

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 4 (51) 2024

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. Емелишин* – 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», 2024

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 24.12.2024. Заказ 342. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 4 (51) 2024**

---

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”, 2024**

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 24.12.2024. Order 342. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В. <b>ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ КРУПНОСТИ КОКСА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ОСНАЩЕННОЙ ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ, В УСЛОВИЯХ ПАО «ММК».....</b>	<b>4</b>
Малютин Н.С., Столяр А.М., Юдин Д.В. <b>КОВШЕВАЯ ОБРАБОТКА ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60.....</b>	<b>9</b>
Ровин С.Л., Гараев Р.С., Каримов А.М., Фозилов Б.Р. <b>РЕЦИКЛИНГ АСПИРАЦИОННОЙ ПЫЛИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАНГАНЦА.....</b>	<b>13</b>
Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В. <b>ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛИСТЫХ СОРБЦИОННОАКТИВНЫХ ЗОЛОТЫХ РУД.....</b>	<b>18</b>
Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В. <b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ, УПАКОВАННОЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОНТЕЙНЕР, ПРИ ДВИЖЕНИИ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ КОЛОШНИКА К ГОРНУ.....</b>	<b>24</b>
Гаврилова Т.О. <b>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ.....</b>	<b>30</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....</b>	<b>34</b>
Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К. <b>ОЦЕНКА ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛИТЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКАХ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>34</b>
Леушин И.О., Коровин В.А., Гарченко А.А., Рябова Л.И. <b>О ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА ИЗЛОЖНИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....</b>	<b>40</b>
<b>ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>49</b>
Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емельюшин А.Н., Дубровин В.К. <b>ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ НАГРЕТОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМ КОВОЧНЫМ КОЛОННЫМ ПРЕССОМ.....</b>	<b>49</b>
<b>ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ.....</b>	<b>56</b>
Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шibaева А.С., Рахматуллина А.А. <b>ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ.....</b>	<b>56</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS.....</b>	<b>4</b>
Kharchenko A.S., Yudina S.V., Sibgatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V., Kurguzov K.V., Pavlov A.V. <b>THE EFFECT OF EQUIVALENT COKE SIZE ON THE PERFORMANCE OF A BLAST FURNACE EQUIPPED WITH A TRAY LOADING DEVICE IN THE CONDITIONS OF PJSC MMK.....</b>	<b>4</b>
Malyutin N.S., Stolyarov A.M., Yudin D.V. <b>LADLE TREATMENT OF PIPE STEEL OF STRENGTH CLASS K60.....</b>	<b>9</b>
Rovin S.L., Garayev R.S., Karimov A.M., Fozilov B.R. <b>RECYCLING OF ASPIRATION DUST OF ELECTRIC ARC MELTING OF FERROSILICON MANGANESE.....</b> Ошибка! Закладка не определена.	<b>9</b>
Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D., Bogorodskiy E.V. <b>PROBLEMS OF PROCESSING CARBONACEOUS SORPTION-ACTIVE GOLD ORES.....</b>	<b>18</b>
Dzyuba A.V., Savinov A.S., Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Sysoev V.I., Kharchenko E.O., Pavlov A.V. <b>FORECASTING THE TEMPERATURE OF OILED SCALE PACKED IN A METAL CONTAINER WHEN MOVING IN A BLAST FURNACE FROM THE BLAST-FURNACE MOUTH TO THE IRON RECEIVER.....</b>	<b>28</b>
Gavrilova T.O. <b>FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVA TECHNOLOGIES IN METALLURGY.....</b>	<b>33</b>
<b>FOUNDRY.....</b>	<b>34</b>
Yumabayev A.A., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Troyanov A.V., Chernov V.P., Dubrovin V.K. <b>EVALUATION OF THE TEMPERATURE GRADIENT IN CAST ROLLING ROLLS DURING HEAT TREATMENT.....</b>	<b>34</b>
Leushin I.O., Korovin V.A., Garchenko A.A., Ryabova L.I. <b>ON DEGRADATION OF STRUCTURE, PROPERTIES AND DESTRUCTION OF MOLD MATERIAL DURING OPERATION.....</b>	<b>40</b>
<b>METALLURGICAL PRODUCTION EQUIPMENT.....</b>	<b>49</b>
Androsenko M.V., Savelyeva I.A., Moskvina E.A., Kulikov S.S., Novikov V.I., Emelyushin A.N., Dubrovin V.K. <b>INVESTIGATION OF NON-STATIONARY HEAT TRANSFER BETWEEN A HEATED WORKPIECE AND A HYDRAULIC FORGING COLUMN PRESS.....</b>	<b>49</b>
<b>PREPARATION OF RAW MATERIALS FOR METALLURGICAL PRODUCTION.....</b>	<b>56</b>
Mullina E.R., Mishurina O.A., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S., Rakhmatullina A.A. <b>CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF RAW MATERIAL PREPARATION FOR METALLURGICAL PRODUCTION.....</b>	<b>56</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.16:669.162.24

Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В.

## ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ КРУПНОСТИ КОКСА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ОСНАЩЕННОЙ ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ, В УСЛОВИЯХ ПАО «ММК»

**Аннотация.** Исследовали работу доменной печи ПАО «ММК», оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, при изменении эквивалентной по поверхности крупности кокса. Повышение крупности было осуществлено за счет увеличения содержания классов 60-80 и +80 мм. В базовом периоде она составила 50,4 мм, в опытном – 52,3 мм при постоянном режиме загрузки. Результаты показали, что рост крупности кокса сопровождался самопроизвольным перераспределением его относительно зон колошникового пространства: осевой, пристеночной, рудного гребня. Следствием было изменение рудной нагрузки по горизонтальному сечению, на что указывала температура газа в верхней части печи. Рост эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,4 до 52,3 мм сопровождался уменьшением его удельного расхода на 0,71% (3 кг/т чугуна) и снижением производительности печи на 1,29%. Для повышения положительного действия крупности кокса на ход доменной плавки целесообразно разработать рациональные режимы загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошника с корректировкой параметров дутья.

**Ключевые слова:** доменная плавка, чугун, расход кокса, производительность

### Введение

Совершенствование доменного процесса направлено на уменьшение удельного расхода кокса и повышение производительности печей [1-4]. Одним из направлений улучшения технико-экономических показателей их работы является выявление рационального гранулометрического состава кокса с воздействием на распределение сырьевых материалов по радиусу колошника [5-8]. Положительное влияние на работу доменной печи оказывает ограничение поступления фракций менее 35(40 мм) и более 80 мм [9-12], с последующим выделением и загрузкой в скипы мелких составляющих совместно с железорудными материалами [13-15]. Увеличение содержания фракции более 80 мм может влиять положительно или отрицательно на работу доменной печи [16, 17]. В среднем на печах объемом 2000, 2700, 5000 м<sup>3</sup> предприятий Российской Федерации, Украины и Финляндии повышение её на 1% сопровождалось уменьшением производительности на 30-50 т/сут при росте удельного расхода кокса на 1-2,5 кг/т чугуна [11, 19]. Ухудшение работы печей преимущественно объясняют низкой прочностью фракции более 80 мм в холодном и горячем состояниях. Обратное влияние повышения доли крупной фракции на каждый 1% в интервале 25-40% проявлялось ростом производительности на 0,77% и уменьшением удельного расхода кокса на 1,25%. В этом случае условия производства кокса обеспечивали высокие прочностные свойства фракции более 80 мм и, соответственно, минимизацию склонности к трещинообразованию [19, 20].

Исследованиями кокса, загружаемого в доменные печи ПАО «ММК», установлены существенно меньшие отличия в прочностных показателях между

фракциями кокса [21]. Класс крупности более 80 мм для кокса мокрого и сухого тушения по сравнению с фракцией 40-60 и 60-80 в среднем имел меньшую горячую прочность по показателю CSR и структурную прочность в холодном состоянии соответственно на 1,5 и 3,3%. Такие отличия в прочностных характеристиках фракций кокса в исследованиях [22] позволили обеспечить уменьшение удельного расхода кокса на 0,13% при росте его эквивалентной по поверхности крупности на каждый 1% в интервале крупности от 53,0 до 54,7 мм. Однако самопроизвольное его перераспределение в колошниковом пространстве печи, оснащенной КЗУ, сопровождалось уменьшением производительности печи на 0,59%.

В связи с этим цель работы заключалась в исследовании роли эквивалентной по поверхности крупности кокса для хода процессов и достигаемых результатов применительно к доменной печи ПАО «ММК», оснащенной лотковым загрузочным устройством.

### Методы и результаты

Изучали влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на показатели работы доменной печи ПАО «ММК» объемом 1370 м<sup>3</sup>, оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа. Выделили два периода продолжительностью по 21 недели, отличающиеся крупностью кокса. В первом периоде (базовый) она составляла 50,4 мм, во втором (опытный) – 52,3 мм (табл. 1).

