

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 1 (56) 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 Metallургия 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. Шешуков* – д-р техн. наук, проф.,  
ГУ ИМетРАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

### **Главный редактор:**

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

### **Научный редактор:**

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

### **Технический редактор:**

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

*К.И. Рудь*

### **Дизайнер:**

*Е.О. Харченко*

© **ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 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: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

### **Адрес типографии:**

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

### **Адрес издателя:**

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

Выход в свет 31.03.2026. Заказ 83. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

# ***THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION***

---

**No. 1 (56) 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. Ostrowski* – D.Sc., Professor,  
University of New South Wales, Australia

*A.M. Pesin* – D. Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

*M. Dabala* – D.Sc., Professor, University of Padova,  
Italy

*P. Tandon* – D. Sc., Professor & Head of Mechanical  
Engineering, PDPM Indian Institute of Information  
Technology, Design and Manufacturing, Jabal-  
pur, India

*R.P. Cardoso* – D. Sc., Professor,  
Federal University of Santa Catarina, Brazil

*E.V. Ageev* – D.Sc., Professor, Southwest State University  
*V.B. Deev* – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow, Russia

*A.A. Popov* – D.Sc., Professor,  
Institution of Higher Professional Education «Ural Federal  
University named after the first President of Russia  
B.N.Yeltsin»

*V.M. Salganik* – D. Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

*O. Ju. Sheshukov* – D.Sc., Professor,  
alloys Federal State Autonomous Educational  
Institution of Higher Professional Education  
«Ural Federal University named after the first President  
of Russia B.N.Yeltsin»

### **Editor-in-Chief:**

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

*Y.A. Izvekov* – Professor, Ph.D., Nosov Magnitogorsk  
State Technical University

*K.I. Rud*

### **Designer:**

*E.O. Harchenko*

## **© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 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 31.03.2026. Order 83. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Женин Е.В., Шаповалов А.Н., Потапов И.М. <b>ОПТИМИЗАЦИЯ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ.....</b>	<b>4</b>
Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю., Гридин Н.А., Шалайкин С.Р. <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДОВ ПОПУТНЫХ ПРОДУКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ СООТНОШЕНИЯ МАРОК И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕЙ.....</b>	<b>11</b>
Крупнов Л.В. <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННОГО АГРЕГАТА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА НА ПРИМЕРЕ ПЕЧИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛАВКИ ..</b>	<b>22</b>
Крупнов Л.В. <b>ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ПЕРЕРАБОТКИ МАЛОСЕРНИСТОГО НИКЕЛЕВОГО СЫРЬЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ ВАНЮКОВА .....</b>	<b>30</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>37</b>
Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Манцеров С.А., Рябова Л.И., Герасимов А.В. <b>К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ АДДИТИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.</b>	<b>37</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>44</b>
Мезин И.Ю., Касаткина Е.Г., Понурко И.В., Кургузов С.А. <b>ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА АКТИВАЦИЮ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПОРОШКЕ.....</b>	<b>44</b>
<b>ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>51</b>
Анищенко А.С., Присяжный А.Г., Лаврова Е.В. <b>ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЪЕМНЫХ КОРПУСОВ ПРОКАТНО-СВАРНЫХ ТЕЛЕЖЕК МАШИН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА И ОКАТЫШЕЙ .....</b>	<b>51</b>
<b>ЭКОНОМИКА В МЕТАЛЛУРГИИ .....</b>	<b>57</b>
Пonomарева О.С., Назарова О.Л., Майорова Т.В., Решетова И.В., Козлов Р.А. <b>АВТОНОМНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....</b>	<b>57</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>4</b>
Zhenin E.V., Shapovalov A.N., Potapov I.M. <b>SLAG REGIME OPTIMIZATION IN BLAST FURNACE SMELTING .....</b>	<b>4</b>
Mokritsky M.I., Velikotsky R.E., Nikulin S.Y., Gridin N.A., Shalaykin S.R. <b>MATHEMATICAL FORECASTING OF BY-PRODUCTS OF COKE CHEMICAL PRODUCTION DURING SIMULTANEOUS ANALYSIS OF COAL QUALITY AND CHEMICAL COMPOSITION.....</b>	<b>11</b>
Krupnov L.V. <b>DETERMINATION OF THE ACTUAL PARAMETERS OF AN INDUSTRIAL UNIT FOR HEAT BALANCE CALCULATIONS USING A FLASH SMELTING FURNACE AS AN EXAMPLE ..</b>	<b>22</b>
Krupnov L.V. <b>DEVELOPMENT OF MODES FOR LOW-SULFUR NICKEL RAW MATERIALS PROCESSING IN THE VANYUKOV INDUSTRIAL FURNACE .....</b>	<b>30</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>37</b>
Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Mantserov S.A., Ryabova L.I., Gerasimov A.V. <b>ON THE APPLICATION OF ADDITIVE CORES IN THE PRODUCTION OF CRITICAL STEEL CASTINGS .....</b>	<b>37</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>44</b>
Mezin I.Yu., Kasatkina E.G., Ponurko I.V., Kurguzov S.A. <b>EFFECT OF COLD PRESSURE WORKING ON THE ACTIVATION OF CONTACT SURFACES IN METAL POWDER .....</b>	<b>44</b>
<b>METALLURGICAL PRODUCTION EQUIPMENT .....</b>	<b>51</b>
Anishchenko A.S., Prisyazhnyi A.G., Lavrova E.V. <b>OPTIMIZATION OF DESIGN OF SPLIT HOUSINGS OF ROLLING-WELDED CARTS OF MACHINES FOR PRODUCING AGGLOMERATE AND PELLETS .....</b>	<b>51</b>
<b>ECONOMICS IN METALLURGY .....</b>	<b>57</b>
Ponomareva O.S., Nazarova O.L., Maiorova T.V., Reshetova I.V., Kozlov R.A. <b>AUTONOMOUS EQUIPMENT MAINTENANCE AS A TOOL FOR INCREASING OPERATIONAL EFFICIENCY IN FERROUS METALLURGICAL ENTERPRISES .....</b>	<b>57</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.1

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)

Женин Е.В., Шаповалов А.Н., Потапов И.М.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния параметров шлакового режима на результаты доменной плавки по производственным данным о работе доменной печи полезным объемом 1232 м<sup>3</sup> с использованием железорудных материалов Курской магнитной аномалии. Показано, что для достижения наилучших результатов доменной плавки шлаковый режим должен характеризоваться минимальной основностью, обеспечивающей достижение заданного качества передельного чугуна.

На основе анализа производственных данных даны рекомендации по оптимизации шлакового режима доменной плавки по уровню основности, отношения  $\text{CaO/MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ . Реализация предлагаемых рекомендаций обеспечит условия для улучшения результатов доменной плавки.

Установлено, что в условиях нестабильности состава железорудной шихты и шлака в качестве оценки химических свойств шлака следует использовать показатель суммарной основности, который даёт более объективные результаты.

**Ключевые слова:** доменная плавка, производительность, расход кокса, десульфурация чугуна, коэффициент распределения серы, основность шлака

### Введение

Несмотря на активное развитие альтернативных технологий производства стали, более 90 % стальной продукции в настоящее время производится по классической схеме с участием доменного передела. Устойчивые позиции доменной технологии в структуре производства стали обусловлены известными достоинствами доменной плавки, такими как высокая степень использования тепловой и химической энергии, а также эффективность десульфурации чугуна [1-4]. Вместе с тем доменный передел, включая вспомогательные процессы производства кокса и подготовки руд к плавке, является основным потребителем энергетических ресурсов и главным источником выбросов загрязняющих веществ в черной металлургии [1-5].

Одним из главных направлений повышения эффективности и экологичности доменной плавки является снижение расхода кокса. Эта задача решается путем повышения качества шихтовых материалов, совершенствования техники и технологии плавки [6-9]. Одним из направлений повышения эффективности доменной плавки, обеспечивающих как снижение расхода кокса, так и повышение качества чугуна, является совершенствование шлакового режима [10-12].

Известно, что химический состав, количество и свойства доменного шлака должны обеспечивать требуемый уровень десульфурации чугуна [1, 13-16] при минимальном отрицательном влиянии на газодинамические условия плавки и его технико-экономические показатели в виде удельного расхода кокса и производительности.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных данной теме, вопрос совершенствова-

ния шлакового режима доменной плавки остается актуальным, поскольку оптимальные параметры шлака определяются специфическими шихтовыми условиями работы доменных печей. Поэтому в настоящей работе задача оптимизации шлакового режима доменной плавки решалась на основе анализа производственных данных о работе доменной печи №2 АО «Уральская Сталь» полезным объемом 1232 м<sup>3</sup>.

### Исходные данные

Для исследования влияния шлакового режима на результаты работы доменной печи был выполнен анализ производственных данных за период с 2021 по 2023 годы. Этот период характеризовался относительно стабильной работой печи на железорудной шихте Курской магнитной аномалии. Усредненные показатели работы печи и контролируемые параметры шлакового режима сведены в табл. 1.

### Анализ производственных данных

Анализ производственных данных (табл. 1) свидетельствует о значительной колеблемости технико-экономических показателей работы исследуемой печи, что связано с изменениями условий доменной плавки, главным образом, параметров дутья и шлакового режима, а также содержания железа в железорудной части шихты. Отмеченная вариативность условий работы печи осложняет решение поставленной в работе задачи и не позволяет в полной мере адекватно оценить влияние параметров шлакового режима на показатели работы печи. Поэтому влияние шлакового режима на основные показатели доменной плавки оценивали по «приведенным» расходу кокса и производительности, рассчитанным для условий работы печи в марте 2021 года с учетом стандартных коэффициентов влияния параметров доменной плавки [1].

Усредненные показатели работы печи и контролируемые параметры шлакового режима

Показатели		Значение за период	
		диапазон	среднее
Производительность фактическая, т/сут		1797,1-2203,5	2012,5
Производительность приведенная, т/сут		1605,4-2301,4	1910,2
Содержание железа в рудной части, %		54,6-61,6	57,4
Выход шлака, кг/т чугуна		304,6-394,0	343,8
Доля в рудной части шихты, %	окатыши	18,1-61,6	40,2
	агломерат	36,3-81,9	58,3
Рудная нагрузка, т/т кокса		3,5-4,2	3,85
Параметры дутья	расход, м <sup>3</sup> /мин	1773-2303	1984
	давление, МПа	0,294-0,347	0,324
	температура, °С	1059-1166	1118
	содержание O <sub>2</sub> , %	24,3-31,2	28,7
Расход кокса фактический, кг/т		401,0-457,68	433,2
Расход кокса приведенный*, кг/т		390,3-475,6	444,2
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т		102,6-177,7	132,2
Химический состав шлака, %	SiO <sub>2</sub>	40,4-44,9	41,9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7-10,0	7,8
	CaO	41,4-46,1	43,7
	MgO	4,7-7,6	5,9
	FeO	0,26-0,58	0,39
	S	0,51-0,82	0,66
Простая основность CaO/SiO <sub>2</sub> , ед.		1,00-1,10	1,058
Суммарная основность (CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub> , ед.		1,11-1,25	1,19
Общая основность (CaO+MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), ед.		0,95-1,06	1,00
CaO/MgO, ед.		5,45-9,38	7,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , ед.		0,16-0,25	0,19
Выход шлака кг/т чугуна		325-368	343,8

Из сопоставления фактических и «приведенных» показателей доменной плавки следует, что при учете изменяющихся условий работы печи и приведении их к условиям марта 2021 года существенно расширяется диапазон колебаний расхода кокса и производительности, что говорит о действенности метода для исследования влияния технологических факторов на показатели доменной плавки.

Учитывая значительные колебания содержания MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлаке, использование показателя простой основности CaO/SiO<sub>2</sub> не дает полного представления о свойствах шлака, поэтому в дальнейшем анализе использовали показатели суммарной (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> и полной (CaO+MgO)/(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) основности. Влияние этих показателей на удельный расход кокса представлено на рис. 1, из которого следует, что повышение основности шлака и, как следствие, его количества сопровождается ростом «приведенного» расхода кокса. При этом с точки зрения достоверности полученных уравнений регрессии использование суммарной основности для анализа влияния шлакового режима на расход кокса более предпочтительно.

Влияние показателей основности шлака на приведенную производительность представлено на рис. 2. Снижение производительности с повышением основности связано как с увеличением количества шлака и

снижением количества железа в шихте, так и с ухудшением газодинамических условий доменной плавки. Так же как и в случае с расходом кокса, использование суммарной основности дает более тесную корреляцию с «приведенной» производительностью, поэтому в дальнейшем исследовании для оценки химических свойств шлака использовали показатель суммарной основности.

Таким образом, анализ производственных данных наглядно иллюстрирует негативное влияние роста основности на производительность и расход кокса, что, очевидно, обусловлено прямой корреляцией между основностью шлака, его количеством, расходной частью теплового баланса и газодинамическим сопротивлением столба доменной шихты. Поэтому с точки зрения достижения наилучших технико-экономических показателей работы доменной печи шлаковый режим должен характеризоваться минимальным уровнем основности, обеспечивающим требуемую степень десульфурации чугуна. Последнее обеспечивается увеличением основности шлака, что наглядно иллюстрируется графиками на рис. 3, из которых следует, что повышение уровня суммарной основности является действенным фактором для повышения степени десульфурации чугуна и коэффициента распределения серы, что полностью соответствует теории и практике поведения серы в доменной печи [13-18].

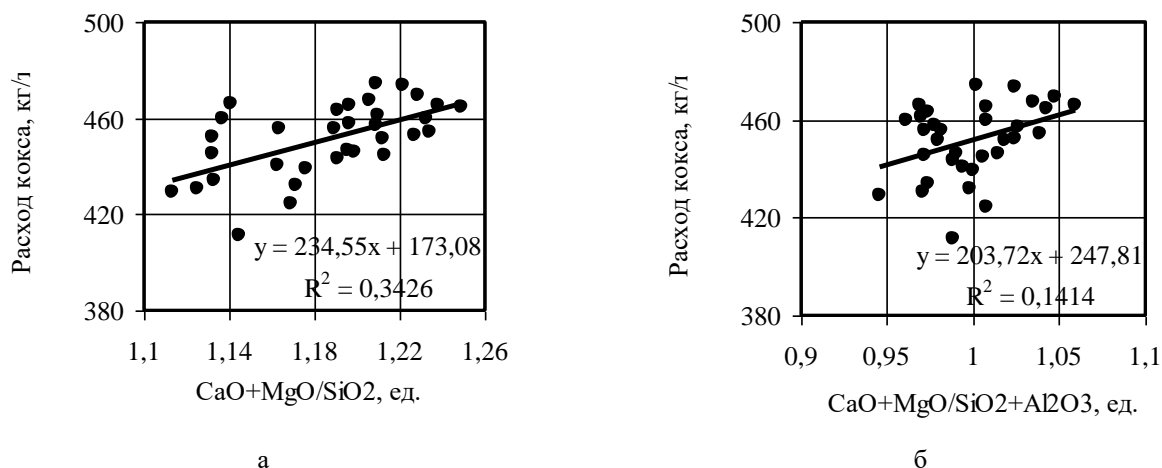


Рис. 1. Влияние суммарной (а) и полной (б) основности на приведенный расход кокса

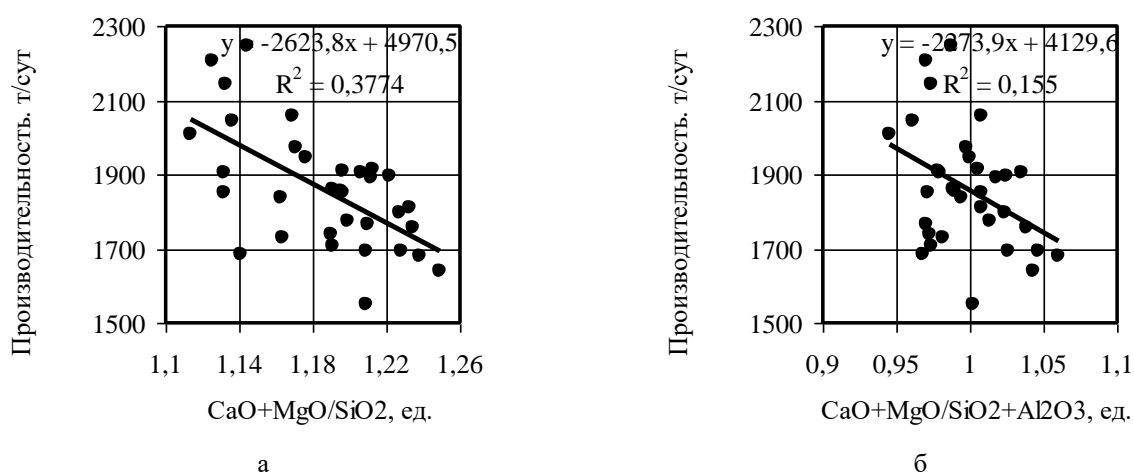


Рис. 2. Влияние суммарной (а) и полной (б) основности на приведенную производительность

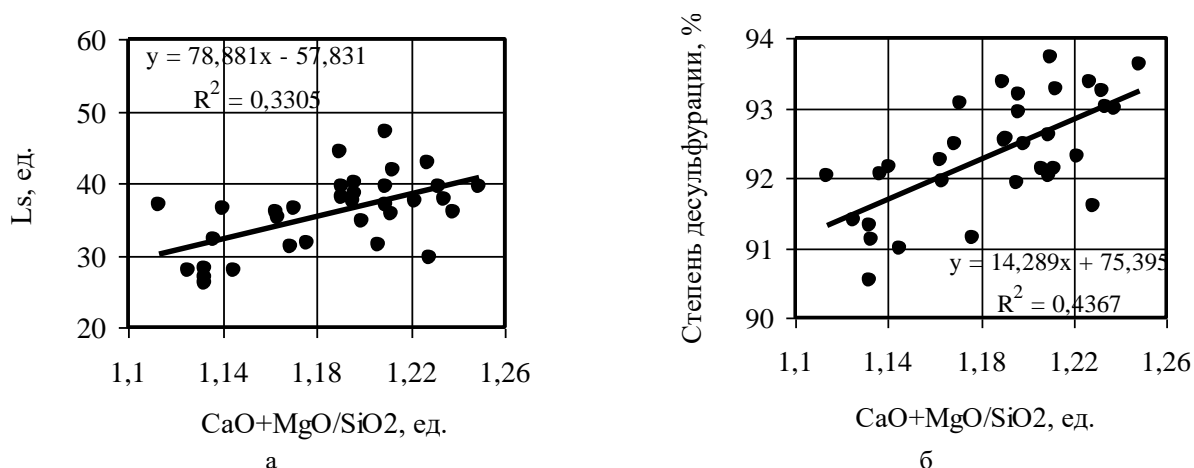


Рис. 3. Влияние суммарной основности на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

Суммарная основность шлака как интегральный показатель, характеризующий сульфидную емкость, можно повысить как в результате увеличения содержания CaO, так и в результате роста MgO. Известно, что CaO является более сильным основным оксидом в сравнении

с MgO, однако увеличение содержания CaO повышает температуру плавления и вязкость доменных шлаков, что ухудшает условия десульфурации. В то же время увеличение содержания MgO в шлаке до 10-12% повышает жидкоподвижность и устойчивость доменных

шлаков [16-21], способствуя тем самым улучшению условий и результатов десульфурации. Более значимая роль MgO в сравнении с CaO в результатах десульфурации подтверждается влиянием отношения CaO/MgO, с уменьшением которого результаты десульфурации улучшаются (рис. 4).

Таким образом, в рассматриваемых условиях резервом улучшения результатов десульфурации является частичное замещение CaO на MgO с доведением содержания последнего до 8-10 % при сохранении величины суммарной основности шлака на текущем уровне 1,19 ед. Для сохранения результатов десульфурации при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки целесообразно снижение суммарной основности до 1,15-1,17 ед. при поддержании содержания MgO в шлаке на уровне 8-10 %. Последнее возможно в результате увеличения содержания MgO в агломерате [23, 23] при одновременной корректировке поступления CaO с шихтой в результате снижения основности агломерата по отношению CaO/SiO<sub>2</sub> или увеличения доли окатышей.

Другим важным критерием шлакового режима доменной плавки, оказывающем влияние на физические свойства шлака и реализацию его обессеривающей способности является отношение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> (рис. 5), повышение которого способствует улучшению результатов десульфурации чугуна в результате воздействия на вязкость и температуру плавления шлака.

Из представленных на рис. 5 данных следует, что для исследуемых шихтовых условий доменной плавки целесообразно поддерживать отношение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> на уровне 0,20-0,25 ед. Для получения шлака с таким соотношением Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> при текущем содержании кремнезема 41-42 % необходимо обеспечить содержание глинозема в шлаке на уровне не менее 8-10%. Положительное влияние именно такого уровня содержания глинозема в шлаке отмечено и в литературных данных [20, 24].

Текущие и рациональные параметры шлакового режима, обеспечивающие улучшение показателей работы печи и качества чугуна, представлены в табл. 2.

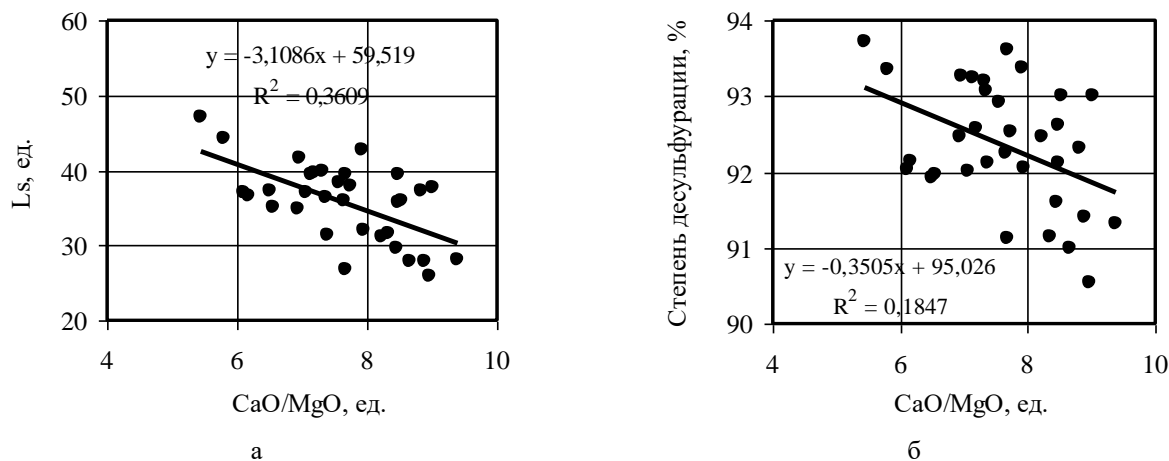


Рис. 4. Влияние отношения CaO/MgO в шлаке на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

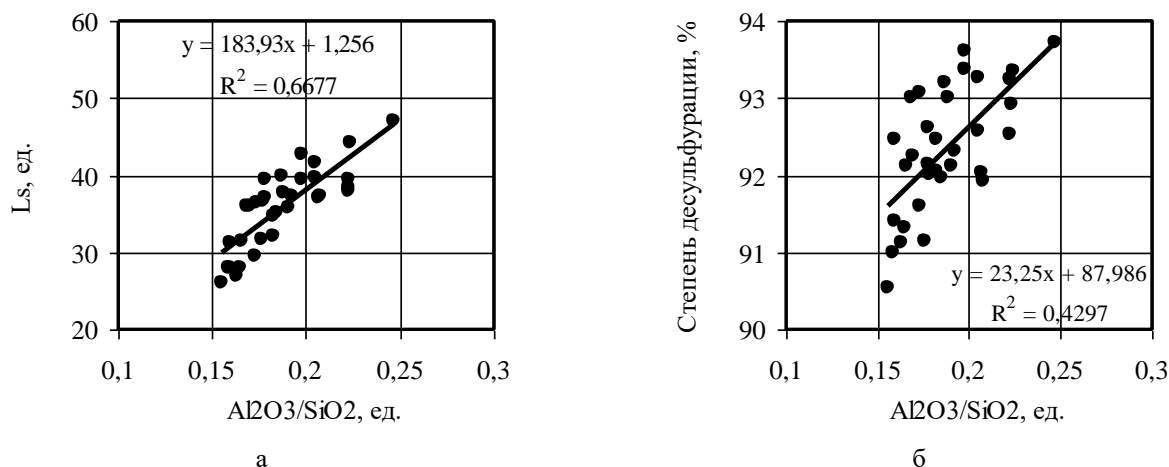


Рис. 5. Влияние отношения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> в шлаке на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

Текущие и рациональные параметры шлакового режима

Параметры шлака	Исследуемый период	Рациональные параметры
CaO, %	41,4-46,1 / 43,7	38-40
SiO <sub>2</sub> , %	40,4-44,9 / 41,9	41-42
MgO, %	4,7-7,6 / 5,9	8-10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	6,7-10,0 / 7,8	8-9
CaO/MgO, ед.	5,45-9,38 / 7,49	4,0-4,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , ед.	0,16-0,25 / 0,19	0,20-0,25
CaO/SiO <sub>2</sub> , ед	1,0-1,1 / 1,06	0,94
(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub> , ед	1,11-1,25 / 1,19	1,15-1,17
(CaO+MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), ед.	0,95-1,06 / 1,00	1,06-1,08
Выход шлака, кг/т	325-368 / 343,8	325-345 / 335

Поддержание рациональных параметров шлакового режима позволит повысить результаты десульфурации при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки в результате снижения выхода шлака и улучшения его физических свойств.

**Заключение**

Для повышения качества чугуна при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки целесообразно скорректировать состав шлака в сторону увеличения содержания MgO до 9-10 % при снижении уровня простой основности шлака до 0,94 ед. и поддержании величины суммарной основности на уровне 1,15-1,17 ед. Дополнительным мероприятием, способствующим улучшению технико-экономических показателей доменной плавки в рассматриваемых условиях является поддержание отношения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> на уровне 0,2-0,25 ед.

**Список источников**

1. *Металлургия чугуна: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.С. Юсфина. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.*
2. Курунов И.Ф. Доменный процесс – есть ли альтернатива? // *Металлург.* 2012. №4. С. 40-44.
3. Smith M. Blast furnace ironmaking: view on future developments // *Ironmaking & Steelmaking.* 2015. 42(10). Pp. 734-742.
4. Люнген Х.Б., Шмёле П. Сравнение рабочих характеристик доменных печей в мире // *Черные металлы/* 2019. №3. С. 13-18.
5. Li X.-L., Sun W., Zhao L., Cai J.-J. Energy consumption and smoke and dust emissions analysis of typical iron and steel production enterprise // *Journal of Northeastern University,* 2016, 37(3). 352-356.
6. Повышение эффективности доменной плавки в ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Портнов Л.В., Коверзин А.М., Никитин Л.Д., Щипицын В.Г., Бугаев С.Ф. // *Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации.* 2014. № 6 (1374). С. 15-18.

7. Koichi T., Taihei N., Michitaka S., Tatsuro A. Perspective on Progressive Development of Oxygen Blast Furnace for Energy Saving // *ISIJ International,* 2015, 55(9), 1866-1875.
8. Behnaz R., Arash T., Hannah L. et al. A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking // *Fuel.* 2023, 336, 127077.
9. Повышение эффективности доменной плавки в условиях ПАО «НЛМК» путем оптимизации структуры вдуваемого топлива / Филиппев С.Н., Горовых Н.И., Титов В.Н., Белых Е.В., Прохорова Т.В. // *Металлург.* 2024. № 10. С. 13-16.
10. Shatokha V. Slag parameters and sulphur partition in blast furnace hearth: Ukrainian case and international comparison // *Ironmaking & Steelmaking.* 2022, 49(1), 60-69.
11. Sahoo M, Hazra S, Kumar B, et al. Optimisation of slag composition (MgO and Basicity) to operate 20% alumina in Blast Furnace slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy,* 2024, 133(1-2), 42-48.
12. Shapovalov A.N., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R. The influence of parameters of slag conditions on blast furnace smelting performance and cast iron quality // *CIS Iron and Steel Review,* 2024, 28, 15-20.
13. Шаповалов А.Н., Дружков В.Г. Повышение эффективности десульфурации чугуна. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.Н. Носова, 2011. 148 с.
14. Ma X., Chen M., Xu H. et al. Sulphide capacity of CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO system relevant to low MgO blast furnace slags // *ISIJ International,* 2016, 12, 2126–2131.
15. Потапова М.В., Шаповалов А.Н. Влияние параметров доменной плавки на качество передельного чугуна в условиях АО «Уральская Сталь» // *Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки.* 2018. № 17. С. 4-14.
16. Анализ возможных путей снижения содержания серы в чугуне / Мясоедов С.В., Филатов С.В., Пантелеев В.В., Листопадов В.С., Загайнов С.А. //

- Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 878-882.
17. Крячко Г.Ю., Беляев Ю.В. Влияние состава шлака на работу доменных печей // Черные металлы. 2006. № 3. С. 17-22.
  18. К обоснованию выбора рационального шлакового режима в металлургических процессах / Степаненко Д.А., Волкова О., Хеллер Х.П., Оторвин П.И., Чебыкин Д.А. // Сталь. 2017. № 9. С. 2-5.
  19. Shen F., Jiang X., Wu G. et al. Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation // ISIJ International, 2006, 46(1), 65-69.
  20. Исследование подвижности доменных шлаков / Логачев Г.Н., Гостенин В.А., Пишнограев С.Н., Селезнев Д.И., Гридасов В.П. // Сталь. 2013. № 12. С. 4-6.
  21. Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Оценка шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Наука и производство Урала. 2015. № 11. С. 35-39.
  22. Экспериментальные исследования магниезных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н., Майстренко Н.А., Берсенев И.С. // Сталь. 2018. № 1. С. 2-5.
  23. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А. Влияние вида магниезных материалов на показатели агломерационного процесса в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2018. №11(1043). С.38-42.
  24. Sunahara K. Nakano K. Hoshi M. et al. Effect of high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag on the blast furnace operations // ISIJ International, 2008, 48, 420-429.

### 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.

**Потапов Иван Михайлович** – бакалавр 4 курса каф. МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: potapovmg@mail.ru.

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

### SLAG REGIME OPTIMIZATION IN BLAST FURNACE SMELTING

**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.

**Potapov Ivan M.** – 4th-year bachelor's student, Department of Metallurgy and Chemical Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: potapovmg@mail.ru.

**Abstracts.** The article presents the results of a study of the influence of slag regime parameters on the results of blast furnace smelting based on production data on the operation of a blast furnace with a useful volume of 1232 m<sup>3</sup> using iron ore materials from the Kursk Magnetic Anomaly. It is shown that in order to achieve the best results in blast furnace smelting, the slag regime must be characterized by a minimum basicity, ensuring the achievement of a specified quality of pig iron.

Based on an analysis of production data, recommendations are provided for optimizing the blast furnace slag regime in terms of basicity level, CaO/MgO ratio, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio. Implementation of these recommendations will ensure improved blast furnace smelting results.

In conditions of instability in the composition of iron ore charge and slag, to assess the chemical properties of slag, it is necessary to use the indicator of total basicity.

