	569	1351	
PLA-LW 270 °C		800	656	1456	
PMMA		870	598	1468	

Экспериментальная часть

Компьютерное моделирование процесса

Результаты моделирования в программе «ПолигонСофт», визуализированные в виде карт распределения скоростей и температурных полей, позволили прогнозировать зоны возможного образования дефектов и оптимизировать ключевые технологические параметры, главным образом температуру заливки и конфигурацию литниковой системы, для последующей экспериментальной проверки.

Из представленной модели видно, что образование усадочной пористости (22–100%) локализуется в стояке и порядка 1,2% в теле самой отливки, чем можно пренебречь.

Результаты моделирования показывают, что центральная часть отливки затвердевает в последнюю очередь. Кроме того, полное затвердевание происходит через 5 мин, следовательно, к этому времени должна произойти не только полная газификация модели, но и устранение следов ее деструкции в зоне расплава.

Важным моментом исследования является определение соотношения температур в системе «стояк-отливка-форма». Температура заливки 1420°C, скорость подачи металла ~1 м/с, температурный интервал кристаллизации сплава 1231,63–1158,63°C. В процессе кристаллизации, протекающем в интервале от 8,3 до 40 мин, наблюдается активный разогрев контактного слоя формы. Согласно показаниям виртуальной термопары, установленной в

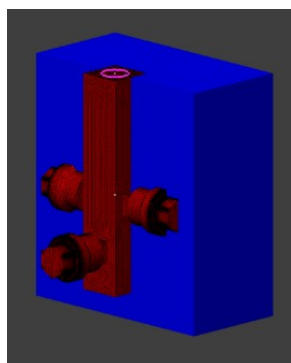
форме, температурный максимум в 854°C достигается на 25-й минуте процесса. Установлено, что центральный стояк, выполняющий функцию прибыли, сохраняет температуру в диапазоне 1350–1150°C значительно дольше периферийных участков, что обеспечивает эффективную компенсацию усадочных процессов в рабочей зоне отливки. Определены основные параметры технологии процесса, скорость остывания заливки с 1420 до 387°C составила 4,8 ч. При этом температура формы в зоне контакта остается выше и составляет около 400°C.

Направленное затвердевание, визуализированное на изотермах, соответствует физическим принципам процесса, что подтверждает корректность заданных коэффициентов теплопередачи (500 Вт/(м²·К)) и других граничных условий.

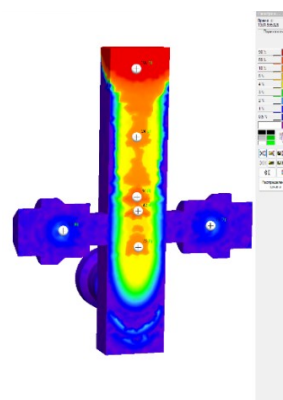
На следующем этапе исследовали газотворность модельных материалов PLA и ППС. Для PLA-LW были реализованы следующие режимы экструдирования: 190, 210, 250, 270°C.

Скорость подачи материала (экструдирования) составляла 150 мм/мин.

При одинаковой массе ППС дает в 22,5 % больше газов, чем PLA. Однако в нашем эксперименте PLA-модель весит 33 г; ее общее количество газов на 26,547 см³ больше по сравнению с ППС. Однако это не повлияло на качество заливки и не создало дефектов в виде газовых раковин в теле отливки.



а



б

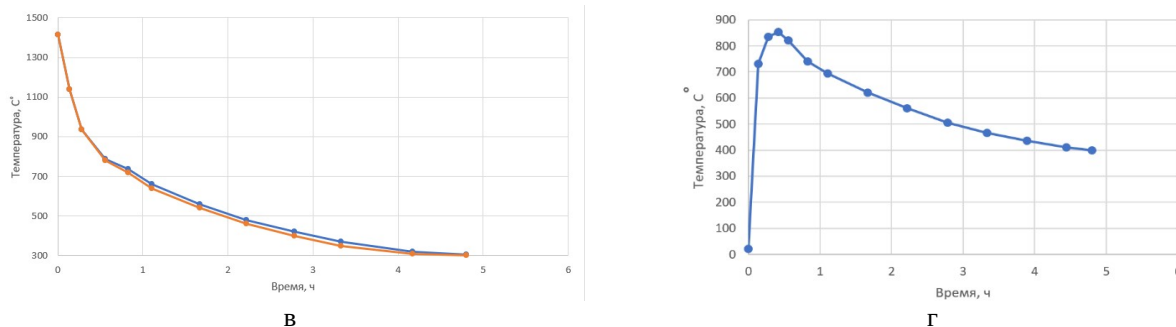


Рис. 1. Моделирование технологии изготовления отливки «пробка тампонажная»:

а – сеточная модель отливки; б – карта распределения пористости в отливке (%);

в – динамика остывания отливки (ч); г – динамика нагрева и остывания песчаной формы (ч)

Экспериментальная часть исследования была структурирована в два последовательных этапа, обеспечивающих переход от проверки исходной гипотезы к комплексной технологической апробации.

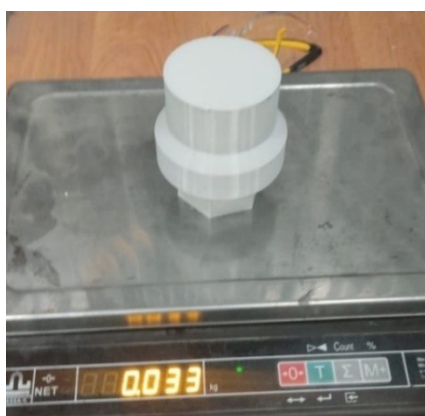
На первом этапе решалась задача подтверждения принципиальной способности материала PLA к полной газификации в контакте с жидким чугуном. С этой целью модель, полученная методом 3D-печати, заливалась в форму без применения вакуума. Качественный анализ, проведенный после выбивки, продемонстрировал отсутствие твердых остатков пластика в объеме отливки, что подтвердило пригодность материала для процессов типа ЛГМ.

Второй этап представлял собой полноценную проверку в условиях технологического цикла ЛГМ. Были изготовлены идентичные модельные блоки из PLA и традиционного ППС, включающие литниковую систему. После нанесения противопригарного покрытия и сушки осуществлялась формовка в опоке с виброуплотнением сухого песка. Заливка чугуном производилась под разрежением 0,06 МПа. После стандартного цикла охлаждения проводился

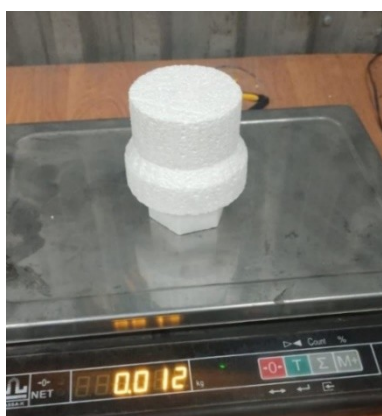
сравнительный анализ полученных отливок, включавший макроструктурные исследования для оценки качества поверхности и выявления внутренних дефектов.



Рис. 2. Готовый куст



а



б



в

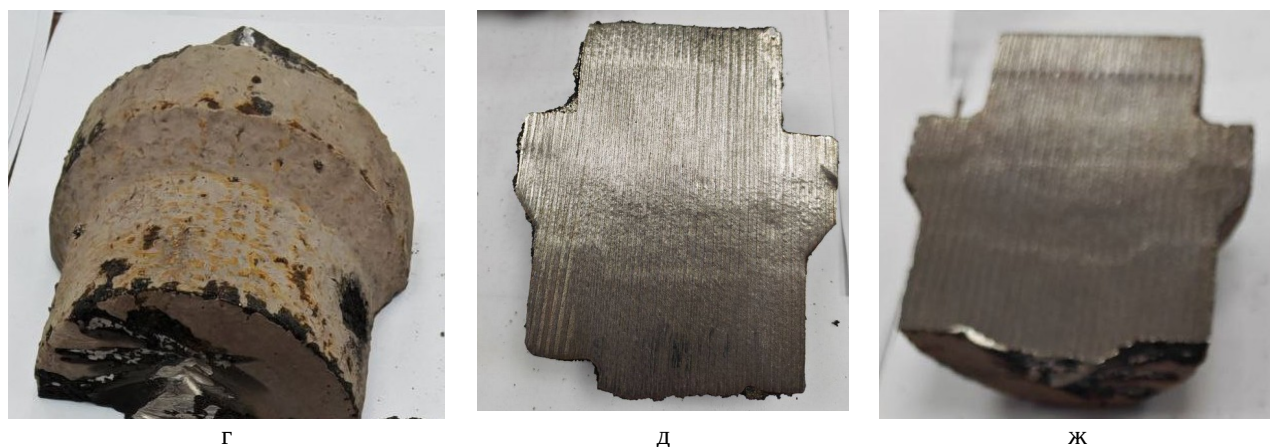


Рис. 3. Модель и отливки по технологии ЛГМ:

а – PLA-модель на весах; б – ППС-модель на весах; в – отливка по PLA-модели; г – отливка по ППС-модели; д – внутренняя часть отливки по PLA-модели; ж – внутренняя часть отливки по ППС-модели

Анализ микроструктуры

Микроструктура отливки представлена ферритно-перлитной основой, в которой встречается вермикулярный графит. При детальном изучении графита также был обнаружен пластинчатый графит. Следует отметить, что такая структура характерна для изделий, изготовленных из вспененного полистирола, а также пластика PLA.

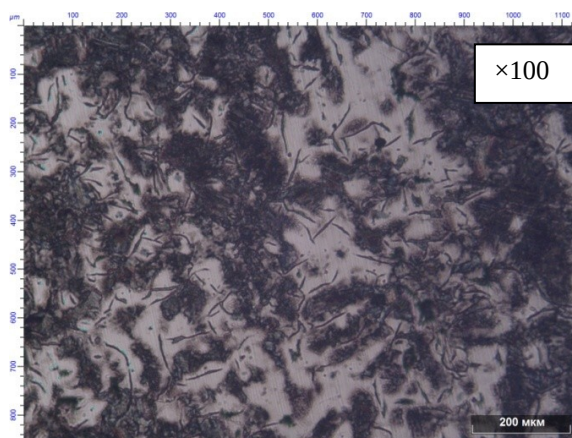
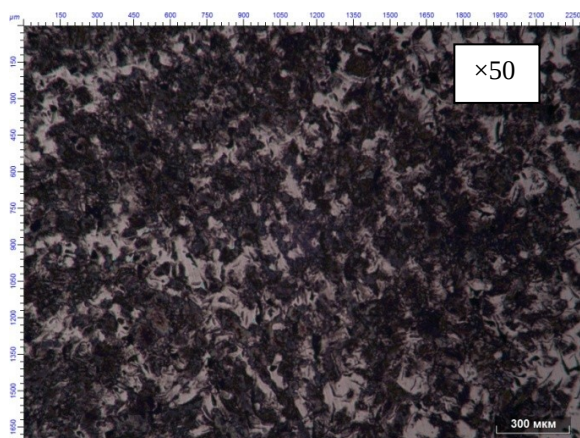
В пограничной зоне, непосредственно контактировавшей с литейной формой, сформирован отбеленный слой. Глубина отбеленного слоя составляет от 0,5 до 2 мм.

Структура отливки на глубине свыше 2 мм

представлена ферритно-перлитной основой. Процентное содержание графита на этой глубине составляет 2,7%, графит – вермикулярный (ВГф2, ВГф3, ВГр2, ВГ85) (рис. 4).

На глубине свыше 10 мм содержание графита составляет 1,9%, графит – пластинчатый (ПГф1, ПГр1, ПГд90, ПГ2) (рис. 3).

Сравнение микроструктур отливок, которые заливались в разные материалы, показало, что кардинальных отличий в структурах не наблюдается. Это является доказательством возможности отказа от традиционных моделей из вспененного полистирола при соответствующих технологических доработках.



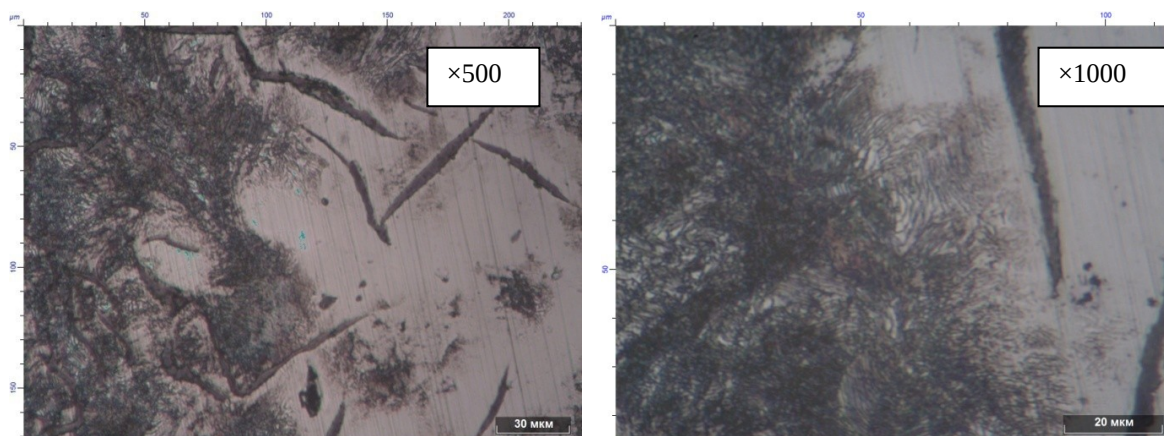


Рис. 4. Микроструктура чугуна отливки «Пробка тампонажная»



Рис. 5. Вермикулярный графит

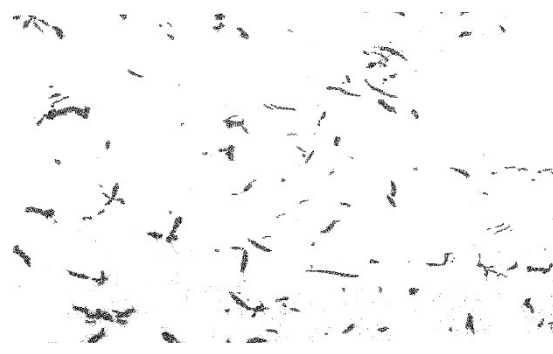


Рис. 6. Пластинчатый графит

Исследование свойств PLA-моделей на формирование пригара

Большинство огнеупорных покрытий ЛГМ были разработаны для ППС. Пригар песка, который остается на отливке по PLA-модели, возникает из-за того, что примененное противопригарное покрытие не подходит для такого вида пластика, оставляя непокрытые части модели, так как PLA является более полярной молекулой, чем ППС, и может проявлять другие смачивающие свойства.

Необходимо подобрать состав, который бы имел более лучшую адгезию к PLA-пластику, так как плохая адгезия при окупании ведет к незакрытым частям модели, через которые происходит пролив жидкого металла, вследствие чего происходит налипание формовочного материала (песка).

Для решения проблемы требуются новые типы противопригарных покрытий, химически совместимые с PLA. Возможно, на основе спирта.

Переход от водной основы к спиртовой решает сразу две фундаментальные проблемы: идеальное смачивание полярной поверхности полилактида, благодаря низкому поверхностному натяжению спиртов и отсутствие температурной деформации. PLA размягчается уже при 55–60°C, поэтому традиционная сушка водных покрытий в термощафах часто приводит к короблению

геометрии.