Повышение крупности кокса в периоде II по сравнению с периодом I от 50,4 до 52,3 мм обеспечивали при постоянном режиме загрузки (табл. 2) увеличением содержания класса +60 мм. Рост составил 36,2 отн. % для фракции +80 мм и 4,8 отн. % для интервала 60-80 мм (табл. 1).

Таблица 1

Показатели качества кокса, загружаемого в доменную печь и его ситовый состав

Наименование показателей	Уровень показателей при эквивалентной по поверхности крупности кокса, мм	
	50,4	52,3
Номер периода	I	II
Длительность периода, сутки	21	21
Содержание кокса (%) по классам крупности, мм:		
>80	9,85	13,42
80-60	37,79	39,60
60-40	39,84	35,96
40-25	9,43	8,17
< 25	3,09	2,85
Холодная прочность кокса по показателям, %:		
M10	8,4	8,4
M25	85,1	85,9
Горячая прочность кокса (CSR), %	37,3	37,1
Реакционная способность (CRI), %	42,1	42,1

Таблица 2

Характеристики режима загрузки материалов в печь и параметров дутья

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Содержание кокса в шихте по станциям углового положения лотка, %:		
№ 9-11 ( $\alpha_{пер}$ )	17,5	
№ 6-8 ( $\alpha_{гр}$ )	50,0	
№ 3-5 ( $\alpha_{пром}$ )	30,0	
№ 1-2 ( $\alpha_{центр}$ )	2,5	
Содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, %:		
№ 9-11 ( $\alpha_{пер}$ )	33,3	
№ 6-8 ( $\alpha_{гр}$ )	55,6	
№ 3-5 ( $\alpha_{пром}$ )	11,1	
№ 1-2 ( $\alpha_{центр}$ )	0,0	
Уровень засыпи фактический, м	2,37	2,46
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	38,6	38,5
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1666	1672
Содержание фракции 0-5 мм в агломерате, %	10,13	10,33
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна:		
– дутья	1065	1057
– природного газа	123,7	124,4
Давление горячего дутья, кПа	256	255
Температура дутья, °С	1182	1185
Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>	1,4	2,2
Содержание кислорода в дутье, %	28,1	28,4

Рост крупности кокса в периоде II по сравнению с периодом I на 3,8 отн. % сопровождался самопроиз-

вольным перераспределением его по радиусу колошника преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в периферийную часть печи. На это указывает изменение температуры газа по радиусу в верхней части печи в периоде II по сравнению с периодом I (табл. 3):

– температура газа на периферии и в зоне рудного гребня увеличилась соответственно на 2 и 5<sup>0</sup>С, в центральной части печи уменьшилась на 26<sup>0</sup>С;

– соотношение температуры газа на периферии и температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня уменьшилось соответственно от 1,20 до 1,17 и от 1,23 до 0,99;

– соотношение температуры газа на периферии к температуре в центральной части печи увеличилось от 1,04 до 1,28.

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве печи положительно действовало на участие газов в процессах восстановления. Степень использования СО и Н<sub>2</sub> соответственно увеличились на 0,71 и на 0,69 отн. %. Это действовало в направлении снижения удельного расхода кокса, который в периоде II по сравнению с периодом I уменьшился от 424,8 до 421,8 кг/т чугуна (табл. 3). Положительное действие на уменьшение удельного расхода кокса оказывало улучшение условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса из-за увеличения его крупности от 50,4 до 52,3 мм и уменьшения вязкости шлака от 0,33 до 0,26 Па·с. Показатель DMI увеличился от 163 до 168 растворимость углерода уменьшилась от 97,45 до 97,26% (табл. 4).

Таблица 3

Основные технико-экономические показатели работы доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Номер периода	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	424,8	421,8
Производительность, т/сут	3717	3669
Интенсивность хода:		
– по дутью, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> мин)	2,007	1,975
– по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сут	0,973	0,958
Рудная нагрузка, т/т	3,654	3,666
Содержание железа в шихте, %	58,545	58,493
Вынос пыли, кг/т чугуна	11,4	12,1
Степень использования, %:		
– СО	46,50	46,83
– Н <sub>2</sub>	46,16	46,48
Температура газа по радиусу, °С:		
– на периферии $T_{пер}$	149	151
– в рудном гребне $T_{гр}$	124	129
– в центре печи $T_{ц}$	157	131
Соотношение температуры:		
$T_{пер}/T_{гр}$	1,20	1,17
$T_{пер}/T_{ц}$	0,95	1,15
$T_{ц}/T_{гр}$	1,27	1,02
Разность температур $T_{пер} - T_{кол}$ , °С	208	200