**Keywords:** blast furnace smelting, productivity, coke consumption, hot metal desulphurization, sulphur distribution coefficient, slag basicity

## References

1. Metallurgy of iron: tutorial for institutions of higher education, revised 3rd edition. Edited by Yusfin Yu.S. Moscow: IKTs «Akademkniga», 2004. 774 p. (In Russ.).
2. Kurunov I.F. The blast-furnace process – is there any alternative? *Metallurgist*, 2012, 56(3-4), 241-246.
3. Smith M. Blast furnace ironmaking: view on future developments. *Ironmaking & Steelmaking*, 2015, 42(10), 734-742.
4. Längen H.B., Schmöle P. Comparative operating parameters of blast furnaces worldwide. *Chernye Metally*, 2019, № 3, 13-18.
5. Li X.-L., Sun W., Zhao L., Cai J.-J. Energy consumption and smoke and dust emissions analysis of typical iron and steel production enterprise. *Journal of Northeastern University*, 2016, 37(3). 352-356.
6. Portnov L.V., Koverzin A.M., Nikitin L.D. et al. Improving the efficiency of blast furnace smelting at JSC EVRAZ ZSMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific-Technical and Economic Information*, 2014, 6(1374), 15-18. (In Russ.).
7. Koichi T., Taihei N., Michitaka S., Tatsuro A. Perspective on Progressive Development of Oxygen Blast Furnace for Energy Saving. *ISIJ International*, 2015, 55(9), 1866-1875.
8. Behnaz R., Arash T., Hannah L. et al. A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking. *Fuel*. 2023, 336, 127077.
9. Filipyev, S.N., Gorovykh, N.I., Titov, V.N. et al. Improving the efficiency of blast furnace melting at Novolipetsk Steel (NLMK) by optimizing the composition of injected fuel. *Metallurgist*, 2025, 68, 1425–1431.
10. Shatokha V. Slag parameters and sulphur partition in blast furnace hearth: Ukrainian case and international comparison. *Ironmaking & Steelmaking*, 2022, 49(1), 60-69.
11. Sahoo M, Hazra S, Kumar B, et al. Optimisation of slag composition (MgO and Basicity) to operate 20% alumina in Blast Furnace slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2024, 133(1-2), 42-48.
12. Shapovalov A.N., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R. The influence of parameters of slag conditions on blast furnace smelting performance and cast iron quality. *CIS Iron and Steel Review*, 2024, 28, 15-20.
13. Shapovalov A.N., Druzhkov V.G. Increasing the Efficiency of Pig Iron Desulfurization. Magnitogorsk: Publishing House of Magnitogorsk State Technical University named after G.N. Nosov, 2011, 148 p. (In Russ.).
14. Ma X., Chen M., Xu H. et al. Sulphide capacity of CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO system relevant to low MgO blast furnace slags. *ISIJ International*, 2016, 12, 2126–2131.
15. Potapova M.V., Shapovalov A.N. Influence of blast furnace smelting parameters on the quality of remelting pig iron under the conditions of JSC «Ural Steel». *Technologies of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing*, 2018, 17, 4-14. (In Russ.).
16. Myasoedov S.V., Filatov S.V., Pantelev V.V. et al. Analysis of possible ways to reduce sulfur content in pig iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2020, 63(11-12), 878-882. (In Russ.).
17. Kryachko G.Yu., Belyaev Yu.V. The influence of slag composition on the operation of blast furnaces. *Chernye Metally*, 2006, 3, 17-22. (In Russ.).
18. Stepanenko D.A., Volkova O., Heller H.-P. et al. Selecting optimal slag conditions in the blast furnace. *Steel in Translation*, 2017, 47(9), 610-613.
19. Shen F., Jiang X., Wu G. et al. Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation, *ISIJ International*, 2006, 46(1), 65-69.
20. Logachev G.N., Gostenin V.A., Pishnograev S.N. et al. Mobility of blast-furnace slag. *Steel in Translation*, 2013, 43(12), 805-807.
21. Ovchinnikova E.V., Gorbunov V.B., Shapovalov A.N. Assessment of the slag regime in blast furnace smelting under the conditions of JSC «Ural Steel». *Science and Production of the Urals*, 2015, 11, 35-39. (In Russ.).
22. Ovchinnikova E.V., Gorbunov V.B., Shapovalov A.N. et al. Magnesia Sinter with Flux Based on Magnesium Silicate. *Steel in Translation*, 2018, 48(1), 34-38.
23. Shapovalov A.N., Ovchinnikova E.V., Maistrenko N.A. Effect of the type of magnesia materials on the sintering process indicators at JSC «Ural Steel». *Chernye Metally*, 2018, (11), 38-42.
24. Sunahara K. Nakano K. Hoshi M. et al. Effect of high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag on the blast furnace operations. *ISIJ International*, 2008, 48, 420-429.

Ссылка на статью:

Женин Е.В., Шаповалов А.Н., Потапов И.М. Оптимизация шлакового режима доменной плавки // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)  
 Zhenin E.V., Shapovalov A.N., Potapov I.M. Slag regime optimization in blast furnace smelting. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)

Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю., Гридин Н.А., Шалайкин С.Р.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДОВ ПОПУТНЫХ ПРОДУКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ СООТНОШЕНИЯ МАРОК И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕЙ

**Аннотация.** В работе представлены результаты математического моделирования, позволяющие синхронно прогнозировать попутные продукты коксохимического производства (КХП) по четырем предикторам: смоле, бензолу, сульфату аммония, коксовому газу, при одновременном анализе соотношения десяти марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС и девяти показателей качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита. Впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок и показателями качества углей и предикторами. Впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов, а также зависимость между функцией ковариация ( $f$ ) и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву исследованных предикторов. Впервые установлены зависимости между  $f$  и фактическими суммарными значениями предикторов. Установлено изменение характера зависимости между  $f$  и смолой при изменении сортировки массива  $f$  на предиктор и появлении точки экстремума, что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов. Полученные технологические зависимости и математические закономерности свидетельствуют о сложности физико-химических процессов КХП, что определяет обязательное требование к системному развитию математического аппарата и детализации математического моделирования по каждой марке угля. При статистической обработке данных и математическом моделировании использовались методики и алгоритмы математического анализа, математического аппарата, разработанные авторами настоящего исследования, адаптированные к условиям нестабильной работы предприятия с полным металлургическим циклом, функционирующего в прифронтовой полосе ведения боевых действий.

**Ключевые слова:** попутные продукты коксохимического производства, соотношения марок углей, показатели качества углей, смола, бензол, сульфат аммония, коксовый газ

В настоящее время ряд коксохимических предприятий сталкивается с проблемой неоднородного выхода классов кокса из коксовых батарей, в связи с чем М.Н. Степановой предложена математическая модель процесса коксохимического производства (КХП) с целью оптимизации фракционного состава кокса, предназначенная для анализа данных и построения предсказательных моделей. Представлен результат работы в табличном процессоре Excel, с помощью которого можно произвести транспонирование и выборку данных из исходного материала. Проведен факторный анализ в программе STATISTICA, который позволил выявить все факторы, влияющие на выход валового кокса размером более 80 мм. С помощью математической модели скорректировано процентное соотношение шихт для получения однородного размера валового кокса [1].

В работе представлены математические расчеты по снижению себестоимости чугуна за счет уменьшения расхода кокса в доменном цехе на основе оптимизации закупки угольной шихты. Задача оптимизации закупки угольной шихты направлена на подбор долевого участия поставщиков, обеспечивающего минимальную стоимость угольной шихты при технологически заданном качестве кокса. Результаты проведенного исследования А. В. Липатниковым с сотрудниками позволили решить ряд научных задач. В частности, разработать методики оптимального потребления угольной шихты, определить нелинейные статистические взаимосвязи между показателями качества

угольной шихты и показателями качества получаемого кокса, показателями качества кокса и удельным расходом кокса на уровне 70-80%, определить принципиальные возможности построения модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья на основе имеющихся статистических данных, возможность снижения стоимости используемой угольной шихты при аналогичном качестве, либо улучшения качества кокса при неизменной цене на основе использования разработанной модели. Дальнейшее развитие модели авторы акцентировали на разработку автоматизированной системы планирования привоза и потребления угольной шихты, а также для прогнозирования качества кокса при фактическом привозе [2].

В работе выполнено математическое моделирование прохождения двухфазного пылегазового потока через пылесадительные бункеры установок различных конфигураций для сухого тушения кокса. Определено влияние особенностей конструкции пылесадительного бункера на эффективность пофракционно-улавливания коксовой пыли и скорость пылегазового потока, проходящего через бункер. Получены данные, позволяющие выявить закономерности осаждения коксовой пыли, повысить эффективность конструкции пылесадительного бункера, снизить его материалоемкость и уменьшить эрозионный износ оборудования, установленного за бункером по ходу пылегазового потока [3].

В работе разработана трехмерная модель обогревательного простенка коксовой батареи в CFD-программе Fluent. Результаты расчетов на модели показали удовлетворительную сходимость с экспери-

ментальными данными. Математическая модель позволяет решать задачи повышения равномерности нагрева по высоте, ширине и длине коксового пирога путем регулирования режима процесса горения, задачи изменения конструктивных характеристик обогревательного простенка коксовой печи, повышения прочности кокса, экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения вредных выбросов [4].

На основе полного факторного эксперимента в работе изучено влияние расхода реагентов, плотности пульпы, процента содержания тонких шламов в угольной пульпе и времени флотации на качественно-количественные показатели флотации угольной мелочи. С использованием метода математического моделирования получены регрессионные зависимости первого порядка, в которых в качестве функции отклика выбраны суммарный выход концентрата, зольность концентрата, извлечение горючей массы в концентрат и селективность процесса, включающие в себя совокупность качественно-количественных показателей процесса флотации угольной мелочи. По мнению В. Н. Петухова с коллегами, использование выявленных зависимостей позволяет не только прогнозировать результаты процесса флотационного обогащения угля, содержащего большое количество тонкодисперсных угольных шламов, но и управлять флотационным процессом [5].

В работе представлена разработка метода прогноза выхода химических продуктов коксования из углей и их смесей на основе характеристик их качества с использованием метода нейросетевого математического моделирования. Приведены результаты кластерного анализа данных показателей качества углей и выхода из них химических продуктов коксования на примере кокса, каменноугольной смолы, сырого бензола и коксового газа. Данный метод исследований является частью математического анализа данных и необходим для последующего математического моделирования. На основании анализа иерархического дерева исследованных угольных концентратов Е. В. Васильевой с коллегами сделан вывод об их распределении по классам в соответствии с марочной принадлежностью и свойствами, отражаемыми результатами технического, петрографического, элементного анализа и оценки структурных показателей. Показано, что элементы выборки образуют четыре естественных кластера. На основе полученных результатов разработаны модели, позволяющие прогнозировать выход химических продуктов коксования по характеристикам качества исходных углей [6].

В работе с помощью математического моделирования проведен расчет концентрационного, температурного и скоростного полей газовых потоков при сгорании отопительного газа в отопительном канале коксовой печи. В частности, изучено влияние коэффициента избытка воздуха и характера газодинамики в обогревательном простенке коксовой печи на концентрацию продуктов сгорания [7].

В работе представлена разработка и внедрение системы математического моделирования производ-

ства всего металлургического комбината на примере АО «ЕВРАЗ ЗСМК». В отличие от существующих систем моделирования переделов, целью системы является единовременная сквозная оптимизация всех переделов комбината. Авторами разработана и проанализирована форма статистики, которая выявила следующие основные проблемы: 1) неразрешимость модели из-за ввода математически некорректных данных; 2) повторные расчеты экономических кейсов для выделения и интерпретации отдельных изменившихся факторов плана от бюджета; 3) ошибки на этапе верификации данных из-за некорректного химического состава элементов или неверных настроек модели под конкретный период работы. Для устранения недостатков системы А.С. Леонтьевым и И.А. Рыбенко разработаны системы валидации вводимых данных на этапе до и после расчетов, модули анализа чувствительности и факторный расчет, система автоматического заполнения химического состава, а также добавлена возможность переобучения модели на исторических данных [8].

Результаты математического моделирования, в том числе нейросетевого, технологических аспектов коксохимического производства и прогнозирования выхода химических продуктов коксования также предметно рассмотрены в работах. Наибольший научный интерес представляют математические исследования Е.В. Васильевой по прогнозированию выхода химических продуктов коксования при помощи нейросетевого математического моделирования. Среди ряда научных работ по математическому моделированию следует сделать особый акцент на работы по изучению процессов теплопереноса и термической деструкции угольной шихты в коксовых печах, углубленного анализа факторов, влияющих на процесс тушения кокса в камере установки сухого тушения кокса, и определению равномерности горячей прочности и реакционной способности кокса [9-12].

Таким образом, в литературных источниках отсутствуют результаты математического моделирования по прогнозированию получения попутных продуктов КХП, при комплексном анализе соотношения 10 марок углей и 9 показателей качества углей для четырех предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония, коксового газа.

Целью работы является математическое моделирование прогнозирования получения попутных продуктов КХП, при одновременном анализе соотношения 10 марок углей и 9 показателей качества углей.

Объектом исследования являются попутные продукты КХП (смола, бензол, сульфат аммония, коксовый газ), марки углей (Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС), показатели качества углей (содержание влаги, золы, серы, индекс основности золы и угля, выход летучих на сухую и горячую массу, ширина пластического слоя, средний показатель отражения витринита).

Предметом исследования является математическое моделирование прогнозирования получения попутных продуктов КХП.

Задачи исследования:

1. Разработать аддитивную математическую модель для прогнозирования попутных продуктов КХП в зависимости от соотношения марок углей и показателей качества углей по фактическим и синтетическим коэффициентам множественной регрессии.
2. Построить функции нормального распределения Гаусса – Лапласа.
3. Получить коэффициенты корреляции Пирсона, ковариации, множественной регрессии по фактическим и нормализованным зависимым факторам.
4. Определить критерии Фишера – Снедекора.
5. Апробировать метод наименьших квадратов.
6. Определить степень относительного влияния зависимых факторов на предикторы по общему массиву и подмассивам.
7. Определить относительную ошибку прогноза.
8. Построить зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву.
9. Построить зависимость между функцией ковариации и фактическими суточными значениями предикторов
10. Осуществить проверку адекватности модели.

Методика исследований

Исследованные предикторы (YFn): Y-Factor 1 (YF1) – смола, Y-Factor 2 (YF2) – бензол, Y-Factor 3 (YF3) – сульфат аммония, Y-Factor 4 (YF4) – коксовый газ. В статистическом анализе использовали массив данных соотношения углей по 10 маркам (табл. 1) и по 33 поставщикам за 305 суток (табл. 2) периода январь-октябрь 2024 г. коксохимического производства ООО «Южный горно-металлургический комплекс».

Таблица 1

Исследованные марки углей

X-Factor (XF)	Наименование марки угля
XF1	Г
XF2	ГЖО
XF3	ГЖ
XF4	Ж
XF5	КЖ
XF6	К
XF7	КО
XF8	КСН
XF9	КС
XF10	ОС

Таблица 2

Показатели качества исследованных марок углей по поставщикам

№ п/п	Поставщик	Марка	Показатели качества								
			W	A	S	Vd	Vdaf	Y	Ro	Io	Ио
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	РФ Сила Сибири	Г	8,1	7,4	0,41	40,4	43,6	10,00	0,60	0,40	5,22
2	СМС, Карбон Уголь	ГЖО	9,6	7,6	0,51	35,8	38,7	10,30	0,70	0,19	2,36
3	РФ, Воркутауголь	ГЖО	6,9	9,0	1,28	33,2	36,5	10,00	0,74	0,19	2,73
4	Ресурс Углесбыт СМС, РФ	ГЖО	7,3	7,9	0,51	35,3	38,4	11,50	0,72	0,13	1,62
5	РФ Карбон Промресурс	ГЖ	8,9	6,7	0,50	37,1	39,8	18,83	0,81	0,21	2,35
6	Сибуглемет СМС, РФ	ГЖ	9,0	8,6	0,42	34,8	38,1	20,40	0,82	0,18	2,54
7	СМС, Синдикат Промо	ГЖ	9,5	8,7	0,50	36,2	39,6	20,00	0,75	0,21	3,03
8	ИСТЭК, обогащение рядовки ГЖ	ГЖ	11,0	10,3	0,42	36,0	40,0	18,00	0,70	0,56	9,64
9	Воркута уголь СМС, РФ	Ж	7,5	8,8	1,10	32,7	35,8	17,22	0,82	0,21	2,89
10	РФ СИБУГЛЕМЕТ	Ж	9,0	8,6	0,42	34,8	38,1	20,40	0,82	0,18	2,54
11	Синдикат Промо СМС, РФ	Ж	9,8	10,5	0,51	20,5	22,8	15,50	1,18	0,22	2,95
12	РФ ТопПром	Ж	9,8	9,3	0,56	31,8	35,1	31,83	0,96	0,23	3,35
13	СМС, Континент-Н, ММК Уголь	Ж	8,1	8,5	0,58	29,5	32,3	34,00	1,01	0,32	4,08
14	Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
15	Специалист Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
16	ДОН ТРЕЙД Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
17	СМС, АДВ Инвест, РФ	Ж	9,0	9,7	0,54	31,8	35,2	32,25	0,94	0,23	3,39
18	ДОН ТРЕЙД Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
19	Специалист Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
20	Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
21	ПТК СМС ,РФ	Ж	8,2	8,9	0,73	35,8	39,3	30,17	0,85	0,25	3,65
22	РФ Сила Сибири	Ж	7,3	7,5	0,72	35,6	38,5	28,00	0,81	0,25	3,11
23	РФ Перспектива	КЖ+Ж	10,1	7,7	0,38	28,9	31,3	20,40	0,93	0,21	2,33
24	РФ Воркутауголь	К	7,3	8,9	0,77	22,3	24,4	21,07	1,24	0,23	2,74
25	СМС, Синдикат Промо	К	9,8	10,5	0,51	20,5	22,8	15,50	1,18	0,22	2,95
26	СМС, Северный Кузбасс	К	9,5	9,9	0,57	19,8	21,9	17,50	1,18	0,20	2,49
27	СМС, Краснокам., Персп., Карб. тр.	К	8,8	8,4	0,43	24,4	26,6	15,50	1,07	0,18	2,09
28	СМС, Карбо Сибирь	К	9,0	9,6	0,75	22,1	24,4	18,00	1,19	0,23	2,88
29	СМС, Карбон Уголь	КО	9,9	8,1	0,34	25,6	27,8	10,00	0,96	0,34	3,84
30	РФ МЕЛТЭК	КСН	8,1	8,6	0,30	27,0	29,5	9,25	0,83	0,14	1,73
31	СМС, Сибуглемет У-7	КС	7,0	9,1	0,31	17,3	18,9	8,00	1,44	0,20	2,28
32	СМС, Сибуглемет Уголь	ОС	7,8	8,7	0,28	19,1	21,0	10,33	1,36	0,41	4,56
33	СМС, АЛС Трейд, АЛЕНСИ	ОС	8,6	8,5	0,47	17,4	19,0	11,50	1,31	0,13	1,37

В табл. 3 представлены обозначения и наименования исследованных 9 показателей качества углей (ПКУ).

Таблица 3

Обозначения и наименования исследованных показателей качества углей

№ п/п	Обозначение	Наименование показателей качества углей	Ед. изм.
1	W	Содержание влаги	%
2	A	Содержание золы	%
3	S	Содержание серы	%
4	Vd	Выход летучих на сухую массу	%
5	Vdaf	Выход летучих на горючую массу	%
6	Y	Ширина пластического слоя	мм
7	Ro	Средний показатель отражения витринита	ед.
8	Io	Индекс основности золы	ед.
9	Io	Индекс основности угля	ед.

При статистической обработке данных, математическом анализе и математическом моделировании использовались методики, представленные в работах [13-16], а также алгоритмы математического анализа и математического аппарата, разработанные авторами настоящего исследования, адаптированные к условиям нестабильной работы предприятия с полным металлургическим циклом, функционирующего в прифронтовой полосе ведения боевых действий [17-22].

В частности, для получения корреляционных связей использовали коэффициент корреляции Пирсона – Pearson correlation coefficient (R), рассчитываемый по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции Пирсона;  $n$  – объём выборки;  $x_i$  –  $i$ -й фактор выборки X;  $y_i$  –  $i$ -й фактор выборки Y;  $\bar{x}$  – среднее значение выборки X;  $\bar{y}$  – среднее значение выборки Y.

Коэффициенты множественной регрессии – Multiple regression coefficient (K) получены при помощи метода наименьших квадратов. Метод заключается в определении аппроксимирующей функции, сумма квадратов отклонений  $F$  от которой до экспериментальных (табличных) значений будет наименьшей ( $F \rightarrow \min$ ):

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2, \quad (2)$$

где  $F$  – аппроксимирующая функция;  $n$  – объём выборки;  $x_i$  –  $i$ -й фактор выборки X;  $y_i$  –  $i$ -й фактор выборки Y.

Нормализованные коэффициенты – The coefficient of multiple regression is normalized (K\_N) получены после нормализации исследованного массива по формуле

$$Z_{xi} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (3)$$

где  $Z_{xi}$  – Z Стандартизация фактических XFn;  $x_i$  –  $i$ -й фактор выборки X;  $\bar{x}$  – среднее значение выборки X;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

Проверку значимости модели при выполнении нулевой гипотезы анализировали по F-распределению критерия Фишера – Снедекора (F-test):

$$F = F_{\text{факт}} = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \cdot \frac{m}{n - m - 1}, \quad (4)$$

где  $m$  – количество XFn;  $n$  – объём выборки;  $y_i$  –  $i$ -й фактор выборки Y;  $\bar{y}$  – среднее значение выборки Y.

Адекватность модели определяли по отношению между расчетным ( $F_p$ ) и табличным ( $F_T$ ) значениям критерия Фишера:

$$F_p / F_T > 1. \quad (5)$$

При отношении  $F_p / F_T > 1$ , аддитивная модель считалась актуализированной. Использовали стандартную дополнительную ошибку для расчета критерия Фишера – 5%.

Коэффициент вариации – Coefficient of variation (CV) определяли как отношение между среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  и среднестатистическим значением  $\mu$  по выборке:

$$CV = \sigma / \mu. \quad (6)$$

Абсолютную ошибку – Absolute error (AE) определяли по модулю разницы между фактическим и расчетным значением аргумента. Относительную ошибку – Relative error (RE) определяли в процентах как отношение между абсолютной ошибкой и фактическим значением независимой переменной.

Относительную степень влияния – Relative degree of influence (RDI) X-Factors на Y-Factor определяли в процентах от максимального значения нормализованных коэффициентов по модулю.

Распределение значений XFn&YF строили по функции распределения Гаусса – Лапласа.

Математическую функцию ковариация  $f$  использовали для расчета коэффициента ковариации всей совокупности двух диапазонов данных (генеральной совокупности) и возвращения соответствующего значения. Функцию  $f$  определяли по формуле

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n}, \quad (7)$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – средние значения выборки;  $n$  – размер выборки.

Функция  $f$  установлена между массивами 1 и 2. Массив 1 состоит из среднестатистических произведений между соотношением углей (см. табл. 1) и показателей качества исследованных марок углей (см. табл. 2). Массив 2 состоит из нормализованных значений массива 1. Среднеквадратичное отклонение установлено при анализе массива 2.

**Изложение материала**

Представленный ниже материал является логическим продолжением работы [17], посвященной математическому моделированию предикторов коксохимического производства в зависимости от лага и нулевой инерции.

Результаты анализа 19 исследуемых факторов двух групп – «Марки углей», «Показатели качества углей» и предикторов по функции нормального распределения показали, что из 10 марок углей функция нормального распределения наблюдается для восьми марок (рис. 1, а).

Для марок углей ГЖ (рис. 1, б) и КЖ (рис. 1, в) нормального распределения на функции не наблюдается.

Для показателей качества углей закон нормального распределения характерен для всех показателей, за исключением содержания золы (рис. 2).

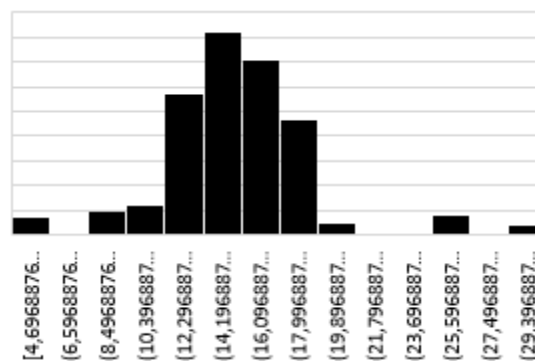
Для исследованных предикторов, нормальное распределение не выявлено для смолы (рис. 3).

F-тест показал, что табличные данные по критерию Фишера (2,42) ниже расчетных для бензола (17,23) и сульфата аммония (11,57). Для смолы расчётный критерий Фишера ниже табличного и составляет 0,47, а для коксового газа находится на сопоставимом уровне (2,37).

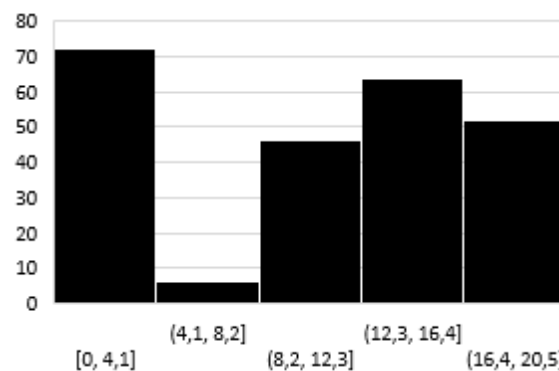
Коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок углей (см. табл. 1), показателями качества углей (см. табл. 2) и попутными продуктами КХП представлены в табл. 4 и 5.

Только для 15 и 17% полученных коэффициентов значение R больше 0,3, что не позволяет установить адекватные корреляционные связи между марками углей (табл. 4), всеми показателями качества углей (табл. 5) и попутными продуктами коксохимического производства.

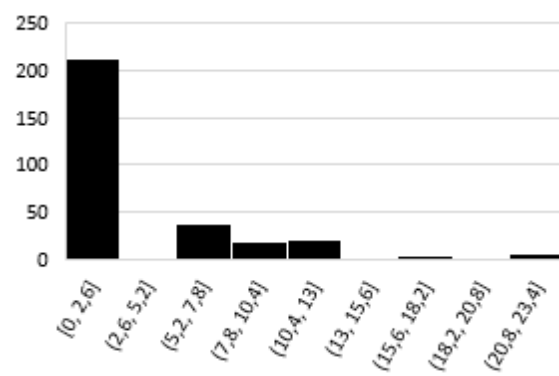
Установленные коэффициенты множественной регрессии, полученные при математической обработке массива данных соотношения марок углей, позволили получить уровень относительной ошибки между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов в пределах 4-20% (табл. 6).



а



б



в

Рис. 1. Распределение Гаусса–Лапласа по исследованным массивам для марок углей: а – КО; б – ГЖ; в – КЖ

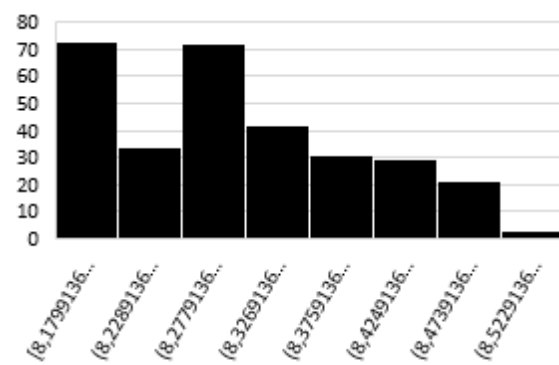


Рис. 2. Распределение Гаусса–Лапласа по золе

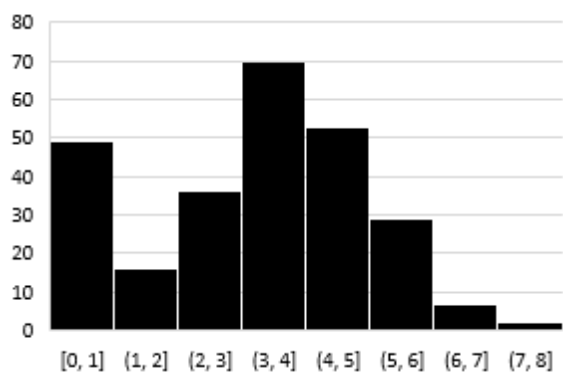


Рис. 3. Распределение Гаусса–Лапласа по смоле

Тем не менее использование на практике для прогнозирования предикторов по коэффициентам множественной регрессии не является адекватным при создании актуальной математической модели, так как анализируемые соотношения углей находятся в узких интервалах колебаний рассмотренных факторов.

В связи с тем, что около 85% всех зависимых факторов имеют низкие корреляционные связи для исследованных предикторов, дальнейший математический анализ выполнили при использовании функции  $f$  (рис. 4). Согласно рис. 4, минимальное  $\sigma$  наблюдается при нулевом значении  $f$ .

Установлены зависимости между  $f$  и фактически-ми суточными значениями исследованных предикторов (рис. 5).

Низкие коэффициенты детерминации ( $R^2 = 0,007-0,040$ ) на зависимостях между  $f$  и фактически-ми суточными значениями предикторов (рис. 5, а, б, г), за исключением зависимости для

сульфата аммония (рис. 5, в) ( $R^2 > 0,3$ ), свидетельствуют об относительно низкой корреляции, необходимой для получения достоверных математических закономерностей.

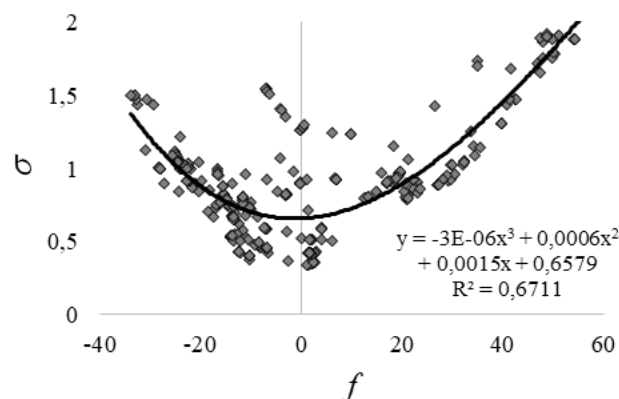


Рис. 4. Зависимость между функцией  $f$  и  $\sigma$  по нормализованному массиву

Тем не менее установленные закономерности между  $f$  и предикторами позволяют с высокой достоверностью прогнозировать получение попутных продуктов коксохимического производства. В частности, на рис. 6 представлены зависимости между  $f$  и предикторами после сортировки по  $f$  на 5 или 10 подмассивов.