Поверхностное натяжение воды составляет около 72 мН/м, в то время как у изопропилового или этилового спирта оно находится в пределах 21–23 мН/м. Поверхностная энергия PLA составляет порядка 40 мДж/м².

Поскольку натяжение растворителя значительно ниже энергии поверхности пластика, спиртовая суспензия идеально и равномерно растекается по модели без использования сложных комплексов ПАВ, не собираясь в капли.

Существенное влияние на формирование пригара и общее качество отливки в процессе ЛГМ оказывает не только противопригарное покрытие, но и сам формовочный песок. Используемый в экспериментах сухой кварцевый песок Балашейского месторождения фракции 0,63–0,70 мм в целом отвечает требованиям ГОСТ 2138-91 к пескам для литья по газифицируемым моделям: содержание глинистой составляющей в нём не превышает 1,0%, что минимизирует спекаемость и сохраняет газопроницаемость формы при высоких температурах. Не менее важна форма зёрен: для достижения максимальной плотности упаковки и равномерного отвода газов зёрна должны обладать высокой сферичностью (коэффициент сферичности не ниже 0,7 по ГОСТ 29234.1-91), обеспечивающей низкое межзерновое трение и стабильную

проницаемость при виброуплотнении. Однако даже при соблюдении указанных требований инертный кварцевый наполнитель остаётся пассивным элементом системы «модель–форма–отливка»: его высокая теплопроводность в контактной зоне способствует локальному переохлаждению расплава и фиксации дефектов, а химическая инертность не позволяет активно связывать продукты деструкции полимерной модели. В связи с этим перспективным направлением совершенствования технологии представляется частичная или полная замена кварцевого песка на альтернативные формовочные материалы, способные не только удерживать модель в форме, но и целенаправленно управлять тепловым режимом и газоотводом, что открывает путь к дальнейшему снижению дефектности отливок из PLA и подобных пластиков.

На основе результатов компьютерного моделирования и апробации в реальных условиях цикла ЛГМ были сформулированы следующие требования к новым противопригарным покрытиям:

- хорошая адгезионная способность к пластику PLA;
- огнеупорность наполнителя в покрытии не менее 900°C;
- газопроницаемость – это фактическое количество газа, которое реально проходит через покрытие в единицу времени в заданных условиях. Поэтому противопригарное покрытие должно быть способно пропускать через себя то количество газа, которое выделяет модель из пластика.

Заключение

Таким образом, многоуровневый эксперимент и исследования, объединяющие вычислительный эксперимент, лабораторную апробацию, обеспечил получение научно обоснованных результатов, позволяющих объективно оценить потенциал комбинированной технологии ЛГМ.

В ходе работы при помощи ПО «ПолигонСофт» были рассчитаны температурные поля и выявлены зоны вероятного образования дефектов. Сравнительный анализ макроструктуры позволил оценить качество отливок из разных модельных форм, а определение газотворности материалов – сформулировать четкие требования к противопригарному покрытию.

Доказано, что использование 3D-печати позволяет отказаться от дорогостоящей пресс-оснастки для традиционных моделей из пенополистирола (ППС), делая технологию экономически эффективным и быстрым решением для мелкосерийного производства. Кроме того, замена ППС на биоразлагаемый полилактид (PLA) снижает экологическую нагрузку, открывая перспективы для использования экологически чистых материалов в литейной отрасли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-99-20057, <https://rscf.ru/project/26-99-20057/>

Список источников

1. Шуляк В.С., Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. Санкт-Петербург: Профessional, 2007. ISBN 978-5-91259-011-5. EDN QNBQLR.
2. Феоктистов Н.А., Ахметов И.И. Современное состояние и перспективы развития технологии литья по газифицируемым моделям // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2025. № 24. С. 73-79. EDN YZLWEI.
3. Понамарева Т.Б. Исследование и разработка новых ресурсосберегающих составов противопригарных покрытий литейных форм для обеспечения качественной поверхности отливок: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2025. 46 с.
4. Озеров В.А., Шуляк В.С., Плотников Г.А. Литье по газифицируемым моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
5. Кондратьев С.Ю., Хайдоров А.Д. Науглероживание стальных отливок при литье по газифицируемым моделям и способы его устранения // Литейное производство. 2010. № 4. С. 15-18.
6. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. Введ. 01.07.1988.

Сведения об авторах

Зубков Антон Анатольевич – доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Туркин Иван Сергеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: fna87@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Ахметов Ильназ Ильгизович – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Кузьяев Евгений Анатольевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Юмабаев Азамат Аслямович – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Штыленко Егор Денисович – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH OF ALTERNATIVE MODEL MATERIALS FOR CASTING BY THE LGM METHOD

Anton A. Zubkov – Doctor of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ivan S. Turkin – Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolay A. Feoktistov – Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Ilnaz I. Akhmetov – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Evgeny A. Kuzyaev – master student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Azamat A. Yumabayev – Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Egor D. Shtylenko – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Traditional Lost Foam Casting (LFC) using expanded polystyrene (EPS) requires the production of expensive specialized tooling and molds. This makes the method cost-effective primarily for high-volume production, while small-batch manufacturing remains prohibitively expensive. This study presents a comprehensive investigation of the LFC process integrated with 3D printing for the fabrication of lightweight gasifiable models. Polylactide (PLA), low-density polylactide (PLA-LW), and polymethyl methacrylate (PMMA) were utilized as modeling materials to 3D-

print thin-walled specimens. Casting of SCh20 gray cast iron was performed using models made of PLA, PLA-LW, PMMA, and traditional EPS. A comparative analysis of the resulting microstructures was conducted. To perform a theoretical analysis of the "mold-model-casting" system, the "PolygonSoft" software suite was employed. For the first time, a casting method using 3D-printed plastic models followed by cast iron pouring is proposed, which completely eliminates the mold machining stage. It was established that the mechanical properties of castings produced via 3D-printed models are equivalent to those of traditional ones. The proposed hybrid technology significantly reduces the time and financial costs of engineering preparation for small-batch production of complex metal castings, while maintaining product quality at the level of traditional foundry production.

Keywords: Lost Foam Casting (LFC), PolygonSoft, polylactide (PLA), gas permeability, casting microstructure

The study was carried out by grant of the Russian Science Foundation No. 26-99-20057, <https://rscf.ru/project/26-99-20057/>

Ссылка на статью:

Исследование альтернативных модельных материалов для получения отливок методом ЛГМ / Зубков А.А., Туркин И.С., Феоктистов Н.А., Ахметов И.И., Кузяев Е.А., Юмабаев А.А., Штыленко Е.Д. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 24-31. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)
Zubkov A.A., Turkin I.S., Feoktistov N.A., Akhmetov I.I., Kuzyaev E.A., Yumabayev A.A., Shtylenko E.D. Research of alternative model materials for casting by the LGM method. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 24-31. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.791.1

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-32-39](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-32-39)

Касаткина Е.Г., Мезин И.Ю., Понурко И.В.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ПЛАТИНИТОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Аннотация. В представленной статье проведен анализ процессов формирования требуемых потребительских свойств платинитовой проволоки, которая представляет собой биметаллическую композицию, состоящую из железоникелевого сердечника и наружного медного слоя. В качестве предпочтительной технологии производства этого вида продукции рассматривается процесс твердофазного соединения железоникелевого сердечника и медной оболочки. Выполнен анализ нормативной и технической документации, регламентирующий данный вид продукции и установлены основные показатели качества, необходимые для промышленного применения платинитовой проволоки. С использованием результатов аналитических и экспериментальных исследований определены основные факторы, влияющие на качество конечной продукции. Установлено, что на фоне совокупности явлений, протекающих при прокатке составной биметаллической заготовки, режим деформации является важнейшим фактором, определяющим качество готовой продукции, в том числе и основным из них – коэффициентом разнотолщинности оболочки. Определено, что рациональные условия деформирования биметаллической заготовки могут быть реализованы с использованием двухклетевой прокатной системы. Разработан и реализован на опытно-промышленном оборудовании новый способ оксидирования поверхности платинита на заключительном этапе производственного процесса. Результаты, изложенные в статье, нашли отражение при организации промышленного производства оксидированного платинита.

Ключевые слова: платинит, биметалл, платинитовая проволока, железоникелевый сплав, коэффициент линейного термического расширения, потребительские свойства, борированная платинитовая проволока, оксидный слой

Введение

Платинитовая проволока относится к классу слоистых композиционных материалов и представляет собой биметаллическую проволоку, состоящая из железоникелевого сердечника (прецизионный сплав марки 43Н: 57% железа, 43% никеля), покрытого слоем меди. По назначению эта проволока относится к группе функциональных материалов с заданным значением коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) в радиальном направлении. Такая проволока применяется для изготовления токопроводящих выводов, которые в конструкции прибора жестко и герметично сопрягаются со стеклом, керамикой или другими аналогичными материалами. В зависимости от области применения платинитовой проволоки ее коэффициент термического расширения должен находиться в строго регламентированном интервале значений и быть равным КЛТР стекла или другого сопрягаемого материала [1, 2].

Сортамент и требования к качеству платинита регламентируются ОСТ 110077–84. В российской промышленности, в соответствии с указанным нормативным документом, при производстве платинита используются два способа нанесения медной оболочки: трубчатый и гальванический. Однако эти технологии производства конечной продукции не в полной мере отвечают современным требованиям по экологичности, трудоемкости, производительности и другим технико-экономическим показателям.

На российских предприятиях для улучшения герметичности и повышения некоторых других свойств спая платинитовой проволоки со стеклом на ее медной поверхности формируют тонкий слой, состоящий из борнозакаленного калия и закали меди за счет введения на последних этапах изготовления платинита операции борирования. За рубежом, кроме борированного платинита, фирмы-производители данной продукции предлагают платинитовую проволоку с поверхностным оксидированным слоем. При таком варианте технологии на поверхности проволоки формируется тонкий однородный меднозакаленный слой. Следует отметить, что на российских предприятиях платинитовая проволока с оксидированной поверхностью не производится.

Методы и условия сравнительной оценки показателей качества платинитовой проволоки

Оценка потребительских свойств платинита проведена на основе сравнения требований нормативных документов, фактических данных по испытаниям и контролю образцов платинитовой проволоки российского производства, изготовленной по ОСТ 110077–84, а также аналогичных показателей качества этой продукции ведущих европейских производителей. Исследовались образцы платинита марки ПГБ массового промышленного производства и платинит, изготовленный по экспериментальной технологии соединения компонентов биметалла в твердой фазе [3]. В качестве зарубежных аналогов исследовались образцы платинитовой проволоки

производства фирм «IMPHY» (Франция) и «PHILIPS» (Голландия).

Равномерность распределения меди в плоскости поперечного сечения, как одного из основополагающих факторов, оценивалась значением коэффициента разнотолщинности абсолютного (КРТА), который представляет собой отношение минимального значения толщины оболочки биметаллической композиции к ее максимальному значению. Этот показатель рекомендован ОСТ 11 0077-84 для оценки качества платинита [3]. Сравнительная оценка характеристик отечественного и зарубежного платинита показана в табл. 1.

Анализируемые марки платинитовой проволоки имеют близкую по составу структуру биметаллической композиции. Интервалы массовых долей меди в композиции и содержания никеля в материале сердечника обусловлены необходимостью расширения сортамента изделий из платинитовой проволоки, различающихся значениями КЛТР: от $78 \cdot 10^{-7}$ до $83 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ и от $83 \cdot 10^{-7}$ до $89 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ для отечественных и зарубежных марок платинита, соответственно. В настоящее время на отечественных предприятиях при изготовлении стеклянных конструкций для корпусов полупроводниковых и электровакуумных приборов используются такие марки стекол, как ДС-10 со значением КЛТР, равным $90 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ по ТУ РБ 09429319.002-99 и СЛ97-1 со значением КЛТР, равным $97 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ по 16-91 ЖТДИ

670300.015 ТУ [3]. При этом стекло марки ДС-10 используется при изготовлении стеклянных конструкций для корпусов полупроводниковых приборов, а стекло марки СЛ97-1 в основном используется в производстве электрических ламп накаливания.

Влияние технологических параметров на потребительские свойства платинитовой проволоки

Получение вакуумплотного спая платинита и стекла обеспечивается наличием на поверхности платинита тонкого оксидного слоя, который при пайке взаимодействует с окислами структурной сетки стекла с образованием слоя, состоящего из кристаллов сложных соединений типа шпинелей: $\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$. Практика промышленного применения платинита показала, что оптимальная толщина оксидного слоя, состоящего только из окиси меди Cu_2O , составляет 1-2 мкм. Таким характеристикам оксидного слоя соответствует платинит, изготовленный зарубежными производителями. Борированная платинитовая проволока отечественного производства имеет на своей поверхности борнозакисную пленку толщиной до 6 мкм, что является одной из основных причин отказа от применения такого платинита для производства некоторых видов продукции [3].

Таблица 1

Сравнительный анализ основных потребительских свойств платинита различных производителей

Параметр	Значения параметров	
	ПГБ, ОСТ 11-0077-84	DUMET 42-24 (IMPHY, Франция) *
Состав платинитовой проволоки		
Содержание меди в биметаллической проволоке, %	21–30	17–28
Марка сердечника	43Н (43% Ni)	Fe Ni 42 (42% Ni) Fe Ni 47 (47% Ni)
Толщина переходного слоя на границе раздела компонентов, мкм	до 4-5	до 4
Механические свойства (в скобках – фактические значения)		
Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	не регламентировано (550–700)	500 (470–500)
Относительное удлинение, %	18-24 (11–23)	не менее 20 (25–30)
Электрические характеристики		
Удельное электросопротивление, мкОм·см	не регламентировано	7,5–8,6
Проводимость, % IACS	не регламентировано	20–27
Геометрические параметры поперечного сечения (в скобках – фактические значения)		
Коэффициент разнотолщинности медной оболочки проволоки (КРТА)	Требование: не менее 0,3...0,5 гальванический метод: (0,85...1,0) твердофазный метод: (0,35...0,60)	Требование: не регламентировано (0,85–1,0)
Характеристика поверхности (фактические значения)		
Толщина окисного слоя, мкм	~ 6	~ 1-2
Состав поверхностного слоя	Бура, закись меди (фиолетово-бурый оттенок свидетельствует о присутствии в составе слоя окиси меди)	Закись меди

Коэффициент теплового расширения в радиальном направлении (в зависимости от марки)		
КЛТР, $\times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ в интервале 20–300°C	83–89	78–93

* Платинитовая проволока производства PHILIPS имеет аналогичную характеристику.

Характеристики оксидного слоя на поверхности платинитовой проволоки в нормативных документах, как правило, не оговариваются. Качество этого слоя в большинстве случаев оценивается по его цвету, характеризующему его толщину и состав. Так, по требованию ОСТ 11 0077-84 поверхность борированного платинита должна иметь цвет от светло-кирпичного до вишневого и соответствовать образцам внешнего вида.