Таблица 4

Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Количество шлака, остающегося в горне, т	16,4	20,0
Подвижность шлака, Па·с	0,33	0,26
Показатель DMI	163	168
Показатель растворимости углерода в чугуне	97,45	97,26

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве печи с повышением рудной нагрузки в периоде II по сравнению с периодом I от 3,654 до 3,666 т/т и с уменьшением содержания железа в шихте от 58,545 до 58,493% оказывало отрицательное действие на взаимное сопротивление потоков шихты и газа их противоточному движению. Коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи увеличился на 1,5% (табл. 5). Для стабилизации работы печи по газодинамике в опытном периоде сократили интенсивность по дутью на 1,6 отн. % со снижением выхода фурменного газа от 3697 до 3655 м<sup>3</sup>/мин при увеличении уровня засыпи от 2,37 до 2,46 м. Эти изменения уменьшили производительность печи на 48 т/сут.

Таблица 5

Показатели газодинамического режима работы доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм		
	50,4	52,3	
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:			
	– вверху шахты	4,970	5,046
	– в нижней части заплечиков	11,577	11,754
– общий	8,259	8,394	
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1432	1428	
	м <sup>3</sup> /мин	3697	3655

Таким образом, увеличение эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,4 до 52,3 мм сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 0,71% и снижением производительности печи на 1,29%.

### Заключение

Исследовали работу доменной печи ПАО «ММК», оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, при различной крупности кокса. Её увеличение, обеспечивало улучшение фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса в горне, что снизило его удельный расход на 0,71% (3 кг/т чугуна).

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве при увеличении его крупности сопровождалось ростом взаимного сопротивления потоков шихты и газа их противоточному движению выше воздушных фурм, что привело к снижению производительности печи на 1,29%.

Целесообразно изменение эквивалентной крупности кокса сопровождать рациональной корректировкой параметров загрузки материалов в колошниковое пространство и характеристик дутьевого режима.

### Список источников

1. Оценка качества кокса как компонента технологии доменной плавки / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим // Кокс и химия. 2018. № 1. С. 15-21.
2. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование доменного производства с использованием цифровых технологий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79, № 6. С. 455-464.
3. Курунов И.Ф. Качество кокса, его поведение в доменной печи и влияние на ее работу // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. №7. С. 31-35.
4. Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.В. Павлов, А.А. Полинов // Черные металлы. 2021. № 12. С. 10-15.
5. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сибатуллин С.К., Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // Черные металлы. 2024. № 3. С. 22-27.
6. Истечение материалов из шихтового бункера лоткового загрузочного устройства доменной печи по видам крупности / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Гаврюшкин С.И., Чевычелов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2009. № 9. С. 21-25.
7. Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 10. С. 766-773.
8. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Харченко Е.О., Сибатуллина М.И., Миникаев С.Р., Савченко Г.Ю. // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 (19). С. 8-12.
9. Кузин А.В., Хлапонин Н.С. Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 1 // Металлург. 2019. № 1. С. 10-16.
10. Effect of coke quality on blast-furnace performance indices / I.F. Kurunov, V.L. Emel'yanov, V.N. Titov, V.V. Kakunin // Metallurgist. 2007. Vol. 51. No. 11-12. P. 644-648.

11. Анализ изменения гранулометрического состава кокса на протяжении четверти века на примере бывшего Криворожского коксохимического завода / В.П. Лялюк, Е.О. Шмельцер, И.А. Ляхова [и др.] // Кокс и химия. 2013. № 12. С. 28-33.
12. Грибанов Е.А., Ганин Д.Р., Фукс А.Ю. Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе // Черные металлы. 2023. № 11. С. 4-7.
13. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4(32). С. 28-30.
14. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 2(30). С. 24-27.
15. Кузин А.В., Хлапонин Н.С. Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 2 // Металлург. 2019. №2. С. 12-18.
16. Оценка зависимости качества доменного кокса от параметров производителя / В.И. Гладышев, Н.Н. Горшков, А.В. Денисов [и др.] // Сталь. 2001. №3. С. 3-6.
17. Влияние качества доменного кокса на работу доменной печи полезным объемом 2000 м<sup>3</sup> / Филоненко Ю.Я., Васильев С.В., Муравков П.Г., Дорофеев И.М. // Кокс и химия. 1972. № 6. С. 31–33.
18. Формирование гранулометрического состава кокса. Его взаимосвязь с показателями механической прочности / Карунова Е.В., Гюльмалиев А.М., Гагарин С.Г., Султангузин И.А. // Кокс и химия. 2006. № 2. С. 23–31.
19. Стабильность качества кокса для доменной плавки / В.П. Лялюк, В.П. Соколова, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим // Кокс и химия. 2012. № 8. С. 19-24.
20. Характеристики кокса, загружаемого в доменные печи ПАО «Северсталь», и особенности его поведения в процессе выплавки чугуна / Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.В. Карунова [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 7(1387). С. 40-45.
21. Сибатуллин С.К., Харченко А.С. Использование коксового орешка на доменных печах: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 162 с.
22. Влияние крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной конусным загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А. С. Харченко, А. В. Павлов, С. В. Юдина, С. К. Сибатуллин // Черные металлы. 2023. № 12. С. 20-24.