Полученные зависимости (см. рис. 6) позволяют установить характер технологических закономерностей КХП.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок углей и попутными продуктами КХП

УФп/Марки углей	Г	ГЖО	ГЖ	Ж	КЖ	К	КО	КСН	КС	ОС
Смола	-0,04	0,07	0,05	-0,02	-0,02	-0,09	0,05	0,04	-0,08	-0,07
Бензол	0,24	0,17	-0,48	0,53	0,29	0,05	0,02	-0,03	-0,21	-0,23
Сульфат аммония	-0,14	0,45	0,18	0,01	-0,21	-0,39	0,24	0,26	-0,34	-0,45
Коксовый газ	-0,11	0,15	0,10	-0,09	0,00	-0,16	0,16	0,04	-0,17	-0,11

Таблица 5

Коэффициенты корреляции Пирсона между показателями качества углей и попутными продуктами КХП

ПКУ/Марки углей	W	A	S	Vd	Vdaf	Y	Ro	Io	Ио
Смола	0,06	0,02	-0,02	0,10	0,10	0,02	-0,10	-0,05	0,00
Бензол	0,35	-0,20	-0,25	0,18	0,17	-0,20	-0,22	-0,13	-0,23
Сульфат аммония	0,26	0,05	-0,33	0,55	0,55	0,03	-0,51	-0,43	-0,28
Коксовый газ	0,08	-0,04	-0,04	0,15	0,15	0,06	-0,16	-0,08	-0,05

Таблица 6

Относительная ошибка прогноза при использовании коэффициентов множественной регрессии, %

Смола	Бензол	Сульфат аммония	Коксовый газ
20,2	12,9	7,7	4,1

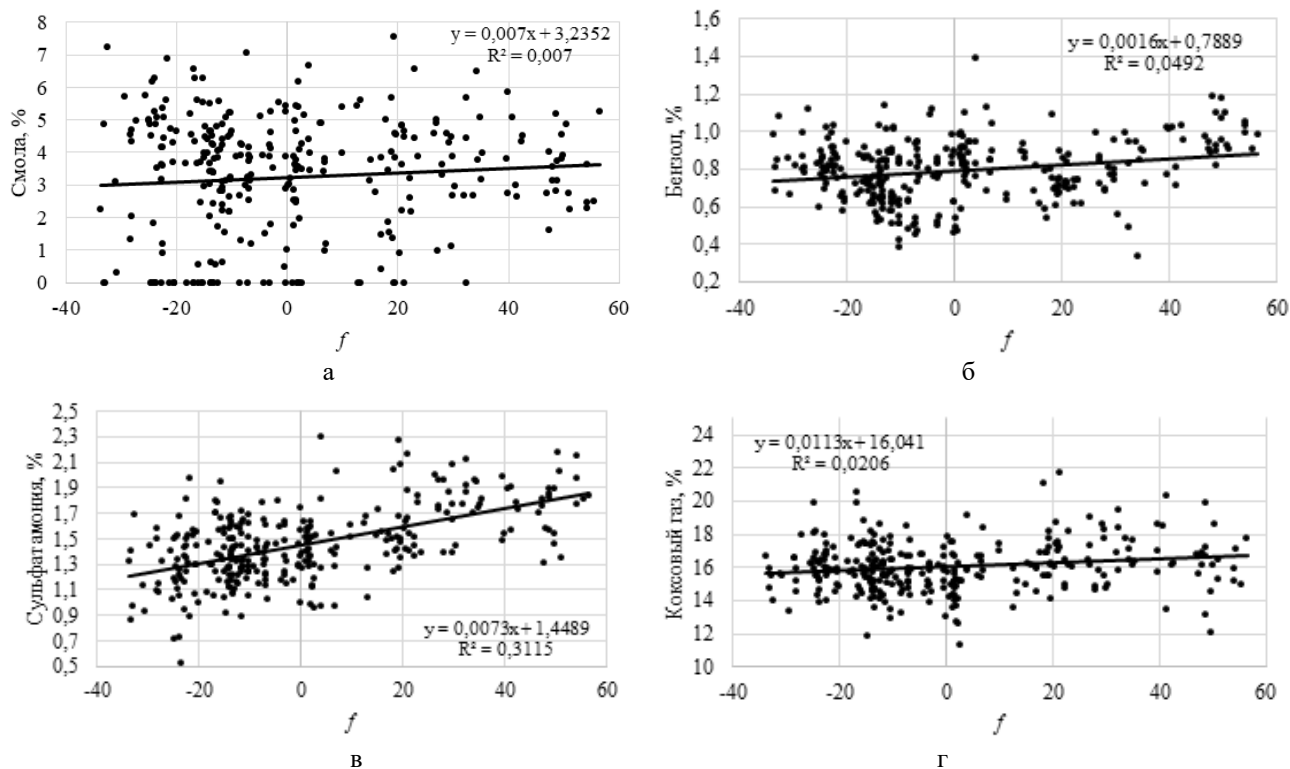


Рис. 5. Зависимость между  $f$  и фактическими суточными значениями предикторов: а – смола; б – бензол; в – сульфат аммония; г – коксовый газ

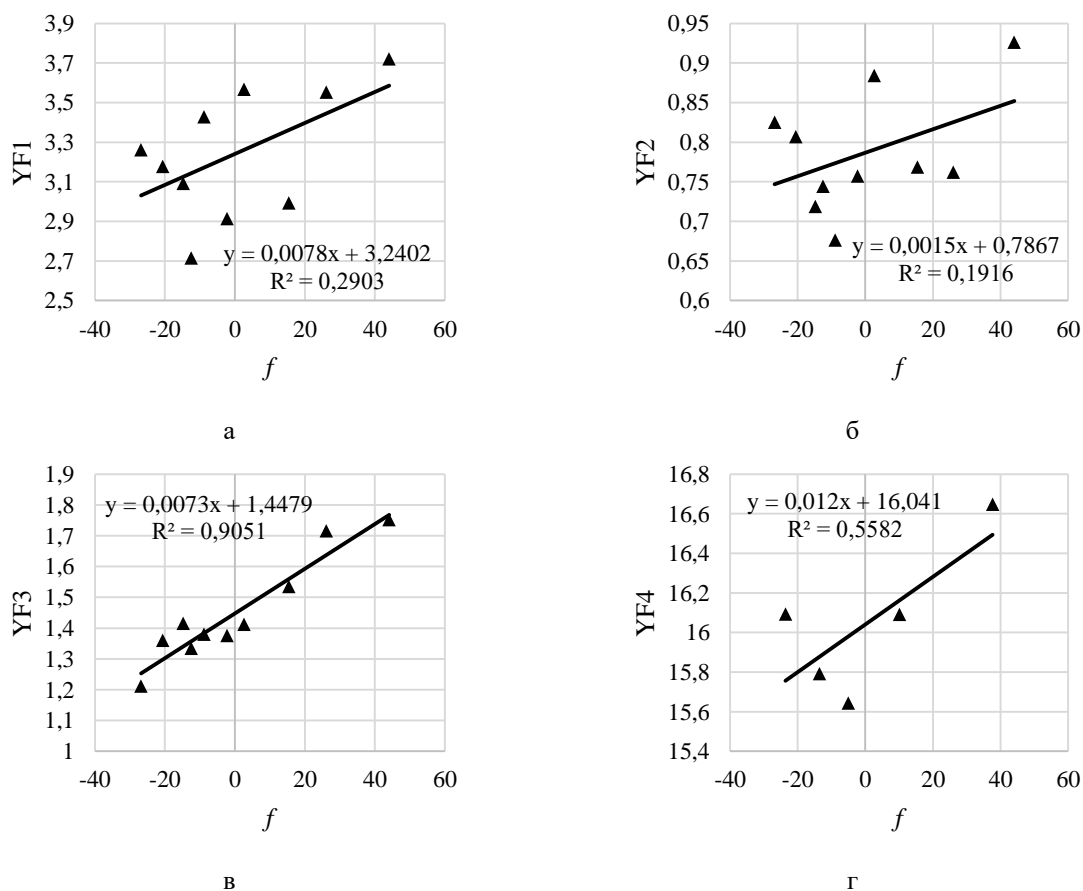


Рис. 6. Зависимости между  $f$  и предикторами: а – смола; б – бензол; в – сульфат аммония; г – коксовый газ

Однако при сортировке массива по  $YF1$ , в частности для смолы, зависимость имеет качественно иной характер (рис. 7), что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов на исследованный предиктор.

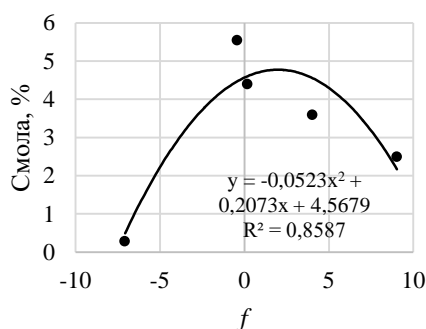


Рис. 7. Зависимость между  $f$  и содержанием смолы при сортировке по  $YF1$

Таким образом, при помощи математического моделирования сформулированы следующие пункты научной новизны:

— впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением десяти исследованных марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, девяти показателей качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита и четырьмя попутными продуктами коксохимического производства: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа;

— впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа;

— впервые установлена зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву;

— впервые установлены зависимости между функцией ковариации и фактическими суточными значениями исследованных предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа.

Дальнейшие математические исследования направлены прежде всего на:

— определение корреляционных связей между соотношением марок углей и предикторами, в зависимости от изменения суточного шага (лага) и периода суточного смещения (инерции);

— определение влияния периода лага на среднестатистическую корреляционную связь по модулю ( $|R|$ ) для предикторов при фиксированной инерции;

— установление зависимостей между инерцией и  $|R|$  для предикторов при увеличении периода лага от 1 суток и более;

— установление зависимостей между инерцией и  $|R|$  для предикторов при фиксированном периоде лага отдельно по каждой марке угля.

Для установления наиболее адекватных и максимально точных результатов математического моделирования перспективность дальнейших исследований также планируется продолжить по всем предикторам, сделав акцент на выявлении универсальных критериев, имеющих наиболее математически тесные корреляционные связи с технологическими режимами коксохимического передела.

### Выводы

1. Создана аддитивная математическая модель, позволяющая прогнозировать получение попутных продуктов КХП (предикторов): смолы, бензола, сульфата аммония, коксового газа, используя соотношения десяти марок углей, девяти показателей качества углей и производственных мощностей коксохимического производства предприятия с полным металлургическим циклом.

2. Метод построения парных зависимостей и получения коэффициентов множественной регрессии не позволяет с высокой точностью установить достоверные закономерности для построения единой математической модели, описывающей все физико-химические и технологические процессы, характерные для коксохимического производства.

3. Впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, показателями качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита, и исследованными предикторами.

4. Впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями предикторов.

5. Впервые установлена зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву.

6. Впервые установлены зависимости между функцией ковариации и фактическими суточными значениями предикторов.

7. Установлено изменение характера зависимости между функцией ковариации и смолой при изменении сортировке массива с  $f$  на  $YF1$  и появлении точки экстремума, что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов на исследованный предиктор.

Полученные технологические зависимости и математические закономерности свидетельствуют о сложности физико-химических процессов КХП, что определяет обязательное требование к системному развитию математического аппарата и детализации математического моделирования по каждой марке угля.

### Список источников

1. Степанова М.Н., Швалева А.В. Математическое моделирование процессов коксохимического производства с целью оптимизации фракционного состава металлургического кокса // Математика и ма-

- тематическое моделирование : материалы Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ (проектов) обучающихся, Самара, 17–19 апреля 2023 года. Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 145-150.
2. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / А.В. Липатников, А.Е. Шмелева, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 4. С. 30-38.
  3. Кравченко С.А., Абдуллин С.Ю., Тесленко В.С. Совершенствование конструкции пылеосадительных бункеров установок сухого тушения кокса // Экология и промышленность. 2018. № 1(54). С. 38-43.
  4. Исаев М.В., Султангузин И.А. Трехмерное моделирование процессов горения в печной камере коксовой батареи // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 34-38.
  5. Математическое моделирование кинетики флотационного обогащения углей с повышенным содержанием тонких классов / В.Н. Петухов, Н.Ю. Свечникова, С.В. Юдина [и др.] // Кокс и химия. 2022. № 1. С. 20-26.
  6. Кластерный анализ результатов экспериментальной оценки выхода химических продуктов коксования / Е.В. Васильева, Т.Г. Черкасова, А.В. Неведров [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2(132). С. 87-96.
  7. Сидоров О.Ю., Аристова Н.А. Математическое моделирование горения отопительного газа в отопительном канале коксовой печи // Кокс и химия. 2017. № 8. С. 23-29.
  8. Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт использования и повышения юзабилити системы математического моделирования производства на металлургическом предприятии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66, № 1. С. 119-126.
  9. Нейросетевое математическое моделирование при прогнозировании выхода химических продуктов коксования из углей Кузнецкого бассейна / Е.В. Васильева, Т.Г. Черкасова, А.В. Неведров [и др.] // Нефтехимия - 2019 : материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 16–18 октября 2019 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2019. С. 189-192.
  10. Математическое моделирование процессов теплопереноса и термической деструкции угольной шихты в коксовых печах / А.М. Гюльмалиев, С.Г. Гагарин, В.Н. Трифионов [и др.] // Кокс и химия. 2004. № 9. С. 15-26.
  11. Кравченко С.А., Стельмаченко С.Ю. Углубленный анализ факторов, влияющих на процесс тушения кокса в камере установки сухого тушения кокса, с помощью численного математического моделирования // Кокс и химия. 2019. № 7. С. 41-45.
  12. Определение равномерности горячей прочности и реакционной способности кокса на основе эксперимента и математического моделирования процесса коксования / Ю.В. Коновалова, А.И. Габов, С.Н. Беляничев [и др.] // Кокс и химия. 2006. № 2. С. 31-36.
  13. Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование : учебное пособие для студентов, магистров и аспирантов технических специальностей. Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2010. 141 с.
  14. Панкратов Л.В. Математическое моделирование систем и процессов. Сложные системы : учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2007. 107 с.
  15. Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Часть 1. Новотроицк : Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2022. 108 с.
  16. Куркина Е.С. Автоколебания, структуры и волны в химических системах. Методы математического моделирования : монография. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 219 с.
  17. Математическое моделирование предикторов коксохимического производства в зависимости от лага и нулевой инерции / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю. [и др.] // Кокс и химия. 2025. № 10. С. 2-14.
  18. Математическое и физическое моделирование определения коррозионной константы для реального и нулевого содержания углерода в трубной стали феррито-бейнитно-перлитного класса / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Сумец А.В., Шабрацкий С.В. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №1(52). С. 29-38.
  19. Комплексный математический анализ влияния содержания железа в агломерате на колебания кремния в чугунах / А.М. Новохатский, П.П. Семенюк, В.Н. Шубравый, Р.Е. Великоцкий [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 6(1422). С. 27-36.
  20. Математическое моделирование влияния температуры горячего дутья доменной печи на колебания содержания кремния в чугунах / П.П. Семенюк, Р.Е. Великоцкий, Н.А. Румянцева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9(1425). С. 25-32.
  21. Металловедческий анализ причин отсортировки на зачистку поверхности квадратной заготовки стали 3пс с элементами математического моделирования / Р.Е. Великоцкий, А.В. Сумец, С.В. Шабрацкий, В.С. Малахида // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 2(49). С. 49-58.
  22. Разработка математической модели для определения глубины обезуглероживания поверхности слэбов из трубных марок стали / М.И. Мокрицкий, С.А. Сбитнев, Р.Е. Великоцкий, С.В. Куберский // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции, Алчевск, 23–24 октября 2024 года. Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. С. 11-15.

Сведения об авторах

**Мокрицкий Максим Игоревич** – исполнительный директор, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: mokrickiy@amk-ygmk.ru

**Великоцкий Роман Евгеньевич** – начальник патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: vr@ro.ru

**Никулин Сергей Юрьевич** – начальник отдела кадров, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: nikulin\_syu@amk-ygmk.ru

**Гридин Никита Андреевич** – инженер патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: nikyta.gridin@yandex.ru

**Шалайкин Стас Романович** – инженер патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: stanshalaikin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**MATHEMATICAL FORECASTING OF BY-PRODUCTS OF COKE CHEMICAL PRODUCTION DURING SIMULTANEOUS ANALYSIS OF COAL QUALITY AND CHEMICAL COMPOSITION**

**Mokritsky Maxim I.** – Executive Director, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: mokrickiy@amk-ygmk.ru

**Velikotsky Roman E.** – Head of the Patent Department, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: vr@ro.ru

**Nikulin Sergey Yu.** – Head of the HR Department, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: nikulin\_syu@amk-ygmk.ru

**Gridin Nikita A.** – Patent Department Engineer, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: nikyta.gridin@yandex.ru

**Shalaykin Stanislav R.** – Patent Department Engineer, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: stanshalaikin@yandex.ru

**Abstracts.** The paper presents the results of mathematical modeling, which make it possible to synchronously predict the associated products of coking chemical production (CCP) according to four predictors: resin, benzene, ammonium sulfate, coke oven gas, while simultaneously analyzing the ratio of ten grades of coal: G, GZHO, GZH, W, KJ, K, KO, KSN, KS, OS and nine chemical components of coals: moisture content, ash, sulfur, the basicity index of ash and coal, the yield of volatile to dry and hot mass, the width of the plastic layer, the average reflection index of vitrinite. For the first time, Pearson correlation coefficients have been established between the ratio of the studied brands and the chemical components of the coals and the predictors. For the first time, the relative prediction error between the actual and calculated values of the studied predictors has been established. For the first time, a relationship has been established between the covariance function ( $f$ ) and the standard deviation of the normalized array of studied predictors. For the first time, relationships have been established between  $f$  and the actual daily values of the predictors. A change in the nature of the relationship between  $f$  and the resin has been observed when the array is sorted from  $f$  to the predictor and an extremum point appears, which may indicate a stronger influence of physical, chemical, technological, and other factors. The obtained technological dependencies and mathematical patterns indicate the complexity of the physical and chemical processes in the coal-chemical plant, which determines the mandatory requirement for the systematic development of the mathematical apparatus and the detailed mathematical modeling of each coal grade. In the statistical processing of data and mathematical modeling, methods and algorithms of mathematical analysis and mathematical apparatus developed by the authors of this study were used, adapted to the conditions of unstable operation of an enterprise with a full metallurgical cycle, operating in the front-line zone of military operations.

**Keywords:** by-products of coke-chemical production, ratios of coal grades, chemical components of coal, resin, benzene, ammonium sulfate, coke oven gas

**References**

1. Stepanova, M. N. Mathematical modeling of coke-chemical production processes in order to optimize the fractional composition of metallurgical coke / M. N. Stepanova, A. V.

Shvaleva // Mathematics and mathematical modeling: Proceedings of the All-Russian competition of research works (projects) of students, Samara, April 17-19, 2023. Samara: Samara State Technical University, 2023. Pp. 145-150.

2. Optimization of coal raw material consumption at PJSC MMK based on mathematical modeling / A. V. Lipatnikov, A. E. Shmeleva, E. N. Stepanov, D. A. Schneider // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 30-38.
3. Kravchenko, S. A. Improving the design of dust settling bins of coke dry quenching units / S. A. Kravchenko, S. Yu. Abdullin, V. S. Teslenko // Ecology and Industry. 2018, no. 1 (54), pp. 38-43.
4. Isaev, M. V. Three-dimensional modeling of combustion processes in the oven chamber of a coke oven battery and / M. V. Isaev, I. A. Sultanguzin // Coke and Chemistry. 2010, no. 8, pp. 34-38.
5. Mathematical modeling of the kinetics of flotation enrichment of coals with an increased content of fine classes / V. N. Petukhov, N. Yu. Svechnikova, S. V. Yudina [et al.] // Coke and Chemistry. 2022, no. 1, pp. 20-26.
6. Cluster analysis of the results of experimental assessment of the yield of chemical coking products / E. V. Vasilyeva, T. G. Cherkasova, A. V. Nevedrov [et al.] // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2019, no. 2 (132), pp. 87-96.
7. Sidorov, O. Yu. Mathematical modeling of heating gas combustion in the heating channel of a coke oven / O. Yu. Sidorov, N. A. Aristova // Coke and Chemistry. 2017, no. 8, pp. 23-29.
8. Leontiev, A. S. Experience of using and improving the usability of a system for mathematical modeling of production at a metallurgical enterprise / A. S. Leontiev, I. A. Rybenko // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. 2023, vol. 66, no. 1, pp. 119-126.
9. Neural network mathematical modeling in forecasting the yield of chemical coking products from coals of the Kuznetsk Basin / E. V. Vasilyeva, T. G. Cherkasova, A. V. Nevedrov [et al.] // PETROCHEMISTRY - 2019: Proceedings of the II International Scientific, Technical and Investment Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Refining, Minsk, October 16-18, 2019. Minsk: Belarusian State Technological University, 2019. Pp. 189-192.
10. Mathematical modeling of heat transfer processes and thermal destruction of coal charge in coke ovens / A. M. Gylmaliev, S. G. Gagarin, V. N. Trifonov [et al.] // Coke and Chemistry. 2004, no. 9, pp. 15-26.
11. Kravchenko, S. A. In-depth analysis of factors influencing the coke quenching process in the chamber of a coke dry quenching unit using numerical mathematical modeling / S. A. Kravchenko, S. Yu. Stelmachenko // Coke and Chemistry. 2019, no. 7, pp. 41-45.
12. Determination of the uniformity of hot strength and reactivity of coke based on experiment and mathematical modeling of the coking process / Yu. V. Konovalova, A. I. Gabov, S. N. Belyanichev [et al.] // Coke and Chemistry. 2006, no. 2, pp. 31-36.
13. Bakhvalov, Yu. A. Mathematical modeling: a tutorial for students, masters and graduate students of technical specialties / Yu. A. Bakhvalov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, South-Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). Novocherkassk: SUSU(NPI), 2010. 141 p.
14. Pankratov, L. V. Mathematical modeling of systems and processes. Complex systems: a tutorial / L. V. Pankratov; Russian State Open Technical University of Railway Engineering. Moscow: RGOTUPS, 2007. 107 p.
15. Smirnov, A. N. Mathematical modeling of chemical-engineering processes / A. N. Smirnov, D. I. Alekseev. Volume Part 1. Novotroitsk: National Research Technological University "MISiS", 2022. 108 p.
16. Kurkina, E. S. Self-oscillations, structures, and waves in chemical systems. Methods of mathematical modeling: monograph / E. S. Kurkina; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Moscow: D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2012. 219 p.
17. Mathematical modeling of predictors of coke-chemical production depending on lag and zero inertia / Mokritsky M. I., Velikotsky R. E., Nikulin S. Yu. [et al.] // Coke and Chemistry. 2025, no. 10, pp. 2-14. 18.
18. Mathematical and physical modeling of determining the corrosion constant for real and zero carbon content in ferrite-bainite-pearlite pipe steel / Mokritsky M.I., Velikotsky R.E., Sumets A.V., Shabratsky S.V. // Theory and technology of metallurgical production. 2025, no. 1 (52), pp. 29-38.
19. Comprehensive mathematical analysis of the influence of iron content in agglomerate on silicon fluctuations in cast iron / A. M. Novokhatsky, P. P. Semenyuk, V. N. Shubray, R. E. Velikotsky [et al.] // Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2018, no. 6 (1422), pp. 27-36.
20. Mathematical modeling of the influence of blast furnace hot blast temperature on variations in silicon content in cast iron / P. P. Semenyuk, R. E. Velikotsky, N. A. Rummyantseva // Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2018, no. 9 (1425), pp. 25-32.
21. Metallographic analysis of the causes of sorting for surface cleaning of a square billet of 3ps steel with elements of mathematical modeling / R. E. Velikotsky, A. V. Sumets, S. V. Shabratsky, V. S. Malakhida // Theory and technology of metallurgical production. 2024, no. 2 (49), pp. 49-58.
22. Development of a mathematical model for determining the depth of decarburization of the surface of slabs made of pipe steel grades / M. I. Mokritsky, S. A. Sbitnev, R. E. Velikotsky, S. V. Kubersky // Ways to improve technological processes and equipment for industrial production: Collection of abstracts of reports of the VIII international scientific and technical conference, Alchevsk, October 23-24, 2024. Alchevsk: Donbass State Technical University, 2024. P. 11-15.

Ссылка на статью:

Математическое прогнозирование выходов попутных продуктов коксохимического производства при одновременном анализе соотношения марок и химического состава углей / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю., Гридин Н.А., Шалайкин С.П. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 11-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-11-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-11-21)  
 Mokritsky M.I., Velikotsky R.E., Nikulin S.Y., Gridin N.A., Shalaykin S.R. Mathematical forecasting of by-products of coke chemical production during simultaneous analysis of coal quality and chemical composition. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 11-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-11-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-11-21)

Крупнов Л.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННОГО АГРЕГАТА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА НА ПРИМЕРЕ ПЕЧИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛАВКИ

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований фактических статей расхода тепла при эксплуатации промышленного агрегата – печи взвешенной плавки, включая такие статьи, как потери тепла через неохлаждаемые элементы печи и отвод тепла системой охлаждения. Цель исследований – экспериментальное определение распределения тепловых полей печей ПВП-1. Полученные экспериментальные данные позволили определить отвод тепла системой охлаждения как значимый и регулируемый канал расхода тепла, что открывает возможность управлять тепловой работой агрегата в условиях дефицита теплового баланса. Полученные результаты отличаются достаточной точностью и могут в дальнейшем использоваться как справочные материалы для инженерных расчетов для подобного рода агрегатов.

**Ключевые слова:** печь взвешенной плавки (ПВП), опытно-промышленные испытания (ОПИ), автогенный процесс, тепловой баланс, отстойник, аптейк, газопылевой поток, Надеждинский металлургический завод (НМЗ)

### Введение

Тепловые балансы печей являются важнейшей информацией для понимания пирометаллургического процесса в целом. Если посмотреть на традиционную структуру теплового баланса какого-нибудь пирометаллургического процесса [1–4], то можно заметить, что значительное число статей баланса могут быть рассчитаны методами термодинамического моделирования с высокой степенью точности. Например, потери тепла с расплавленными продуктами плавки (шлаком и штейном) достаточно точно могут быть рассчитаны, исходя из знания массы продуктов плавки, их температуры и теплоемкости, определенной с высокой степенью точности с использованием баз данных современных термодинамических программных комплексов [5–7].

Несколько сложнее обстоит дело с определением потерь тепла с отходящими газами. Здесь появляются элементы неопределенности, которые не могут быть получены расчетным путем с высокой степенью точности. Это объем подсосов воздуха в печь, содержание пыли в газах и их состав. Чтобы повысить точность составления теплового баланса, желателен вынести инструментальные замеры.

Однако самая большая неопределенность в составлении теплового баланса заключается в оценке потерь тепла печью с охлаждающими элементами и с поверхностей печи (свод, подина, боковые стенки и т.д.). Чтобы существенно увеличить точность определения этих статей баланса, проведение инструментальных замеров просто необходимо. Это становится особенно важным в настоящее время, когда из-за изменения состава сырья и снижением его автогенности тепловой баланс агрегатов становится дефицитным [8, 9]. В настоящее время дефицит такого рода может достигать 10% [10].

Следует заметить, что в открытых источниках по технологии взвешенной плавки отсутствуют сведения о фактических тепловых балансах ПВП, определен-

ных в результате фактических замеров. Нет этой информации и в фундаментальной работе У. Давенпорта с соавторами, посвященной теории и практике технологии взвешенной плавки [11, 12].

Таким образом, представляет большой научный и практический интерес снятие фактических тепловых балансов печей взвешенной плавки с точки зрения возможного управления тепловой работой агрегата через регулирование расходными статьями теплового баланса.

С этой целью еще в 2017 г. были выполнены опытно-промышленные испытания для получения фактических (экспериментальных) исходных данных для составления тепловых и материальных балансов действующей промышленной печи – ПВП-1 НМЗ.

Ранее результаты этой работы не публиковались, но были использованы в рамках других исследований [9, 13].

### Методы исследования

В ходе проведения испытаний выполнялся сбор для определения количества тепла, отводимого в ПВП:

- характеристики системы водяного охлаждения печей (расход воды на охлаждение, увеличение температуры охлаждающей воды в результате теплосъема с печей);
- оценка температур внешних поверхностей РШ, отстойника и аптейка печей;
- исследование объема, температуры, запыленности и состава отходящих газов печей;
- оценка количества и температуры шлака и штейна на выходе из ПВП.

Кроме того, для решения задач работы при использовании штатных систем АСУТП был осуществлен сбор данных, отражающих состав и расход твердых и газообразных веществ, выводимых в ПВП. Были зафиксированы расходы и составы шихты, шлака, штейна, пыли, отходящих газов, расходы природного газа, технического кислорода, азота и т.п. [14].

Помимо указанных параметров, фиксируемых датчиками температуры, расхода, разрежения и т.п., ис-

пользованы данные о химическом составе компонентов шихты и продуктов плавки, результаты исследований параметров отходящего газа (температура, состав, расход, запыленность), а также результаты тепловизионного обследования поверхностей, результаты обследования системы водяного охлаждения печей.

Потери тепла печью складываются из следующих статей теплового баланса:

- 1) потери тепла с продуктами плавки (штейн, шлак, пыль, отходящие газы);
- 2) потери тепла с поверхности печей (борта печи, своды РШ, отстойника и аптейка, подина печи);
- 3) тепло, отводимое системой водяного охлаждения;
- 4) потери тепла на эндотермические реакции, имеющие место в процессе плавки.

В настоящем подразделе приведены обобщения исходных данных, необходимых для оценки расходных статей теплового баланса ПВП. Составлен материальный баланс печей в период ОПИ. Выполненные расчеты привязаны к усредненной часовой производительности печи.

*Состав, количество и тепловые характеристики шлака и штейна ПВП*

Замеры температуры продуктов плавки проводили высокотемпературным инфракрасным пирометром Raynger 3i1M<sup>1</sup> и инфракрасной камерой (тепловизором) Land Guide IR 928+. Кроме того, осуществлены замеры температуры шлака ПВП на выпуске из печи с помощью погружной термопары. Результаты измерений показали высокую сходимость данных, полученных при использовании оптических бесконтактных методов и при использовании термопары.

Массу продуктов плавки определяли из данных оперативного учета (штейн), а также на основе расчетов материального баланса (шлак) печей в период испытаний. Составы продуктов брали из данных оперативного учета.

*Состав, количество и тепловые характеристики шлака и штейна ПВП*

Замеры температуры продуктов плавки осуществляются высокотемпературным инфракрасным пирометром Raynger 3i 1M и инфракрасной камерой (тепловизором) Land Guide IR 928+. Кроме того, осуществлены замеры температуры шлака ПВП на выпуске из печи с помощью погружной термопары. Результаты измерений показали высокую сходимость данных, полученных при использовании оптических бесконтактных методов и при использовании термопары.

Массы и составы продуктов плавки оцениваются из фактических данных оперативного учета.

*Состав и количество шлака и штейна ПВП*

В табл. 1 представлены результаты оценок средних составов и количеств расплавов, выдаваемых из ПВП-1 в период ОПИ.

*Тепловые характеристики шлака и штейна ПВП*

В табл. 2 представлены результаты оценок средних температур расплавов, а также рекомендованные величины теплоемкости и часового количества тепла, выводимого из ПВП с расплавами шлака и штейна.

Как видно из представленных данных, колебания температуры продуктов плавки, вносимой в журнал оперативного учета за период ОПИ, составили 5-10°C. В это же время колебания температуры расплавов, диагностируемой средствами инструментального контроля, достигали 100 градусов: температура штейна изменялась в диапазоне 1120-1220°C, температура шлака изменялась в диапазоне 1205-1305°C. Симбатное изменение температур шлака и штейна, а также высокая согласованность результатов измерения температуры пирометром и термопарой свидетельствуют об адекватности выполненных замеров.

Таблица 1

Средние составы и часовые количества расплавов в период ОПИ

Номер печи	Продукт	Q, т/ч	Содержание, %										
			Ni	Cu	Co	S	Fe	Ni+Cu	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
1	Штейн	25,79	36,62	12,26	0,795	26,71	22,02	48,88	0,324	-	-	-	4,273
	Шлак	152,11	1,03	0,330	0,208	0,65	37,91	1,36	33,65	3,32	4,56	3,84	7,31

Таблица 2

Результаты оценок основных теплофизических характеристик шлака и штейна ПВП, необходимых для составления тепловых балансов печей

Номер печи	Продукт	Ср, МДж/т.°	Q, т/ч	T, °C	Тепло, МДж/ч
1	Штейн	0,781	25,79	1155	23263
	Шлак	1,078	152,11	1249	204876

<sup>1</sup> Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000°C, спектральный отклик 1,0 мкм (1M), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01.