Приведенные обстоятельства обуславливают необходимость существенного изменения подхода к производству платинита в целом. К наиболее прогрессивным технологиям производства биметаллической проволоки и, в частности, платинита следует отнести те, которые используют процессы твердофазного соединения компонентов [4] составной заготовки, состоящей из обернутого медью сердечника из специального сплава. Преимущества и перспективность такой технологии производства платинитовой проволоки обусловлены следующими факторами:

- управляемостью режимов деформации посредством формоизменения составной заготовки при прокатке;
- отсутствием развитой диффузионной зоны на границе раздела компонентов;
- возможностью расширения сортамента продукции как по содержанию меди в композиции, так и по материалу сердечника;
- возможностью комплексной автоматизации и компьютеризации производства;
- экологической чистотой производства.

Основными операциями получения биметаллической проволоочной заготовки по рассматриваемому способу являются: подготовка контактирующих между собой поверхностей исходных элементов механическими, химическими или плазменными способами; формирование составной заготовки; сварка продольного шва плакирующей ленты и последующая совместная пластическая деформация полученной биметаллической заготовки (горячая прокатка, волочение и т.д.) [5]. В качестве исходных компонентов для такой технологии могут использоваться: для сердечника – проволока стальная, железоникелевая или из других сплавов с необходимыми физическими и химическими свойствами, а также плакирующая медная лента с необходимой чистотой.

Описанная выше технология реализована в виде непрерывной промышленной линии, включающей

следующие узлы и агрегаты:

- узел подготовки поверхностей компонентов;
- блок формирования составной биметаллической заготовки с узлом аргоно-дуговой сварки продольного шва оболочки;
- узел индукционного нагрева составной биметаллической заготовки;
- прокатный блок.

Назначение прокатного блока заключается в формировании надежного биметаллического соединения компонентов при их совместной пластической деформации [6]. С целью активации процесса соединения компонентов биметаллической композиции пластическую деформацию заготовки целесообразно осуществлять ее прокаткой в горячем состоянии. В качестве деформирующего устройства предпочтительней использовать прокатную клеть, состоящую из двух последовательно расположенных двухвалковых калибров, с приводом на переднюю пару валков (рис. 1).

Структурная схема, отражающая чувствительность потребительских характеристик платинитовой проволоки к режимам технологических операций и других факторов при ее производстве на основе твердофазного соединения компонентов, приведена на рис. 2.

Проведенный анализ причинно-следственной связи рассматриваемой совокупности факторов и показателей качества (см. рис. 2) наглядно иллюстрирует взаимообусловленность совмещаемых при прокатке процессов: обеспечение надежного биметаллического соединения компонентов и их контролируемое формоизменение. Пластическая деформация, являясь активирующим фактором развития топохимических процессов на границе раздела компонентов, обуславливает прочность их металлической связи, которая, в свою очередь, влияет как на механические свойства биметаллической композиции, так и на развитие течения компонентов в очаге деформации. Указанные процессы определяются не только настройкой калибра, но и динамикой формирования межслойного соединения. Таким образом, на фоне совокупности явлений, протекающих при прокатке составной биметаллической заготовки в прокатном блоке с целью сварки, режим деформации является одним из важнейших факторов, определяющих качество готовой продукции, в том числе и основного его показателя – коэффициента разнотолщинности оболочки (КРТА).

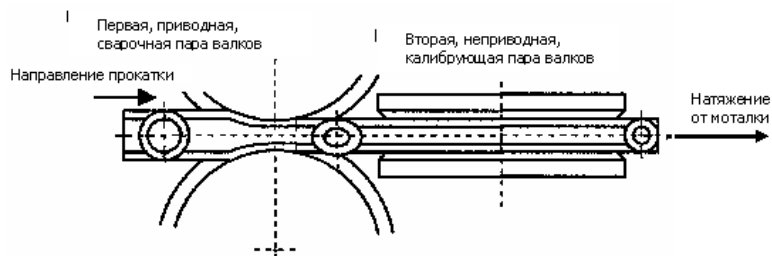


Рис. 1. Схема деформации составной биметаллической заготовки

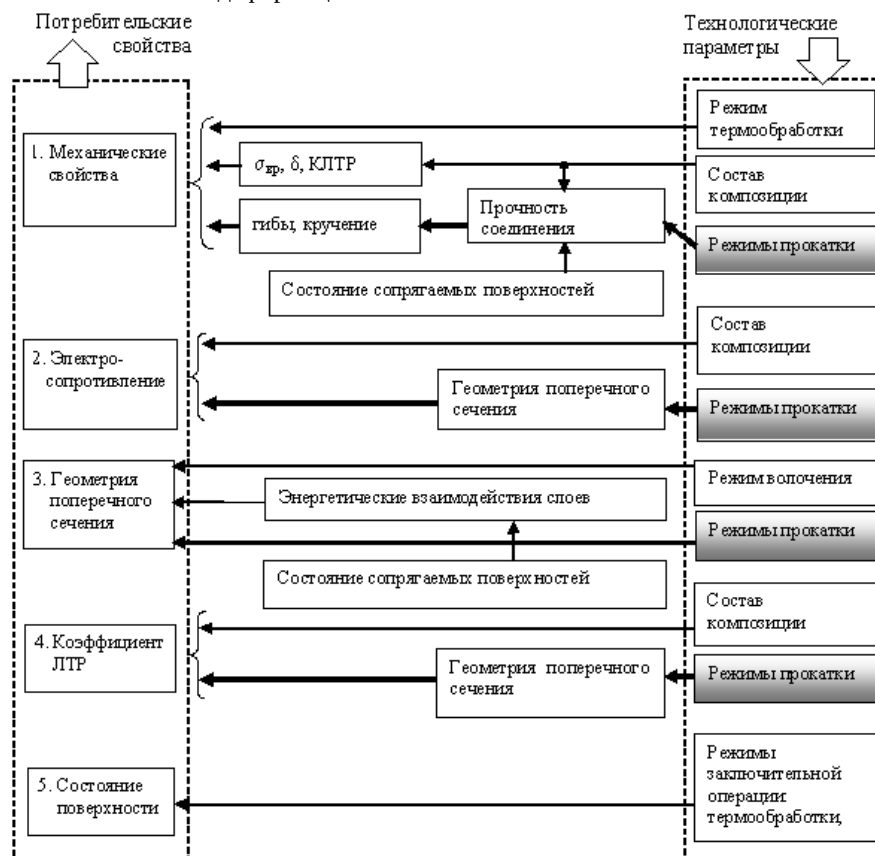


Рис. 2. Структурная схема формирования потребительских свойств

Экспериментальные исследования платинитовой проволоки, изготовленной по технологии твердофазного соединения компонентов

С учетом результатов выполненного анализа проведен комплекс экспериментальных и технологических исследований. На основе исследований формоизменения составной биметаллической заготовки в калибрах простой формы и разработанной ранее математической модели течения бинарной системы при прокатке в системе «приводная клеть – неприводная клеть – моталка» [7, 8] установлены зависимости качества конечной продукции от основных параметров процесса (рис. 3), включая переднее натяжение как фактора, регулирующего разнотолщинность оболочки [9, 10].

Сформированная описываемым способом биметаллическая катанка подвергается дальнейшему волочению на конечный размер, а на заключительной стадии – формированию дополнительных эксплуатационных свойств готового платинита на основе управляемого совмещенного процесса его термообработки и высокотемпературного оксидирования поверхности [6].

Структура непрерывной линии оксидирования, в состав которой входят семь основных узлов, приведена на рис. 4. В соответствии со схемой на узел размотки 1 платинит поступает после мокрого волочения на катушках емкостью до 10 кг. Узел промывки 2 предназначен для удаления с поверхности заготовки остатков смазки после волочения и других загрязнений. Для промывки возможно использование типовых растворов

кальцинированной соды, тринатрийфосфата и др. Узел подготовки поверхности 3 обеспечивает дополнительное активирование поверхности платинита перед оксидированием. Далее следует узел нагрева и высокотемпературного окисления с ванной охлаждения 5. Нагрев платинита осуществляется в наклонной проходной электропечи сопротивления, температура нагрева (до 1000°C) регулируется с помощью тиристорного преобразователя и контролируется с помощью трех вмонтированных в печь термпар. На выходе из печи установлено устройство высокотемпературного окисления, включающее зону с контролируемой атмосферой. Тянущее устройство 6 выполняет основные функции по транспортировке заготовки через линию

оксидирования с заданной скоростью (измеряется с помощью тахогенератора, установленного на валу приводного двигателя, управляемой тиристорным преобразователем напряжения). Готовый оксидированный платинит принимается узлом намотки 7. Натяжение намотки регулируется специальным устройством. Намотка осуществляется на катушку емкостью до 10 кг.

В рамках выполненных исследований проведено изучение режимов нагрева и высокотемпературного окисления поверхности платинита, по результатам которых определены рациональные параметры проведения совмещенного процесса термообработки и оксидирования. Результаты этих исследований приведены на рис. 5.

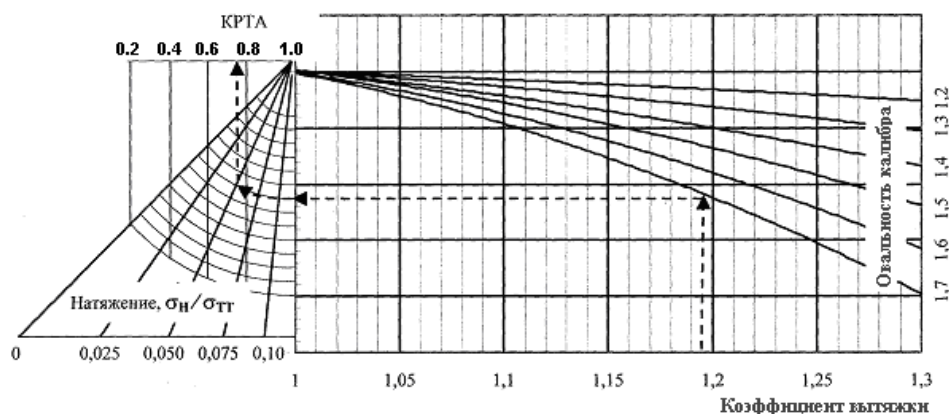


Рис. 3. Номограмма для определения показателя разнотолщинности оболочки на выходе из первой клетки в зависимости от режима прокатки

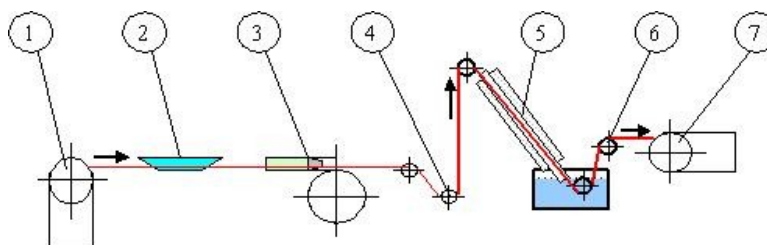


Рис. 4. Схема совмещенного процесса термообработки и оксидирования платинита

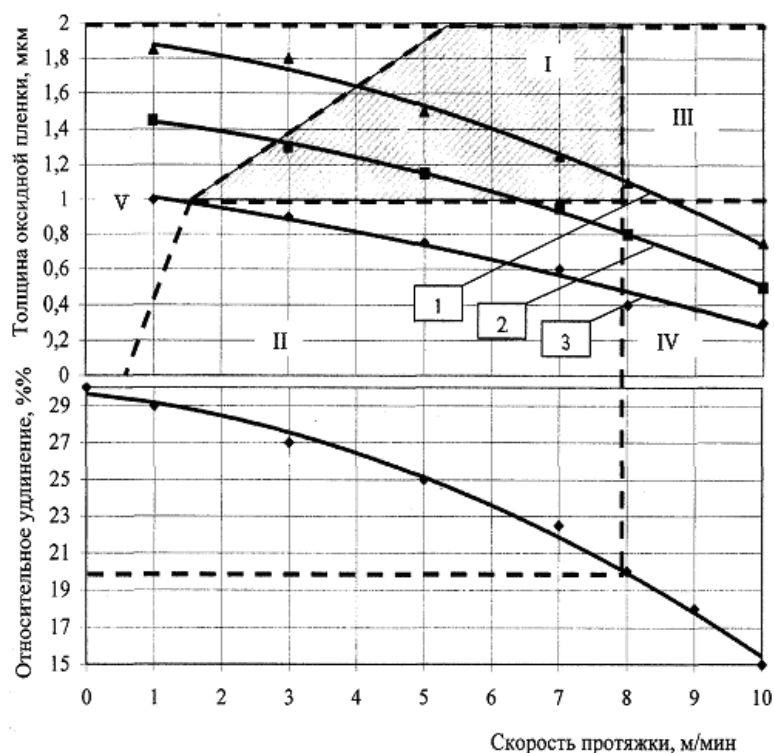


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения и толщины оксидной пленки платинитовой проволоки $\varnothing 0,30-0,40$ мм от скорости протяжки заготовки в печи при различной длине зоны высокотемпературного окисления: 1 – 20 мм; 2 – 12 мм и 3 – 5 мм [5]

Графическая зависимость, представленная на рис. 5, разделена на пять условных зон. Зоны со II по V по разным причинам не соответствуют требованиям к качеству платинита, а именно: в зоне II толщина оксидного слоя составляет менее 1 мкм; в зоне III – при удовлетворительной толщине оксидного слоя значение относительного удлинения меньше допустимого; в зоне IV – оба параметра не удовлетворяют требованиям; в зоне V – при требуемых значениях относительного удлинения и толщины оксидной пленки, в ее составе присутствуют примеси окиси меди CuO. Как показал анализ указанной зависимости, только зону I следует считать областью рекомендуемых режимов реализации совмещенного процесса термообработки и оксидирования, поскольку все параметры платинита соответствуют предъявляемым требованиям потребителей и нормативной и технической документации [5].

Для оценки предложенных в работе технических и технологических решений были произведены опытные партии платинитовой проволоки, изготовленной по рекомендуемым режимам. Произведенная проволока была передана ряду потребителей для промышленных испытаний, по результатам которых получены положительные заключения, а сами результаты этих испытаний представлены в табл. 2.

Заключение

Проведенные аналитические и

экспериментальные исследования позволили установить зависимости показателей качества платинита от технологических режимов его производства. Установлено, что в качестве предпочтительного способа изготовления этого вида продукции является процесс твердофазного соединения железоникелевого сердечника и медной оболочки.

В рамках выполненных исследований проведено изучение режимов нагрева и высокотемпературного окисления поверхности платинита, по результатам которых определены рациональные параметры проведения совмещенного процесса термообработки и оксидирования. Результаты изложенных в работе исследований нашли отражение в рекомендациях по организации промышленного производства оксидированного платинита на российских предприятиях.