#### Сведения об авторах

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

**Юдина Светлана Владимировна** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yudinasv1478@mail.ru

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

**Свечникова Наталья Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: natasha-svechnikova@yandex.ru

**Юдин Данил Владиславович** – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ydv2002@mail.ru

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

**Павлов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, начальник доменного цеха ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

**THE EFFECT OF EQUIVALENT COKE SIZE ON THE PERFORMANCE OF A BLAST FURNACE EQUIPPED WITH A TRAY LOADING DEVICE IN THE CONDITIONS OF PJSC MMK**

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

**Yudina Svetlana V.** – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yudinasv1478@mail.ru

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

**Svechnikova Natalya Yu.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nata-sha-svechnikova@yandex.ru

**Yudin Danil V.** – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: ydv2002@mail.ru

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

**Pavlov Alexander V.** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Blast Furnace Shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** The operation of the MMK PJSC blast furnace equipped with a non-cone tray-type loading device was investigated when the surface equivalent size of coke was changed. The increase in size was carried out by increasing the content of classes 60-80 and +80 mm. In the base period, it was 50.4 mm, in the experimental period – 52.3 mm with constant loading mode. The results showed that the increase in the size of coke was accompanied by a spontaneous redistribution of it relative to the zones of the grate space: axial, wall, ore ridge. The consequence was a change in the ore load along the horizontal section, as indicated by the temperature of the gas in the upper part of the furnace. An increase in the surface equivalent size of coke from 50.4 to 52.3 mm was accompanied by a decrease in its specific consumption by 0.71% (3 kg/ton of pig iron) and a decrease in furnace productivity by 1.29%. To increase the positive effect of coke size on the course of blast furnace melting, it is advisable to develop rational modes of loading charge materials along the annular zones of the grate with adjustment of blast parameters.

**Keywords:** blast furnace melting, cast iron, coke consumption, furnace performance, surface equivalent coke size, loading mode, blast parameters

---

Ссылка на статью:

Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 4-8.

Kharchenko A.S., Yudina S.V., Sibagatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V., Kurguzov K.V., Pavlov A.V. The effect of equivalent coke size on the performance of a blast furnace equipped with a tray loading device in the conditions of PJSC MMK. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 4-8.

УДК 669.056

Малютин Н.С., Столяров А.М., Юдин Д.В.

## КОВШЕВАЯ ОБРАБОТКА ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60

**Аннотация.** Трубная сталь класса прочности К60 производится в кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В кислородных конвертерах выплавляется полупродукт, а сталь получается в результате продолжительной обработки металла на участке ковшевой обработки отделения непрерывной разливки стали (ОНРС). В работе рассматриваются особенности ковшевой обработки трубного металла на данном участке. Для этого проанализирован массив производственных данных из 50 плавов стали класса прочности К60. Ковшевая обработка металла последовательно проводилась на АКП (первая часть), УВС и АКП (вторая часть). Общая продолжительность ковшевой обработки составляла в среднем 141 мин, или 2 ч и 21 мин. Для ее сокращения рекомендовано уменьшить первую часть обработки на АКП до 45 мин, вторую часть – до 20 мин, вакуумирование – до 30 мин. Это позволит уменьшить общую продолжительность обработки в среднем на 31 мин или на 22 % (отн.). Расчетные значения степени удаления серы и водорода достаточно высоки – в среднем 71,4 и 71,9% соответственно, значительно ниже – 14,1% степень удаления азота. Наибольшее усвоение получено для ниобия – 62,7%, меньшее – 42,4 и 30,2% для титана и кальция соответственно. При анализе данных установлена статистически значимая – с вероятностью 99,9% возрастающая линейная зависимость усвоения титана от содержания растворенного в металле алюминия. Согласно выявленной зависимости для получения усвоения титана не менее 45% следует иметь содержание растворенного в стали алюминия не ниже 0,0425%.