*Состав, количество и тепловые характеристики пыли и отходящих газов ПВП*

Важной составляющей теплового баланса печей взвешенной плавки является тепло отходящих газов процесса. Для корректного его расчёта был выполнен анализ отходящих газов в печах (в отстойнике) и в нескольких точках по тракту газоочистки. Кроме того, были использованы данные о составе, объёме и запылённости отходящих газов ПВП на входе и выходе из электрофильтров, полученные центральной лабораторией пылевентиляторных систем Центра диагностики ПАО «ГМК «Норильский никель».

Замер температур газов осуществляется при использовании термопар (тип ХА, в металлическом чехле), замер состава газовой фазы осуществляется при использовании пробоотборника, газоизмерительных индикаторных трубок и переносного газоанализатора ЭМГ-30-1<sup>2</sup>.

Отбор газов из газоходов тракта очистки, имеющих меньшую температуру, осуществлялся с помощью стального пробоотборника со встроенным фильтром непосредственно в шприц, без использования аспиратора.

Объём и состав отходящих газов ПВП представлены в табл. 3.

*Отвод тепла системой водяного охлаждения ПВП*

В конструкции печей взвешенной плавки широко используются медные водоохлаждаемые кессоны; тепло, отводимое водой этих элементов, составляет существенную статью расходной части теплового баланса. Площадь кессонированных элементов ПВП-1 весьма значительна, с детальным контролем параметров системы КИП АСУ ТП [14].

Кессоны объединены в группы, каждая группа имеет общие коллекторы подачи холодной и сбора отработанной воды. Средствами КИП контролируются расход воды на каждую группу (или несколько групп) кессонов, температура подаваемой и отводимой воды. На основании данных о расходе воды и увеличении ее температуры при прохождении системы охлаждения рассчитывается теплосъём.

Часть кессонов на момент проведения ОПИ охлаждались не водой, а воздухом (несколько кессонов свода РШ ПВП-1). Объём доступных данных о работе таких кессонов весьма ограничен. По оценкам, теплосъём таких кессонов значительно ниже, чем теплосъём кессонов, работающих на воде.

Основные группы кессонов ПВП:

- 8 групп кессонов боковой поверхности отстойника (коллекторы SH1-SH8);

- 6 групп кессонов свода отстойника (коллекторы SH9-SH14);

- 3 группы кессонов аптейка (коллекторы US1-US3);

- 8 групп кессонов реакционной шахты (коллекторы RS1-RS8).

Расположение кессонов ПВП представлено на рис. 1. В период ОПИ на 5 кессонов свода реакционной шахты (коллектор RS6) вода не подавалась (охлаждение осуществлялось воздухом).

Для каждого коллектора измерялись:

- температура, давление, общий расход подаваемой воды;

- температура воды на сливе каждого контура циркуляции;

- общая температура воды на сливе коллектора.

Система охлаждения контролируется с использованием программы Outotec Sentinel [14]. По полученным данным рассчитывается общий теплосъём с охлаждающей водой коллектора, а также удельный теплосъём на единицу площади охлаждаемой поверхности.

Для проверки корректности измерения температуры и расхода воды штатными КИП в рамках настоящей работы были измерены температура на входе и выходе коллекторов с помощью оптического пирометра, а также расход воды, подаваемой на несколько произвольно выбранных коллекторов.

Для замера расхода воды использован ультразвуковой расходомер-счетчик «Днепр-7»<sup>3</sup>. Для замера температуры воды использован инфракрасный термометр testo 835-T1<sup>4</sup>.

В табл. 4 представлены обобщённые данные по общему теплосъёму кессонов ПВП 1 за рассматриваемый период.

Видно, что теплосъём кессонов может существенно колебаться в зависимости от условий работы печи; сумма максимальных значений теплосъёма составляет 159,1% от суммы средних, сумма минимальных – 55,2%. Для ряда коллекторов (торец отстойника

<sup>3</sup>Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000 °С, спектральный отклик 1,0мкм (1М), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01. От 80 до 0,1 % объемных.

от 1 до 150°С;  
- насыщенного пара - от 100 до 200°С при условии, что температура первичных преобразователей не превышает 150°С.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерения объемного расхода и количества жидкости (пара) составляют 2,0 % в диапазоне расхода от 3 до 100 % максимального расхода. Расходомер-счетчик устанавливается на трубопроводах с номинальными диаметрами от DN20 до DN1600 для жидкости и от DN20 до DN700 для пара, при толщине стенки от 2 до 20 мм для металлических и пластмассовых трубопроводов.

<sup>4</sup> Инфракрасный термометр, с 4-точечным лазерным целеуказателем, оптикой 50:1, функцией управления данными измерений. Диапазон измерений -30 / +600°С, погрешность +/-1% разрешение 0,1°С.

<sup>2</sup> Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000°С, спектральный отклик 1,0 мкм (1М), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01. От 80 до 0,1% объемных.

со стороны РШ, боковые поверхности отстойника со стороны РШ, нижний ряд кессонов РШ) наблюдается скачкообразное изменение теплосъёма 2.06.2017 г., для других разница между режимами 24.05-02.06.2017 и 3.06-9.06.2017 гг. практически отсутствует (свод отстойника со стороны аптейка, нижний ряд кессонов

аптейка, в меньшей степени верхний ряд кессонов РШ).

Наибольший разброс значений выявлен для кессонов боковых сторон отстойника со стороны РШ (коллекторы SH2 и SH8), наименьший – для кессонов аптейка.

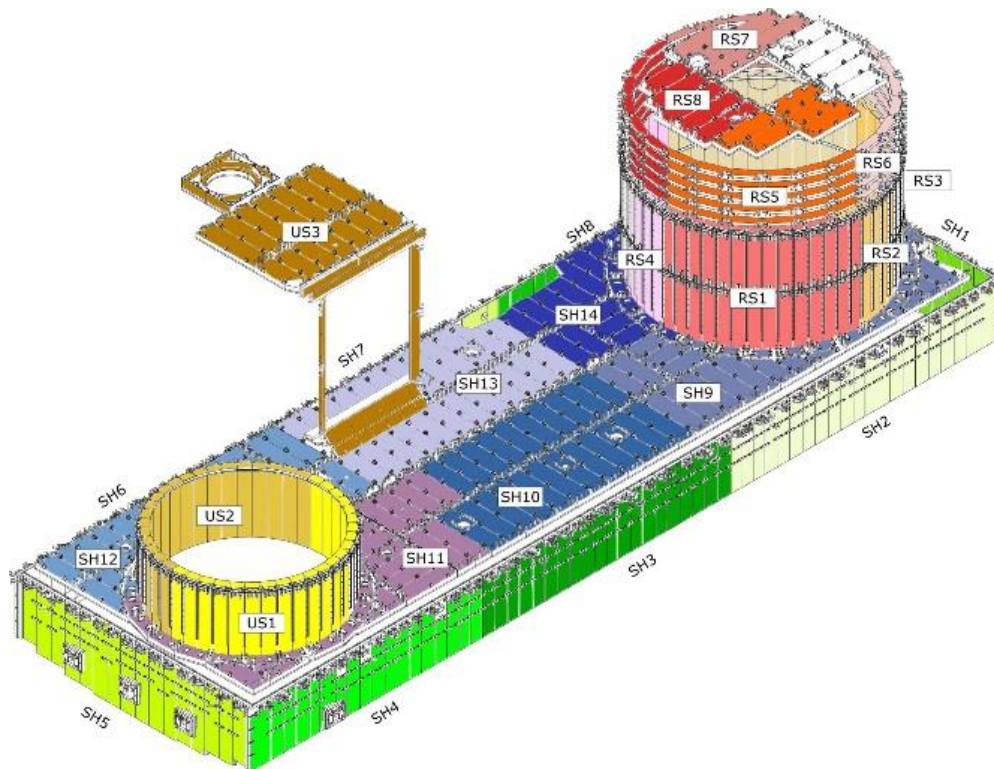


Рис. 1. Расположение кессонов ПВП-1

Таблица 3

Состав и объём газовой фазы ПВП

Компонент	Дутьё РШ		Окисление шихты нм <sup>3</sup> /ч	Газ РШ, всего		Дутьё отстойника		Подсосы		Тепло МДж/ч
	нм <sup>3</sup> /ч	об.%		нм <sup>3</sup> /ч	об.%	нм <sup>3</sup> /ч	об.%	нм <sup>3</sup> /ч	об.%	
O <sub>2</sub>	34380,3	75,04	-34059,8	320,5	0,91	421,5	3,64	4190	21	10758,8
N <sub>2</sub>	9804,4	21,40		9804,4	27,91	6781,1	58,50	15618	78,1	67088,6
Ar	1574,8	3,44		1574,8	4,48	153,3	1,32	186,5	0,93	2348,7
CO <sub>2</sub>	18,4	0,04		18,4	0,05	1412,1	12,18			5000,7
H <sub>2</sub> O	36,9	0,08		550,5	1,57	2824,2	24,36			9700,9
SO <sub>2</sub>			22863,1	22863,1	65,08					77612,3
Всего	45814,8		-11196,7	35131,7		11592,2		20000		172509,9

Таблица 4

Теплосъём кессонов ПВП-1 в период ОПИ

	Ед. изм.	Коллектор ПВП 1								
		SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8	SH9
Среднее	МДж/ч	617	148	534	1068	978	899	458	385	2605
Максимум	МДж/ч	1237	363	863	1517	1742	1466	879	1193	4536
	% от ср.	200,4	244,6	161,7	142,1	178,1	163	191,8	310,1	174,1
Минимум	МДж/ч	76	-74	304	581	473	505	174	-84	1612
	% от ср.	12,3	-49,6	56,9	54,4	48,4	56,2	37,9	-21,7	61,9

	Ед. изм.	Коллектор ПВП-1								
		SH10	SH11	SH12	SH13	SH14	RS1	RS2	RS3	RS4
Среднее	МДж/ч	4489	3976	7750	6545	2851	1759	1991	1696	968
Максимум	МДж/ч	6784	5059	11633	9722	4444	3117	4041	2777	1412
	% от ср.	151,1	127,2	150,1	148,5	155,9	177,2	203	163,7	145,9
Минимум	МДж/ч	3297	2265	4270	2778	1513	829	737	882	700
	% от ср.	73,4	57	55,1	42,4	53,1	47,1	37	52	72,4

Окончание табл. 4

	Ед. изм.	Коллектор ПВП-1								
		RS5	RS6	RS7	RS8	US1	US2	US3	Всего	
Среднее	МДж/ч	778	196	1367	1485	2518	1381	6944	<b>54385</b>	
Максимум	МДж/ч	1182	507	2419	3158	3470	1763	11236	<b>86518</b>	
	% от ср.	151,9	259,1	176,9	212,7	137,8	127,7	161,8	<b>159,1</b>	
Минимум	МДж/ч	417	102	529	606	1863	1157	4501	<b>30015</b>	
	% от ср.	53,6	52,1	38,7	40,8	74	83,8	64,8	<b>55,2</b>	

*Потери тепла с поверхности печей (борта печи, своды РШ, отстойника и аптейка, подина печи)*

Для оценки теплопотерь печью во внешнюю среду принято допущение, что внешний кожух печи – гладкий, стальной.

Поверхность печей ПВП-1 условно разделена на зоны, приблизительно отвечающие контурам охлаждения, а также дополнительные зоны, не оборудованные водяным охлаждением.

ПВП-1 – выделены 29 зон, а также подина печи.

Замеры температуры внешних поверхностей печей осуществляли с использованием инфракрасной камеры (тепловизора) Land Guide IR 928<sup>5</sup>. Цель выполненных измерений – определение средней температуры поверхности каждой из выделенных зон печи.

Тепловизионной съемке не подвергнуты следующие поверхности печей:

- подины ПВП-1, оборудованная системой воздушного охлаждения;
- примыкание аптейк – отстойник;
- примыкание РШ – отстойник, из-за наличия массивных металлоконструкций в этих зонах.

В процессе работы снято более 520 термографий элементов поверхностей ПВП-1.

*Теплопотери с бортов и сводов ПВП-1*

На рис. 2 приведены примеры термографий различных участков поверхности ПВП-1 и ПВП-2.

Каждая зона характеризуется своей площадью и средней температурой поверхности, которая определялась при обработке серии тепловизионных изображений.

Теплопотери рассчитывались следующим образом. На наружной поверхности кожуха происходит непрерывный теплообмен с окружающей средой, который может быть описан по закону Ньютона:

$$q_2 = \alpha \cdot (T_K - T_0),$$

где  $q_2$  – удельный тепловой поток (Вт/м<sup>2</sup>);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>·°C));  $T_K$ ,  $T_0$  – температуры соответственно кожуха конвертора и наружной среды.

Величина  $\alpha$  рассчитывалась по формулам турбулентной естественной конвекции в воздухе:

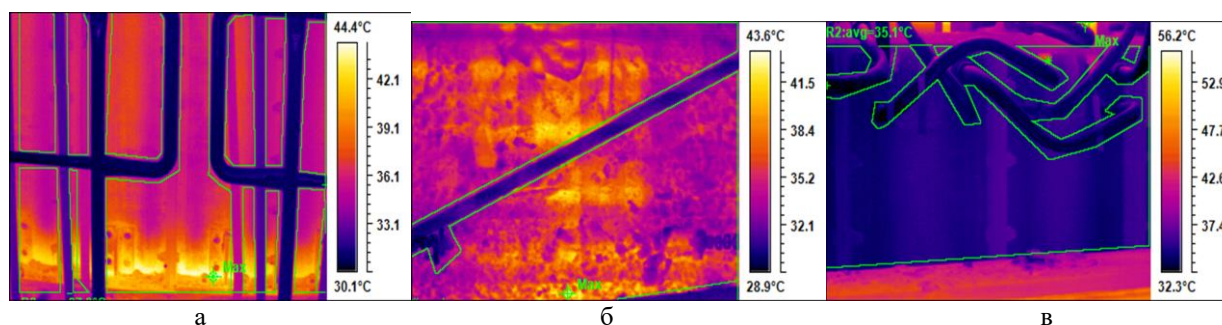


Рис. 2. Термограммы различных элементов печи:  
а – свод отстойника; б – реакционная шахта; в – аптейк (охлаждаемая часть)

<sup>5</sup> Тепловизор с неохлаждаемой матрицей 320×240 элементов, диапазон измерения температур от -20°C до +500°C (с фильтром – до +1500°C).

$$\alpha = 0,13 \cdot \lambda_B \cdot Pr^{1/3} \left[ \frac{g_0 \beta_B (T_K - T_0)}{\nu_B^2} \right]^{1/3} \approx 1,78 (T_K - T_0)^{1/3}.$$

Таким образом, зная температуру поверхности кожуха и время, можно рассчитать тепловые потери с поверхности печи [15].

Суммарная теплоотдача с поверхности (без теплотерь с подины ПВП) в период испытаний для ПВП-1 составила 0,493 МВт или 1777,0 МДж/ч.

Как видно из представленных результатов в табл. 5, основными источниками теплотерь печей с поверхностью являются водоохлаждаемые элементы.

#### Теплотери с подины ПВП-1

Подина ПВП представляет собой многослойную конструкцию из различных материалов.

Основание печи выполнено из двутавровых балок, прикреплённых к закладным плитам. На балки уложены поперечные стальные секции подины шириной 1540-2465 мм.

Таблица 5

Статьи расхода тепла

Расход тепла	Количество тепла, МДж/ч	Количество тепла, отн. %
Теплосодержание шлака	204 876	43,68
Теплосодержание штейна	23 263	4,96
Теплосодержание пыли	6 682	1,42
Теплосодержание газов ПВП	173 447	36,98
Количество тепла, снимаемого системой охлаждения печи	54 385	11,59
Количество тепла, передаваемого атмосфере цеха (с поверхности печи)	6 399	1,36
<b>Итого</b>	<b>469 052</b>	<b>100</b>

Рабочая футеровка днища имеет толщину 450 мм, выполнена из фасонного кирпича, уложенного в продольную перевязку. Первый слой кирпичей под рабочим подом (арматурный слой) имеет толщину 300 мм. Для выравнивания поверхности для установки кирпичей рабочей футеровки между рабочим и арматурным слоями засыпается слой (10 мм) хромомagneзитового порошка, на который укладывается стальной лист толщиной 0,75 мм. Дополнительный слой хромомagneзитового порошка толщиной 5 мм вводится между арматурным слоем и стальной плитой днища для компенсации возможной неровности плиты днища. Общая толщина подины – от 760 до 770 мм.

Согласно проекту ПВП, температура днища подины печи при работе в нормальном режиме составляет от 145 до 165°C для ПВП-1, что достигается за счёт принудительного охлаждения подины.

Система охлаждения подины печи предназначена для отвода тепла вместе с воздухом, омывающим

стальное днище, с целью обеспечения нормального температурного режима работы подины и увеличения срока службы ее футеровки.

На ПВП-1 нагретый воздух удаляется от поверхности днища по отводящим воздуховодам и сборному воздушному коллектору за счёт разрежения, создаваемого центробежными вентиляторами. Из вентиляторов горячий воздух выбрасывается в атмосферу цеха вертикально вверх. Поступление охлаждающего воздуха к поверхности стального днища подины печи из атмосферы цеха происходит за счет принудительной тяги в системе воздуховодов через щелевые зазоры, образованные ложным стальным днищем подины печи.

Таким образом, упрощённо можно принять, что теплосъём через подину печи равен разнице между теплом поступающего к подине холодного воздуха и теплом горячего воздуха, удаляемого в атмосферу цеха. Для расчёта этих величин должны быть известны производительность вентиляторов и температуры горячего и холодного воздуха. В ходе обследования печей осуществлялось измерение температур с помощью инфракрасного термометра Testo 835-T1, кроме того, были получены данные о числе работающих вентиляторов на ПВП-1, паспортной производительности и режиме работы.

Средняя теплоотдача с подины ПВП-1 в период испытаний составляет 4622,0 МДж/ч.

Общие статьи расхода тепла ПВП-1 представлены в табл. 5.

Следует отметить, что величина погрешности определения величин отводимого из системы тепла не превышает 5%, что является хорошим результатом для такого рода измерений на промышленном агрегате.

#### Выводы

На основании проведенных фактических измерений потоков тепла и выполненных на их основе расчетов получены следующие данные:

- количество тепла, отводимого со шлаком, составило 204875,6 МДж/ч, или 43,7%;
- количество тепла, отводимого со штейном, составило 23262,6 МДж/ч, или почти 5%;
- количество тепла газов ПВП составило 173447,3 МДж/ч, или 37%;
- количество тепла, снимаемого системой охлаждения, составило 54385,0 МДж/ч, или 11,5%;
- количество тепла, передаваемого с поверхности печи, составило 6399,0 МДж/ч, или 1,4%.

Таким образом, при переработке низкоэнергетического сырья имеется только один контролируемый поток отводимого тепла, который позволяет регулировать баланс для его бездефицитности – тепло, снимаемое системой охлаждения печи.

Список источников

1. Диомидовский Д.А. *Металлургические печи цветной металлургии*. М.: Металлургиздат, 1961. 728 с.
2. Кобахидзе В.В. *Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии*. М.: МИСиС, 1994. 355 с.
3. Методика расчета и исследование тепловой работы печей взвешенной плавки / А.П. Скуратов, В.М. Парецкий, С.Д. Скуратова, В.Г. Лисиенко // *Эффективность внедрения автогенных процессов в производстве тяжелых цветных металлов: тез. докл. I Всесоюзн. науч.-техн. конф. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1988. С. 79.*
4. Особенности тепловой работы печей взвешенной плавки / В.В. Кобахидзе, Ю.Я. Сухобаевский, А.А. Каждан и др. // *Цветные металлы*. 1993. № 10. С. 13-17.
5. *FactSage Thermochemical Software and Databases - 2010-2016* / С. W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand, S. A. Decterov, G. Eriksson, A.E. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer and M-A. Van Ende. // *Calphad*. 2016. Vol. 54. Pp. 35-53. <www.factsage.com>
6. Шаблий Л.С., Кривцов А.В., Колмакова Д.А. *Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие*. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. 108 с.: ил.
7. Анализ изменения состава сульфидного рудного сырья, перерабатываемого в процессе взвешенной плавки, и технологические особенности работы в условиях снижения его теплотворности/ С.Ю. Ерошевич [и др.]; ЗФ ОАО «ГМК "Норильский никель"» // *Цветные металлы*. 2012. № 9. С. 13-20.
8. Практика работы автогенных агрегатов в ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"» в условиях переработки сырья с пониженным энергетическим потенциалом / Крупнов Л.В., Малахов П.В., Озеров С.С., Цымбулов Л.Б. // *Цветные металлы*. 2022. № 2. С. 39-47.
9. Отчёт о НИР по теме «Корректировка технологического регламента ПМП НМЗ при переработке перспективного никелевого сырья ЗФ и никелевого сырья ЗФ переходного периода», Этап 2 – Док. № 021-372н с ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"». СПб.: ООО «Институт Гипроникель», 2017.
10. Крупнов Л.В. Оценка тепловой работы печей плавки в жидкой ванне и печей взвешенной плавки с точки зрения их конструктивных особенностей / Л.В. Крупнов, Д.В. Румянцев, В.А. Попов, А.В. Каверзин // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2025. 18(2). С. 200–207. EDN: MDTBVL.
11. Взвешенная плавка: контроль, анализ и оптимизация / Давенпорт У.Г. и др. М.: МИСиС, 2006. 400 с.
12. Davenport W.G. Flash smelting: a look back and a look ahead / *Met. Rev.* ММН. 1987. Vol. 4. №2. Pp. 15-33.
13. Отчет о НИР по Договору № 021-372н от 10.02.2017 г. «Корректировка технологического регламента ПМП НМЗ при переработке перспективного никелевого сырья ЗФ и никелевого сырья ЗФ переходного периода». Этап 1.
14. Крупнов Л.В. *Механизм образования тугоплавкой настывки в печах взвешенной плавки и способы ее устранения* : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Крупнов Леонид Владимирович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. Санкт-Петербург, 2015. 19 с.
15. Загускин В.Л. *Основы численных методов для газодинамики с теплопроводностью*. М., 2022. 167 с.

Сведения об авторах

**Крупнов Леонид Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии, машин и оборудования Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского; главный металлург – начальник Металлургического управления Заполярного филиала ПАО «ГМК "Норильский никель"», г. Норильск, Россия. E-mail: KrupnovLV@norvuz.ru. ORCID 0009-0008-7451-9610. Scopus ID 55830885000.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**DETERMINATION OF THE ACTUAL PARAMETERS OF AN INDUSTRIAL UNIT FOR HEAT BALANCE CALCULATIONS USING A FLASH SMELTING FURNACE AS AN EXAMPLE**

**Krupnov Leonid V.** – Associate Professor, Chief Metallurgist – Head of the Metallurgical Department of the Polar Branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, Head of the Metallurgy, Machinery and Equipment Department, N.M. Fedorovsky Polar State University. E-mail: KrupnovLV@norvuz.ru

**Abstracts.** The results of a study of actual heat consumption during the operation of an industrial unit - a flash smelting furnace - including heat loss through uncooled furnace elements and heat removal by the cooling system are presented in this paper. The objective of the study was to experimentally determine the thermal field distribution of flash smelting furnaces (FSFs).

**Key words:** flash smelting furnace (FSF), pilot tests (PIT), autogenous process, heat balance, settling tank, uptake, gas-dust flow, Nadezhdinskiy Metallurgical Plant (NMZ)

---

Ссылка на статью:

Крупнов Л.В. Определение фактических параметров промышленного агрегата для расчетов теплового баланса на примере печи взвешенной плавки // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 22-29. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-22-29)  
Krupnov L.V. Determination of the actual parameters of an industrial unit for heat balance calculations using a flash smelting furnace as an example. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 22-29. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-22-29)

Крупнов Л.В.

## ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ПЕРЕРАБОТКИ МАЛОСЕРНИСТОГО НИКЕЛЕВОГО СЫРЬЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ ВАНЮКОВА

**Аннотация.** В работе представлены общее описание технологии плавки в жидкой ванне и подходы к проведению опытно-промышленных испытаний переработки никелевого сырья в действующем промышленном агрегате – печи Ванюкова на Медном заводе ЗФ. Приведены рекомендованные режимные параметры плавки, предусмотренные в период испытаний, рациональный состав основных никелевых концентратов. На основании результатов оценочных расчетов статей прихода и расхода тепла выработаны подходы по этапам проведения ОПИ с изменением соотношения долей высокосернистых и малосернистых концентратов, показан дефицит тепла процесса плавки, обоснована необходимость введение в состав шихты энергетически емких компонентов – каменного угля и сернистого колчедана.

**Ключевые слова:** печь Ванюкова (ПВ), опытно-промышленные испытания (ОПИ), ЗФ (Заполярный филиал), Талнахская обогатительная фабрика, Норильская обогатительная фабрика, Медный завод, автогенный процесс, тепловой баланс, кислородо-воздушная смесь (КВС), малосернистое сырье

### Введение

Современное состояние горнорудной базы большинства крупных горно-металлургических компаний, перерабатывающих сульфидные медные и медно-никелевые руды, отличается одной общей проблемой – дальнейшим истощением основных месторождений сульфидных руд. Доля богатых сульфидных руд неуклонно сокращается. Растет доля вкрапленных, малосульфидных и малоценных руд, сложных для переработки традиционными методами обогащения [1, 2].

На фоне этого истощения и, как следствие, ухудшения качества рудных концентратов в части снижения содержания целевых компонентов – металлов и серы – современные металлургические предприятия, эксплуатирующие автогенные агрегаты, сталкиваются с рядом технологических вызовов [2, 10, 12]. Основным из этих вызовов является потеря автогенности агрегата, обусловленная ухудшением теплотворной способности шихты, и переход их работы в полуавтогенный режим [3–5].

Таким образом, в планах развития таких компаний появилась неопределенность – возможна ли адаптация автогенных агрегатов к тренду на все более ухудшающееся сырье и какие типы автогенных агрегатов наиболее приспособлены к такой адаптации [5, 12].

Во всем мире, и в «Норильском никеле» в частности, наиболее распространенным агрегатом для переработки такого типа сырья с середины прошлого века были печи взвешенной плавки. Однако кризис технологии взвешенной плавки и появление новых, не менее успешных автогенных технологий (печи Аусмелт, кислородно-факельная плавка Inco (ныне Vale), ВВФ/ВВС - процесс) поставили вопрос о перспективах дальнейшего развития способов переработки сульфидного медного и медно-никелевого сырья [5].

Одним из самых перспективных автогенных процессов является отечественный процесс плавки в жид-

кой ванне, реализованный в виде печи, названной по имени своего создателя – печи Ванюкова (ПВ) [5, 8].

Однако, не смотря на довольно многочисленные исследования и даже опыт эксплуатации укрупненной опытной установки [9], в промышленном масштабе печи Ванюкова перерабатывают исключительно медное сырье и не используются для переработки медно-никелевого сырья.

В Заполярном филиале одна из печей взвешенной плавки в 2027 г. пойдет на капитальный ремонт, что, как следствие, предполагает накопления большого количества медно-никелевых концентратов. Для улучшения финансово-экономических показателей Компании в 2027 г. встал вопрос о возможности переработки такого сырья на одной из имеющихся в Медном заводе ЗФ промышленных печей Ванюкова. Для отработки режимов плавки было принято решение о проведении опытно-промышленных испытаний в 2026 г. и начата подготовка к их проведению. Результаты испытаний также дают возможность получить необходимые данные для проекта дальнейшего расширения плавильных мощностей Надеждинского металлургического завода ЗФ в рамках его модернизации.

В первую очередь, в рамках этой подготовки были осуществлены расчеты материального и теплового балансов, которые легли в основу Технологического регламента и программы опытно-промышленных испытаний [11, 13]. Результаты этой работы представлены в данной статье. Результаты самих испытаний будут рассмотрены в второй части.

### Разработка программы опытно-промышленных испытаний

Плавку металлосодержащего сырья осуществляют в печах Ванюкова ПУ-1 ПЦ МЗ. Каждая печь Ванюкова имеет автономные системы непрерывной загрузки в печь материалов, отведения и частичной переработки отходящих газов, штейновый и шлаковый миксер для накопления продуктов плавки, системы обеспечения кислородом, воздухом и природным газом.

Его конструкция представлено на рис. 1. Переработка никелевого сырья в ПВ будет осуществляться в соответствии с Программой опытно-промышленных испытаний [3, 4].

Плавнение и образование штейна и шлака в печи идёт непрерывно, плавка в ПВ исходного сырья осуществляется в интенсивно перемешиваемом шлаковом расплаве, доля сульфидов в котором не более 10%. На ПВ возможна безопасная переработка влажной, крупнокусковой шихты, хотя при этом происходит снижение удельного проплава (проплава - масса шихты в тоннах, загружаемая в сутки на 1м<sup>2</sup> площади пода печи в области фурм) и температуры расплава.

Подача окислительного дутья осуществляется через боковые фурмы в слой шлако-штейновой эмульсии, что позволяет использовать в наиболее теплонагруженной части агрегата водоохлаждаемые кессоны, которые являются основным конструктивным элементом шахты печи и непосредственно контактируют с расплавом. В нижней части печи, в зоне штейновой ванны, кессонированные элементы (закладные кессоны) используются только внутри огнеупорной кладки.

В качестве окислительного дутья используется смесь кислорода и воздуха с содержанием кислорода от 65 до 95% и давлением от 85 до 110 кПа. В обоих случаях нижний предел давления обусловлен прекращением самоочистки фурм, а верхний – возникновением высоких тепловых нагрузок на фурмы, приводящих к их ускоренному износу. Для обеспечения самоочистки фурм скорость истечения дутья должна составлять примерно от 250 до 280 м/с.

Фурменный пояс делит шлаковую ванну на две зоны: надфурменную и подфурменную. В надфурменной зоне, интенсивно перемешиваемой дутьём, происходят испарение воды, диссоциация, плавление и окисление шихты, образование продуктов плавки и коалесценция капель штейна. В более спокойной подфурменной зоне происходит разделение продуктов плавки по плотности на донную фазу – штейно-

вую и верхнюю – шлаковую. Из средней части подфурменной зоны, где содержание ЦМ наименьшее, осуществляется выпуск шлака в шлаковый сифон. Уровень расплава в печи определяется высотой сливного порога шлакового сифона и высотой оси фурм, при подаче дутья высота надфурменной зоны увеличивается в несколько раз.

Основными составляющими металлосодержащей шихты в период испытаний будут рудные концентраты Норильской и Талнахской обогатительных фабрик (далее ТОФ и НОФ).