Список источников

1. Солдатенко А.Ф., Касаткина Е.Г. Производство платинита: технология, качество: монография. Магнитогорск, 2009. 183 с.
2. Гун Г.С., Касаткина Е.Г., Солдатенко А.Ф. Математическая модель течения биметаллической заготовки при прокатке в калибре // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: труды междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: Изд-во политехнического ун-та, 2005. С.40-43.
3. Касаткина Е.Г., Мезин И.Ю., Солдатенко А.Ф. Анализ потребительских свойств платинита разных производителей // Качество в обработке материалов. 2015. № 2(4). С. 24-30.
4. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
5. Технологические основы повышения качества платинита / Касаткина Е.Г., Мезин И.Ю., Гун И.Г. и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2018. Т.18. №4. С. 98-108.
6. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Металлургия, 1964. 271 с.
7. Стеблянко В.Л., Солдатенко А.Ф. Неравномерность деформации компонентов при сварке биметалла прокаткой в калибре // Теория и практика процессов обработки композиционных и сплошных материалов: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1990. С. 11-19.
8. Солдатенко А.Ф., Касаткина Е.Г. Влияние распределения компонентов биметаллической проволоки в плоскости поперечного сечения на потребительские свойства // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С.205-211.
9. Касаткина Е.Г. Управление показателями качества при производстве платинита // Материалы 64-й науч.-техн. конф.: сб. докл. Магнитогорск: МГТУ, 2006. С. 83-85.
10. Солдатенко А.Ф., Касаткина Е.Г. Способ изготовления платинитовой проволоки. Пат.№ 2354517 РФ на изобретение, МПК В23К20/04. БИПМ, 2009. №13. С.522-523.

Таблица 2

Значения показателей качества оксидированной платинитовой проволоки $\varnothing$ 0,35 мм по результатам входного контроля у потребителя

Проверяемый параметр	Значения параметра			
	По ОСТ	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Коэффициент разнотолщинности, не менее	0,5	0,85–0,95		
Относительное удлинение, %	≥ 20	18–23	25–28	29
Состав поверхностного слоя	Борзакись	Закись меди	Закись меди	Закись меди
Массовая доля оксидной пленки, %	$\sim 2,0$	0,17	0,56	1,15
Абсолютная масса пленки на 1 м, г	0,0162	0,001377	0,004536	0,009085
Расчетная толщина оксидной пленки, мкм	2,457	0,209	0,688	1,382
Цвет платинита	Вишневый	Желто-коричневый	Светло-коричневый	Розово-коричневый

Сведения об авторах

Мезин Игорь Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: i.mezin@magtu.ru.

Касаткина Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tssa@magtu.ru.

Понурко Ирина Витальевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tssa@magtu.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FORMATION OF CONSUMER PROPERTIES PLATINITE WIRE

Kasatkina Elena G. – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tssa@magtu.ru.

Mezin Igor Yu. – Dr. Sci. (Tech.), Head of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department,

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

Ponurko Irina V. – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tssa@magtu.ru.

Abstract. The presented article analyzes the processes of formation of the required consumer properties of platinite wire, which is a bimetallic composition consisting of an iron-nickel core and an outer copper layer. The preferred technology for producing this type of product is the solid-phase bonding process between an iron-nickel core and a copper sheath. An analysis of the regulatory and technical documentation governing this type of product was completed, and key quality indicators necessary for the industrial use of platinum wire were determined. Based on the results of analytical and experimental studies, key factors influencing the quality of the final product were identified. It is established that, against the backdrop of a combination of phenomena occurring during the rolling of a composite bimetallic blank, the deformation mode is the most important factor determining the quality of the finished product, including the key factor - the sheath thickness variation coefficient. It has been determined that rational conditions for deformation of a bimetallic workpiece can be realized using a two-stand rolling system. A new method for oxidizing the surface of platinite at the final stage of the production process was developed and implemented on Pilot-industrial equipment. The results presented in the article were used in organizing the industrial production of oxidized platinite.

Keywords: platinite, bimetal, platinite wire, iron-nickel alloy, coefficient of linear thermal expansion, consumer properties, borated platinite wire, oxide layer

References

1. Soldatenko A.F., Kasatkina E.G. Production of platinite: technology, quality: monograph. Magnitogorsk, 2009. 183 p.
2. Gun G.S., Kasatkina E.G., Soldatenko A.F. Mathematical model of the flow of a bimetallic workpiece during rolling in a caliber // Proceedings of the international scientific and technical conf. "Modern achievements in the theory and technology of plastic processing of metals". St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2005. P. 40-43.
3. Kasatkina E.G., Mezin I.Yu., Soldatenko A.F. Analysis of consumer properties of platinite from different manufacturers. Quality in materials processing. 2015. No.2(4). P.24-30.
4. Karakozov E.S. Connection of metals in the solid phase. Moscow: Metallurgy, 1976. 264 p.
5. Kasatkina E.G., Mezin I.Yu., Gun I.G., et al. Technological foundations for improving the quality of platinite. Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 98-108.
6. Arkulis G.E. Joint plastic deformation of different metals. Moscow: Metallurgy, 1964. 271 p.
7. Steblyanko V.L., Soldatenko A.F. Uneven deformation of components when welding bimetal during rolling in a caliber // Theory and practice of composite and continuous materials processing processes: Interuniversity collection of scientific papers. Magnitogorsk: MGMI, 1990. - P. 11-19.
8. Soldatenko A.F., Kasatkina E.G. Influence of distribution of components of bimetallic wire in the cross-sectional plane on consumer properties // Processing of continuous and layered materials: Interuniversity collection of scientific papers. Magnitogorsk: MSTU, 2001. P. 205-211.
9. Kasatkina E.G. Management of quality indicators in platinite production // Proceedings of the 64th scientific and technical conf.: Collection of reports. Magnitogorsk: MSTU, 2006. P.83-85.
10. Soldatenko A.F., Kasatkina E.G. Method for manufacturing platinite wire. Patent No. 2354517 of the Russian Federation for invention, IPC B23K20/04. BIPM, 2009. No. 13. P. 522-523

*

* Ссылка на статью:

Касаткина Е.Г., Мезин И.Ю., Понурко И.В. Формирование потребительских свойств платинитовой проволоки // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 32-39. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-32-39](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-32-39)

Kasatkina E.G., Mezin I.Yu., Ponurko I.V. Formation of consumer properties platinite wir. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 32-39. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-32-39](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-32-39)

ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 620.171.5

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-40-47)

Конев С.В., Осипова О.А., Кенарь Е.В., Козлов Р.А.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛЯХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Поляризационно-оптический и конечно-элементный методы характеризуются визуализацией картин напряжений и деформаций во внутриконтурных точках моделей, нагруженных твердых тел. Дана сравнительная оценка этих методов. Комплексная оценка произведена сопоставлением объема теоретических знаний, необходимых для освоения методов, сложности подготовки моделей, достоверности моделирования граничных условий, а также сложности понимания закономерностей распределения напряжений и точности получаемых результатов. На примере моделирования пружинной детали верхнего строения железнодорожного пути – рельсового противоугона – наглядно показаны преимущества и недостатки оптической модели и конечно-элементной модели, построенной в Российском программном комплексе «WinMachine». Поляризационно-оптический метод может быть использован на начальном этапе моделирования для качественного анализа напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта. Метод конечных элементов позволяет получить уточненные закономерности распределения напряжений и деформаций, полученные поляризационно-оптическим методом.

Ключевые слова: поляризационно-оптический метод, метод конечных элементов, модель, сложность, точность, картины напряжений и деформаций

Известно достаточное количество методов практического определения малых упругих перемещений с последующим вычислением напряжений в упругодеформируемом твердом теле: при помощи механических и оптических тензометров [1, 2], тензометрами сопротивления [3, 4], методом муар [5, 6] и др. Но визуально наиболее наглядными и информативными являются картины напряжений, полученные поляризационно-оптическим методом [7, 8]. Поляризационно-оптический метод отличается также тем, что позволяет исследовать напряжения во внутриконтурных точках тела без нарушения его сплошности. Используемые в этом методе модели твердых тел на протяжении многих лет были практически единственным дидактическим материалом, наглядно и просто демонстрирующим картину напряжений в точках внутри тела на курсах по сопротивлению материалов, теории упругости и строительной механике (рис. 1).

Однако в последнее время активно развивается компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния твердого тела. Известно, что любое твердое тело может быть разбито на конечные элементы, подчиняющиеся законам теории упругости [9, 10]. Поэтому тело, как упругодеформируемая среда, может быть представлено в виде неразрывно связанных между собой в узловых точках упругодеформируемых элементов конечного размера. Напряженно-

деформированное состояние каждого элемента определяется аппроксимирующей функцией, общей для всех элементов рассматриваемой области. Поскольку при этом не используются уравнения равновесия точки тела и неразрывности тела в точке [11, 12], то расчет получается приближенным. Однако такая постановка задачи позволяет схематизировать расчет, используя для этого матричную форму записи уравнений теории упругости. А это, в свою очередь, позволяет использовать высокопроизводительную вычислительную технику, позволяющую добиться высокой точности приближенного расчета за счет уменьшения размера конечных элементов. При этом компьютер позволяет получить на экране монитора цветную картину рассчитанных напряжений, что ставит МКЭ на один уровень визуализации с поляризационно-оптическим методом.

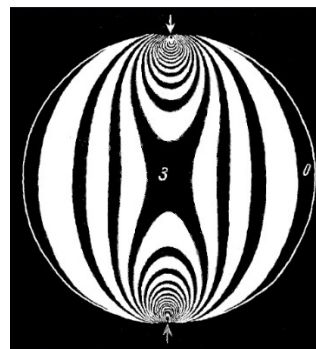


Рис. 1. Картина изохром (линий $\sigma_1 - \sigma_2$) в модели диска, сжатом диаметрально приложенными силами (задача Герца)

Целью настоящей работы является сравнительная характеристика поляризационно-оптического (ПО) и конечно-элементного (КЭ) методов визуализации напряжений.

Сравнение ПО- и КЭ-методов проводится по следующим характеристикам:

1. Объем теоретических знаний для понимания основ метода.
2. Сложность изготовления моделей и область моделирования.
3. Достоверность моделирования граничных условий.
4. Сложность понимания («расшифровки») полученных картин.
5. Точность метода.

1. Объем теоретических знаний для понимания основ метода.

1.1. Поляризационно-оптический метод.

В основе ПО-метода лежат несколько физических явлений.

Эффект линейной поляризации света позволяет упорядочить колебания волн света в одной плоскости. Это достигается пропусканием луча через специальную пленку, содержащую однонаправленные близко расположенные полимерные цепи [13]. Другой вариант предусматривает пропускание луча через пленку с напыленными одноосно ориентированными мелкими кристаллами герпатита [14].

Затем используется эффект двулучепреломления. Поляризованный луч света, проходящий через плоскую прозрачную нагруженную модель, изготовленную из оптически активного материала, разделяется на два луча. При этом поляризованные волны лучей располагаются таким образом, что в их плоскостях лежат векторы главных напряжений. Кроме того, согласно основному закону фотоупругости Вертгейма [15], скорость прохождения каждого луча прямо пропорциональна модулю соответствующего главного напряжения, вследствие чего на выходе из нагруженной модели эти два луча получают разность хода Δ , пропорциональную разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Таким образом, эти явления позволяют получить информацию о напряжениях в модели. Но, поскольку полученные лучи лежат в перпендикулярных плоскостях, то необходима повторная поляризация, которая позволяет получить интерференционную картину линий разности главных напряжений. Полная схема метода показана на рис. 2.

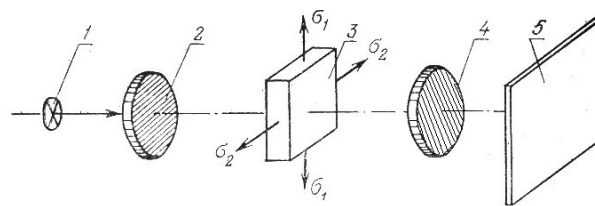


Рис. 2. Расположение элементов ПО-метода на оптической оси:

- 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – модель;
4 – поляризатор-анализатор; 5 – экран

Моделирование напряженного состояния в непрозрачных деталях посредством его изучения в прозрачных оптически активных моделях той же конфигурации возможно по следующей причине. В уравнениях теории упругости (плоская задача, уравнения (1)-(2) отсутствуют механические характеристики материала – модули упругости E , G и коэффициент Пуассона ν :

– уравнения равновесия точки тела:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y = 0;$$

– уравнение совместности линейных и угловых деформаций:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (2)$$

То есть в прозрачной и непрозрачной моделях поля напряжений получаются подобными. Полученные в прозрачной модели величины напряжений затем пересчитываются в пропорции.

Как следует из вышеизложенного, для понимания метода достаточно знать основы физики и механики твердого тела (сопротивление материалов, теорию упругости).

1.2. Конечно-элементный метод.

В основе КЭМ лежат уравнения теории упругости, записанные в матричной форме, такие как уравнения Коши:

$$\varepsilon = Du, \quad (3)$$

где D – матрица дифференцирования,

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

u – вектор-столбец перемещений,

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

и обобщенный закон Гука

$$\sigma = A \varepsilon,$$

где σ – вектор-столбец напряжений;

A – матрица закона Гука,

$$A = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Помимо этого, нужно уметь составлять матрицу жесткости каждого конечного элемента и глобальную матрицу жесткости всего упругодеформируемого тела, которое образует совокупность КЭ и разрешающее (конечное) матричное уравнение. Поскольку уже при разбиении тела на три-четыре конечных элемента эта задача предельно усложняется, а еще требуется и визуализация полученного решения, то появляется необходимость в профессиональном программировании.

Таким образом, теория метода КЭ представляется более сложной, чем теория поляризационно-оптического метода.

2. Сложность изготовления моделей и область моделирования.

Как отмечено выше, модели для поляризационно-оптического метода изготавливаются из оптически активного материала, чаще всего – из эпоксидной смолы [7, 16]. Плоская упругая задача исследуется на моделях, изготовленных из пластин с идеально равной толщиной по всему полю пластины. Технология изготовления прецизионных однородных пластин из эпоксидной смолы с хорошим светопропусканием достаточно сложна. Основная сложность заключается в высокой адгезии эпоксидной смолы к форме и токсичности качественных отвердителей, поэтому работы должны проводиться в химической лаборатории.

Последующее изготовление моделей исследуемых тел состоит в их механической обработке до требуемой конфигурации. Область моделирования преимущественно сводится к плоской задаче. Моделирование объемной задачи затруднено. Исследовать неплоскую модель, выполненную целиком из оптически активного материала невозможно, поскольку луч света проходит разное расстояние в различных частях модели. Вклейка пластины в оптически малоактивный прозрачный материал должна быть выполнена оптически

неактивным однородным клеем. Следует также учитывать отражение света от неплоской поверхности модели и т.д.

Модель диска, в котором получены изохромы по рис.1, изготовленная из эпоксидной смолы Э-40, пластифицированной дибутилфталатом и отвержденной малеиновым ангидридом, показана на рис. 3.



Рис. 3. Оптически активная модель диска

При исследовании пластических деформаций оптические модели нагружают при температуре размягчения, с последующим охлаждением нагруженной модели [8]. Отвержденную таким образом объемную модель можно исследовать, разрезая модель послойно на плоские темплеты с «замороженной» картиной изохром.

В свою очередь, моделирование методом КЭ требует навыков работы в соответствующих компьютерных программных комплексах, например, таких, как отечественные ПК КОМПАС, ПК Studio и ПК Structure-3D [17 - 19].

Очевидная сложность цифрового метода проявляется при исследовании нелинейных, например пластических, деформаций. Программные комплексы МКЭ при повышенных деформациях модели требуют тщательного подбора шагов (разбиений) нагружения, а также задания оптимальной величины сходимости при выполнении итераций. Эти параметры варьируются как для оптимизации времени решения, так и для недопущения чрезмерного искажения модуля Якобиана [20, 21], используемого при решении систем линейных дифференциальных уравнений (СЛУ), в том числе уравнений механики твердого тела. Увеличение количества шагов и подшагов многократно увеличивает время решения задачи и совершенно не гарантирует преждевременной остановки программы - «решателя» СЛУ.