**Ключевые слова:** трубная сталь, агрегат «ковш-печь», вакууматор, ковш, обработка, технология

Трубная сталь класса прочности К60 производится в кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В кислородных конвертерах выплавляется полупродукт, а сталь получается в результате продолжительной обработки металла на участке ковшевой обработки отделения непрерывной разливки стали (ОНРС) [1–7]. В работе рассматриваются особенности ковшевой обработки трубного металла на данном участке.

С этой целью проанализирован массив производственных данных из 50 плавов. Металл в сталеразливочном ковше сначала поступал на агрегат «ковш-печь» (АКП), где производилась корректировка химического состава с его усреднением путем донной продувки аргоном, десульфурация металла под «белым» шлаком, нагрев металла перед вакуумированием. После этого ковш транспортировался на установку вакуумирования стали (УВС) циркуляционного типа для дегазации металла. Затем ковш повторно отправлялся на АКП для проведения микролегирования металла и его усреднения перед разливкой на МНЛЗ.

Рассмотрим логистику ковшевой обработки трубной стали. На рис. 1 представлена информация об усредненной продолжительности обработки металла (в абсолютных цифрах) на разных агрегатах участка ковшевой обработки стали.

Следует отметить, что ковшевая обработка трубной стали имеет значительную общую продолжительность, составляющую в среднем 141 мин, или 2 ч и 21 мин. Продолжительность нахождения металла на различных агрегатах в относительных единицах показана на рис. 2.

Наибольшую долю времени – 61,5 % (отн.) металл суммарно обрабатывался на АКП, при этом первая часть обработки в 1,7 раза превышала вторую часть. Средняя продолжительность вакуумирования равнялась 39 мин и

составила 27,4% в относительных единицах. Общую продолжительность ковшевой обработки трубной стали необходимо, несомненно, сокращать.

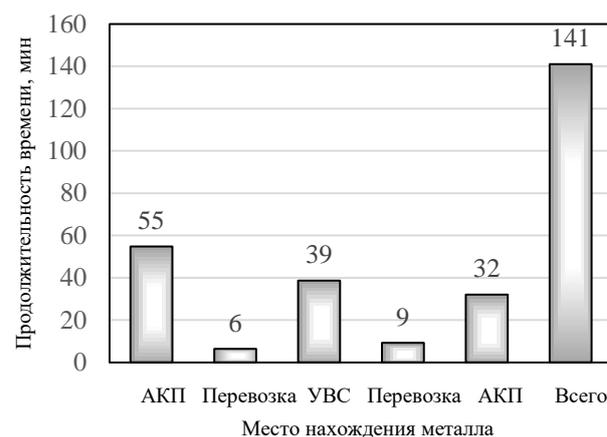


Рис. 1. Абсолютная продолжительность ковшевой обработки трубной стали

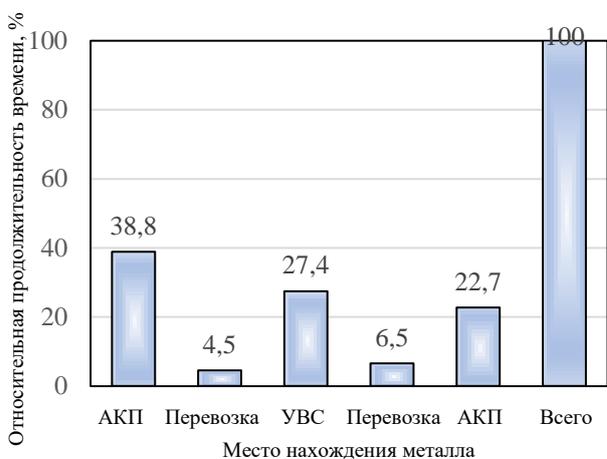


Рис. 2. Относительная продолжительность ковшевой обработки стали

Для этого целесообразно сократить первую часть обработки на АКП до 45 мин, вторую часть – до 20 мин, вакуумирование – до 30 мин. Это позволит уменьшить общую продолжительность обработки в среднем на 31 мин или на 22% (отн.).