Рациональный состав концентратов НОФ и ТОФ представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

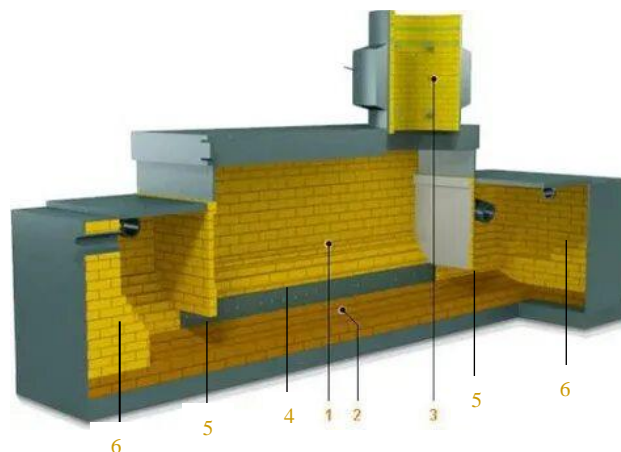


Рис. 1. Печь Ванюкова:

- 1 – надфурменная зона; 2 – горн печи; 3 – аптейк;
- 4 – фурменный пояс; 5 – перегородки; 6 – сифоны

Как видно из представленных составов, никелевый концентрат НОФ, получаемый из малоценных вкрапленных руд, является существенно более бедным по основным целевым компонентам, а также более малосернистым, чем концентрат ТОФ, получаемый из богатых и медистых руд.

Таблица 1

Рациональный состав концентрата НОФ

Соединение	Содержание, мас. %											Всего
	Ni	Cu	Co	Fe	S	Si	Ca	Al	Mg	O	Прочие	
(Ni,Fe) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>	3,62			3,45	3,51							10,58
CuFeS <sub>2</sub>		2,29		2,01	2,3							6,6
CoS			0,11		0,05							0,16
Fe <sub>(x-1)</sub> S <sub>x</sub>				13,58	8,49							22,07
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				12,31						4,7		17,01
SiO <sub>2</sub>						9,04				10,3		19,34
CaO							3,57			1,43		5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								3,02		2,69		5,71
MgO									4,46	2,93		7,39
Прочие											6,14	6,14
Итого	3,62	2,29	0,11	31,35	14,4	9,04	3,57	3,02	4,46	22,05	6,14	100

Рациональный состав концентрата ТОФ

Соединение	Содержание, мас. %											
	Ni	Cu	Co	Fe	S	Si	Ca	Al	Mg	O	Прочие	Всего
(Ni,Fe) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>	8,93			8,5	8,65							26,08
CuFeS <sub>2</sub>		1,61		1,42	1,62							4,65
CoS			0,38		0,21							0,59
Fe <sub>(x-1)</sub> S <sub>x</sub>				30,78	19,2							50,02
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				2,16						0,84		3
SiO <sub>2</sub>						3,07				3,49		6,56
CaO							1,13			0,45		1,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								0,94		0,84		1,78
MgO									1,12	0,73		1,85
Прочие											3,89	3,89
Итого	8,93	1,61	0,38	42,86	29,7	3,07	1,13	0,94	1,12	6,35	3,89	100

Речной песок, используемый в процессе плавки в качестве флюса, вводят в состав шихты из расчёта получения шлака с массовой долей диоксида кремния ~30%.

Основываясь на практике работы ПЦ МЗ, минимальное количество серы в шихте, обеспечивающее оптимальные энергетические режимы работы ПВ, составляет ≈ 24,0%. В рассматриваемых шихтах содержание серы варьируется от 20,77 до 25,8%, поэтому при снижении серы ниже порогового значения возникает дефицит тепла, компенсируемый введением в шихту угля и пирита.

Ввиду низкого содержания серы в составе подсушенного никелевого концентрата (минимальное средневзвешенное значение в используемых шихтовках составляет – 20,77%) в рамках ОПИ будет произведено тестирование двух энергетических ресурсов для обеспечения теплового баланса плавки: железный колчедан (пирит), каменный уголь.

Поскольку целью испытаний является не только определение возможности переработки на существующей печи Ванюкова никелевых концентратов, но и определение границ автогенности при увеличении в шихте доли малосернистых продуктов испытания будет проводиться в несколько этапов – в начале доля в смеси концентратов концентрата ТОФ будет составлять 70%, а доля концентрата НОФ только 30%. Далее доля концентрата НОФ будет возрастать до 70% на заключительном этапе испытаний. Оценка устойчивости технологического процесса и автогенности шихты будет определяться по температурам продуктов плавки – штейна и шлака. При изменении их температуры и качества от установленных параметров в состав шихты будут вводиться пирит и уголь.

Исходные компоненты металлосодержащей шихты, подготовленные в СЦ, по системе конвейеров поступают в загрузочные припечные бункеры. Дозирование компонентов шихты осуществляют при помощи питателей по принципу весового дозирования. Из бункеров компоненты шихты через питатели непрерывно поступают на сборные конвейеры и затем в печь на плавление.

### Тепловой баланс плавки

Расчёт теплового баланса проводился с использованием программного пакета для термодинамического анализа FactSage [7]. В табл. 3 приведены принятые для расчетов температуры продуктов плавки, в табл. 4 приведены составы отходящих газов.

Таблица 3

Температуры продуктов плавки

Наименование материала	Температура, °С
Твёрдые исходные материалы (концентраты, флюсы, уголь, обороты, пыль и пр.)	25
Исходные газообразные компоненты (воздух, кислород, азот, природный газ)	25
Отходящие газы ПВ	1300
Пыль ПВ	1300
Шлак ПВ	1300
Штейн ПВ	1250

Таблица 4

Состав кислородо-воздушной смеси

Компонент	Содержание, об. %			
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar
Кислородо-воздушная смесь ПВ	0,006	85	10,977	4,017

В процессе плавки в печах Ванюкова благодаря высокому окислительному потенциалу дутья горючие газы практически полностью окисляются в рабочем пространстве печи. Поэтому дополнительные подсосы воздуха в газоход не приводят к дожиганию и не увеличивают тепловыделение, а лишь разбавляют отходящие газы, снижая их температуру и увеличивая объём. Выделения тепла при этом не происходит, поэтому при расчётах материальных и тепловых балансов подсосы не учитывались. Для процесса плавки в печи Ванюкова величина подсоса принята равной 10%.

При расчёте тепловых потерь печи Ванюкова потери тепла с кессонами принимались на основании данных практических замеров при промышленной

эксплуатации печей Ванюкова МЗ, а также во время опытно-промышленных испытаний технологии непрерывного конвертирования на двухзонной печи комбината Североникель в 2006 г.:

– удельный тепловой поток на одну работающую фурму 200 Мкал/м<sup>2</sup>·ч. Огневая поверхность фурмы 0,34 м<sup>2</sup>;

– удельный тепловой поток на основные кессоны шахты, омываемые расплавом (кессоны первого и второго ряда) 80 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток на кессоны третьего ряда 30 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток на кессоны торцевых стен такой же, как на кессоны зоны барботажа 80 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток через кладку горна печи 0,4 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток через кладку шахты печи 0,6 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток через свод 0,6 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

– удельный тепловой поток через подину 0,1 Мкал/м<sup>2</sup>·ч.

Для расчётов плавки в печи Ванюкова обогащение дутья КВС в период испытаний принято равным 85 об. %. Состав КВС приведён в табл. 4.

Результаты расчетов теплового баланса приведены в табл. 5.

Как следует из проведенных расчетов, дефицит тепла, без его компенсации окислением энергетически емких продуктов, достигает свыше 40% от его общего количества. Было принято решение о его ком-

пенсации энергетически емкими материалами – каменным углем и железным колчеданом (пиритом).

#### Этапы проведения опытно-промышленных испытаний

Проведённые расчёты тепловых балансов работы ПВ при переработке никелевых концентратов показали, что максимальная суточная потребность для компенсации дефицита тепла каждого из энергетических материалов составит:

- пирит – 355 т/сут, при учёте среднего содержания в нем серы 45%;

- уголь – 38 т/сут, при учёте содержания углерода в его составе 65,8%.

В период ОПИ предусмотрено проведение тестирования трех основных режимов плавки с применением пирита (≈ 10 суток, в том числе 2 суток совместно с углем) и двух режимов плавки с применением угля (≈ 4 суток, в том числе 2 суток совместно с пиритом). Таким образом, суммарная минимальная потребность в материалах с учётом запаса 20%, в зависимости от вариативности содержания серы в никелевых концентратах для обеспечения теплового баланса работы ПВ, составит:

- пирит - 2160 т/период;

- уголь - 270 т/период.

На рис. 2 и 3 приведены диаграммы изменения состава смеси концентратов изменения серы посуточно в период испытаний.

В табл. 7 приведены основные технологические параметры ведения плавки в период испытаний в соответствии с этапами проведения ОПИ.

Таблица 5

Тепловой баланс плавки

№ п/п	СТАТЬИ ПРИХОДА	Мкал/год	%	СТАТЬИ РАСХОДА ТЕПЛА	Мкал/год	%
1	Физическое тепло шихты	2771708	0,82	Тепло штейна ПВ	11662764	3,43
2	Физическое тепло дутья	2158532	0,64	Тепло шлаков ПВ	136800668	40,26
3	Тепловой эффект процесса	181581830	53,44	Тепло отходящих газов ПВ	131385053	38,67
4	Тепло от сгорания угля	118433490	34,86	Тепло пыли ПВ	1572691	0,46
5	Тепло от сгорания пирита	5506172 1,62	1,62	Тепло, отводимое охлаждающей водой кессонов	57616685	16,96
6	Тепло от сгорания угля	29319766	8,63	Потери тепла кожухом	733635	0,22
7	ВСЕГО:	339771497	100	ВСЕГО:	339 771 497	100

Таблица 6

Этапы проведения ОПИ

Время от начала испытаний, сут	Содержание НК НОФ в смеси, %	Содержание серы в смеси концентратов, %
4-6	30	25,8
7-8	30-50	23,29-25,8
9-10	50	23,29
11-12	50-70	20,77-23,29
13-18	70	20,77



Рис. 2. Изменение состава смеси НК в период испытаний



Рис. 3. Изменение содержания серы в смеси НК в период испытаний

Таблица 7

Режимы плавки никелевого концентрата в ПВ-3 в период проведения ОПИ (на сухую массу материала)

Номер режима	Длительность, сут	ТОФ		НОФ		Расход пирита, т/ч	Расход угля, т/ч	Расход флюса, т/ч	Содержание S в смеси НК, %	Содержание S в шихте, %	Расход природного газа, тыс. нм <sup>3</sup> /ч	Расход КВС, тыс. нм <sup>3</sup> /ч
		т/ч	%	т/ч	%							
1	3	45,5	70	19,5	30	0,00	0,00	14,70	25,80	25,80	2,43	21,29
2	2	32,5	50	32,5	50	5,56	0,00	14,77	23,29	25,00	2,62	22,67
3	2	19,5	30	45,5	70	13,74	0,00	15,81	20,77	25,00	2,68	24,97
4	2	19,5	30	45,5	70	7,00	0,66	13,37	20,77	22,92	2,72	23,03
5	2	19,5	30	45,5	70	0,00	1,46	10,85	20,77	20,33	2,69	21,04

### Выводы

1. Расчеты показали существенный дефицит тепла в процессе при плавке шихты с высокой долей малосернистых концентратов. Процесс должен протекать в полуавтогенном режиме с использованием дополнительных энергоносителей.

2. Компенсация тепла возможна путем включения в состав шихты энергоемких материалов – угля, пирита.

3. Конструкция агрегата и пропускная способность газоотводящего тракта должны обеспечить устойчивую плавку обогащенной шихты.

4. Проработанные технологические режимы плавки легли в основу Программы промышленных испытаний переработки никелевых концентратов в печи ПВ и позволяют считать их успешное проведение обоснованным.

### Список источников

1. Дауев Ю.М., Василенко В.П., Денисов М.Н. Результаты переоценки минерально-сырьевой базы металлических полезных ископаемых Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. 2020. №4. С 32-39.

2. Изменение ресурсной базы производства тяжелых цветных металлов на примере меди и никеля / Крупнов Л.В., Мидюков Д.О., Дациев М.С., Ильин В.Б. // Горный журнал. 2024. №3. С. 10-15.
3. Автогенные процессы в цветной металлургии / Мечев В.В. и др. М.: Металлургия, 1991. 413 с.
4. Кобахидзе В.В. Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии. М.: МИСиС, 1994. 355 с.
5. Промышленные плавильные агрегаты для производства тяжелых цветных металлов: монография / Крупнов Л.В., Марченко Н.В. и др.; под ред. О.В. Носовой. Норильск: ЗГУ им Н.М. Федоровского, 2022. 234 с.
6. Термодинамическое моделирование окислительного обжига сульфидного медно-никелевого концентрата / В.А. Попов, Ю.А. Савинова, Л.В. Крупнов, М.И. Рябушкин // Цветные металлы. 2022. №2.
7. Обоснование выбора технологии переработки низкоэнергетического сырья / Крупнов Л.В., Малахов П.В., Озеров С.С., Мидюков Д.О. // Сборник докладов XV международной конференции имени члена-корреспондента РАН Геннадия Леонидовича Пашкова. Красноярск, 2022. С. 237-242.
8. FactSage Thermochemical Software and Databases - 2010-2016 / C. W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand, S. A. Decterov, G. Eriksson, A.E. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer and M. A. Van Ende // Calphad. 2016. Vol. 54. Pp. 35-53. <www.factsage.com>
9. Плавка в жидкой ванне / Ванюков А.В., Быстров В.П. и др.; под ред. А.В. Ванюкова. М.: Металлургия, 1988. 208 с.
10. Цымбулов Л.Б. Совершенствование существующих и разработка новых пирометаллургических технологий переработки никельсодержащего сырья: дис. ... д-ра техн. наук. /05.16.02. М.: РГБ, 2005.
11. Практика работы автогенных агрегатов в ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в условиях переработки сырья с пониженным энергетическим потенциалом / Крупнов Л.В., Малахов П.В., Озеров С.С., Цымбулов Л.Б. // Цветные металлы. 2022. № 2. С. 39-47.
12. Отчёт о НИР по теме «Разработка технологического регламента на переработку никелевого сырья на Медном заводе», Этап 2 – Док. № 021-1095н с ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». СПб.: ООО «Институт Гипроникель», 2025.
13. Оценка тепловой работы печей плавки в жидкой ванне и печей взвешенной плавки с точки зрения их конструктивных особенностей / Л.В. Крупнов, Д.В. Румянцев, В.А. Попов, А.В. Каверзин // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2025. № 18(2). С. 200–207. EDN: MDTBVL.
14. Отчет о НИР по Договору № 021-1095н «Программа опытно-промышленных испытаний». Этап 1. СПб.: ООО «Институт Гипроникель», 2025.
15. ТИ 49156713.14.55-27-2016 Плавка медного никельсодержащего сырья в печах Ванюкова плавильного цеха Медного завода.
16. Загускин В.Л. Основы численных методов для газодинамики с теплопроводностью. М., 2022. 167 с.

#### Сведения об авторах

**Крупнов Леонид Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии, машин и оборудования Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского; главный металлург – начальник Металлургического управления Заполярного филиала ПАО «ГМК "Норильский никель"», г. Норильск, Россия. E-mail KrupnovLV@norvuz.ru. ORCID 0009-0008-7451-9610. Scopus ID 55830885000.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### DEVELOPMENT OF MODES FOR LOW-SULFUR NICKEL RAW MATERIALS PROCESSING IN THE VANYUKOV INDUSTRIAL FURNACE

**Krupnov Leonid V.** – Associate Professor, Chief Metallurgist – Head of the Metallurgical Department of the Polar Branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, Head of the Metallurgy, Machinery and Equipment Department, N.M. Fedorovsky Polar State University. E-mail: KrupnovLV@norvuz.ru

**Abstract.** A general description of the molten bath smelting technology and approaches to conducting pilot tests of nickel raw material processing in an operating industrial unit—the Vanyukov Furnace - at the Copper Plant of the Polar Division are presented in the paper. Recommended smelting parameters for the test period and a rational composition of the main nickel concentrates are presented. Approaches for the stages of the pilot tests, varying the ratio of high-sulfur

to low-sulfur concentrates, are developed, the heat deficit of the smelting process are demonstrated, and the need to introduce energy-intensive components—coal and pyrite sulfide—into the charge are substantiated based on the results of heat balance calculations.

**Key words:** Vanyukov furnace (VF), pilot industrial testing (PIT), Polar Division, Talnakh Concentrator, Norilsk Concentrator, Copper Plant, autogenous process, thermal balance, oxygen-air mixture (OAM), low-sulfur springs

---

Ссылка на статью:

Крупнов Л.В. Отработка режимов переработки малосернистого никелевого сырья в промышленной печи Ванюкова // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 30-36. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-30-36](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-30-36)  
Krupnov L.V. Development of modes for low-sulfur nickel raw materials processing in the Vanyukov industrial furnace. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 30-36. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-30-36](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-30-36)

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Манцеров С.А., Рябова Л.И., Герасимов А.В.

## К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ АДДИТИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Аннотация.** В центре внимания авторов находятся актуальные проблемы, с которыми сталкиваются производственники, использующие аддитивные стержни в производстве стальных отливок ответственного назначения, к которым помимо высокой стоимости или отнесены высокие риски получения поверхностных дефектов литья и невысокая экологичность процесса. Цель работы - теоретически обоснованный выбор вариантов организационных и технических решений, минимизирующих эти риски применительно к производству конкретного предприятия. Для этого определили возможные направления поиска решения, к которым отнесли технологический режим 3D-печати, материал аддитивного стержня, покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом, и проводили информационно-аналитический обзор открытых источников, содержащих описание опыта решения проблемы по указанным направлениям. В итоге остановились на золь-гель-методе в качестве базового для дальнейшей проработки, сформулировали модельное поэтапное представление о будущей технологической схеме формирования эффективного покрытия на рабочей поверхности аддитивного стержня и теоретически показали наличие необходимых предпосылок успешного применения золь-гель-метода для формирования керамического покрытия на поверхности аддитивного литейного стержня, позволяющего минимизировать риски получения дефектов и повысить экологичность производства стального литья ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками. Полученные результаты проходят экспериментальную проверку для уточнения параметров технологической схемы и последующего внедрения в действующее производство предприятия.

**Ключевые слова:** промышленный 3D-принтер, аддитивный литейный стержень, стальная отливка ответственного назначения, поверхностные дефекты, экологичность, покрытие рабочей поверхности стержня, золь-гель-метод, технологические добавки

### Введение

В последнее время на российских предприятиях четко просматривается тренд, связанный с расширением применения в производстве стальных фасонных отливок ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками так называемых аддитивных стержней, получаемых без использования специальной технологической оснастки (стержневые ящики) и оборудования (стержневые машины).

Аддитивными называют литейные стержни, получаемые послойным наращиванием материала на специальных принтерах с применением аддитивных технологий 3D-печати, например Binder Jetting, SLS-и FDM-печать.

Binder Jetting, или ВJ-технология, представляет собой технологию струйной печати, при которой жидкое связующее выборочно, или селективно, осаждается на тонкий слой огнеупорной основы (песок), смешиваясь с ней, а после затвердевания слоя на него укладывается последующий.

SLS-печать предполагает использование огнеупорной основы, предварительно плакированной полимером. Материал будущего стержня спекается лазером, после чего очищается, после чего стержень помещается в прокалочную печь для отверждения, которое происходит при температуре 300–350°C.

Технология FDM-печати предусматривает послойное наплавление на огнеупорную основу пластиковых нитей (филаментов).

Из перечисленных ВJ-технология печати аддитивных литейных стержней получила наибольшее распространение прежде всего по причине относительно высокой скорости печати и отсутствия ограничений по геометрии изделий. Однако при этом можно выделить несколько факторов, сдерживающих ее активное освоение российскими предприятиями. Помимо сохраняющейся высокой стоимости промышленных принтеров, речь идет об использовании фурановых смол двухкомпонентной системы, например, марки Binder VX-2с с катализатором Activator или «Резоформ» с катализатором в виде ортофосфорной кислоты [1] в качестве связующего и кварцевого песка – в качестве огнеупорной компоненты материала аддитивных стержней. Предел прочности при растяжении стержневых смесей на большинстве промышленных фурановых смол не превышает 0,15 МПа при 1000°C, что предопределяет низкие механические свойства стержней при высоких температурах. Кварцевый песок в рабочем диапазоне температур эксплуатации стержней испытывает ряд фазовых переходов, при которых резко изменяет значения своих термомеханических характеристик, в частности коэффициента линейного термического расширения, что повышает риски образования трещин и снижения поверхностной прочности стержней. Как показывает опыт, это ведет к образованию таких дефектов поверхности отливок, как пригар, грубая поверхность, газовая шеро-

ховатость и просечки согласно терминологии ГОСТ 19200-80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов» [2]. Помимо этого следует отметить и невысокую экологичность применения аддитивных литейных стержней на фурановом связующем, обусловленную активным выделением вредных летучих соединений (формальдегид, метанол, фурфурол, оксид углерода, бензол и др.) при неизбежном контакте стержня с металлическим расплавом [3].

В сложившейся ситуации все острее возникает необходимость поиска организационных и технических решений представленной проблемы, что подтверждает ее актуальность. В данной работе представлены результаты этого поиска, выполненные группой ученых Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). При этом целью работы стал теоретически обоснованный выбор варианта решения, минимизирующего риски образования поверхностных дефектов на отливках ответственного назначения, характеризующегося существенно большей экологичностью и приемлемого для условий конкретного предприятия, а именно ООО «СовТехЛит» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.), где для улучшения технико-экономических показателей производства реализуется схема так называемой комбинированной литейной формы – сочетание традиционной ХТС-формы для оформления внешнего контура с аддитивным стержнем для оформления внутренней геометрии отливки.

#### **Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки**

На первом этапе определили возможные направления поиска решения, к которым отнесли:

- технологический режим 3D-печати;
- материал аддитивного стержня;
- покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом.

На втором этапе проводили информационно-аналитический обзор открытых источников, содержащих описание опыта решения проблемы по указанным направлениям.

##### *Технологический режим 3D-печати*

В настоящее время на российских предприятиях в большей степени представлены 3D-принтеры для печати песчаных литейных форм и стержней по технологии Binder Jetting с формообразованием по ФУРАН-процессу, произведенные такими компаниями, как 3D Systems (США), FHZL (Китай), Robotech (Россия) и ZIAS Machinery (Россия). Как правило, в ходе предпродажной подготовки представители всех этих компаний фактически вслепую производят «ручную настройку» принтера под индивидуальные характеристики единичного тестового конкретного изделия, указанного Заказчиком, а при переходе на другое изделие у Заказчика неизбежно возникает необходимость переналадки – корректировки технологических

режимов печати. Сложность состоит в том, что такую корректировку Заказчику на своей производственной площадке самостоятельно провести затруднительно, не имея в своем распоряжении достаточной информации о соответствии технологических режимов печати эксплуатационным свойствам и характеристикам получаемого изделия – литейного стержня. Для решения этой проблемы, очевидно, необходимо проведение комплекса соответствующих исследований при активном взаимодействии фирмы-производителя принтера, предприятия-Заказчика с привлечением квалифицированных специалистов-литейщиков. На сегодняшний день надежная база результатов таких исследований отсутствует.

##### *Материал аддитивного стержня*

Как известно, материал аддитивного литейного стержня, как и получаемого с использованием технологической оснастки (стержневой ящик) и технологического оборудования (стержневая машина), функционально включает в себя три компонента: огнеупорный наполнитель, связующее и технологические добавки. Учитывая достаточно широкий спектр отечественных и зарубежных материалов, в настоящее время представленных на рынке или имеющихся в распоряжении производителей и в той или иной мере выполняющих указанную нагрузку, теоретически это открывает отличные возможности для выбора их оптимального сочетания. Однако на деле все оказывается по-другому.

Во-первых, производители 3D-принтеров неохотно (если не сказать больше) идут на любые изменения материала стержня, ссылаясь на высокие риски отказа отдельных дорогостоящих узлов оборудования и снимая по этой причине гарантии, предоставляемые литейщикам при его приобретении. Очевидно, изменений здесь ждать придется до того момента, пока спрос на принтеры не упадет существенно и их производители не будут вынуждены заниматься инновациями по экономическим причинам.

Во-вторых, известно, что на эксплуатационные свойства и характеристики аддитивных стержней, такие как поверхностная прочность, газотворность, газопроницаемость, шероховатость, в отличие от стержней, получаемых с использованием технологической оснастки (стержневой ящик) и технологического оборудования (стержневая машина), дополнительное влияние оказывают некоторые специфические факторы, «привязанные» к конкретной марке 3D-принтера, например, размер сопла головки принтера, высота сопла, скорость экструзии, толщина слоя, число слоев, термовременной режим отверждения и направление печати. Достаточной информации о характере такого влияния применительно к различным сочетаниям всех трех функциональных компонентов стержневой смеси на сегодня нет.

В-третьих, в России зафиксированы лишь робкие начальные шаги в направлении поиска оптимального

сочетания компонентов материала аддитивного стержня. Так, например, в открытых источниках сети Интернет приводятся очень краткие сведения об эффективном применении при печати аддитивных стержней некоторыми предприятиями хромитового песка взамен кварцевого. Практически отсутствует такая информация о корундовых, цирконовых, оливковых песках, шамоте, дистенсиллиманите, песках, содержащих полевой шпат, песках конкретных карьеров и т.п. В целом такая же ситуация складывается и в отношении связующих материалов и композиций. Например, в сообщении профессора В.Д. Илюхина на научно-практической конференции «Практическое применение аддитивных технологий в заготовительном производстве», прошедшей 18 апреля 2025 года в Московском политехническом университете, акцент сделан на первых результатах лабораторных исследований использования в производстве аддитивных стержней экологически безопасного минерального связующего (жидкое стекло) взамен фурановых смол.

*Покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом*

Это направление решения проблемы имеет под собой более существенную информационную базу в сравнении с предыдущими двумя. Подавляющее большинство исследователей вопроса сходятся в том, что покрытие (в некоторых источниках используется термин «обмазка») рабочей поверхности стержня должно играть роль защитного граничного слоя между стержнем и металлом, подавляющего образование дефектов литья посредством снижения шероховатости, ступенчатости, волнистости и повышения гладкости поверхности стержня, предотвращения непосредственного физического контакта стержня и металлического расплава и протекания нежелательных химических реакций.

При этом, по мнению представителей компании Уралхимпласт–Хюттенес Альбертус (УХП-ХА) [4], позиционирующей себя как одного из ведущих производителей связующих и покрытий форм и стержней для нужд литейных цехов и заводов России и СНГ, из-за специфичной структуры поверхности, а также сложности геометрии печатных стержней требуются покрытия с особыми свойствами. В то же время сами покрытия должны эффективно противостоять образованию упомянутых ранее дефектов литья.

В этой связи выбор вида покрытия аддитивного стержня нужно проводить, принимая во внимание такие факторы, как материал стержня, и в частности, гранулометрические характеристики его огнеупорной составляющей, свойства и совместимость типа связующего, помимо этого – поверхностная плотность стержня, направление печати на принтере, а также тип покрытия и способ его нанесения. Важную роль в формировании характеристик аддитивного стержня играют факторы, зависящие от оси печати и прочности скрепления слоев песка, а также поверхностные

структуры покрытых и впоследствии связанных смоллой формовочных материалов. Так, например, зависящие от оси печати различия в прочности приводят, среди прочего, к повышенной возможности образования просечек. Поэтому использование привычных для литейщиков «классических» покрытий не всегда дает ожидаемый результат и решает проблему в полной мере. Как следствие, для того чтобы найти подходящие решения, свойства покрытия должны быть специально адаптированы к специфическим свойствам аддитивного стержня.

Один из трендов последнего времени – использование покрытий на основе нанокристаллических материалов [5]. На сегодняшний день известно несколько десятков способов формирования таких покрытий и несколько вариантов их классификации. В соответствии с одним из них [6] по агрегатному состоянию исходных компонентов различают газофазные, жидкостные и твердофазные методы.

При реализации газофазных методов покрытие формируется в газовой фазе или парах реагирующих компонентов. К ним относят такие известные методы, как вакуумное напыление, лазерное распыление, химическое (Chemical Vapor Deposition (CVD)) или физическое (Physical Vapor Deposition (PVD)) осаждение частиц на подложку, высокотемпературный пиролиз органических или неорганических веществ.

Соответственно, твердофазные методы ориентированы на формирование покрытия в твердой фазе. К ним традиционно относят высокотемпературный синтез материалов из высокодисперсных порошкообразных компонентов, а также процессы объемной кристаллизации стекол.

Недостатками газофазных и твердофазных методов являются высокая энергоемкость реализации, необходимость применения дорогостоящих и сложных технологического оборудования и оснастки, привлечение опытного и квалифицированного персонала, весьма жесткие требования по обеспечению безопасности труда персонала, а также экологической и пожарной безопасности производства.

Жидкостные методы являются относительно простыми, высокопроизводительными и не требуют сложного технологического оборудования. Они позволяют формировать различные одно- и многокомпонентные покрытия, характеризующиеся высокой однородностью. При этом формирование осуществляется в жидкой фазе при соблюдении относительно просто контролируемых параметров технологического процесса, таких как химический состав реагентов, температура, наличие специальных добавок, продолжительность процесса и т.д.

Одним из наиболее распространенных жидкостных методов является так называемый «золь-гель-метод» получения керамики и неорганических композитов – формирование материалов из растворов на базе золь-гель-процессов, сущность которых заключается в применении золь – коллоидных растворов раз-

личных оксидов и оксигидратов металлов для перехода к коллоидному осадку – гелю [7]. Золь-гель-процесс (англ. sol-gel-process) – технология материалов, в том числе включающая получение золя с последующим переводом его в гель, состоящий из жидкой дисперсионной среды, заключенной в пространственную сетку, образованную соединившимися частицами дисперсной фазы.

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая изменение структуры материала на различных стадиях реализации золь-гель-метода, к которым традиционно относят: 1) создание коллоидного раствора (золя); 2) формирование геля; 3) сушка геля; 4) термообработка геля и его спекание.

Золь-гель-технологии характеризуются простотой исполнения и не требуют специального оборудования, экологичны и экономичны. Об их перспективности свидетельствует большое число научных исследований и публикаций [8-11], посвященных совершенствованию этого процесса получения покрытий, а также расширению областей его применения.

Этот метод уже довольно давно и успешно применяется при изготовлении форм для литья по выплавляемым моделям [12, 13]. На третьем этапе исследований именно он был выбран авторами данной статьи в качестве базового для дальнейшей теоретической проработки решения заявленной проблемы.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На основе имеющейся информации о золь-гель-методе выстраивали модельное поэтапное представление о будущей технологической схеме формирования эффективного покрытия на рабочей поверхности аддитивного стержня.

На первой стадии реализации золь-гель-метода в качестве прекурсоров было предложено использовать выпускаемые химической промышленностью России относительно дешевые и доступные для производства оксиды кремния и/или оксиды алюминия на спиртовой или водной связках, например

«АРМОСИЛ», «ЛЭЙКСИЛ», «КЗ-ТМ», «Алюмозоль» ТУ 2163-007-61801487-2009.