Распространенность компьютерной техники и компьютерная грамотность делает КЭ-метод более доступным по сравнению с ПО-методом.

3. Достоверность моделирования граничных условий.

Изготовленная из оптически активного материала модель обладает реальным объемом, массой и контактными поверхностями. Поэтому необходимые граничные условия (закрепление на опорах, активные силовые факторы) выполняются

автоматически и проверяются инструментально. В связи с этим соответствие модели реальному объекту преимущественно определяется практическими навыками исследователя при работе с лабораторным оборудованием и инструментами.

При компьютерном моделировании методом КЭ «изготовление» модели и задание граничных условий осуществляется виртуально. Это обстоятельство, помимо отличного понимания моделируемой задачи, требует понимания особенностей работы компьютерной программы (математической модели, заложенной в «решатель систем линейных уравнений»). В качестве примера рассмотрим моделирование определения механических характеристик образца по ГОСТ 25.503-97 [22].

Согласно ГОСТ, образец симметрично сжимается между двумя траверсами пресса.

При ПО-моделировании контурные условия (условие неподвижности сжимаемого образца после приложения нагрузки и условия контакта поверхности образца с поверхностью опор, сжимающих образец) понимаются и выполняются автоматически.

При выполнении компьютерного моделирования можно предположить, что, поскольку при приложении одинакового давления на противоположных торцах виртуальная модель будет уравновешена (рис. 4), то это позволит программе выполнить расчет ее напряженно-деформированного состояния. Но это не так. Программа не произведёт расчет, посчитав, что модель не закреплена.

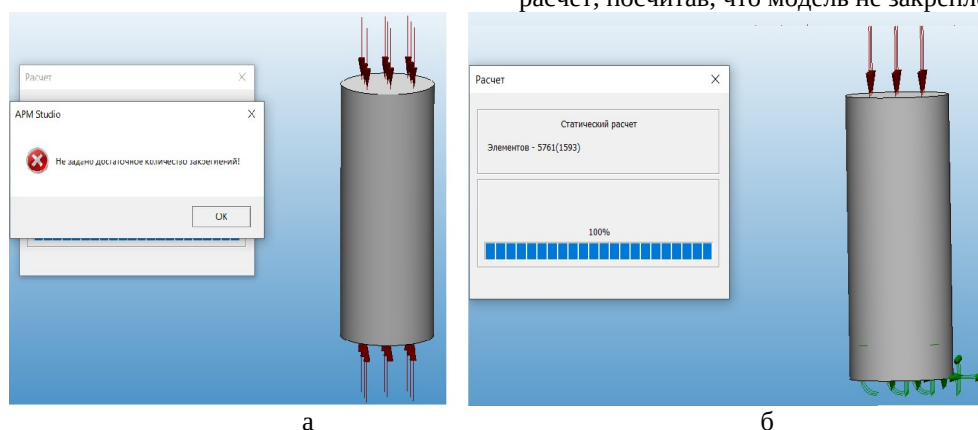


Рис. 4. Нагружение образца в ПК Studio:

а – для решения недостаточно закреплений;

б – решение выполняется при отсутствии перемещений точек торца модели

Несмотря на то, что сумма приложенных к модели сил равна нулю, для программы это означает, что модель, как вариант, имеет возможность двигаться в пространстве с постоянной скоростью. Программа Studio выдает сообщение «Не задано достаточное количество закреплений». Таким образом, при компьютерном решении этой простой задачи возникает проблема создания соответствующего закрепления образца. Проблема усугубляется тем, что, согласно ГОСТ 25.503-97, при определении модуля упругости и предела текучести необходимо обеспечить отсутствие смазки на контактных поверхностях образца. То есть в компьютерной модели требуется обосновать и задать особый закон распределения сил трения по торцам образца, контактирующим с траверсами. Такое требование значительно усложняет моделирование методом КЭ.

4. Сложность понимания («расшифровки») полученных картин.

Сложность анализа полученных картин ПО-методом значительно зависит от поставленной задачи.

При поставленной задаче определить

конкретные значения напряжений в точках модели по картине изохром дополнительно требуется:

а) отдельным опытом определить оптическую постоянную материала модели;

б) получить дополнительные картины изоклин – линий наклона главных напряжений к выбранным координатным осям (рис. 5, а);

в) по линиям изоклин необходимо построить поля изостат (рис. 5, б) – траекторий главных напряжений, по которым далее выполняется вычисление главных напряжений.

После этого проводится графическое интегрирование по выбранной изостате. Однако если требуется провести лишь качественный анализ напряжений, то ПО-метод дает возможность очень просто и наглядно сделать важные заключения и выводы, а также наметить пути достижения оптимального распределения напряжений.

Метод компьютерного КЭ позволяет определить значение любых напряжений в любой точке модели простым наведением курсора на нужную точку (рис. 6), что является неоспоримым преимуществом этого метода.

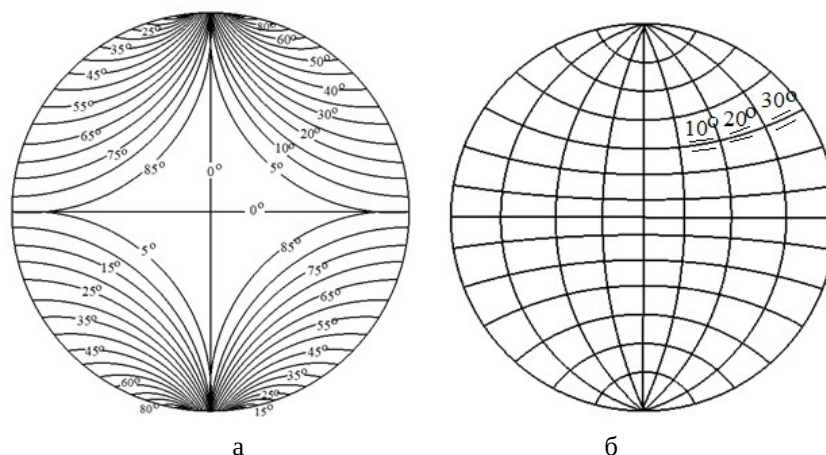


Рис. 5. Поля изоклин и изостат, соответствующие нагружению диска с получением изохром по рис. 1.

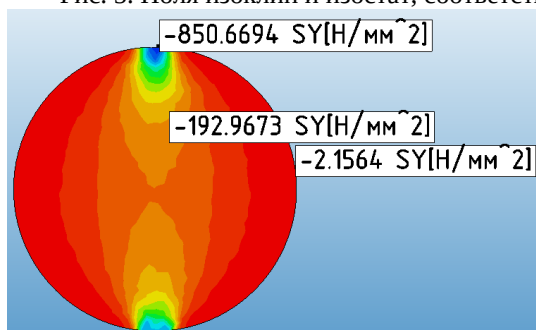


Рис. 6. Определение напряжений в точках модели диска, сжатого диаметрально приложенной силой, КЭ-методом

5. Точность метода.

При моделировании ПО-методом точность определения напряжений ощутимо снижается при переносе линий изоклин с поля модели на расчетный чертеж (изоклины порой имеют значительную ширину и прерываются в изотропных точках, в которых $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$) и составлении поля изостат.

При моделировании методом КЭ точность расчета определяется характеристикой сетки разбиения модели (величиной КЭ, адаптивностью сетки КЭ к элементам модели и др.) и зависит от характеристики используемого оборудования (оперативной памяти ПК). Современные компьютеры позволяют получить достаточно точную картину напряжений (в том числе рассчитанных по теориям прочности) и перемещений. Дополнительно можно получить картины коэффициента запаса прочности, полей пластических деформаций и др.

Выполним сравнительное моделирование ПО- и КЭ-методом на примере нагружения пружинной детали верхнего строения железнодорожного пути – противоугона [23].

Противоугон нужен для увеличения сопротивления смещению рельса относительно шпалы. При движении локомотива крутящий момент от силовой установки передается через ведущую колесную пару на головку

рельса, образуя силу, сдвигающую рельс. К деревянным шпалам рельс прижимается через накладку костылями, однако их удерживающей способности зачастую оказывается недостаточно. Поэтому на подошву рельса дополнительно устанавливаются (защелкиваются) пружинные скобы – противоугоны, которые, упираясь в шпалу, препятствуют смещению рельса (рис. 7). На рис 7 красной стрелкой показано усилие, действующее на рельс от колеса подвижного состава, а зелеными стрелками показаны усилия, действующие на рельс со стороны ветвей зева противоугона и создающие силы трения. Суммарная сила трения по ГОСТ 32409-2013 должна быть не менее 7840 Н.

Модель железнодорожного противоугона, изготовленная из эпоксидной смолы Э-40, пластифицированной дибутилфталатом и отвержденной малеиновым ангидридом, показана на рис. 8. Картины изохром в оптически активной модели противоугона показаны на рис. 9.

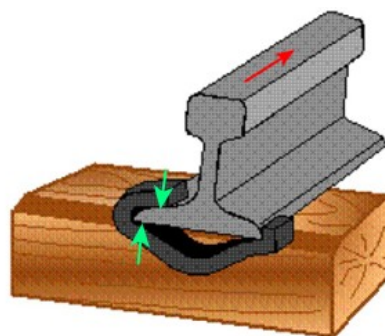


Рис. 7. Пружинный противоугона, закрепленный на рельсе



Рис. 8. Оптически активная модель железнодорожного противоугона



полосы №1 и №4 на внутренней поверхности зева полосы №1 и №2 на внешней поверхности зева изоклина

Рис. 9. Изохромы в оптической модели противоугона при постановке на рельс

На рис. 8, 9 видно, что внутренняя поверхность малой пружинной петли (зева) противоугона является источником концентрации напряжений. При постановке противоугона на рельс ветви зева раздвигаются и дуга зева нагружается внецентренным растяжением. Изохромы появляются на контуре модели и по мере нагружения продвигаются вглубь модели.

Первая изохрома (красного цвета) появляется на внутренней поверхности дуги зева раньше, чем первая изохрома красного цвета с внешней стороны. Порядок

последней в очередности появления по рис. 9 изохромы красного цвета на внутренней поверхности дуги зева – №4. При этом на внешней поверхности зева сформировалась вторая красная изохрома и зарождается третья изохрома. То есть на внутренней поверхности зева появляется приблизительно в 1,5–2 раза больше изохром, чем с противоположной стороны зева противоугона. Отмеченное обстоятельство позволило сделать вывод о неравномерности нагружения зева и разработать противоугоны с трапециевидным поперечным сечением [24], повышающим срок службы противоугона.

Метод КЭ позволил уточнить результаты этого исследования. Модель противоугона, полученная в ПК КОМПАС и импортированная в ПК Studio, показана на рис. 10. Картина («карта») напряжений, полученная при нагружении модели, выполненной согласно ГОСТ из стали 60С2, показана на рис. 11. Каждая ветвь зева противоугона нагружена силой 5500 Н, являющейся ответной реакцией со стороны подошвы рельса по рис. 7. Суммарно эти две силы создают силу трения – требуемое по ГОСТ сопротивление сдвигу противоугона относительно рельса, равную 7840 Н.

Как видно из рис. 11, компьютерное моделирование методом КЭ позволяет получить точные значения напряжений в любой точке модели. В результате можно определить точное отношение значений напряжений на внутренней и внешней ветвях зева противоугона: 232,75 МПа/123,34 МПа = 1,89.

Выводы

1. Поляризационно-оптический и конечно-элементный методы отличает визуализация картин напряжений и деформаций во внутриконтурных точках моделей, нагруженных твердых тел.

2. Поляризационно-оптический метод основан на простых физических законах и может быть использован на начальном этапе моделирования для качественного анализа напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта на реальных моделях. Моделированием ПО-методом получены рекомендации по повышению срока службы железнодорожного противоугона.

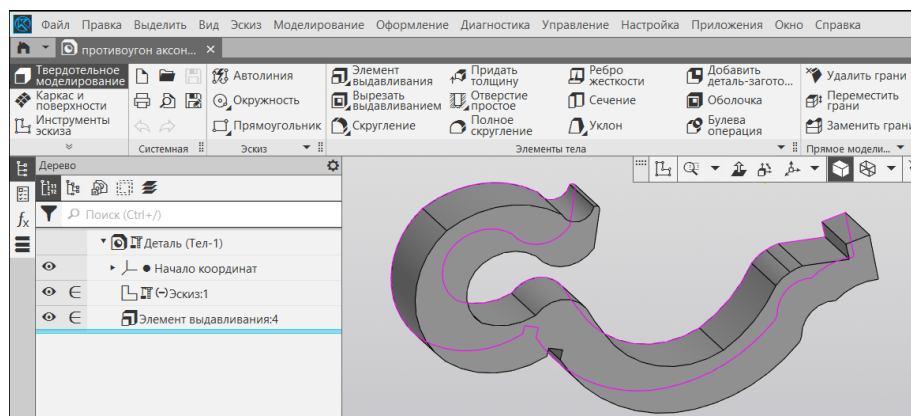


Рис. 10. Модель железнодорожного противоугона для исследования методом КЭ

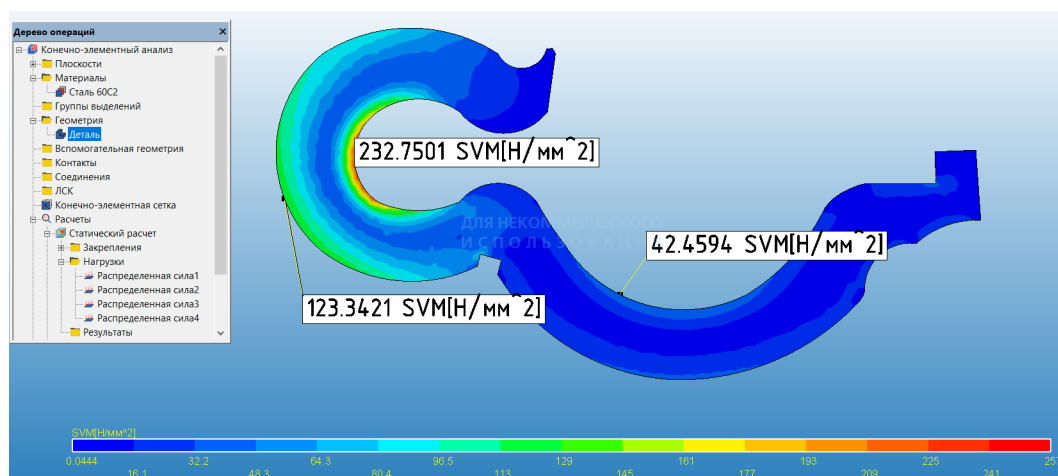


Рис. 11. Напряжения по теории прочности Мизеса в противоугоне 1П75 при постановке на рельс Р75

3. Метод конечных элементов позволяет получить уточненные картины напряжений и деформаций при условии владения базовыми положениями механики твердого тела, необходимыми при виртуальном компьютерном моделировании. Использование метода КЭ позволило получить дополнительные рекомендации по оптимизации формы поперечного сечения противоугона.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НТЦ АПМ Замрий А.А. и Лотареву А.В. за оказанную помощь в создании моделей в ПК «WinMahine».