В процессе ковшевой обработки происходит изменение химического состава металла. Информация о химическом составе металла (% по массе) перед началом ковшевой обработки и после ее завершения представлена ниже:

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
До обработки	0,054	0,191	1,59	0,009	0,008	0,016	0,17
После обработки	0,069	0,217	1,71	0,002	0,009	0,023	0,17

Элемент	Cu	Al	Ti	Nb	N	Ca
До обработки	0,13	0,046	0,002	0,002	0,006	0,000
После обработки	0,13	0,039	0,022	0,051	0,005	0,002

В результате коррекции химического состава металла в нем увеличилось содержание углерода, кремния, марганца, фосфора, хрома, титана, ниобия и кальция, снизилось содержание серы, алюминия и азота, а содержание никеля и меди осталось прежним (рис. 3).

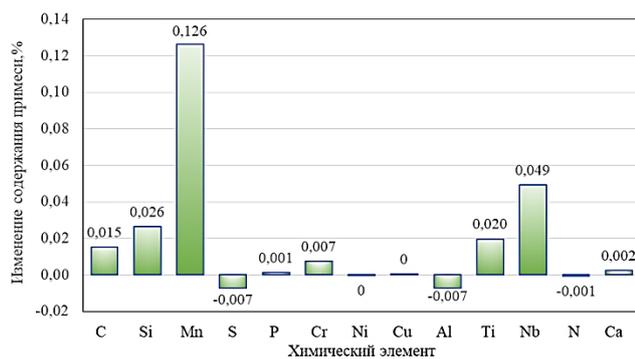


Рис. 3. Изменение химического состава стали в процессе ковшевой обработки

На рис. 4 показана информация об изменении усредненной температуры металла по ходу ковшевой обработки.

Для эффективной ковшевой обработки трубной стали чрезвычайно важное значение имеет температурный режим процесса, так как в процессе вакуумной обработки происходит неизбежное падение температуры металла, а для разливки на МНЛЗ должен быть сохранен его определенный перегрев над температурой ликвидус.

За первую часть обработки на АКП температура металла поднимается в среднем на 48°C для компенсации потерь тепла при вакуумировании в количестве 44°C. При осуществлении второй части обработки на АКП температура металла практически не меняется. Перед отдачей на МНЛЗ перегрев металла над температурой ликвидус в среднем составляет 55°C.

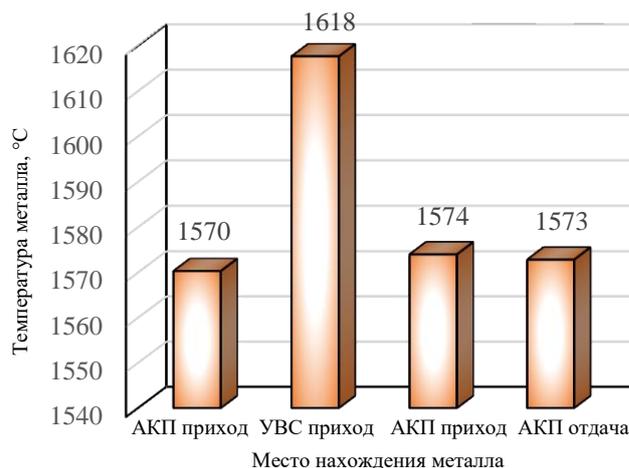


Рис. 4. Температурный режим ковшевой обработки

В процессе ковшевой обработки трубной стали решаются задачи по удалению из металла вредных примесей. Десульфурация металла осуществляется на первой части обработки на АКП путем наведения хорошо раскисленного «белого» шлака. Дегазация металла проводится на УВС при среднем остаточном давлении в вакуумной камере 0,7 мм рт. ст. Информация о расчетных значениях степени удаления вредных примесей представлена на рис. 5.

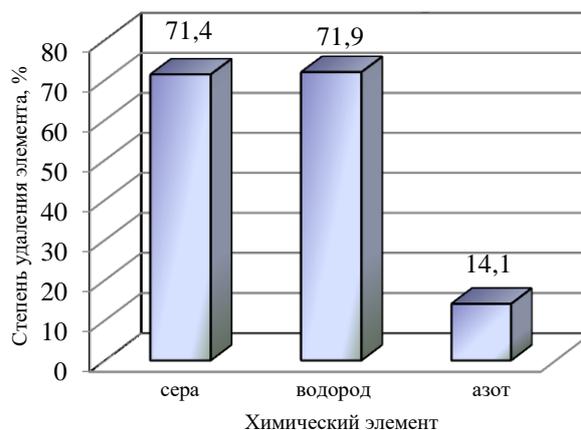


Рис. 5. Информация о степени удаления вредных примесей

Степень удаления серы и водорода достаточно высока – в среднем 71,4 и 71,9% соответственно. Значительно ниже – 14,1% степень удаления азота.