Для формирования геля на второй стадии реализации метода, по замыслу авторов статьи, необходима дестабилизация коллоидного раствора посредством увеличения объемной концентрации дисперсной фазы, например, за счет ввода так называемых пуццолоновых добавок (активные минеральные добавки в тонкоизмельченном виде, которые в присутствии воды могут образовывать химические соединения, обладающие вяжущими свойствами) или изменения его водородного показателя pH. При этом формируется объемная сетка наночастиц и раствор теряет текучесть. Согласно современным представлениям, формирование геля начинается с образования фрактальной структуры золя, роста фрактальных агрегатов, пока они не начнут сталкиваться друг с другом и сцепляться между собой, как это описывает теория перколяции (теория протекания). После прохождения точки гелеобразования золь теряет подвижность и застудневает, преобразуясь в так называемый «мокрый гель». Продолжительность перехода из золя в гель определяется условиями протекания процесса. По данным [14], в процессе дальнейшей выдержки образующийся мокрый гель «стареет» – в нем происходят структурные изменения. При этом единая сетка-кластер соседствует с золем, содержит множество мелких кластеров, и идет процесс непрерывного присоединения последних к общему каркасу будущего покрытия – непрерывному гигантскому кластеру. Кроме того, в геле могут продолжаться реакции конденсации, не прошедшие до конца в золе, имеют место и фазовые переходы «твердая фаза – жидкость». В ходе старения неизбежно происходит синерезис (от греч. *synáresis* – «сжатие, уменьшение») – переход геля в термодинамически более устойчивое состояние, сопровождающийся уплотнением пространственной структурной сетки – усадкой геля, включающей деформацию сетки каркаса и своеобразное выталкивание жидкости из пор.

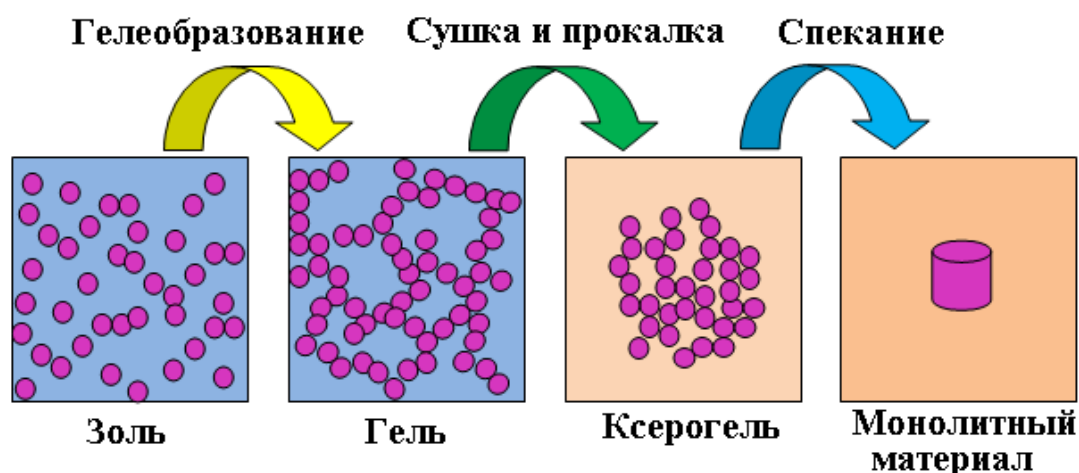


Рис. 1. Изменение структуры материала при реализации золь-гель-метода [6]

На третьей стадии реализации золь-гель-метода, стадии сушки, при удалении из геля жидкого растворителя, заполняющего пространство между ячейками сетки каркаса, механически непрочный и рыхлый сырой гель претерпевает еще большую усадку и приобретает свойства монолитного твердого тела. В результате образуется так называемый ксерогель (англ. xerogel – «твёрдое тело, получаемое в результате сушки геля») – по версии [15], продукт сушки аква- или алкогелей при атмосферном давлении в достаточно жестких условиях, приводящих к схлопыванию крупных пор и значительному увеличению плотности материала. При этом в нем возникают повышенные напряжения, происходит зарождение и развитие трещин, что существенно повышает риски разрушения формирующегося покрытия. Для минимизации этого нежелательного эффекта требуются либо специальные практические технологические приемы, например, таких как рациональный выбор толщины слоя, контролируемые вентиляция рабочей зоны и тайминг процесса, либо добавки веществ, относящихся к классу способствующих быстрому высыханию гелей Drying Control Chemical Additives (DCCA), например, некоторых органических аминов и амидов (формамид, диметилформамид, ацетамид, глицерин и оксалиевая кислота).

Четвертая стадия реализации золь-гель-метода представляет собой термообработку и спекание высушенного геля вплоть до получения плотного керамического слоя на основе покрытия при плавном увеличении и снижении температуры, исключающем резкие ее перепады для предотвращения образования сетки трещин в формирующемся покрытии. Цель ее проведения – полное термическое разложение DCCA и удаление исходных компонентов и газообразных остатков, а также упрочнение структуры материала покрытия.

При выборе конкретного материала технологических добавок к прекурсорам авторы данной статьи руководствовались двумя принципиальными положениями:

1) для профилактики образования пригара кристаллохимическое сродство материала покрытия к материалу аддитивного стержня должно быть больше, чем таковое к материалу стальной отливки;

2) для профилактики обезуглероживания стальной отливки предпочтение отдавали углеродсодержащим добавкам.

При этом предполагали, что нанесение нескольких слоев покрытия аддитивного стержня позволит не только повысить поверхностную прочность и гладкость поверхности стержня, сводя к минимуму риски образования поверхностных дефектов на стальном литье ответственного назначения, но и обеспечить увеличение экологичности применения аддитивных стержней на фурановом связующем.

### Заключение

Таким образом, теоретически показано, что имеются необходимые предпосылки успешного применения золь-гель-метода для формирования керамического покрытия на поверхности аддитивного литейного

стержня, позволяющего минимизировать риски получения дефектов и повысить экологичность производства стального литья ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками.

В настоящее время результаты проведенного предварительного теоретического анализа будущей технологической схемы проходят экспериментальную проверку в лабораториях НГТУ и условиях действующего производства ООО «СовТехЛит» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.) с целью уточнения таких параметров технологии нанесения покрытия на аддитивный стержень, как температурно-временной режим реализации каждой из стадий золь-гель-метода, число слоев, способ нанесения покрытия, условия вентиляции, вид и гранулометрический состав пуццолановых добавок и DCCA, их содержание в прекурсоры и т.д.

### Список источников

1. Куликов С.А., Куликов Ю.А. Анализ свойств литейных стержней, изготовленных по фуран-процессу методом аддитивных технологий и традиционным способом // Литье и металлургия. 2025. №3. С. 29-35.
2. Леушин И.О., Герасимов А.В., Любомиров Д.А. Применение аддитивных песчаных стержней на примере изготовления отливки «Аппарат направляющий» из коррозионностойких сталей // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Самара, 10–12 апреля 2024 года). Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. С. 254-260.
3. Лазаренков А.М., Садох А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм // Литье и металлургия. 2022. №3. С. 122–126.
4. Фуран-процесс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ucp-ha.ru/furan-process/> (дата обращения: 17.12.2025).
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М: ФИЗМТЛИТ, 2005. 416 с.
6. Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Жидкостные методы получения оптических наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2018. 84 с.
7. Комаров О.С., Розенберг Е.В. Золь-гель-технология как основа для защитных покрытий в литейном производстве // Современные технологии для заготовительного производства: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции. Минск: БНТУ, 2022. С. 56-58.
8. Золь-гель технология: самый простой путь к новой технологии материалов // Реферативный журнал. 19. Химия. 19М. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. [Электронный ресурс]. 2005. №21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9101447> (дата обращения: 17.12.2025).
9. Sheveleva E., Shevelev S., Sokolovskiy A., Zininidov A.K. Investigation with using thermal analysis of gas evolution and sintering of nanopowders of

- zirconia prepared by sol-gel method // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2020. No.1(97). Pp. 88-96.
10. Орлов Е.Ю., Бельских Г.Н., Кузьменко А.П. Разработка теплоизоляционного нанокompозита с помощью золь-гель-технологии для использования в авиационной промышленности // Современные материалы, техника и технологии. 2015. №1(1). С. 177-179.
  11. Мошняга М.А., Гринберг Е.Е., Почиталкина И.А. Получение высококачественного кристобалита с использованием «золь-гель»-алкоголятной технологии // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35, №6(241). С. 75-76.
  12. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. М.: Машиностроение, 1971. 436 с.
  13. Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. [и др.] Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
  14. Лясников К.О., Чернышова О.В., Логинов К.О. Золь-гель синтез-метод получения функциональных материалов // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение YOUNG ISC 2024: тезисы докладов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 03-06 декабря 2024 года). Санкт-Петербург: «ЛЕМА», 2024. С. 95.
  15. Силикатные ксерогели и вспененные материалы, формируемые золь-гель методом / Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Алексеенко А.А. [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2005. №2. С. 3-10.

#### Сведения об авторах

**Леушин Игорь Олегович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru.

**Вахидов Умар Шахидович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mto@nntu.ru.

**Манцеров Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mca\_9@nntu.ru.

**Рябова Любовь Игоревна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

**Герасимов Артем Валерьевич** – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: gerasimov\_lp@list.ru.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### ON THE APPLICATION OF ADDITIVE CORES IN THE PRODUCTION OF CRITICAL STEEL CASTINGS

**Leushin Igor O.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: igoleu@yandex.ru.

**Vakhidov Umar Sh.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of construction and road machinery, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: mto@nntu.ru.

**Mantserov Sergey A.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of automation in mechanical engineering, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: mca\_9@nntu.ru.

**Ryabova Liubov I.** – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: kafmto@mail.ru.

**Gerasimov Artem V.** – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: gerasimov\_lp@list.ru.

**Abstracts.** The authors focus on current problems faced by manufacturers using additive cores in the production of critical steel castings. These problems include, in addition to high cost, high risks of surface casting defects and low process environmental friendliness. The aim of the work is to theoretically substantiate the selection of organizational and technical solutions that minimize these risks specifically for the production of a particular enterprise. To achieve this, possible directions for finding a solution were identified, including: the 3D printing technological regime; the material of the additive core; the coating of the core's working surface in contact with the molten metal. An information and analytical review of open sources describing experience in solving the problem in these directions was conducted. Ultimately, the sol-gel method was chosen as the basic approach for further development. A model stage-by-stage representation of the future technological scheme for forming an effective coating on the working surface of the additive core was formulated, and the necessary prerequisites for the successful application of the sol-gel method for forming a ceramic coating on the surface of an additive foundry core were theoretically demonstrated. This method allows minimizing the risks of defects and increasing the environmental friendliness of producing critical steel castings with complex geometry and thin walls. The obtained results are currently undergoing experimental verification to refine the parameters of the technological scheme and for subsequent implementation in the enterprise's existing production.

**Keywords:** industrial 3D printer, additive casting core, critical steel casting, surface defects, environmental friendliness, core print surface coating, sol-gel method, process additives

### References

1. Kulikov S.A., Kulikov Yu.A. Analysis of the properties of foundry cores manufactured by the furan process using additive technologies and the traditional method // *Foundry and Metallurgy*. 2025, no. 3, pp. 29-35.
2. Leushin I.O., Gerasimov A.V., Lyubomirov D.A. Application of additive sand cores using the example of manufacturing the «Guiding Apparatus» casting from corrosion-resistant steels // *Vy`skie tekhnologii v mashinostroenii: Materialy` XXI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem* [High Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation] (Samara, April 10-12, 2024). Samara: Samara State Technical University, 2024. Pp. 254-260.
3. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Investigation of the air environment in the working zones of foundries with modern technologies for manufacturing cores and molds // *Lit'e i metallurgiya* [Foundry and Metallurgy]. 2022, no. 3, pp. 122-126.
4. Furan Process [Electronic resource]. URL: <https://www.ucp-ha.ru/furan-process/> (date of the application: 17.12.2025).
5. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow: FIZMLIT, 2005. 416 pp.
6. Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. *Liquid Methods for Obtaining Optical Nanomaterials*. St. Petersburg: ITMO University, 2018. 84 p.
7. Komarov O.S., Rozenberg E.V. Sol-gel technology as a basis for protective coatings in foundry production // *Modern Technologies for Preparatory Production: collection of scientific works of the Republican Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU, 2022. Pp. 56-58.
8. Sol-gel technology: the simplest path to new material technology // *Referativny Zhurnal*. 19. Chemistry. 19M. Technology of Silicate and Refractory Non-metallic Materials. [Electronic resource]. 2005. No. 21 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9101447> (date of the application 17.12.2025).
9. Sheveleva E., Shevelev S., Sokolovskiy A., Zeinidenov A.K. Investigation with using thermal analysis of gas evolution and sintering of nanopowders of zirconia prepared by sol-gel method // *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2020, no.1(97), pp. 88-96.
10. Orlov E.Yu., Bel'skikh G.N., Kuzmenko A.P. Development of a thermal insulating nanocomposite using sol-gel technology for use in the aviation industry // *Sovremennye materialy`, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Engineering and Technologies]. 2015, no.1(1), pp. 177-179.
11. Moshnyaga M.A., Grinberg E.E., Pochitalkina I.A. Obtaining High-Purity Cristobalite Using the «Sol-Gel» Alkoxide Technology // *Uspexi v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. 2021, vol. 35, no. 6(241), pp. 75-76.
12. *Investment Casting* / edited by Ya.I. Shklenyuk, V.A. Ozerov. Moscow: Mashinostroenie, 1971. 436 p.
13. Ivanov V.N., Kazennov S.A., Kurchman B.S. [et al.] *Investment Casting*. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 408 p.
14. Lyasnikov K.O., Chernyshova O.V., Loginov K.O. Sol-Gel Synthesis - A Method for Obtaining Functional Materials // *Functional Materials: Synthesis. Properties. Application* YOUNG ISC 2024: Abstracts of the All-Russian Youth Scientific Conference with International Participation (Saint Petersburg, December 03-06, 2024). Saint Petersburg: «LEMA», 2024. p. 95.
15. Poddenezhny E.N., Boyko A.A., Alekseenko A.A. [et al.] Silicate Xerogels and Foamed Materials Formed by the Sol-Gel Method // *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy]. 2005, no. 2, pp. 3-10.

Ссылка на статью:

К вопросу о применении аддитивных стержней в производстве стальных отливок ответственного назначения / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Манцеров С.А., Рябова Л.И., Герасимов А.В. // *Теория и технология металлургического производства*. 2026. №1(56). С. 37-43. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Mantserov S.A., Ryabova L.I., Gerasimov A.V. On the application of additive cores in the production of critical steel castings. *Teoria i tekhnologia metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 37-43. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.762

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)

Мезин И.Ю., Касаткина Е.Г., Понурко И.В., Кургузов С.А.

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА АКТИВАЦИЮ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПОРОШКЕ

**Аннотация.** В представленной работе холодная обработка давлением пористых порошковых металлических материалов рассматривается не только как формоизменяющая технологическая операция, но и как процесс, формирующий сам материал, его структуру и свойства. В работе рассмотрены физико-химические аспекты воздействия внешних силовых факторов на процессы формирования межчастичных контактов в порошковой среде. Анализируется активация контактных поверхностей металлических частиц на примере медного порошка, при формировании изделий из материалов на его основе в процессах холодной обработки давлением. В результате выполненных исследований предложены аналитические зависимости и построены графики, отражающие закономерности образования активных центров на контактных поверхностях деформируемых частиц медного порошка. С помощью полученных зависимостей также возможно прогнозирование прочностных свойств получаемых дискретных материалов в зависимости от степени деформации и параметров микросварки давлением при их получении. Установлено, что рост прочности порошкового материала может происходить не только в результате его уплотнения и упрочнения собственно материала-основы, но и в результате явления «схватывания», то есть наличия и реализации активных центров на пятнах действительного контакта порошковых частиц. Представленные результаты могут быть полезны и рекомендованы для анализа процессов взаимодействия порошковых частиц при обработке давлением некомпактных порошковых металлических сред.

**Ключевые слова:** порошковый материал, холодное пластическое деформирование, активация контактных поверхностей, активный центр, частота выхода дислокаций, плотность дислокаций, энергия выхода дислокации, относительная прочность

## Введение

Порошковые композиционные материалы в настоящее время нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, к числу которых можно отнести металлургию, машиностроение, приборостроение, производство инструмента и др. Известно, что свойства используемых порошковых материалов зависят не только от их состава и технологии производства, но и от качества соединения отдельных частиц порошковой среды. Традиционными операциями, в процессе которых образуется соединение между частицами, в порошковой металлургии считаются спекание и горячее прессование [1]. Однако исследования многих отечественных и зарубежных ученых показывают, что явления, протекающие при спекании и холодном прессовании, являются стадиями одного и того же процесса, процесса консолидации порошковой среды [2, 3, с. 10-25, 4-6]. В этом контексте холодная пластическая деформация пористых порошковых материалов рассматривается не только как формоизменяющая технологическая операция, а как еще и процесс, формирующий сам материал, его структуру и свойства. Г.В. Самсонов в своих работах отмечает, что «Процессы прессования порошков сводятся к контактному взаимодействию частиц, аналогичному холодной сварке...» [7]. Процесс образования соединения при сварке давлением рассматривается протекающим в три основные стадии [7-9]:

1) образование физического контакта;

- 2) активация контактных поверхностей;
- 3) объемное взаимодействие.

В рамках представленной работы активация контактных поверхностей порошковых частиц при обработке давлением рассматривается как одна из важных стадий формирования порошкового материала. В связи с этим теоретический анализ процессов активации контактной поверхности порошковой среды под действием прикладываемого внешнего силового воздействия представляется актуальным и представляет практический интерес для оценки формируемых прочностных свойств порошкового материала.

## Методы и условия проведения исследований

Изучение процессов активации контактной поверхности в порошковой среде под действием прикладываемого внешнего силового воздействия осуществлялось методом теоретического анализа с использованием основных положений широко апробированных теорий прессования и спекания металлических порошков [10, 11], обработки металлов давлением [12], совместной пластической деформации разных металлов [13], а также физико-химических закономерностей соединения металлов в твердой фазе при сварке давлением [7-9].

Расчетные эксперименты и тестовые расчеты проведены с использованием полученных в ходе теоретического исследования аналитических зависимостей и выполнены на примере медного порошка ПМС-1 по ГОСТ 4960-2017. При этом во внимание были приняты справочные данные о его химических, физических и технологических свойствах [14], а также физико-

химические и механические свойства меди марки М1 по ГОСТ 859-2014 [15]. Условия силового воздействия удовлетворяли соответствующим технологическим параметрам статического холодного прессования порошковой формовки в закрытой пресс-форме [16].

При анализе процессов активации контактных поверхностей учитывались следующие основные факторы [9]:

1. Величина энергии, выносимой каждой дислокацией в зону физического контакта частиц.

2. Распределение энергии вокруг дислокации при выходе ее на поверхность с учетом сил зеркального отображения.

3. Частота выхода дислокаций в зону физического контакта.

4. Величина энергетического барьера, при достижении или превышении которого в пределах отдельного активного центра осуществляется разрыв старых связей.

Полагая, что соединение частиц дискретной среды происходит точно так же, как и соединение двух компактных металлов в твердой фазе под действием силового воздействия, для анализа срачивания частиц порошков пластичных металлов целесообразно принять некоторые допущения, характерные для сварки давлением компактных металлов [17]:

1. Атомы соединяемых поверхностей твердых тел уже находятся в состоянии физического контакта.

2. Параметры сварки (температура и давление) таковы, что образование новых фаз не происходит.

3. Химическое взаимодействие происходит на активных центрах. Активным центром считается область радиуса  $r$  вокруг вышедшей на контактную поверхность дислокации, включающая очаг взаимодействия (зона радиусом  $\approx 15b$  [9] вокруг ядра дислокации) и зону релаксации энергии до уровня  $U$ .

4. Если в результате выхода дислокации в зону физического контакта активируется, по крайней мере,  $n$  атомов в области активного центра на одной из контактных поверхностей, достигая или превышая энергетический барьер  $U$ , то они могут образовывать химические связи с атомами другой поверхности. Если такие связи образованы, то они в дальнейшем не разрушаются.

5. Активные центры считаются независимыми, то есть вероятность возникновения  $i$ -го активного центра не зависит от возникновения остальных центров.

6. При постоянных параметрах  $T$  и  $P$  процесса каждый выход дислокаций вызывает активацию постоянного числа  $n$  атомов, приводящую к достижению энергии уровня  $U$  и выше.

7. Число активных центров, возникающих за конечный промежуток времени, конечно.

## Результаты и их обсуждение

В соответствии с принятыми допущениями следует считать, что при прессовании металлического порошка поверхности его частиц находятся в физическом контакте. Образование межатомных связей в прессуемой заготовке происходит на активных центрах поверхности частиц. Такими центрами могут являться участки поля упругих искажений, образованные вышедшими в зону физического контакта частиц отдельных дислокаций или их скоплений. В пределах указанных участков энергия возбужденных атомов соответствует уровню, достаточному для разрыва старых и образования новых межатомных связей [8, 9]. Активация поверхностей частиц порошка из пластичных металлов происходит в результате разрыва связей между атомами кристаллической решетки и атомами хемсорбированного кислорода. Указанный разрыв может происходить, в том числе и за счет энергии выходящих на поверхность дислокаций во время пластического деформирования [8, 9].

Энергия  $U_k$ , приобретаемая атомами поверхности пластичных частиц (в рассматриваемом случае - частиц медного порошка) в результате выхода дислокации, определяется как энергия искажения  $k$ -го ряда атомов вокруг ядра дислокации у поверхности с учетом сил зеркального отображения [18]:

$$U_k = \frac{2Q}{8\pi^2 a} \left[ 1 - \cos \frac{4\pi R_k}{b} \right], \quad (1)$$

величина смещения  $k$ -го ряда

$$R_k = -\frac{b}{2\pi} \arctg \left( \frac{r_k}{f} \right), \quad (2)$$

ширина поля дислокации

$$f = \frac{a}{2(1-\mu)}, \quad (3)$$

где  $Q$  – полная энергия дислокации, включающая энергию ядра и поля искажений вокруг нее;

$b$  – модуль вектора Бюргера, для меди  $b = 25,4 \cdot 10^{-9}$  м;

$r_k$  – расстояние в плоскости вектора Бюргера до рассматриваемого  $k$ -го ряда;

$\mu$  – коэффициент Пуассона, для меди  $\mu = 0,35$ ;

$a$  – постоянная решетки, для меди  $a = 2,55 \cdot 10^{-10}$  м.

Полную энергию дислокации, вышедшей на поверхность при деформировании медной частицы, можно определить следующим образом [19]:

$$Q = Gb^3, \quad (4)$$

где  $G$  – модуль сдвига, для меди  $G = 4000 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

Таким образом, полная энергия дислокации при деформировании медной частицы по результатам расчетов составила  $Q = 0,655 \cdot 10^{-12}$  Дж.

В табл. 1 представлены результаты расчетов энергетического барьера, который может быть преодолен атомным рядом частицы медного порошка в зависимости от расстояния до ядра дислокации.

Таблица 1

Расчетная величина энергетического барьера

$r_k \cdot 10^{-8}$ м	10	15	30	38,1
$U_k \cdot 10^{-5}$ , Дж	13,01195	13,011978	13,011994	13,011997

В соответствии с принятым допущением, активным центром является область вокруг вышедшей на поверхность деформируемой частицы дислокации. Поэтому частоту появления активных центров можно определить как частоту выхода дислокаций на поверхность контакта  $\lambda$ .

В качестве усредненного параметра частоты выхода дислокаций в зону соединения, применительно к рассматриваемому случаю, целесообразно рассматривать изменение плотности дислокаций  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0$  (где  $\rho_1$  и  $\rho_0$  – плотности дислокаций для двух фиксированных значений степени деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_0$  соответственно):

$$\rho_1 - \rho_0 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{Lb}, \quad (5)$$

где  $L$  – путь движения дислокации.

Путь движения дислокации до барьера и плотность дислокации в металле связаны между собой следующим соотношением [9]:

$$L = \rho^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

или

$$\lambda = \frac{\Delta\rho}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{Lb\Delta t}. \quad (7)$$

Величина  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$  в уравнении (7) принимается малой. Поэтому параметр  $\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$  выражает среднюю скорость деформации для выбранного интервала  $\Delta t$ . Переходя к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$ , можно получить следующее выражение:

$$\lambda = \frac{\dot{\varepsilon}}{Lb}, \quad (8)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации.

На рис. 1 представлен расчетный график зависимости плотности дислокаций  $\rho$  от фиксированных значений степени деформации частицы медного порошка  $\varepsilon$ .

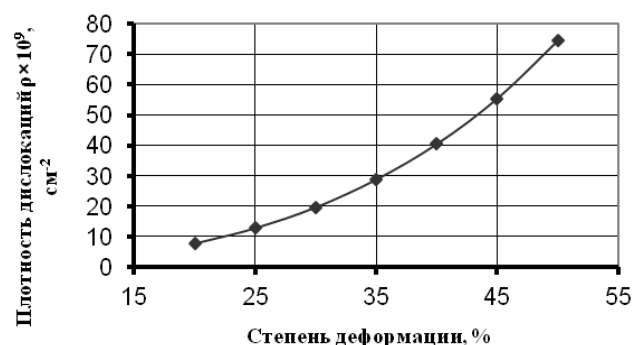


Рис. 1. Изменение плотности дислокаций для частиц медного порошка при пластическом деформировании

Применительно к условиям консолидации частиц медного порошка под воздействием внешних силовых факторов можно принять, что скорость деформации постоянная и определяется по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r}\right)}{t_c}, \quad (9)$$

где  $r_0$  – радиус медной частицы до деформации, мм;  
 $r$  – расстояние от центра частицы до поверхности контакта в момент схватывания атомов контактных поверхностей, мм;  
 $t_c$  – длительность схватывания атомов контактных поверхностей, с.

При обработке порошковых материалов давлением предполагается, что время взаимодействия совпадает со временем активации и не превышает 1-2 с. Принимая значения для параметра  $t_c$  равным 1, 1,5, 2 с и  $\varepsilon = 50\%$ , расчетные значения для скорости деформации составят соответственно  $\dot{\varepsilon}_1 = 0,693 \text{ с}^{-1}$ ,  $\dot{\varepsilon}_2 = 0,462 \text{ с}^{-1}$ ,  $\dot{\varepsilon}_3 = 0,346 \text{ с}^{-1}$ .

Используя полученные значения в формуле (7), можно получить расчетные значения  $\lambda$  при различных скоростях и степенях деформации. Результаты указанных расчетов представлены на рис. 2.

Как видно из полученных зависимостей, с увеличением скорости деформирования порошковых материалов возрастает число активных центров на поверхности частиц, что, в свою очередь, увеличивает площадь физико-химического взаимодействия частиц. Однако следует отметить, что в реальных условиях изготовления изделий из порошковых материалов под действием внешних силовых факторов практический интерес представляет прогнозная оценка прочностных характеристик получаемого материала. В контексте

настоящей работы прочность материала рассматривается как функции состояния межчастичных контактов, которые, в свою очередь, характеризуются числом активных центров на контактной поверхности в порошковой среде.

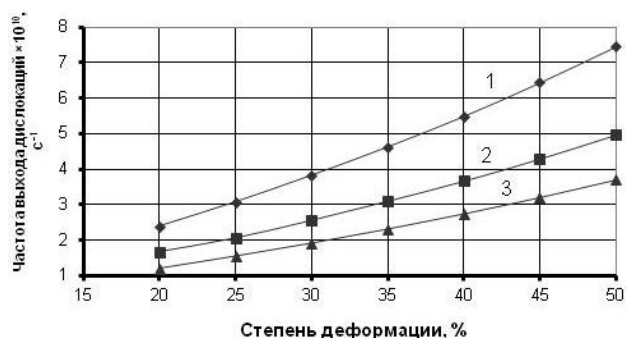


Рис. 2. Частота выхода дислокаций на поверхность частиц при пластической деформации (частота образования активных центров):  
 1 – скорость деформации 0,693  $\text{c}^{-1}$ ;  
 2 – скорость деформации 0,462  $\text{c}^{-1}$ ;  
 3 – скорость деформации 0,346  $\text{c}^{-1}$

Количественно оценить межчастичное взаимодействие возможно по величине относительной прочности соединения  $\sigma_\phi$ , используемой для аналогичной оценки при сварке давлением компактных материалов, которая в общем случае определяется выражением [9]

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma(t)}{\sigma_{\max}}, \quad (10)$$

где  $\sigma(t)$  – прочность соединения в текущий момент времени  $t$  ;

$\sigma_{\max}$  – прочность компактного материала.

В результате ряда математических преобразований и подстановок, выполненных в работе [4], получена аналитическая зависимость для оценки относительной прочности соединения контактных поверхностей взаимодействующих порошковых частиц, которую в первом приближении можно распространить на прочностную характеристику получаемого обработкой давлением порошкового материала:

$$\sigma_\phi = \frac{S \dot{\epsilon} t_c}{Lb}, \quad (11)$$

где  $S$  – площадь активного центра,  $\text{м}^2$ .

При условии, что скорость деформации есть величина постоянная, можно принять следующее выражение:  $\dot{\epsilon} t_c = \epsilon$ . Тогда уравнение (11) запишется в виде

$$\sigma_\phi = \frac{S \epsilon}{Lb}. \quad (12)$$

Принимая, что радиус активного центра составляет  $r \approx 15b$  [7], можно получить, что для частицы меди  $r = 38,1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ , а  $S = 45,58 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$ . Подстановка известных значений в полученные выражения при  $\epsilon = 20\%$  дает  $\sigma_\phi = 35$ . Это означает, что максимальная прочность соединения  $\sigma_\phi = 1$  достигается при значительно меньших деформациях, а это при реальных условиях обработки порошковых материалов давлением невозможно. Поэтому в формулу (12) целесообразно ввести коэффициент  $B$ , предложенный в работе [8] и зависящий от условий образования соединения:

$$\sigma_\phi = \frac{BS \epsilon}{Lb}. \quad (13)$$

При обработке порошковых материалов  $B$  можно определить исходя из того, что относительная прочность порошковых формовок достигает значений 0,7–0,9, а относительная деформация для условий прессования в закрытой пресс-форме – 50%, тогда  $B = 2,6 \cdot 10^{-3}$ . На рис. 3 представлена оценочная зависимость относительной прочности порошкового материала при различных значениях степени деформации, рассчитанная по формуле (13).

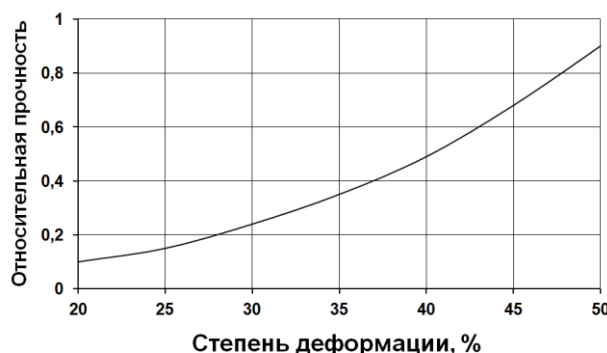


Рис. 3. Зависимость относительной прочности соединения частиц медного порошка от степени деформации

Характер полученных аналитических выражений и графических зависимостей подтверждает развивающиеся представления о ключевой роли деформационно-силового воздействия в оценке контактных межчастичных взаимодействий. С помощью полученного уравнения (13) возможно прогнозирование прочностных свойств получаемых дискретных материалов в зависимости от степени деформации и параметров микросварки давлением, формирующихся при их получении.

### Заключение

Таким образом, при рассмотрении вопроса о соединении порошковых материалов под действием внешних силовых факторов вполне возможно приме-

нение теоретических положений, разработанных для соединения компактных материалов давлением. Одним из ключевых моментов этих положений является образование активных центров взаимодействия на контактных поверхностях деформируемых частиц. Для этого необходимо учитывать особенности деформирования частиц, имеющих разнообразные форму и размеры и находящихся в общей массе прессовки. В ходе работы установлено, что рост прочности порошкового материала может происходить не только в результате его уплотнения под действием гидростатического давления и упрочнения собственно материала-основы, но и в результате явления «схватывания», и предопределяться наличием и реализацией активных центров физико-химического взаимодействия на пятнах действительного контакта взаимодействующих порошковых частиц. Представленные в настоящей статье результаты аналитического исследования и расчетов могут быть полезны и рекомендованы для анализа процессов взаимодействия порошковых частиц при обработке давлением порошковых металлических сред.