Список источников

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть II. Конечные деформации. М.: Наука, 1984. 432 с.
2. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. В 3-х т. / под ред. Бернштейна М. Л., Рахштадта А. Г. 4-е изд., перераб. и доп. Т. 1. Методы испытаний и исследования. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Металлургия, 1991. 462 с.

3. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
4. ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия. Изд-во стандартов, 1991. 47 с.
5. Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. Исследования деформаций и напряжений методом муаровых полос. М.: Машиностроение, 1969. 208 с.
6. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974. 360 с.
7. Фрохт М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М.: Гостехиздат, 1948. 920 с.
8. Воронцов В.К., Полухин П.И. Фотопластичность. М.: Металлургия, 1969. 400 с.
9. Даутов Р.З., Карчевский М.М. Введение в теорию метода конечных элементов: учеб. пособие. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2004. 239 с.
10. Конев С.В. От закона Гука до APM FEM, интегрированного в систему КОМПАС : учебное пособие. Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2024. - 1 CD-ROM. - Загл. с титул. экрана. - URL:

- <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/22293>.
11. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М: Наука, 1979. 279 с.
 12. Стружанов В.В., Бурмашева Н.В. Теория упругости: основные положения: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 204 с.
 13. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Поляризатор>.
 14. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Высш. шк., 1984. 384 с.
 15. Шарафутдинов Г.З. Об основном законе фотоупругости // Вести Моск. ун-та. Серия 1: Математика, механика. 2012 №1. С.38-41.
 16. Поляризационно-оптический метод моделирования. <https://helpiks.org/3-2414.html?ysclid=mfjanh9m91811190110>.
 17. КОМПАС-3D v17. Руководство пользователя. https://ascon.ru/source/info_materials/2018/04/COMPAS-3D%20v17_Guide.pdf.
 18. APM Studio. Руководство пользователя. <https://apm.ru/downloads/188/APM-Studio.pdf?ysclid=mfj8ne2b2k951993365>.
 19. APM Structure3D. Руководство пользователя. https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/File/CIT/manuals/APM_WinMachine/APM_Structure3D.pdf18.
 20. Аксёнов А.П. Математика. Математический анализ: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим специальностям. Ч. 2. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.
 21. Матрица Якоби и якобиан. <https://vmath.ru/vf5/algebra2/dets/jacobian?ysclid=mfjqad9a9f660490325>.
 22. [Исследование напряженно-деформированного состояния эксцентрикового кулачка методом конечных элементов](#) / Конев С.В., Кенарь Е.В., Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов Р.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. № 2 (53). С. 58-64. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82896173>
 23. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.
 24. ГОСТ 32409-2013. Противоугоны пружинные к железнодорожным рельсам. Технические условия.
 25. Пат. RU2032784 РФ, МПК E01B13/00 Устройства, предотвращающие перевод и угон рельсов/ Конев С.В., Кривошапов В.В., Пудов Е.А. и др.; заявитель и патентообладатель смешанное товарищество «Импульс 1», заявл.28.02.1992, опубл. 10.04.1995.

Сведения об авторах

Конев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: svk1956@mail.ru

Осипова Ольга Александровна – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: osipova_1977@mail.ru

Кенарь Екатерина Владимировна - кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация. Email: redket78@mail.ru

Козлов Роман Алексеевич – кандидат педагогических наук, доцент, декан факультета ФКиСМ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ. Email: fkism@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF DETERMINING STRESSES IN MODELS OF SOLID BODIES BY THE POLARIZATION-OPTICAL METHOD AND THE FINITE ELEMENT METHOD

Konev Sergey V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: svk1956@mail.ru

Osipova Olga A. – Senior Lecturer, Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: osipova_1977@mail.ru

Kenar Ekaterina V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: redket78@mail.ru

Kozlov Roman A. – Candidate of Pedagogical Sciences. Phd, Associate Professor, Dean of FFKIS, Nosov

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

Abstract. The polarization-optical and finite element methods are characterized by the visualization of stress and strain patterns at intra-contour points of models of loaded solids. A comparative assessment of these methods is provided. A comprehensive assessment is made by comparing the amount of theoretical knowledge required to master the methods, the complexity of model preparation, the reliability of boundary conditions modeling, as well as the difficulty of understanding stress distribution patterns and the accuracy of the obtained results. Using the example of modeling a spring component of a railway superstructure—a rail anti-theft device—the advantages and disadvantages of the optical model and the finite element model constructed in the Russian software package "WinMachine" are clearly demonstrated. The polarization-optical method can be used at the initial stage of modeling for a qualitative analysis of the stress-strain state of the object under study. The finite element method allows for obtaining more precise patterns of stress and strain distribution obtained using the polarization-optical method.

Keywords: polarization-optical method, finite element method, model, complexity, accuracy, stress and strain patterns

†
‡Ссылка на статью:

Сравнительная оценка эффективности определения напряжений в моделях твердых тел поляризационно-оптическим методом и методом конечных элементов / Конев С.В., Осипова О.А., Кенарь Е.В., Козлов Р.А. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 40-47. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-40-47)

Konev S.V., Osipova O.A., Kenar E.V., Kozlov R.A. Comparative assessment of the efficiency of determining stresses in models of solid bodies by the polarization-optical method and the finite element method. *Teoria i tecnologia metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 40-47. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-40-47)

ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.928.44: 622.7.091

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)

Лаговская Е.В., Фидаров Б.Ф., Глубокова Л.Г.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГУСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье обобщены типовые причины нестабильной работы сгустителей: нестационарность питания, нарушения флокуляционного режима и условий смешения, колебания границы раздела фаз, гидродинамические циркуляции, реологические осложнения осадка, перегрузки и износ механической части. Выделены направления совершенствования: повышение удельной производительности аппаратов, переход к более плотным режимам сгущения, интенсификация осаждения за счёт модернизации узлов подачи и распределения, повышение качества реагентной подготовки и дозирования, усиление и диагностика приводов и скребковых механизмов, развитие комплексного контроля и автоматизации на основе расширенного набора измерений и анализа данных. Показано, что для предприятий Арктической зоны критичны устойчивость режима, снижение эксплуатационных рисков и воспроизводимость качества осветлённого слива и сгущённого продукта при ограниченных ремонтных ресурсах, высокой стоимости простоев и повышенной цене отклонений технологического режима.

Ключевые слова: сгущение, сгуститель, пульпа, флокуляция, осветлённый слив, хвосты, реология, водооборот, надёжность

В современных условиях горно-металлургические предприятия сталкиваются с необходимостью одновременного увеличения объёмов переработки минерального сырья, повышения эффективности водооборота и обеспечения стабильного качества осветлённого слива. Актуальность совершенствования сгустительного оборудования усиливается в связи с переходом крупных промышленных объектов к системе комплексных экологических разрешений, внедрением принципов наилучших доступных технологий, развитием производственного экологического контроля и повышением экономической значимости экологических отклонений. В этих условиях качество осветлённого слива, содержание взвешенных веществ, объём возврата оборотной воды, характеристики сгущённого продукта и стабильность хвостовых потоков становятся не только технологическими, но и экологически значимыми показателями, влияющими на выполнение установленных нормативов, расчёт платы за негативное воздействие на окружающую среду и снижение риска применения повышающих коэффициентов и административных санкций [1–5].

Процесс сгущения в горнодобывающей и горно-металлургической промышленности связан с обезвоживанием технологических пульп и разделением их на осветлённый слив и сгущённый продукт. Актуальность совершенствования процессов сгущения определяется не только ростом объёмов переработки минерального сырья и увеличением нагрузки на действующее оборудование, но и усилением требований к экологической устойчивости

промышленных производств. Для крупных горно-металлургических предприятий качество водооборота, содержание взвешенных веществ в осветлённом сливе, объём возврата воды, стабильность хвостовых потоков и характеристики размещаемых отходов приобретают значение показателей, связанных с выполнением условий комплексного экологического разрешения, программ производственного экологического контроля и требований наилучших доступных технологий. Поэтому вынос тонкодисперсной твёрдой фазы в слив следует рассматривать не только как технологический дефект работы сгустителя, но и как фактор, способный нарушать водно-реагентный режим последующих операций, увеличивать нагрузку на хвостовое хозяйство и повышать экологические и финансовые риски предприятия.

Сгущение технологических пульп – ключевая операция разделения твёрдой и жидкой фаз, обеспечивающая получение осветлённого слива и сгущённого продукта. Данная операция осуществляется на сгустителе (рис. 1), под которым будем понимать технологический аппарат непрерывного действия, в котором пульпа разделяется на два потока: осветлённый слив и сгущённый продукт. При этом с технологической точки зрения внутри сгустителя выделяют несколько основных зон: зону осветления, зону свободного осаждения, зону стеснённого (затруднённого) осаждения и зону уплотнения. Следует отметить, что при переработке пульп повышенной концентрации зона свободного осаждения может быть выражена слабо либо практически отсутствовать.

Зона осветления располагается в верхней части сгустителя, где содержание твёрдого минимально. Непосредственно в этой части через кольцевой сливной желоб (поз. 6) отводится осветлённая вода, то есть осуществляется слив (см. рис. 1). Обычно такой слив относится к оборотной воде и повторно

возвращается в производственный процесс. Осветлённый слив может быть чистым или замутнённым и характеризуется следующими показателями (табл. 1): содержание взвешенных веществ / мутность; стабильность качества слива во времени; отсутствие выноса осадка и переливов.

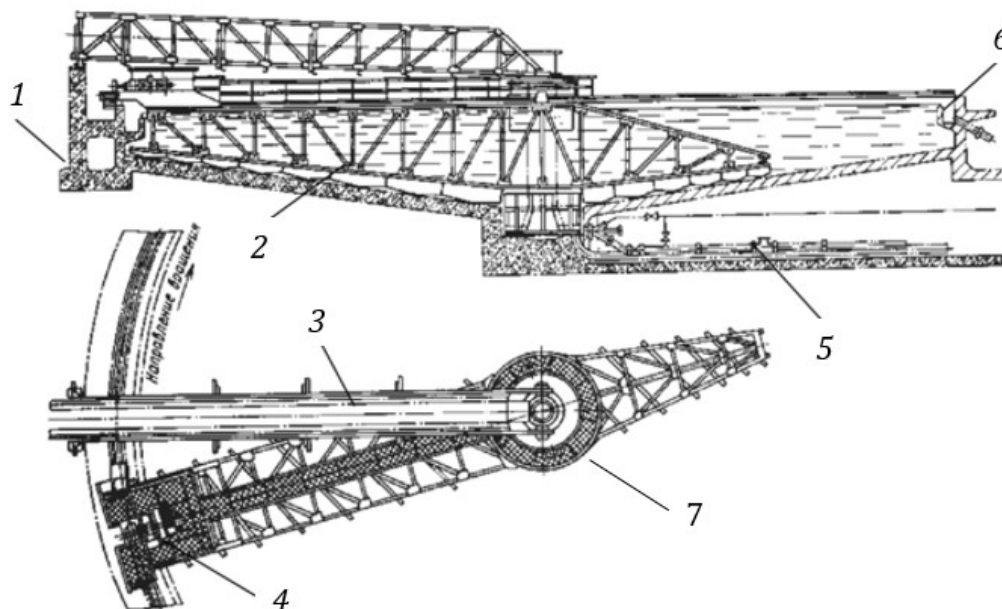


Рис. 1. Схема радиального сгустителя с периферическим приводом:
1 – корпус сгустителя (чан); 2 – вращающаяся ферма с гребковыми устройствами (граблями);
3 – желоб для подачи исходной суспензии; 4 – привод; 5 – трубопровод для сгущенного продукта;
6 – желоб для слива; 7 – центральный разгрузочный конус

Таблица 1

Показатели качества осветлённого слива, сгущенного продукта и устойчивости разгрузки

Показатель	Единицы / форма	Способ измерения	Значение для эффективности
Содержание взвешенных веществ / мутность	мг/л; НТУ	Онлайн-мутномер/анализатор взвеси; лабораторный анализ проб	Пригодность воды для возврата в оборот; соответствие экологическим требованиям; индикатор качества разделения фаз
Стабильность качества слива во времени	разброс/σ; % времени в допуске	Статистика онлайн-измерений (мутность/взвесь), контрольные пробы	Устойчивость режима при нестационарном питании и изменениях реагентной обработки; снижение рисков «просадок» качества
Отсутствие выноса осадка и переливов	события/частота; % времени без нарушений	Журналы аварий/сигнализаций; визуальный контроль; мониторинг уровня и мутности	Признак правильной гидродинамики и работы зоны питания/осветления; предотвращение загрязнения оборотной воды
Плотность (концентрация твёрдого) сгущенного продукта	мас. %; г/л; т/м ³	Плотномер (радиометрический/вибрационный), пробоотбор и анализ; расчёт по расходам	Условия перекачивания и последующего обезвоживания/укладки; показатель глубины обезвоживания на стадии сгущения
Стабильность плотности сгущенного продукта	разброс/σ; % времени в допуске	Статистика плотномера + подтверждение пробами	Связь со стабильностью насосного режима, фильтрации/укладки; снижение вероятности нештатных режимов
Реологические свойства (прежде всего предел текучести)	Па (предел текучести); усл. вязкость	Лабораторная/цеховая реометрия; косвенные оценки по давлению/расходу в трубопроводе и нагрузке привода	Критерий «паста/не паста», энергозатраты на транспорт, риск «пробок», неустойчивой разгрузки и перегрузки механизма
Устойчивость	коэффициент	Расходомер и плотномер; журналы	Надёжность работы насосов и

разгрузки (выдачи)	вариации расхода; частота остановов/«провалов»	событий; давление на линии	трубопровода; воспроизводимость подачи на следующую стадию
--------------------	--	----------------------------	--

В связи с этим качество осветлённого слива является одним из наиболее чувствительных показателей работы сгустителя. При повышении производительности аппарата возрастает риск выноса тонкодисперсной твёрдой фазы в слив, особенно при колебаниях расхода питания, изменении гранулометрического состава пульпы, нарушениях дозирования флокулянта и нестабильном положении границы раздела фаз. Поэтому практически значимым является такой режим работы, при котором аппарат способен перерабатывать повышенный объём пульпы без ухудшения качества осветлённой воды и без нарушения устойчивости разгрузки сгущённого продукта.

Ниже зоны осветления располагается **зона свободного осаждения**, в которой частицы пульпы осаждаются независимо друг от друга и не оказывают существенного взаимного влияния. По мере увеличения концентрации твёрдого формируется **зона стеснённого осаждения**. В средней части чана сгустителя частицы начинают взаимодействовать между собой и осаждаются как единая структурированная система. Скорость их движения снижается и формируется граница раздела фаз, отделяющая относительно разреженную часть пульпы от более плотной. Положение данной границы является важным параметром контроля процесса сгущения.

В нижней части аппарата располагается **зона уплотнения**, в которой под действием веса вышележащих слоёв происходит сжатие и дополнительное уплотнение осадка. Граблины вращающейся фермы (поз. 2 на рис. 1) перемещают уплотнённый материал, иначе называемый сгущённым продуктом, к разгрузочному конусу (поз. 7), откуда он выкачивается насосами. Сгущённый продукт подвергается дальнейшей переработке или складированию. Плотность сгущённого продукта достигает 60-70% твёрдого по массе и характеризуется такими показателями (см. табл. 1), как: плотность (концентрация твёрдого) сгущённого продукта; стабильность плотности сгущённого продукта; реологические свойства (прежде всего предел текучести); устойчивость разгрузки (выдачи).