#### Список источников

1. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы: пер. с нем./ Б. Финдайзен, Э. Фридрих, И. Калнич и др.; под ред. В. Шатта. М.: Металлургия, 1983. 520 с.
2. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V.E., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. // Vestnik of Novosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). С. 67-69.
3. Самсонов Г.В. Электронная теория спекания // Теория и технология спекания. Киев: Наук. думка, 1974.
4. Мезин И.Ю. Формирование металлоизделий из структурно-неоднородных материалов: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 155 с.
5. Gutmanas E.Y. Cold sintering under high pressure mechanisms and application // P/M-82 Eur. Int. Milano, 1982. P. 627-634.
6. Активация твердофазного диффузионного взаимодействия при формировании сварных соединений: монография / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, П.А. Саблин, В.В. Григорьев. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 368 с. Текст: электронный. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903606>
7. Красулин Ю.Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971. 119 с.
8. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 271 с.
9. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
10. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
11. Ивенсен В.А. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. М.: Металлургия, 1985. 247 с.
12. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. 2-е изд., перераб. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
13. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Металлургия, 1964. 271 с.
14. Ничипоренко О.С., Помосов А.В., Набойниченко С.С. Порошки меди и ее сплавов. Проблемы цветной металлургии. М.: Металлургия, 1988. 206 с.
15. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 360 с.
16. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. М.: Металлургия, 1987. 729 с.
17. Шоршов М.Х., Каракозов Э.С., Мякишев Ю.В. Особенности взаимодействия между соединяемыми металлами под влиянием повышенной температуры и давления // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 6. С. 68-74.
18. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 584 с.
19. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 267 с.

#### 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.

**Кургузов Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ksaask@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**EFFECT OF COLD PRESSURE WORKING ON THE ACTIVATION OF CONTACT SURFACES IN METAL POWDER**

**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.

**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.

**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.

**Kurguzov Sergej A.** – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Machines and technologies for pressure processing and mechanical engineering» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ksaask@mail.ru.

**Abstract.** In presented paper, cold plastic deforming of porous powder metal materials is considered not only as a changes in shape product technological operation, but also as a process that shapes the material itself, its structure, and properties. The paper examines the physicochemical aspects of the influence of external force factors on the processes of interparticle contact formation in a powder medium. The activation of the contact surfaces of metal particles is analyzed using copper powder as an example, during the formation of products from materials based on it during cold plastic deforming processes. As a result of the completed research, analytical dependencies were proposed and graphs were constructed reflecting the patterns of formation of active centers on the contact surfaces of deformed copper powder particles. Using the obtained dependencies, it is also possible to predict the strength properties of the resulting discrete materials depending on the degree of deformation and the parameters of pressure microwelding during their production. It was established that an increase in the strength of a powder material can occur not only as a result of its compaction and hardening of the base material itself, but also as a result of the phenomenon of solid-phase microwelding, i.e. The presence and realization of active centers at the actual contact spots of powder particles. The presented results can be useful and recommended for analyzing the interaction processes of powder particles during pressure processing of non-compact powder metal materials.

**Keywords:** powder material, cold plastic deformation, activation of contact surfaces, active center, dislocation exit on contact surface frequency, dislocation density, dislocation exit on contact surface energy, relative strength

**References**

1. Powder metallurgy. Sintered and composite materials / B. Findaisen, E. Friedrich, I. Kalnich, et al.; Ed. by V. Shatt: Translated from German. Moscow: Metallurgy, 1983. 520 p.
2. Metallurgy qualimetry theory design and development. / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V.E., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 67-69.
3. Samsonov G.V. Electronic theory of sintering // Theory and technology of sintering: Kyiv: Nauk. dumka, 1974. Pp. 10-25.
4. Mezin I.Yu. Formation of metal products from structurally heterogeneous materials: Monograph. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nosov, 2000. 155 p.
5. Gutmanas E. Y. Cold sintering under high pressure mechanisms and application // P/M-82 Eur. Int. Milano, 1982, pp. 627-634.
6. Activation of solid-phase diffusion interaction during the formation of welded joints: monograph / V.I. Muravyov, P. V. Bakhmatov, P. A. Sablin, V. V. Grigoriev. Moscow; Volgda: Infra-Engineering, 2022. 368 p. Text: electronic. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903606>
7. Krasulin Yu.L. Interaction of a metal with a semiconductor in the solid phase. Moscow: Nauka, 1971. 119 p.
8. Karakozov E.S. Welding of metals by pressure. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 271 p.
9. Karakozov E.S. Connection of metals in the solid phase. Moscow: Metallurgy, 1976. 264 p.
10. Balshin M. Yu. Scientific foundations of powder metallurgy and fiber metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1972. 336 p.
11. Ivensen V.A. Phenomenology of sintering and some theoretical issues. Moscow: Metallurgy, 1985. 247 p.
12. Gromov N. P. Theory of Processing of metal under pressure. 2nd ed., revised. Moscow: Metallurgy, 1978. 360 p.
13. Arkulis G.E. Joint plastic deformation of different metals. Moscow: Metallurgy, 1964. 271 p.
14. Nichiporenko O.S., Pomosov A.V., Naboynichenko S.S. Powders of copper and its alloys. Problems of non-ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1988. 206 p.

15. Osintsev O.E., Fedorov V.N. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: reference book. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Innovative engineering, 2016. 360 p.
16. Powder metallurgy and spray coatings: Textbook for universities / V. N. Antsiferov, G. V. Bobrov, L. K. Druzhinin et al.; edited by B.S. Mitin. Moscow: Metallurgy, 1987. 729 p.
17. Shorshov M.Kh., Karakozov E.S., Myakishev Yu.V. Features of interaction between joined metals under the influence of elevated temperature and pressure. *Physics and Chemistry of Materials Processing*, 1971, no. 6, pp. 68-74.
18. Van Buren. Defects in Crystals. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1962. 584 p.
19. Cottrell A. H. Dislocations and plastic flow in crystals. Moscow, Metallurgical Publishing House, 1958. 267 p.

---

Ссылка на статью:

Влияние холодной обработки давлением на активацию контактных поверхностей в металлическом порошке / Мезин И.Ю., Касаткина Е.Г., Понурко И.В., Кургузов С.А. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 44-50. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)

Mezin I.Yu., Kasatkina E.G., Ponurko I.V., Kurguzov S.A. Effect of cold pressure working on the activation of contact surfaces in metal powder. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 44-50. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)

# ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 669.1

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-51-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-51-56)

Анищенко А.С., Присяжный А.Г., Лаврова Е.В.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЪЕМНЫХ КОРПУСОВ ПРОКАТНО-СВАРНЫХ ТЕЛЕЖЕК МАШИН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА И ОКАТЫШЕЙ

**Аннотация.** Показаны преимущества и недостатки тележек конвейерных машин для производства агломерата и окатышей, в которых литой корпус заменен на прокатно-сварной. Статья ставит целью разработку конструкций тележек, снижающих или устраняющих деформацию корпусных элементов. Проанализированы существующие технические решения в этом направлении. Предложены разъемные конструкции спекательных и обжиговых тележек с прокатно-сварным корпусом, обеспечивающие снижение прогиба корпусов при эксплуатации за счет многократных переворачиваний корпусов прогибом вверх по достижении ими критических деформаций. Описаны конструкции узлов тележек, обеспечивающие повышение жесткости крепления корпусов к ходовым частям тележек, а также допускающие линейное расширение корпусов при нагреве без потери устойчивости и прогиба в направлении вакуум-камер.

**Ключевые слова:** тележка, корпус, прогиб, балка, полка, пружина, разъем, расширение

### Введение

Производство агломерата и окатышей сопряжено с тяжелыми условиями эксплуатации тележек конвейерных машин. Корпуса тележек в процессе работы подвержены знакопеременным температурно-силовым воздействиям [1], что приводит к их пластической деформации на начальной стадии эксплуатации, а затем высокотемпературной ползучести. Возникает прогиб корпусов, который может достигнуть критической величины, определяемой параметрами вакуум-камер, и привести к аварийным ситуациям на конвейере. В работах [2, 3] показано, что прогиб также является вынужденной потерей устойчивости конструкции корпуса вследствие его термического расширения и невозможности увеличить ширину из-за наличия роликов, опирающихся ребрами в головки рельсов конвейера.

Критический прогиб корпусов тележек является одной и наиболее серьезных аварийных ситуаций на фабриках по обогащению железных руд. В связи с этим линии с обжиговыми и агломерационными тележками оборудуются приборами для превентивного предотвращения больших прогибов корпусов, несмотря на то, что при этом увеличивается стоимость линий и затраты на их обслуживание. К примеру, конвейерные линии «Metso» структурного подразделения фирмы «Outotec» (Финляндия) оснащены специальными системами «Metso Pallet Car Control Condition Monitoring System», использующими для мониторинга поврежденных тележек бесконтактные датчики и видеокамеры [4]. Существуют также иные разработки на базе алгоритмов компьютерного зрения, искусственных нейронных сетей для анализа повреждений по их изображению [5-7].

Известно достаточно много конструкторских решений по снижению прогиба корпусов, но практика показывает, что они лишь частично устраняют проблему, в связи с чем существует потребность в дальнейших разработках в этом направлении.

Цель работы – создание новых конструкций прокатно-сварных корпусов тележек агломерационных и обжиговых машин, обеспечивающих снижение прогиба корпусов в процессе их эксплуатации.

### Результаты исследования и их обсуждение

Спекательные тележки первых агломерационных машин изготавливали сваркой отдельных частей из проката. Низкое качество сварных швов вынудило потребителей отказаться от сварных конструкций, и долгое время в конструкциях тележек применяли литые стали или чугуны. В 90-х годах прошлого столетия предприятие «Азовмашпром» (г. Мариуполь) возобновило выпуск прокатно-сварных спекательных тележек из сталей для судостроения 09Г2С, St.52-3, обеспечив качественную сварку конструкций. Прокатно-сварные тележки (патенты на полезную модель, далее сокращенно – ППМ, UA №605, 2252, 3354, 3422, RU №39389) при меньшей массе показали более высокую стойкость к прогарам и прогибу. Выбор более прочных сталей позволил либо увеличить срок службы корпусов, либо уменьшить поперечные сечения их несущих элементов, то есть изготовить корпус еще более легкими.

Тележки «Азовмашпрома» стали успешно конкурировать со своими литыми аналогами, поскольку литой металл в сравнении с деформированным имел большую склонность к прогарам, а механические свойства обуславливали необходимость в увеличении массы элементов корпуса. Более тяжелые тележки снижали энергетические показатели работы конвейерных машин.

Однако несмотря на определенные преимущества прокатно-сварных конструкций тележек, проблема прогиба корпусов заменой литого металла на деформированный не устранилась.

Наиболее распространенные способы снижения прогиба корпусов тележек предполагают уменьшение влияния температурного разогрева на элементы корпуса и увеличение их несущей способности. Нестандартное решение проблемы было предложено германской фирмой «Lurgi Metallurgie» (с 2007 года входит в состав финской фирмы «Outotec»), применившей принцип научного творчества «обратить вред в пользу». Она спроектировала тележки в виде отдельной литой рамы, крепящейся разъемным соединением к вертикальным ригелям с установленными в них роликами, осями, уплотнениями и боковыми стенками [8] (патент ФРГ №209479). В процессе эксплуатации тележек по достижении критического прогиба рамный корпус отсоединяли от остальных узлов тележки, переворачивали и прогибом вверх вновь присоединяли к ригелям. При дальнейшей работе полки несущих балок корпуса вначале приобретали нулевую кривизну, а затем прогибались в противоположную сторону, то есть срок службы корпуса до последующего переворачивания увеличивался почти вдвое. Таким образом, негативное механическое и тепловое воздействие на тележку было частично обращено для получения положительного результата.

Нами на предприятии «Азовмашпром» разработана подобная конструкция корпуса тележки (рис. 1) применительно к прокатно-сварному варианту изготовления [ППИМ UA № 2253].

Тележка содержит корпус, включающий две крайние и три средние несущие балки, которые состоят из одинаковых вертикальных стенок 1 и двух горизонтальных полок (поз. 2 – для крайних, поз. 3 – для средних балок). В прорезах между несущими балками перпендикулярно к ним расположены ребра жесткости 4.

Торцы несущих балок соединены сваркой с перпендикулярно расположенными к ним ригелями 5, которые, в свою очередь, соединены болтами со смежными боковинами 6. Для этого в ригелях 5 и боковинах 6 выполнены друг против друга отверстия 7 (рис. 1, в, г).

Если несущей способности болтов будет недостаточно, в смежных поверхностях боковин 6 и ригелей 5 выполняются горизонтальные пазы 8 (рис. 1, г), в которые вставляют, к примеру, шпонки.

На базе корпуса происходит сборка спекательной тележки. Для этого в отверстия 9 боковин 6 устанавливают роликовые узлы, сверху к боковинам прикрепляют съемные борты 10, поверх несущих балок устанавливают колосники, а снизу несущие балки и ригели 5 соединяют с узлом уплотнения.

Корпус эксплуатируют как составную часть спекательной тележки. После загрузки шихты на колосники тележка от привода агломашины перемещается по рельсам к зоне спекания, где горячая шихта превращается в агломерат при непрерывном отсасывании воздуха от слоя шихты вакуум-камерами. Далее тележка опрокидывается и возвращается в исходное положение.

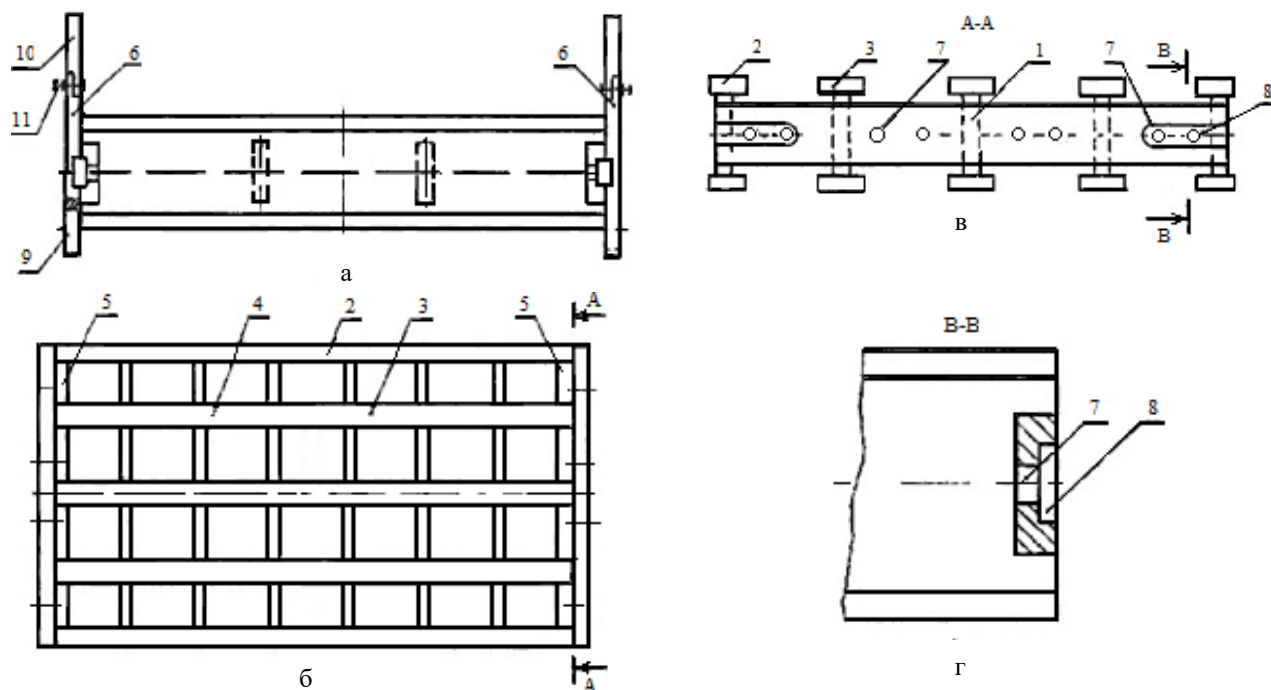


Рис. 1. Прокатно-сварная спекательная тележка с переворачиваемым корпусом

По достижении максимально допустимой величины прогиба тележку снимают с конвейера и демонтируют. Освобожденный от других деталей и узлов корпус переворачивают на  $180^\circ$  относительно горизонтальной оси и вновь соединяют с этими деталями и узлами.

После установки тележки на конвейер агломашины расстояние между нижней кромкой несущих балок и уровнем вакуум-камер становится больше номинального, так как корпус в этот момент имеет прогиб вверх, то есть в противоположную от вакуум-камер сторону.

Повторный цикл эксплуатации корпуса вновь сопровождается деформацией его несущих балок в направлении к вакуум-камерам. При этом вначале остаточный прогиб, образованный на предыдущем цикле эксплуатации уменьшается до нуля. Далее корпус продолжает прогибаться в направлении к вакуум-камерам. По достижении критических размеров остаточного прогиба тележку вновь снимают с конвейера, корпус переворачивают на  $180^\circ$ , обеспечивая работоспособность тележки на еще одном цикле эксплуатации.

Таким образом, вне зависимости от того, является ли корпус литым или прокатно-сварным, срок его эксплуатации зависит от числа переворачиваний на  $180^\circ$ . Если же корпус будет выполнен из проката, общий срок его эксплуатации еще более увеличится за счет большего времени работы в промежутках между переворачиваниями корпуса. Это обусловлено более высоким пределом циклической ползучести для катаного металла в сравнении с литым, то есть меньшей деформацией прокатно-сварного корпуса в единицу времени.

Корпуса данной конструкции эксплуатировались на ГОКах Кривого Рога. В результате были выявлены следующие недостатки корпуса и тележки в целом:

- ригели 5 и боковины 6 соединяются между собой с помощью болтов, установленных в соосные отверстия, расположенные в один ряд и только в центральной части ригелей 5; в связи с этим ригели 5 при прогибе корпуса существенно отклоняются в своей верхней части от боковин 6, возникает промежуток, в который высыпается шихта и нарушает герметичность пространства под корпусом; в результате имеют место потери шихты, а также неэффективная работа вакуум-камер;

- ригели 5 и боковины 6 не имеют центрирующих посадочных поверхностей для обеспечения соосности отверстий для соединительных болтов, это ухудшает условия ремонтных работ и увеличивает срок переналадки тележек; кроме того, из-за отсутствия этих поверхностей изгибающий момент от прогиба корпуса принимают на себя только болты, что дополнительно ухудшает жесткость соединения ригелей 5 с боковинами 6;

- крепление ригелей 5 к боковинам 6 даже при частичном изнашивании болтов или отверстий обуслов-

ливает подсос холодного воздуха с противоположной относительно ригелей 5 стороны боковин 6 в полость между корпусом и вакуум-камерами, что уменьшает производительность конвейерной машины и ухудшает качество окатышей или агломерата.

Для устранения выявленных недостатков нами спроектированы усовершенствованные конструкции тележек конвейерных машин с разъемными переворачиваемыми корпусами.

Тележка с повышенной жесткостью соединения корпуса с ходовой частью показана на рис. 2, а-г. Она имеет рамный корпус 1, присоединенный с обеих сторон к двум боковинам 2. Поверх боковин 2 установлены съемные борты 3. Боковины 2 консольно установлены на ролики 4 с помощью осей 5. В нижней части корпуса 1 с обеих сторон установлены уплотнения 6. Корпус 1 имеет ребра жесткости 7, расположенные между балками, состоящими из горизонтальных полок 8 и вертикальных стенок 9. Балки своими торцами приварены к ригелям 11. Ригели 11 соединены с боковинами 2 с помощью болтов 12 (рис. 2, г). Болты 12 установлены в соосных отверстиях 10 ригелей 11 и стоек 13, являющихся частью боковин 2. Отверстия 10 выполнены в два ряда по высоте ригелей 11 на одинаковом расстоянии от середины высоты ригелей 11. Оси каждого из рядов отверстий 10 находятся в одной горизонтальной плоскости.

В стойках 13 боковин 2 на смежных с ригелями 11 поверхностях совместно с отверстиями 10 изготовлены пазы 15. В пазы 15 посажены выступы 14, выполненные на поверхностях ригелей 11, то есть оси выступов 14 совпадают с осями отверстий 10 и пазов 15.

В связи с тем, что расположенные в два ряда болты 12 крепят ригели 11 к боковинам 2 (стенкам 13) на меньшем в сравнении с ППМ UA №2253 расстоянии от верхнего торца ригелей 11, прогиб корпуса 1 при таких же значениях термических напряжений и усилий от собственного веса, колосников и шихты обуславливает возникновение меньших изгибающих моментов, действующих на болты 12.

Расположение выступов 14 на ригелях 11 в пазах 15 боковин 2 обеспечивает создание дополнительных несущих поверхностей, воспринимающих поперечные усилия и изгибающие моменты от прогиба корпуса 1. Такими поверхностями являются боковые поверхности пазов 15 и выступов 14.

Уменьшение изгибающих моментов, действующих на болты 12, а также увеличение несущих поверхностей соединения корпуса 1 с боковинами 2 увеличивает жесткость конструкции тележки.

Прогиб корпуса 1 не сопровождается возникновением промежутка между боковинами 2 (стенками 13) и ригелями 11 в их верхней части. Отсутствие промежутка обеспечивает стабильную работу вакуум-камер, снижает просыпание шихты в полости вакуум-камер, увеличивает срок эксплуатации тележек, в частности ригелей 11 и боковин 2 [9].

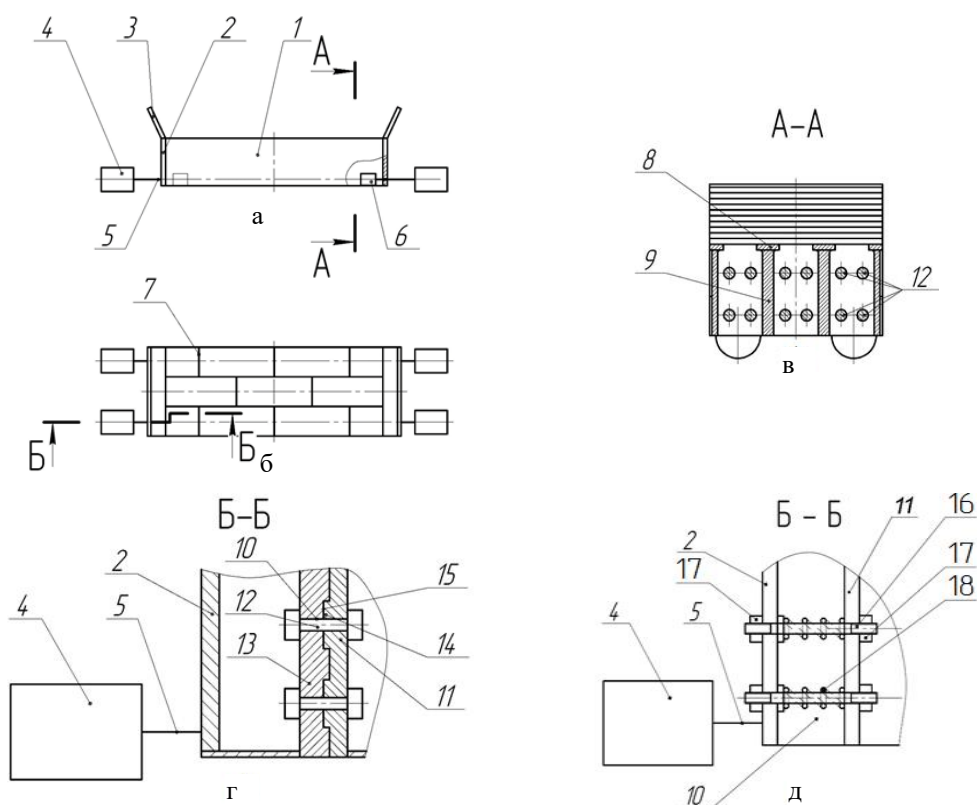


Рис. 2. Усовершенствованные спекательные тележки с переворачиваемым корпусом

Наличие выступов 14 и пазов 15 упрощает операции крепления корпусов 1 к боковинам 2, поскольку проще сначала вставить выступы 14 в пазы 15, а уже затем крепить болтами 12 боковины 2 к ригелям 11.

Тележка, в конструкции которой предусмотрена компенсация теплового расширения корпуса, представлена на рис. 2, а-в, д. В отличие от узла крепления корпуса 1 к ходовой части тележки, показанного на рис. 2, г, ригели 11 соединены с боковинами 2 разъемными соединениями, допускающими перемещение ригелей 11 относительно боковин 2 вдоль осей 5 роликов 4 (рис. 2, д). Для этого в боковинах 2 и ригелях 11 выполнены соосные отверстия, в которые установлены шпильки 16. На торцах шпилек 16 накручены гайки 17, а между боковиной 2 и ригелем 11 на шпильки 12 установлены пружины 18.

В процессе эксплуатации под влиянием высоких температур спекания или отжига корпус 1 тележки нагревается и расширяется. Если этому мешают реборды роликов 4, то балки корпуса 1 частично деформируются в направлении вакуум-камер, следствием чего является быстрый остаточный прогиб корпуса 1, обуславливающий уменьшение зазоров между колосниками, то есть снижение газопроницаемости слоя шихты [10]. Наличие пружин 18 обеспечивает расширение балок корпуса 1 в направлении боковин 2 за счет сжатия этих пружин 18 без прогиба балок в направлении вакуум-камер. Таким образом, макси-

мально допустимая величина прогиба балок достигается за большой срок эксплуатации.

### Выводы

1. Показаны преимущества и недостатки тележек конвейерных машин для производства агломерата и окатышей, в которых литой корпус заменен на прокатно-сварной.

2. Предложены разъемные конструкции спекательных и обжиговых тележек с прокатно-сварным корпусом, обеспечивающие снижение прогиба корпусов при эксплуатации за счет многократных переворачиваний корпусов прогибом вверх по достижении ими критических деформаций.

3. Описаны конструкции узлов тележек, обеспечивающие повышение жесткости крепления корпусов к ходовым частям тележек, а также позволяющие линейное расширение корпусов при нагреве без потери устойчивости и прогиба в направлении вакуум-камер.

### Список источников

1. Прибыкин Д.Л. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. В 3-х ч. Ч. 1. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов. М.: Металлургия, 1988. 391с.
2. Anishchenko A., Kukhar V., Oginskiy I. Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering // Machines

- Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). Pp. 342-353.
3. Анищенко А.С., Тахтамыш И.В., Тарасюк Л.И. Усовершенствование конструкций роликовых узлов спекательных и обжиговых тележек // Вестник ПГТУ. Серия «Технические науки». 2020. Вып. 40. С. 104-113.
  4. Metso outotec. Digital solution for iron ore pelletizing plants // Metso corporation. 2023. 8 p. www.metso.com.
  5. Dubsy Jan. Optical analysis of pellet car damages. Prague, IPSS. 2019. 43 p.
  6. Puramini Ahmad. An online System for Detecting Bending in a Pallet Car // Int. Journ. of Computer Applications. 2016. October. Vol. 152. No. 10. Pp. 1-5.
  7. Нечаев А.А., Поляков Р.Н. Обзор методов обработки изображений для детектирования объектов с помощью искусственных нейронных сетей. Ч. 1 // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. №5. С.39-59.
  8. Арист Л.М., Тылкин М.А. Модернизация и долговечность агломерационного и доменного оборудования. М.: Metallurgia, 1973. 448 с.
  9. Metallurgical investigation into the failure of an iron ore sintering car pallet / P.P. Sarkar, S.K. Dhua, S. Dhara, S.K. De // Engineering Failure Analysis. 2016. May. Vol. 63. Pp. 31-42.
  10. Рудь Ю.С., Кучер В.Г., Белоножка В.Ю. Анализ конструкций и повышение технического уровня колосниковых решеток агломерационных и обжиговых машин // Вестник Криворожского национального университета. 2019. Вып. 48. С. 94-99.

### Сведения об авторах

**Анищенко Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики и общеобразовательных дисциплин, Приазовский государственный технический университет - филиал НИУ «Московский государственный строительный университет», Мариуполь, Донецкая Народная Республика, Россия. E-mail: anichsh@yandex.ru

**Присяжный Андрей Григорьевич** – кандидат технических наук, заместитель директора, Приазовский государственный технический университет - филиал НИУ «Московский государственный строительный университет», Мариуполь, Донецкая Народная Республика, Россия. E-mail: andrejprisyazhnyi@yandex.ru

**Лаврова Елена Владимировна** – доктор технических наук, директор Учебно-научного института информационных технологий, Приазовский государственный технический университет - филиал НИУ «Московский государственный строительный университет», Мариуполь, Донецкая Народная Республика, Россия. E-mail: UNIT-PSTU@yandex.ru

---



---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---



---

#### OPTIMIZATION OF DESIGN OF SPLIT HOUSINGS OF ROLLING-WELDED CARTS OF MACHINES FOR PRODUCING AGGLOMERATE AND PELLETS

**Anishchenko Alexander S.** – Candidate of Technical Sciences, senior scientific, Associate Professor, Head of the Department, Pryazovsky State Technical University – branch of the Moscow State University of Civil Engineering Research University, Mariupol, Donetsk People's Republic, Russia. E-mail: anichsh@yandex.ru.

**Prisyazhnyi Andrey G.** – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the branch, Pryazovsky State Technical University – branch of the Moscow State University of Civil Engineering Research University, Mariupol, Donetsk People's Republic, Russia. E-mail: andrejprisyazhnyj@yandex.ru.

**Lavrova Elena V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Information Technology, Pryazovsky State Technical University – branch of the Moscow State University of Civil Engineering Research University, Mariupol, Donetsk People's Republic, Russia. E-mail: lavrova e.e.@yandex.ru,

**Abstract.** Detachable designs of sintering and firing carts with a rolled-welded body have been proposed, ensuring a reduction in the deflection of the bodies during operation due to repeated inversions of the bodies with the deflection upward when they reach critical deformations. The designs of car assemblies are described that provide increased rigidity of fastening the housings to the running parts of the cars, as well as allowing linear expansion of the housings when heated without loss of stability and deflection in the direction of the vacuum chambers..

**Keywords:** car, body, deflection, beam, shelf, spring, connector, expansion

**References**

1. Pribykin D.L. Mechanical equipment of non-ferrous metal-lurgy plants in 3 parts. Part 1. Mechanical equipment for the preparation of charge materials. M.: Metallurgy, 1988. 391 p.
2. Anishchenko A., Kukhar V., Oginskiy I. Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering. Machines Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). P.342-353.
3. Anishchenko A.S., Takhtamych I.V., Tarasiuk L.I. Improvement of the designs of roller units of sintering and firing carts // Vestnik Pryazovskogo Gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, serya Tekhnicheskie nauki [Vestnik of Pryazovsky State Technical University, Technical Sciences series]. 2020, issue 40, pp. 104-113.
4. Metso outotec. Digital solution for iron ore pelletizing plants. Metso corporation. 2023. 8 p. www.metso.com.
5. Dubsy Jan. Optical analysis of pellet car damages. Prague, IPSS. 2019. 43 p.
6. Puramini Ahmad. An online System for Detecting Bending in a Pallet Car. Int. Journ. of Computer Applications. 2016. October, vol. 152, no. 10, pp. 1-5.
7. Nechaev A.A., Polyakov R.N. A Review of Image Processing Methods for Object Detection Using Artificial Neural Networks. Part 1 // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology [Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii]. 2025, no. 5, pp. 39-59.
8. Arist L.M., Tylkin M.A. Modernization and durability of sintering and blast furnace equipment. M.: Metallurgy, 1973. 448 p.
9. Metallurgical investigation into the failure of an iron ore sintering car pallet / P.P. Sarkar, S.K. Dhua, S. Dhara, S.K. De // Engineering Failure Analysis. 2016. May, vol. 63, pp. 31-42.
10. Rud Yu.S., Kucher V.G., Belonozhko V.Yu. Analysis of designs and improvement of the technical level of grate bars of sintering and roasting machines // Vestnik Kryvorozhskogo natsionalnogo universiteta [Vestnik of Kryvyi Rih National University]. 2019, issue 48, pp. 94-99.