Особое внимание следует уделить реологическим свойствам сгущённого продукта. Под

реологическими свойствами понимаются характеристики течения и деформации суспензии под действием внешних нагрузок. В отличие от ньютоновских жидкостей, сгущённые пульпы относятся к структурированным дисперсным системам и проявляют неньютоновское поведение. Для них характерно наличие предела текучести – минимального напряжения, необходимого для начала течения, а также зависимость вязкости от скорости сдвига. По мере увеличения концентрации твёрдого фаза приобретает выраженные пластические свойства, что существенно влияет на транспортировку, перекачивание и разгрузку материала. Контроль реологических параметров необходим для предотвращения перегрузки сгребющего механизма, образования застоев в трубопроводах, нестабильной работы насосов и нарушения режима сгущения в целом. Таким образом, реология является не только характеристикой качества сгущённого продукта, но и важным фактором надёжности и энергоэффективности всего технологического процесса.

В зависимости от места сгустителя в технологической схеме сгущённый продукт направляется либо на дальнейшие переделы (как носитель ценного компонента), либо в хвостовое хозяйство. В технологических схемах горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий их располагают в нескольких типовых местах, представленных на рис. 2 [1, 6].

Разделение фаз происходит за счёт гравитационного осаждения частиц и последующего уплотнения осадка. Эти процессы распределены по высоте аппарата и определяют формирование осветлённого слива и сгущённого продукта. Следовательно, результат работы сгустителя определяется не одной характеристикой, а совокупностью свойств пульпы и технологических параметров режима [1].

Скорость осаждения частиц в пульпе определяется их размером, плотностью, концентрацией твёрдой фазы, вязкостью жидкой среды и физико-химическими свойствами поверхности частиц. Повышение температуры, как правило, снижает вязкость жидкости, что может способствовать увеличению скорости осаждения.

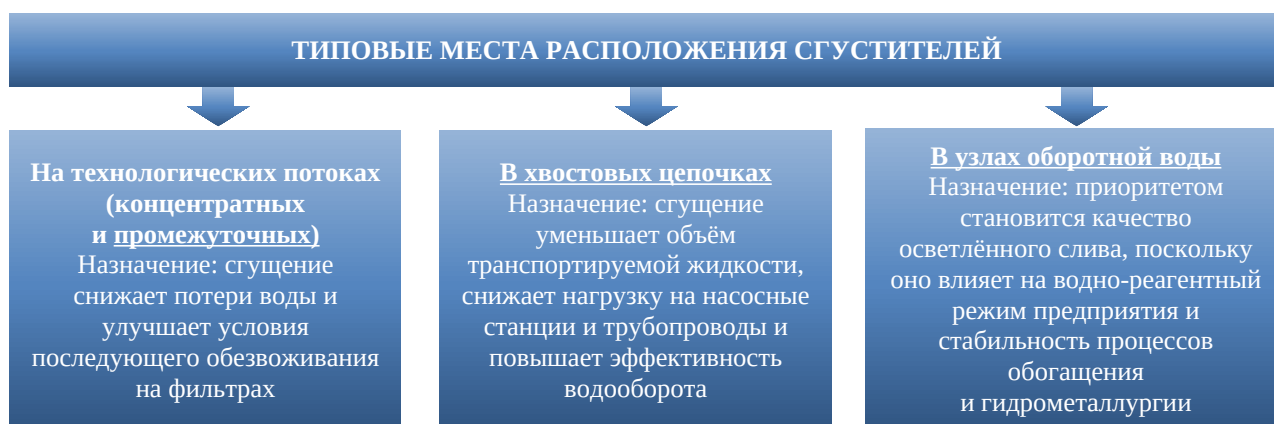


Рис. 2. Типовые места расположения сгустителей на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях

В зависимости от дисперсности и электрического состояния поверхности частицы могут осаждаться как раздельно, так и в виде агрегатов. Для интенсификации процесса осаждения в промышленности применяются реагенты – коагулянты и флокулянты. Коагулянты способствуют снижению электрического заряда частиц и уменьшению их взаимного отталкивания, тогда как флокулянты адсорбируются на поверхности частиц и формируют между ними пространственные (мостиковые) связи, образуя укрупнённые агрегаты – флокулы. Образование флокул приводит к увеличению эффективного размера частиц и ускорению их осаждения.

Сгущаемые пульпы характеризуются широким диапазоном гранулометрического состава. В процессах обогащения и металлургической переработки основная доля твёрдой фазы обычно представлена тонкодисперсными частицами, что требует применения реагентной обработки для обеспечения требуемой скорости осаждения и стабильности работы сгустителя.

Таким образом, требования к процессу сгущения обычно формулируют двойственно:

- осуществить выполнение ключевого тренда развития современного производства, включающего элемент устойчивого производства, то есть обеспечить осветлённый слив требуемой чистоты для возврата в оборот и выполнения экологических и природоохранных нормативов [7];

- получить сгущённый продукт с заданной массовой долей твёрдого и такими реологическими свойствами, чтобы он устойчиво выгружался из аппарата и транспортировался без нарушений режима перекачки и остановок потока [1, 3].

В условиях роста производительности эффективность сгустителя не может оцениваться только по одному показателю, например по плотности сгущённого продукта или расходу питания.

Увеличение нагрузки на аппарат без одновременного контроля мутности слива, положения границы раздела фаз, расхода флокулянта и нагрузки на привод может сопровождаться ухудшением качества оборотной воды, нестабильной разгрузкой и ростом эксплуатационных рисков. Поэтому оценка эффективности работы сгустителя должна учитывать компромисс между качеством слива, плотностью сгущённого продукта и эксплуатационной устойчивостью аппарата. Для этого на практике применяют следующие основные показатели мониторинга процесса сгущения:

- мутность и содержание взвешенных частиц в сливе;
- массовую долю твёрдого вещества в сгущённом продукте;
- расход и удельный расход реагента на тонну твёрдого вещества;
- производительность;
- устойчивость границы раздела фаз;
- параметры разгрузки (расход, стабильность плотности);
- нагрузку на привод и крутящий момент скребкового механизма.

Для хвостовых потоков (тонкодисперсных отходов обогащения, направляемых на складирование или гидротранспортирование в хвостохранилище) решающим становится реологическое состояние сгущённого продукта. При росте концентрации твёрдого и доли тонких фракций осадок ведёт себя как неньютоновская система*: появляется выраженный предел текучести, резко возрастают потери напора в трубопроводах, усложняются пусковые режимы. Поэтому переход к пастовым режимам работы, то есть к получению высококонцентрированного сгущённого продукта, обладающего выраженными пластическими свойствами и способного сохранять форму без

*Неньютоновская система – это жидкость, течение которой не подчиняется закону Ньютона. В отличие от ньютоновских жидкостей, где вязкость постоянна и не зависит от градиента скорости или приложенного напряжения, у неньютоновских жидкостей вязкость изменяется в зависимости от скорости сдвига или внешних воздействий.

свободного стекания, корректнее определять через достижение требуемого предела текучести и воспроизводимость этих реологических характеристик, а не через одну фиксированную массовую долю твёрдого вещества. Значения предела текучести зависят от минералогии, тонкости, содержания глинистых частиц и режима флокуляции, поэтому целевые параметры следует подтверждать испытаниями для конкретного объекта [3–5, 8].

Современные решения в области сгущения развивались от аппаратов, ориентированных преимущественно на осветление, к агрегатам, обеспечивающим одновременно высокую производительность, более глубокое уплотнение и устойчивую работу при нестационарном питании. В промышленности применяют несколько основных групп оборудования (табл. 3) [1, 9].

Классические радиальные сгустители (см. рис. 1) остаются базовым решением благодаря простоте и

надёжности, однако при большом содержании мелкодисперсных частиц и высоких требованиях к качеству слива их чувствительность к гидродинамике и изменчивости питания становится ограничивающим фактором.

Высокопроизводительные сгустители ориентированы на увеличение пропускной способности за счёт развитого узла питания и распределения: снижается турбулентность, подавляются циркуляции и «короткие протоки» к сливу, которые ухудшали бы его качество, обеспечивается более стабильное формирование гранул и агрегатов.

Высокоплотные и глубококonusные (пастовые) аппараты предназначены для получения более плотного и вязкого продукта; они предъявляют повышенные требования к разгрузке, мощности привода, прочности и износостойкости рабочих органов, а также к контролю режимов сгущения и осаждения [1, 3–11].

Таблица 2

Ключевые показатели мониторинга процесса сгущения и методы их измерения

Производительность по питанию	м ³ /ч; т/ч; т сух. тв./ч	Расходомер питания; балансовые расчёты; АСУ ТП	Соответствие аппарата заданным расходам; базовый параметр для оценки удельных нагрузок и «узких мест»
Удельная нагрузка по площади осаждения	т сух. тв./ (м ² ·ч) или м ³ / (м ² ·ч)	Расчёт: расход питания и содержание твёрдого / площадь зеркала	Сопоставимость различных сгустителей и режимов; показатель «напряжённости» аппарата
Уровень пульпы и положение границы раздела фаз	м; % высоты; тренд	Датчик уровня; датчики границы раздела фаз (при наличии) или косвенно по мутности/нагрузке	Интегральные параметры устойчивости: риск ухудшения качества слива, «захлёбывания» или чрезмерного уплотнения слоя осадка
Нагрузка на привод (крутящий момент/мощность)	% от допустимого; кН·м; кВт	Сигнал привода/частотного преобразователя; система защиты и диагностики	Сопротивление осадка и приближение к перегрузке; индикатор ухудшения разгрузки и роста реологических осложнений
Расход флокулянта (и других реагентов)	г/т сух. тв.; кг/ч	Дозирующие станции; учёт расхода; лабораторный контроль приготовления	Экономичность режима; связь с качеством слива и скоростью осаждения; риск «перерасхода ради стабильности»
Энергозатраты на привод механизма	кВт; кВт·ч/т сух. тв.	Учёт энергии привода; АСУ ТП	Индикатор сопротивления осадка и эффективности механической части; важен для сравнения режимов и оценки износа
Энергозатраты на перекачивание сгущённого продукта	кВт·ч/т сух. тв.; кВт·ч/м ³	Учёт энергии насосов; давление/расход в линии	Связь с реологией и стабильностью underflow; отражает «цену» повышения плотности
Частота отклонений режима и простоев	случаев/мес.; ч/мес.	Журналы АСУ ТП/ремонтов; отчёты смен	Совокупный показатель надёжности: заиливание, перегрузка, ухудшение разгрузки, просадки качества слива
Износ и обслуживание узлов (граблины, привод, питатель, желоба)	интервалы ТО; наработка; % замен	Ремонтная статистика; осмотры; вибродиагностика/температура (при наличии)	Долговечность и стоимость жизненного цикла; связь с режимами уплотнения, абразивностью и перегрузками
Эффективность водоотбора (возврат воды в оборот)	м ³ /т сух. тв.; % возврата	Водный баланс узла; расход перелива и его качество	Ключевой КРП хвостовых схем: снижение потребности в подпиточной воде и объёма воды на хвостохранилище
Управляемость процесса (время восстановления режима, вариabельность КРП)	мин; σ/коэфф. вариации; % времени в допуске	Тренды АСУ ТП: мутность, плотность, уровень, нагрузка; анализ возмущений	Чувствительность к нестационарности питания; показатель качества автоматизации и «запаса устойчивости»

Таблица 3

Сравнение основных типов промышленных сгустителей,

применяемых на предприятиях горнодобывающей промышленности

Тип сгустителя	Назначение	Конструктивные особенности	Преимущества	Ограничения/риски
Классический радиальный (гравитационный)	Технологические и хвостовые пульпы; оборотная вода	Большой диаметр; цилиндрический корпус; стандартная зона питания; практически плоское днище	Простота и надежность конструкции	Чувствительность к изменению питания; риск ухудшения качества слива при неблагоприятной гидродинамике; ограниченная плотность продукта
Высокопроизводительный	Большой объем питания при ограниченной площади (чаще хвостовые потоки)	Усовершенствованный узел питания/распределения; Более острый угол днища	Повышенная производительность на единицу площади; компактность; эффективное смешение с реагентом; снижение турбулентности	Зависимость от качества приготовления и дозирования реагента; риск ухудшения осветления при изменении класса крупности твердых частиц (гранулометрического состава)
Высокоплотный	Повышенная плотность сгущенного продукта (хвосты, иногда концентраты)	Развитая зона уплотнения (наличие решеток, дополнительное выравнивание потоков ЧЕМ); усиленные механизмы разгрузки	Увеличение возврата воды; снижение объема транспортируемой жидкости, дополнительное выравнивание потоков в чане	Рост реологического сопротивления; риск нестабильной разгрузки; рост нагрузок и износа
Пастовый (глубококонусный)	Максимальное уплотнение; пастообразные хвосты	Увеличенная высота чана; коническое днище; режимы интенсивного уплотнения. Острый угол днища	Максимальный возврат оборотной воды; снижение водонасыщенности хвостов	Высокие требования к устойчивости разгрузки; риск нештатных режимов при вязком продукте; повышенные нагрузки

Отдельно применяются осветлители-сгустители для водооборота, где приоритетом является стабильная чистота слива, и ламельные аппараты для осветления при дефиците площади. Данные виды сгустителей не применяются в горно-металлургической промышленности, поэтому речь о них в данной статье не пойдет.

При выборе оборудования важно разделять технологический класс (какие показатели должны быть достигнуты) и конструктивное исполнение (каким способом это достигается) [1].

С позиции технологической машины качество работы сгустителя зависит от следующих узлов:

- узла подачи и распределения, которое формирует гидродинамику и условия смешения с реагентом. Ошибки здесь порождают циркуляции и вынос твердого в слив;

- узла приготовления реагентов. Реагентное хозяйство определяет воспроизводимость флокуляции;

- скребкового механизма и привода, которые задают способность аппарата работать на плотных осадках без перегрузок. Система разгрузки определяет устойчивость выдачи вязкого продукта и во многом ограничивает достижимую плотность;

- средств контроля и защиты обеспечивают наблюдаемость режима и предотвращают аварийные состояния [1, 9].

Ключевые проблемы эксплуатации сгустителей в промышленности обычно имеют комплексную природу и усиливают друг друга [1].

Во-первых, питание почти всегда нестационарно: меняются расход, массовая доля твердого,

гранулометрия, минералогия, доля тонких и глинистых фракций. Эти изменения напрямую влияют на скорость осаждения, эффективность флокуляции и структуру осадка, вызывая колебания качества слива и плотности сгущенного продукта [1].

Во-вторых, флокуляционный режим чувствителен к качеству приготовления раствора, точности дозирования и к условиям смешения. Недостаточная флокуляция повышает мутность слива, избыточная формирует рыхлые агрегаты, ухудшающие уплотнение и разгрузку. Дополнительный риск связан с разрушением хлопьев в насосах, трубопроводах и в турбулентной зоне питания [1, 12].

В-третьих, нестабильность границы раздела фаз становится ранним признаком потери устойчивости: её подъём ведёт к выносу твердого и ухудшению слива, а чрезмерное опускание – к росту сопротивления осадка, увеличению крутящего момента и ухудшению разгрузки. Неблагоприятная гидродинамика (циркуляции, вихри, неравномерность распределения по радиусу) усиливает «короткие протоки» и размыв осадка [1, 2, 13].

В-четвёртых, при стремлении к более глубокому сгущению проявляются реологические осложнения: локальные зоны уплотнённого осадка, неравномерность выдачи, склонность к образованию «пробок/застоев». Это сопровождается ростом нагрузок на привод и ускоренным износом скребков, редукторов и опорных узлов, особенно при абразивной среде стущаемого материала [3–5].

Наконец, традиционные схемы регулирования часто оказываются недостаточными. Сгуститель –

инерционная система, и изменения расхода питания, плотности или подачи реагента отражаются на качестве слива, положении границы раздела фаз и нагрузке привода не сразу, а спустя некоторое время. Поэтому управление по одному сигналу (например, только по уровню) не гарантирует ни качества слива, ни устойчивой разгрузки, ни допустимых нагрузок на механическую часть [2, 13].

Совершенствование технологии сгущения в настоящее время развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям.

Первое – выбор глубины обезвоживания пульпы. Вместо единого подхода всё чаще рассматривают спектр решений по степени отделения жидкости: от режимов, ориентированных главным образом на осветление слива и умеренное сгущение, до высокоплотного (пастового) сгущения и фильтрованному осадку с сухим складированием. Здесь история опять связана с местом расположения сгустителя в технологической цепочке оборудования (см. рис. 2):

- для потоков, направляемых на дальнейшую переработку, более глубокая степень сгущения снижает последующие операции, уменьшает объёмы перекачки и может улучшать условия фильтрации и промывки. При этом возрастают требования к устойчивости разгрузки и воспроизводимости реологических свойств;

- для хвостов, направляемых на складирование, повышение степени сгущения увеличивает возврат воды и уменьшает долю свободной жидкости, что улучшает условия транспортирования и размещения хвостов. Фильтрация обеспечивает максимальное удаление жидкости, но требует более высоких капитальных и энергетических затрат и предъявляет повышенные требования к инфраструктуре и эксплуатации [1, 3, 6, 14].

Второе – интенсификация осаждения и подавление неблагоприятной гидродинамики. Наибольший эффект обычно даёт модернизация узла питания и распределения, заключающаяся в снижении энергии входящего потока, равномерном распределении по объёму, создании условий для устойчивого формирования агрегатов частиц и предотвращении циркуляций. Одновременно важны меры, снижающие размыв уплотнённой зоны и обеспечивающие эффективное перемещение осадка к разгрузке, к которым относятся: выбор рациональной скорости вращения, совершенствование формы рабочих органов, оптимизация профиля дна и разгрузочных устройств [1, 9].

Третье – совершенствование реагентной подготовки и дозирования. Стабильность приготовления раствора флокулянта (концентрация, выдержка, перемешивание) и точность подачи часто определяют как качество осветления, так и расход реагента. Эффект дают технологически простые меры, такие как устранение колебаний концентрации раствора, выбор рациональной точки ввода, обеспечение достаточного

смешения без разрушения хлопьев. Перспективно применение адаптивного дозирования, когда уставка реагента корректируется по текущему качеству слива, нагрузке и динамике границы раздела фаз [9, 12].

Четвертое – надёжность механической части и снижение износа. Для сгустителей, в особенности для хвостовых, при переходе к высоким плотностям первостепенны прочность и износостойкость скребков, защита привода от перегрузок, корректная смазка и герметизация узлов. Важно развивать диагностирование по нагрузке, вибрации и температуре узлов, чтобы переходить от аварийного ремонта к плановому упреждающему обслуживанию [1, 15].

Пятое – развитие контроля и автоматизации. Повышение устойчивости режима требует расширения набора измерений, таких как расход и плотность питания и разгрузки, нагрузка привода, уровень и положение границы раздела фаз, мутность слива, расход реагента. Современная практика движется к комплексному управлению, где поддерживаются одновременно качество слива, заданные свойства сгущённого продукта и ограничения по механическим нагрузкам. В условиях шумных и неполных измерений применяют расчётные оценки состояния по совокупности сигналов и статистике работы [2, 13].

Для предприятий Арктической зоны перечисленные направления имеют повышенную значимость. Логистическая удалённость и ограниченность ремонтных ресурсов увеличивают стоимость простоев, а требования к экологической безопасности водных объектов усиливают роль качества осветлённого слива и устойчивости хвостового хозяйства. Для промышленных центров Арктической зоны это особенно существенно, поскольку экологическая модернизация таких территорий рассматривается в рамках федеральных и корпоративных программ снижения негативного воздействия на окружающую среду, а любые нарушения устойчивости водооборотных и хвостовых систем приобретают повышенную производственную, природоохранную и репутационную значимость. Низкие температуры могут косвенно влиять на свойства воды, работу реагентов и условия эксплуатации коммуникаций, поэтому критичны воспроизводимость реагентной подготовки, устойчивость разгрузки и надёжность механических узлов [15–16].

Перспективные практические задачи для предприятий включают: разработку комплекса критериев оперативной оценки качества слива и запасов устойчивости режима; выбор целевых параметров сгущённого продукта с учётом транспорта и хвостового хозяйства; модернизацию узлов питания и разгрузки для подавления гидродинамических причин выноса твёрдых частиц в слив; внедрение комплексного мониторинга и защит по нагрузке и признакам ухудшения разгрузки; формирование баз данных режимов и отказов для повышения точности управленческих решений [2, 17].

На основании вышеизложенного следует заключить, что сгуститель является ключевым элементом технологических схем, определяющим эффективность водооборота, качество осветлённого слива, свойства сгущённого продукта, устойчивость последующих переделов и экологическую надёжность производства. Актуальность совершенствования сгустительного оборудования определяется необходимостью одновременного решения трёх взаимосвязанных задач: увеличения производительности аппаратов при росте объёмов переработки, обеспечения стабильной чистоты осветлённого слива для водооборотных систем и получения сгущённого продукта с заданной плотностью и реологическими свойствами. В современных условиях к указанным задачам добавляется регуляторный фактор: выполнение требований комплексного экологического разрешения, производственного экологического контроля, программ повышения экологической эффективности и перехода к наилучшим доступным технологиям. Поэтому повышение эффективности сгустителей следует рассматривать как направление не только технологической, но и экологической модернизации горно-металлургического производства. Наиболее результативные решения достигаются при согласовании технологических целей с возможностями системы транспортирования, ограничениями по механическим нагрузкам, требованиями к качеству оборотной воды, системой обслуживания оборудования, комплексного мониторинга и производственного экологического контроля [2, 3].

Список источников

- Бауман А.В., Степаненко А.И., Баранова А.А. Теоретические основы и практика проектирования процессов и аппаратов сгущения рудных пульп // Обогащение руд. 2023. № 1.
- Leonov R.E., Sosnovskaia D.V. Thickener as an automatic control object // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 6. С. 30–38.
- Jewell R.J., Fourie A.B. (eds.). Paste and Thickened Tailings - A Guide. 3rd ed. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015.
- Boger D.V. Rheology and the resource industries // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64, No. 22. P. 4525–4536.
- Sofrà F., Boger D. V. Rheology for thickened tailings and paste - history, state-of-the-art and future directions // Paste 2011: Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2011. P. 131–133
- Исследование сгущения и фильтрации хвостов сульфидной флотации / Рылов К.А., Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Бурдонов А.Е. // Обогащение руд. 2024. № 6. С. 47–53.
- Лаговская Е.В., Ярославцев А.В., Разумова Н.А. Современные системы охлаждения металлургических предприятий
- Федорова Э.Р., Пупышева Е.А., Моргунов В.В. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 77–84.
- Соколова А.А. Комплексные решения при интенсификации процесса сгущения // Информационные системы и технологии АПК и ПГС: сборник научных статей Международной научно-технической конференции: в 2 т. Курск, 2023. С. 260–262.
- Исследование процесса сгущения тонкодисперсных хвостов золотосодержащих руд / Дмитриева Е.Г., Газалеева Г.И., Мусаев В.В., Ключников А.М. // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 46–50.
- Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд / Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н., Минеева Т.С. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3 (158). С. 391–401.
- Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В. Влияние типа флокулянта на прочностные характеристики флокул в глинисто-солевых суспензиях // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2020. Т. 63. № 6. С. 30–36.
- Сосновская Д.В. Анализ технологического комплекса сгущения как управляемого объекта // Актуальные вопросы науки и практики и перспективы их решений: сборник научных трудов по материалам X Международной научно-практической конференции. Анапа, 2023. С. 76–78.
- Кибирев В.И. Анализ производственного опыта складирования сгущенных хвостов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 27–32.
- Реконструкция и модернизация Талнахской обогатительной фабрики. Основные аспекты / Волянский И.В., Лихачева Т.А., Курчуков А.М., Миллер А.А. // Цветные металлы. 2020. № 6. С. 6–11.
- Кузнецов Н.С., Набойченко С.С., Нафталъ М.Н. Автоклавно-окислительное осаждение железа в виде ярозитов из раствора, получаемого при выщелачивании файнштейна на предприятии Norilsk Nickel Harjavalta Oy // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 17–29.
- Сольский С.В., Зеленский И.Г., Мелихов В.И. Современные расчетные методики гидротранспортных систем горно-обогатительных предприятий // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2025. Т. 316. С. 63–72.

Сведения об авторах

Лаговская Елена Владимировна – доцент, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: Lagovskayaev@norvuz.ru

Фидаров Батраз Фидарович – аспирант, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: fidarovbf@edu.norvuz.ru

Глубокова Людмила Геннадьевна – доцент, кандидат экономических наук, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: GlubokovaLG@norvuz.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROSPECTIVE DIRECTIONS AND METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THICKENING EQUIPMENT IN MODERN MINING AND METALLURGICAL PRODUCTION CONDITIONS

Elena V. Lagovskaya – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia. E-mail: Lagovskayaev@norvuz.ru

Batraz F. Fidarov – graduate student, N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia. E-mail: fidarovbf@edu.norvuz.ru;

Lyudmila G. Glubokova – Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, N.M. Fedorovsky Polar State University Norilsk, Russia. E-mail: GlubokovaLG@norvuz.ru

Abstract. The article generalizes typical causes of unstable thickener performance: unsteady feed, flocculation mode and mixing condition disturbances, phase boundary fluctuations, hydrodynamic circulations, rheological complications of the sediment, mechanical overloads and wear. Areas for improvement have been identified: increasing the specific productivity of equipment, transitioning to denser thickening modes, intensifying sedimentation through modernization of feed and distribution units, improving the quality of reagent preparation and dosing, strengthening and diagnostics of drives and scraper mechanisms, developing integrated control and automation based on an expanded set of measurements and data analysis. It has been shown that for enterprises in the Arctic zone, the stability of the operating regime, reduction of operational risks, and reproducibility of the quality of clarified overflow and thickened product are critical under conditions of limited maintenance resources, high downtime costs, and the increased cost of deviations from the technological regime.

Keywords: thickening; thickener; pulp; flocculation; clarified overflow; tails; rheology; water circulation; reliability

References

1. Bauman A.V., Stepanenko A. I., Baranova A. A. Theoretical foundations and practice of designing processes and devices for thickening ore pulps // Ore enrichment. 2023. No. 1.
2. Leonov R. E., Sosnovskaia D. V. Thickener as an automatic control object // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal. 2022. No. 6. P. 30–38.
3. Jewell R. J., Fourie A. B. (eds.). Paste and Thickened Tailings - A Guide. 3rd ed. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015.
4. Boger D. V. Rheology and the resource industries // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64, No. 22. P. 4525–4536.
5. Sofrà F., Boger D. V. Rheology for thickened tailings and paste - history, state-of-the-art and future directions // Paste 2011: Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2011. P. 131–133.
6. Rylov K. A., Tyutrin A. A., Nemchinova N. V., Burdonov A. E. Investigation of thickening and filtration of tailings of sulfide flotation // Ore enrichment. 2024. № 6. pp. 47-53.
7. Fedorova E. R., Pupysheva E. A., Morgunov V. V. Determination of precipitation parameters during thickening and washing of red sludge // Non-ferrous metals. 2023. No. 4. pp. 77-84.
8. Sokolova A. A. Integrated solutions for the intensification of the thickening process // Information systems and technologies of agroindustrial complex and GHS: collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference: in 2 volumes Kursk, 2023. pp. 260-262.
9. Dmitrieva E. G., Gazaleeva G. I., Musaev V. V., Klyushnikov A.M. Study of the thickening process of fine-dispersed tailings of gold-bearing ores // Ore enrichment. 2022. No. 1. pp. 46-50.

10. Chernigov D. A., Bogorodsky A. V., Nabiulin R. N., Mineeva T. S. Study of thickening processes for beneficiation products of gold-bearing ores // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2021. Vol. 25. No. 3 (158). P. 391–401.
11. Seredkina O. R., Rakhimova O. V., Lanovetsky S. V. Influence of flocculant type on the strength characteristics of flocs in clay-salt suspensions // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2020. Vol. 63. No. 6. P. 30–36.
12. Sosnovskaya D. V. Analysis of the technological complex of condensation as a controlled object // *Current issues of science and practice and prospects for their solutions: a collection of scientific papers based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference*. Anapa, 2023. pp. 76-78.
13. Kibirev V. I. Analysis of industrial experience in the storage of thickened tailings // *Ore enrichment*. 2019. No. 2. pp. 27-32.
14. Volyansky I. V., Likhacheva T. A., Kurchukov A. M., Miller A. A. Reconstruction and modernization of the Talnakh Concentrator: main aspects // *Non-Ferrous Metals*. 2020. No. 6. P. 6–11.
15. Kuznetsov N. S., Naboichenko S. S., Naftal M. N. Autoclave-oxidative precipitation of iron in the form of jarosite from a solution obtained by leaching feinsteel at the Norilsk Nickel Harjavalta Oy enterprise // *Non-ferrous metals*. 2019. No. 8. pp. 17-29.
16. Solsky S. V., Zelensky I. G., Melikhov V. I. Modern calculation methods of hydrotransport systems of mining and processing enterprises // *Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering*. 2025. Vol. 316. pp. 63-72.

**

†† Ссылка на статью:

Лаговская Е.В., Фидаров Б.Ф., Глубокова Л.Г. Перспективные направления и методы повышения эффективности стеснительного оборудования в условиях современного горно-металлургического производства // *Теория и технология металлургического производства*. 2026. №2(57). С. 48-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)

Lagovskaya E.V., Fidarov B.F., Glubokova L.G. Prospective directions and methods for improving the efficiency of thickening equipment in modern mining and metallurgical production conditions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 48-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)

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.
5. Подготовка сырья к металлургическому производству;
6. Управление качеством в металлургическом производстве;
7. Экономика в металлургии;
8. Оборудование металлургического производства;
9. Материаловедение;
10. Техногенные отходы металлургического производства.

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: TTePEoMP@mail.ru; [http://magtu.ru](mailto:TTePEoMP@mail.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 – A4 (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 A4;
- 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., Монастырских 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 tehniceskogo 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