---

Ссылка на статью:

Анищенко А.С., Присяжный А.Г., Лаврова Е.В. Оптимизация конструкций разъемных корпусов прокатно-сварных тележек машин для производства агломерата и окатышей // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 51-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-51-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-51-56)

Anishchenko A.S., Prisyazhnyi A.G., Lavrova E.V. Optimization of design of split housings of rolling-welded carts of machines for producing agglomerate and pellets. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 51-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-51-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-51-56)

# ЭКОНОМИКА В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 658.5

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-57-64](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-57-64)

Пономарева О.С., Назарова О.Л., Майорова Т.В., Решетова И.В., Козлов Р.А.

## АВТОНОМНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**Аннотация.** В результате анализа проблемы внедрения автономного обслуживания на металлургических предприятиях, была поставлена цель определить конкретные действия, которые рассматриваются как неотъемлемая часть реализации любой программы автономного обслуживания. Автономное обслуживание оборудования позволяет сократить внеплановые простои оборудования, увеличить межремонтный период и в целом улучшить показатели надежности оборудования, кроме этого, оно повышает вовлеченность сотрудников, предоставляя им обязанности, которые оказывают реальное и осязаемое влияние на успех бизнеса. Проанализирована основная идея автономного обслуживания. Определена его цель как выявление дефектов на ранней стадии, предотвращения ускоренного износа оборудования и поддержания его в работоспособном состоянии, а также обучение операторов самостоятельно обслуживать свое оборудование, выполняя ежедневную проверку, смазку, некоторые виды ремонтов, а также создание стандартов обслуживания. Авторами выделено 7 шагов автономного обслуживания, направленных на повышение производительности оператора и оборудования. Выделены этапы и конкретные действия внедрения автономного обслуживания оборудования. Рассмотрен опыт внедрения автономного обслуживания оборудования на предприятиях металлургической отрасли. Выявлено, что в результате внедрения автономного обслуживания снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций, что, в свою очередь, способствует увеличению межремонтного периода, высвобождению обслуживающего персонала для решения более сложных задач технического обслуживания. Возможность выявления проблем до того, как они приведут к критическим отказам оборудования, обеспечение надлежащей очистки и смазки оборудования приводят не только к повышению общей безопасности, но и помогают повысить эффективность оборудования и общую производительность. Потенциальный технический эффект от внедрения организационно-технических решений по внедрению автономного обслуживания оборудования складывается за счет сокращения внеплановых простоев оборудования, сокращения текущих затрат на ремонты. Внедрение автономного обслуживания приводит как к повышению операционной эффективности деятельности предприятия, так и к развитию культуры профилактики, при которой операторы берут на себя ответственность за свое оборудование.

**Ключевые слова:** бережливое производство, автономное обслуживание, операционная эффективность, производительность труда, 5S, эффективность производства

Операционная эффективность является важным аспектом любого успешного бизнеса. Одним из путей повышения операционной эффективности является внедрение инструментов бережливого производства. Важно, что при этом оптимизация внутренних ресурсов проходит без дополнительных инвестиций со стороны бизнеса, а за счет устранения простоев и потерь, а главное, растет ценность труда обычного работника. Именно такую задачу, повышение производительности труда через повышение операционной эффективности, поставил перед промышленными предприятиями Президент России. Благодаря росту эффективности труда, без глобальных инвестиций в технологические преобразования предприятие сможет повысить операционную эффективность производства. Автономное обслуживание, или АО, является частью концепции бережливого производства Total Productive Maintenance (TPM), направленных на устойчивое повышение производительности предприятия. В современных условиях, когда обеспечение высокого качества, гибкости, скорости и низких производственных затрат является сложной, многогранной задачей, внедрение автономного обслуживания становится

жизненно важной стратегией. Основная идея автономного обслуживания заключается в том, что сами операторы оборудования могут выполнять простые технические работы по его обслуживанию и ремонту, не прибегая к помощи специалистов по обслуживанию. Такой подход позволяет сократить время простоя оборудования, улучшить его надежность и продлить срок службы, а также повышает вовлеченность сотрудников, предоставляя им обязанности, которые оказывают реальное и осязаемое влияние на успех бизнеса. Ключевыми принципами автономного обслуживания оборудования являются проактивный, то есть действующий на опережение, подход к техническому обслуживанию, оперативное реагирование на возможные проблемы и постоянное повышение квалификации персонала. Операторы оборудования обучаются основам технического обслуживания и проведения превентивных мероприятий, что позволяет им самостоятельно обнаруживать и устранять незначительные неисправности до того, как они приведут к серьезным поломкам. При этом важно поддерживать постоянное обновление знаний и навыков персонала, а также создать благоприятную атмосферу для инициативы и саморазвития сотрудников [1-3].

© Пономарева О.С., Назарова О.Л., Майорова Т.В., Решетова И.В., Козлов Р.А., 2026

Автономное обслуживание оборудования является направлением, которое по своей сути является применением инструмента 5S по отношению к определенному оборудованию, что подтверждается частичным совпадением шагов 5S с шагами автономного обслуживания [4]. Основная задача при внедрении автономного обслуживания – выделить те параметры обслуживания оборудования, которые мог бы выполнять сам работник и передать их ему. Можно выделить 7 шагов автономного обслуживания, направленных на повышение производительности оператора и оборудования:

1. Очистка и контроль. Первым шагом является регулярная очистка и проверка оборудования. Здесь чистка означает не просто удаление грязи с оборудования. Это позволяет заметить незначительные дефекты или отклонения во время чистки оборудования. Проверки, выполняемые во время очистки, помогают выявить потенциальные проблемы в оборудовании на ранней стадии. Таким образом, оператор избегает непредвиденных неисправностей.

2. Контрмеры. Второй этап включает в себя устранение источников загрязнения и рассеивания. Он также включает в себя сокращение времени на очистку и инспекцию благодаря усилиям кайдзен по облегчению доступа к труднодоступным участкам.

3. Установление временных стандартов. На третьем этапе операторы обучаются точкам смазки оборудования, контролю уровня масла и доливке масла. В конце обучения операторы приступают к периодическому контролю масла и процедурам смазки. С учетом опыта, накопленного на этапах очистки и контрмер, установлены временные стандарты автономного обслуживания для операций по очистке, контролю и смазке для предотвращения выхода оборудования из строя и обнаружения аномалий до выхода из строя. Эти стандарты постоянно обновляются и совершенствуются с учетом вновь накопленного опыта.

4. Проведение общих проверок. Для проведения общих проверок требуются технические знания. Важно технически контролировать и стандартизировать каждый шаг вплоть до этого момента. Необходимо пройти как теоретическую, так и практическую подготовку, чтобы выявлять новые ошибки и вносить улучшения.

5. Автономное управление. Цель пятого шага – обеспечить непрерывность успеха, достигнутого на первых четырех этапах, и повысить эффективность. Это позволяет оператору не тратить время на стандартные проверки, которые он постоянно выполняет. Сделать машины полностью безупречными можно с помощью автономного управления.

6. Стандартизация. После завершения технического обслуживания цель состоит в том, чтобы вернуть оборудование к работе в первый день и обеспечить качественное производство. Стандарты эксплуатации, качество, осведомленность о безопасности труда, планы рабочих процессов собираются в соот-

ветствии со стандартными рабочими критериями и ответственностью.

#### 7. Полностью автономное обслуживание

Авторами проанализированы и выделены следующие преимущества внедрения автономного обслуживания на промышленных предприятиях:

– Повышение эффективности оборудования. Автономное техническое обслуживание обеспечивает постоянную работу оборудования в идеальном состоянии благодаря регулярной очистке, смазке и контролю. Это повышает эффективность производства за счет сокращения числа сбоев в работе оборудования и непредвиденных остановок.

– Сокращение количества сбоев и простоев. Непрерывный мониторинг и техническое обслуживание оборудования позволяют своевременно выявлять потенциальные неисправности. Таким образом, можно принять необходимые меры предосторожности до возникновения неисправности и свести к минимуму время простоя.

– Снижение затрат на обслуживание. Упреждающие подходы к обслуживанию предотвращают серьезные и дорогостоящие неисправности. Регулярные мелкие операции по техническому обслуживанию продлевают срок службы оборудования и экономят основные расходы на техническое обслуживание.

– Повышенная безопасность труда. Автономное обслуживание обеспечивает безопасную эксплуатацию оборудования. Это снижает количество несчастных случаев на производстве и травматизмов и способствует тому, что сотрудники работают в безопасных условиях.

– Культура непрерывного совершенствования. Автономное обслуживание способствует постоянному совершенствованию. Сотрудники разрабатывают более эффективные методы работы, выявляя свои и возможности улучшения процессов.

– Качественное производство. Регулярное и эффективное техническое обслуживание гарантирует оптимальную работу оборудования, что улучшает качество производимой продукции. Качественное оборудование напрямую влияет на качество производства и повышает удовлетворенность клиентов.

Металлургические предприятия России активно внедряют инструменты бережливого производства. Автономное обслуживание оборудования играет ключевую роль в успешной реализации концепции бережливого производства в рамках реализации национального проекта «Производительность труда» [5-7].

Авторами выделено три конкретных действия, которые рассматриваются как неотъемлемая часть реализации любой программы автономного обслуживания. Это:

1. Аудиты 6S: Методология 6S – это концепция управления и организации рабочего пространства, основанная на шести принципах: сортировка, систематизация, содержание в чистоте, стандартизация, совершенствование и соблюдение безопасности, кото-

рая помогает предприятию быстро повысить эффективность за счет оптимизации чистоты, порядка и организации каждого рабочего места, а также встроенной безопасности рабочего места. Данная система позволяет практически без затрат не только наводить порядок на предприятии (повышать производительность, сокращать потери, снижать уровень брака и травматизма), но и создавать необходимые стартовые условия для реализации сложных и дорогостоящих производственных и организационных инноваций, обеспечивать их высокую эффективность за счет радикального изменения сознания работников, их отношения к своему делу.

2. Управление неисправностями: Отчетность о неисправностях является центральной концепцией методологий «операционного совершенства». Она включает в себя установление стандартов процесса, способ сообщения об аномалиях, отчетность о корректирующих действиях и планы превентивных действий.

3. CILs / Центральные линии: Если обработка аварийных ситуаций является реактивной, то CILs и центральные линии являются упреждающими мероприятиями по техническому обслуживанию для ваших операторов. CILs и Centerlines – это запланированные мероприятия, при которых машины останавливаются, а операторов просят выполнить простые задачи по техническому обслуживанию и сообщить о своих результатах [8]. Каждое из этих действий направлено на то, чтобы обеспечить операторам большую ответственность за состояние своего рабочего места и находящихся на нем машин. Операторов просят поддерживать стандарты чистоты и порядка, понимать допустимые стандарты и распознавать неисправности и сообщать о них, а также соблюдать процедуры по уходу за оборудованием, включая чистку, смазку и периодические проверки.

На многих крупных предприятиях металлургической отрасли реализовываются проекты по совершенствованию операционной эффективности. Проекты направлены на выявление и устранение потерь в местах их возникновения, внедрение основных принципов автономного обслуживания, изменения подхода к системе ТОиР, развертывание и поддержание системы организации и рационализации рабочего пространства 6С. Например, пилотной площадкой для внедрения такого проекта на предприятиях метизной отрасли было выбрано производство крепежа. За счет большого объема смежных процессов данного структурного подразделения задействованы и инструментальные цеха [6, 9]. В рамках данного проекта определены основные шаги по внедрению автономного обслуживания оборудования, цель которого выявление

дефектов на ранней стадии, предотвращение ускоренного износа оборудования и поддержание его в работоспособном состоянии, а также обучение операторов самостоятельно обслуживать свое оборудование, выполняя ежедневную проверку, смазку, некоторые виды ремонтов, а также создание стандартов обслуживания [10, 11]. Этапу внедрения предшествовал этап обучения всех операторов на С-Р 3 разряда. Порядок основных этапов по внедрению автономного обслуживания оборудования следующий:

Этап 1. Подготовка: составление плана мероприятий.

Этап 2. Уточнение: уточняющее обсуждение в команде

Этап 3. Действие: общая чистка, смазка в соответствии с планом. Отметка и сбор проблем.

Этап 4. Закрепление: составление плана обслуживания. Решение проблем. Регулярная чистка и смазка.

Этап 5. Обслуживание: автономное обслуживание силами операторов. Выполнение мелких ремонтов.

На стендах автономного обслуживания размещается регламент автономного обслуживания: операции, которые необходимо выполнять при приеме-передаче смены, чтобы выявить дефект оборудования на ранней стадии и не допустить аварийной остановки оборудования.

В соответствии с нормативными документами предприятий регламенты АО оборудования должны включать в себя работы по:

- наружному осмотру оборудования с целью выявления дефектов оборудования и отдельных его узлов;
- наружному осмотру степени износа защитных броней, футеровочных плит, утечек и других подобных элементов с указанием допустимых параметров;
- регулировке зазоров в узлах оборудования и плавности хода подвижных сопряжений машин;
- проверке исправности ограждений, переключателей;
- визуальному осмотру систем охлаждения, смазки, гидравлики и пневматики;
- ревизии проводной системы с ее прочисткой и заменой при необходимости изношенных деталей;
- проверке наличия и исправности предохранительных, блокировочных устройств;
- проверке на наличие шума, нагрева, биения и вибрации и др.

Суммарное время на проведение АО не должно превышать 30 минут в смену.

Фрагмент регламента автономного обслуживания представлен в табл. 1.

Фрагмент регламента автономного обслуживания

Перечень работ	Инструмент	Периодичность
1. Главный привод		
1.1. Осмотр на предмет целостности металлоконструкции	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	Ежемесячно
1.2. Осмотр и протяжка защитного ограждения	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	1 раз в 24 часа
1.3. Осмотр состояния и протяжка анкерных болтов	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	1 раз в месяц
1.4. Осмотр состояния, проверка натяжения ремней приводного вала	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	ежесменно
1.5. Проверка герметичности пневмосистемы, при выявлении дефектов произвести замену или восстановление элементов	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	ежесменно
1.6. Проверка системы смазки, при выявлении дефектов произвести замену или восстановление элементов	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	ежесменно
1.7. Сброс конденсата с воздушной системы в сливные каналы или емкости	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	ежесменно
1.8. Проверка и регулировка тормозов	- визуальный осмотр - слесарный инструмент	1 раз в месяц

Работа по внедрению АО включает в себе следующие составляющие:

1. Машины – Оборудование:

- Сделать стандарты наглядными и понятными.
- Гарантировать доступность оборудования для чистки и обслуживания.
- Обеспечить функциональность и хороший внешний вид окружающего оборудование условий.
- Периодически обслуживать и проверять согласно планам и срокам.

2. Работник – Руководитель:

- Совместная разработка стандартов.
- Развивать ответственность путем мотивации.
- Операторы выполняют мелкий ремонт и обслуживание самостоятельно.

3. Стандарты – Критерии:

- Подготовить стандарты по маркировке, цветам, маслу, и т. д.

- Подготовить проверочные списки для обеспечения периодического обслуживания.

- Утвердить сроки обслуживания и разъяснить обязанности.

- Вывесить анализ общей эффективности оборудования и неисправностей:

- ✓ при помощи красной кривой отмечается количество замечаний, выявленных на оборудовании операторами;

- ✓ при помощи зеленой кривой отмечается количество устраненных замечаний ремонтной службой.

Пример анализа общей эффективности оборудования и неисправностей представлен на рис. 1.

- Найти возможности для улучшения в расположении оборудования.

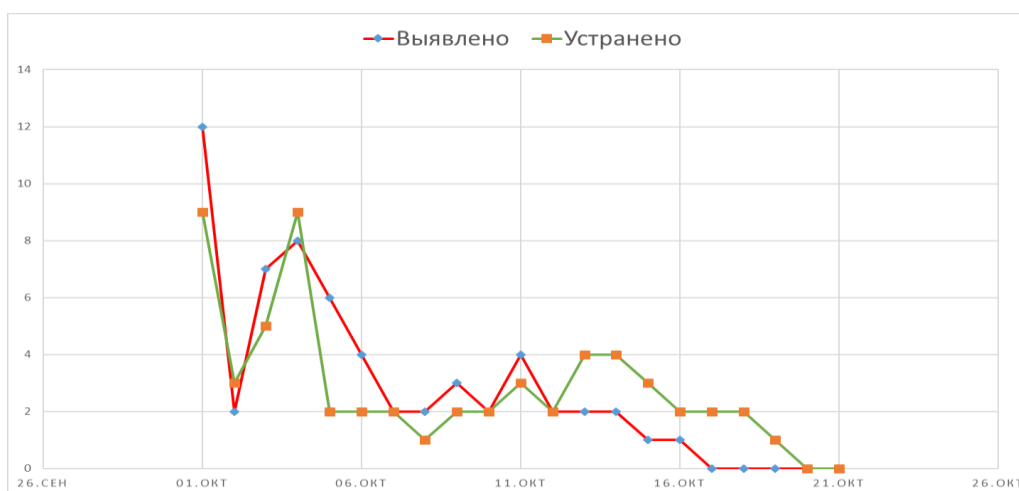


Рис. 1. Анализ общей эффективности оборудования и неисправностей

## 4. Обучение – Подготовка:

– Разработать учебные материалы для этапа 3 и обучить операторов.

– Разработать и провести тематические уроки.

– Обучить определенным навыкам автономного обслуживания (например, замена фильтров, смазка и иные мелкие операции по обслуживанию и ремонту).

Результаты этапов внедрения автономного обслуживания (АО):

## 1. Подготовка.

На первом этапе тщательно соблюдаются основные условия эксплуатации оборудования (в основном за счет очистки и проверки), а также создается система для поддержания этих условий. Операторы должны убедиться в том, что из-за несвоевременного обслуживания оборудования происходят его поломки и остановки. Сначала нужно действовать, а мотивация возникает в процессе действия. Этот этап призван заставить операторов задуматься о причинах вынужденных остановок и понять, почему они переходят к автономному обслуживанию. Составляется план мероприятий.

## 2. Уточнение.

Результаты:

- уточняющее обсуждение в команде;
- распределение участков чистки;
- подготовка списка проблем.

## 3. Действие.

Результаты:

- общая чистка;
- смазка в соответствии с планом;
- выявление потенциальных дефектов оборудования;
- отметка и сбор проблем.

Операторы самостоятельно улучшают свое оборудование и внедряют собственные улучшения.

## 4. Закрепление.

Результаты:

- составление плана обслуживания;
- решение выявленных проблем;
- регулярная чистка и смазка;
- разработка стандартов обслуживания.

Цель разработки стандартов состоит в том, чтобы повысить надежность и ремонтпригодность оборудования за счет создания простых в применении стандартов.

## 5. Обслуживание.

Результатом этапов 1–4 является:

- автономное обслуживание силами операторов;
- выполнение мелких ремонтов.

Кроме того, что автономное техническое обслуживание дает значительные преимущества, такие как увеличение времени безотказной работы оборудования, продление срока службы, повышение качества продукции, более эффективное использование ресурсов, повышение безопасности труда и стимулирование постоянного совершенствования, данные показате-

тели рекомендуется использовать для оценки работы операторов по системе KPI. Внедрение системы KPI даст возможность перевести концепцию и стратегию компании в плоскость понятных и выполнимых задач для операторов, что будет способствовать оптимизации усилий. Система KPI позволит мотивировать персонал на повышение эффективности деятельности, что будет в целом способствовать и повышению корпоративной культуры предприятия [12, 13].

Потенциальный технический эффект от внедрения организационно-технических решений складывается за счет сокращения времени простоя оборудования, сокращения затрат на эксплуатацию единицы оборудования, увеличения производительности оборудования и повышения качества выпускаемой продукции.

В процессе исследования был проанализирован процесс внедрения автономного обслуживания оборудования на предприятиях метизной отрасли. Определена цель автономного обслуживания как выявление дефектов на ранней стадии, предотвращения ускоренного износа оборудования и поддержания его в работоспособном состоянии, а также обучение операторов самостоятельно обслуживать свое оборудование, выполняя ежедневную проверку, смазку, некоторые виды ремонтов, а также создание стандартов обслуживания. Определен регламент АО и содержание этапов внедрения автономного обслуживания (АО). В результате внедрения автономного обслуживания снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций, что, в свою очередь, способствует увеличению межремонтного периода, высвобождению обслуживающего персонала для решения более сложных задач технического обслуживания. Возможность выявления проблем до того, как они приведут к критическим отказам оборудования, обеспечение надежной очистки и смазки оборудования приводят не только к повышению общей безопасности, но и помогают повысить эффективность оборудования и общую производительность. Потенциальный технический эффект от внедрения организационно-технических решений по внедрению автономного обслуживания оборудования складывается за счет сокращения внеплановых простоев оборудования, сокращения текущих затрат на ремонты, а также высвобождению обслуживающего персонала. Автономное техническое обслуживание играет важнейшую роль в повышении эффективности производственной системы металлургических предприятий. Привлечение операторов к уходу за оборудованием и его сохранению формирует у них мышление, ориентированное на профилактику и совместную ответственность. Внедрение автономного обслуживания приводит как к повышению операционной эффективности деятельности предприятия, так и к развитию культуры профилактики, при которой операторы берут на себя ответственность за свое оборудование.

Список источников

1. Практика внедрения бережливого производства [Электронный ресурс]. <https://leanbase.ru>
2. Повышение производительности труда республики Татарстан [Электронный ресурс]. <https://ppt.tatarstan.ru/index.htm/news/> (дата обращения: 04.04.2025)
3. Карасева Е.Д. Операционная эффективность предприятия // Индустриальная экономика. 2018. №1. С. 23-25.
4. Практические аспекты внедрения LEAN-подхода на промышленном предприятии / Литовская Ю.В., Травникова К.А., Щелоков И.Д. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. Т. 2. С. 170.
5. Пономарева О.С., Назарова О.Л., Татаркин А.О. Инструменты повышения операционной эффективности предприятия // Управление организацией, бухгалтерский учет и экономический анализ: вопросы, проблемы, перспективы развития: Материалы VII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Магнитогорск, 27–28 мая 2022 года / под общ. ред. Н.В. Кузнецовой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. С. 87-91.
6. Бережливое производство и операционная эффективность ООО «ММК Метиз». URL: <https://mmk-metiz.ru/company/novosti-mmk-metiz/berezhlivoe-proizvodstvo-i-operatsionnaya-effektivnost/> (дата обращения: 04.04.2025)
7. Хаирова С.М., Куликова О.М. Применение сентимент-анализа инструментов бережливого производства (на примере России) // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 2 (66). С. 55-61.
8. Пономарева О.С. Бережливое предприятие: Электронное издание. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021.
9. Портал «Управление производством» [Электронный ресурс]. <https://up-pro.ru>
10. Гладышева Д.С. Оценка и повышение эффективности деятельности предприятия // Наукосфера. 2024. № 1-2. С. 282-287.
11. Пономарева О.С., Загребельный П.В., Шмаков А.А. Операционное совершенствование и стратегии оптимизации бизнес-процессов // Управление организацией, бухгалтерский учет и экономический анализ: вопросы, проблемы и перспективы развития: материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Магнитогорск, 28–29 января 2025 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. С. 126-131.
12. Пономарева О.С., Майорова Т.В., Приймак В.А. Разработка и внедрение системы KPI на предприятиях металлургической отрасли // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 1. С. 118-125.
13. Совершенствование корпоративной культуры как инструмента управления эффективностью бизнес-процессов металлургических предприятий / Г.Г. Валяева, В.М. Гафурова, С.В. Коптыкова, А.С. Лазарев // Теория и технология металлургического производства. 2025. № 2(53). С. 51-57.

Сведения об авторах

**Пономарева Ольга Станиславовна** – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и государственного управления института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [slava\\_5@inbox.ru](mailto:slava_5@inbox.ru) ORCID 0000-0003-2274-2964

**Назарова Ольга Леонидовна** – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента и государственного управления института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: [oil.nazarova@mail.ru](mailto:oil.nazarova@mail.ru). ORCID 0000-0003-2790-3675

**Майорова Татьяна Владимировна** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и государственного управления института экономики и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: [mtv1\\_2010@rambler.ru](mailto:mtv1_2010@rambler.ru). ORCID 0000-0002-5137-6425

**Решетова Ирина Валерьевна** – ассистент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: [irareshetova@rambler.ru](mailto:irareshetova@rambler.ru)

**Козлов Роман Алексеевич** – кандидат педагогических наук, доцент, декан факультета физической культуры и спортивного мастерства, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## AUTONOMOUS EQUIPMENT MAINTENANCE AS A TOOL FOR INCREASING OPERATIONAL EFFICIENCY IN FERROUS METALLURGICAL ENTERPRISES

**Ponomareva Olga S.** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Public Administration at the Institute of Economics and Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: slava\_5@inbox.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

**Nazarova Olga L.** – Doctor of Pedagogic Sciences, Professor, Professor of the Department of Management and Public Administration at the Institute of Economics and Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: oll.nazarova@mail.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

**Maiorova Tatyana V.** – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Public Administration at the Institute of Economics and Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mvtv1\_2010@rambler.ru. ORCID 0000-0002-5137-6425

**Reshetova Irina V.** – assistant at the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: irareshetova@rambler.ru

**Kozlov Roman A.** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Physical Education and Sports, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** As a result of the analysis of the problem of implementing autonomous maintenance at metallurgical enterprises, the goal was to identify specific actions that are considered an integral part of any autonomous maintenance program. Autonomous maintenance of equipment allows for reducing unscheduled equipment downtime, increasing the overhaul period and, in general, improving the reliability of equipment, in addition, it increases employee engagement by providing them with responsibilities that have a real and tangible impact on business success. The main idea of autonomous maintenance has been analyzed. Its purpose is to detect defects at an early stage, prevent accelerated wear and tear of equipment, and maintain it in good working condition. It also aims to train operators to independently maintain their equipment by performing daily inspections, lubrication, and certain types of repairs, as well as creating maintenance standards. The authors have identified 7 steps of autonomous maintenance aimed at increasing the operator's and equipment's productivity. The stages and specific actions of implementing autonomous equipment maintenance have been highlighted. The experience of implementing autonomous equipment maintenance at metallurgical enterprises has been reviewed. It has been revealed that the implementation of autonomous maintenance reduces the likelihood of accidents, which in turn increases the inter-repair period and frees up maintenance personnel for more complex maintenance tasks. The ability to identify problems before they lead to critical equipment failures, as well as ensuring proper cleaning and lubrication of equipment, not only improves overall safety but also helps to enhance equipment efficiency and overall productivity. The potential technical effect of the implementation of organizational and technical solutions for the implementation of autonomous equipment maintenance is achieved by reducing unscheduled equipment downtime and reducing current repair costs. The implementation of autonomous maintenance leads to both an increase in the operational efficiency of the enterprise and the development of a preventive maintenance culture, where operators take responsibility for their equipment.

**Keywords:** Lean manufacturing, autonomous maintenance, operational efficiency, labor productivity, 5S, production efficiency

## References

1. The practice of implementing lean production [Electronic resource]. <https://leanbase.ru>
2. Increasing labor productivity of the Republic of Tatarstan [Electronic resource]. <https://ppt.tatarstan.ru/index.htm/news/> (date of request: 04/04/2025)
3. Karaseva E. D. Operational efficiency of the enterprise // Industrial economics. 2018, no. 1, pp. 23-25.
4. Practical aspects of implementing the LEAN approach in an industrial enterprise / Litovskaya Yu. V. , Travnikova K. A., Shchelokov I. D. // Actual problems of modern science, technology and education: Abstracts of the 80th International Scientific and Technical Conference, Magnitogorsk, April 18-22, 2022. Volume 2. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2022. P. 170.
5. Tools for improving the operational efficiency of an enterprise / Ponomareva O. S., Nazarova O. L., Tatarkin A. O. // Organization management, accounting and economic analysis: issues, problems, development prospects: Proceedings of the VII All-Russian (national) Scientific and Practical Conference, Magnitogorsk, May 27-28, 2022 / Edited by N.V. Kuznetsova. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 2022. pp. 87-91.
6. Lean manufacturing and Operational Efficiency of MMK Metiz LLC. URL: <https://mmk-metiz.ru/company/novosti-mmk-metiz/berezhlivoe-proizvodstvo-i-operatsionnaya-effektivnost/> (date of request: 04/04/2025)

7. Khairova S.M., Kulikova O.M. Application of sentiment analysis of lean production tools (on the example of Russia) // Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2022, no. 2 (66), pp. 55-61.
8. Ponomareva O. S. Lean enterprise: Electronic edition. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 2021.
9. Production Management portal [Electronic resource]. <https://up-pro.ru>
10. Gladysheva D.S. Evaluation and improvement of the efficiency of the enterprise // Naukosphere. 2024, no. 1-2, pp. 282-287.
11. Ponomareva, O. S. Operational Improvement and Business Process Optimization Strategies / O. S. Ponomareva, P. V. Zagrebelny, and A. A. Shmakov // Management of Organizations, Accounting, and Economic Analysis: Issues, Problems, and Development Prospects : Proceedings of the 10th All-Russian (National) Scientific and Practical Conference, Magnitogorsk, January 28–29, 2025. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025. Pp. 126-131.
12. Development and implementation of the KPI system at enterprises of the metallurgical industry / Ponomareva O. S., Mayorova T.V., Priymak V. A. // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 118-125. doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125.
13. Improvement of corporate culture as a tool for managing the efficiency of business processes at metallurgical enterprises / G. G. Valyaeva, V. M. Gafurova, S. V. Koptyakova, and A. S. Lazarev // Theory and Technology of Metallurgical Production. 2025, no. 2(53), pp. 51-57.

Ссылка на статью:

Автономное обслуживание оборудования как инструмент повышения операционной эффективности на предприятиях черной металлургии / Пономарева О.С., Назарова О.Л., Майорова Т.В., Решетова И.В., Козлов Р.А. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 57-64. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-57-64](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-57-64)  
 Ponomareva O.S., Nazarova O.L., Maiorova T.V., Reshetova I.V., Kozlov R.A. Autonomous equipment maintenance as a tool for increasing operational efficiency in ferrous metallurgical enterprises. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 57-64. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-57-64](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-57-64)

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемые коллеги!*

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «*Теория и технология металлургического производства*» («*Teoriã i tehnologiã metallurgiçeskogo 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: TТаPEoMP@mail.ru; [tmp@magtu.ru](mailto:tmp@magtu.ru).
- лицензионный договор на передачу прав;
- авторская справка.

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

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

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

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

## Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

## Пример оформления литературы

## Список литературы

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

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

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

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

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