Микролегирование металла производилось во второй части обработки на АКП путем ввода порошковой проволоки с феррониобием, ферротитаном и феррокальцием. С учетом расхода данных материалов на ковш вместимостью 360 т рассчитано усвоение введенных элементов. Данные о среднем усвоении элементов показаны на рис. 6.

Наибольшее усвоение получено для ниобия – 62,7 %, меньшее – 42,4 и 30,2 % для титана и кальция соответственно.

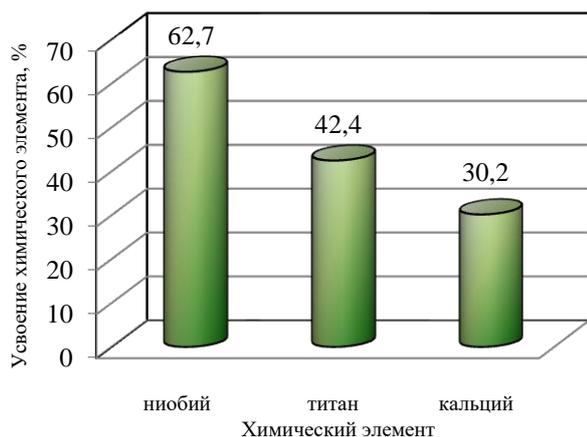


Рис. 6. Среднее усвоение введенных химических элементов

В процессе анализа данных установлена статистически значимая – с вероятностью 99,9% возрастающая линейная зависимость усвоения титана ( $U_{Ti}$ , %) от содержания растворенного в металле алюминия ( $[Al]$ , %). Данная зависимость характеризуется уравнением

$$U_{Ti} = 752,7 \cdot [Al] + 13,1, \quad r = 0,557, \quad r_{0,001} = 0,456.$$

Графическое изображение зависимости приведено на рис. 7. Для повышения усвоения титана необходимо проводить более полное раскисление металла.

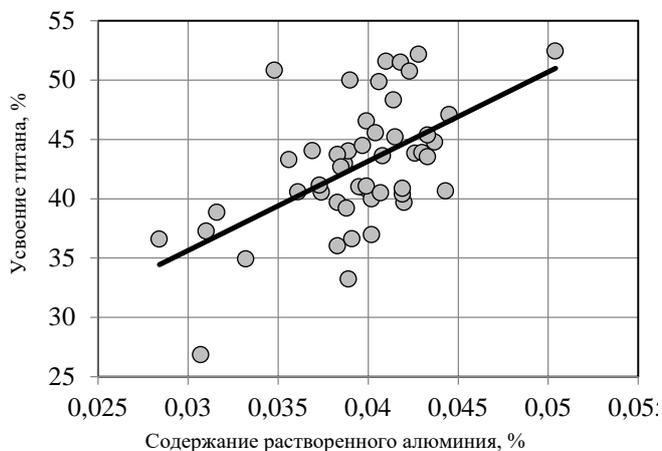


Рис. 7. Зависимость усвоения титана от содержания растворенного в стали алюминия

Согласно выявленной зависимости для получения усвоения титана не менее 45% следует иметь содержание растворенного в стали алюминия не ниже 0,0425%.

**Заключение.** В работе проанализирован массив производственных данных из 50 плавки стали класса прочности К60. Ковшевая обработка металла после-

довательно проводилась на АКП (первая часть), УВС и АКП (вторая часть). Общая продолжительность ковшевой обработки составляет в среднем 141 мин, или 2 ч и 21 мин. Для ее сокращения рекомендовано уменьшить первую часть обработки на АКП до 45 мин, вторую часть – до 20 мин, вакуумирование – до 30 мин. Это позволит уменьшить общую продолжительность обработки в среднем на 31 мин или на 22 % (отн.). Расчетные значения степени удаления серы и водорода достаточно высоки – в среднем 71,4 и 71,9% соответственно, значительно ниже – 14,1% степень удаления азота. Наибольшее усвоение получено для ниобия – 62,7%, меньшее – 42,4 и 30,2% для титана и кальция соответственно. При анализе данных установлена статистически значимая – с вероятностью 99,9% возрастающая линейная зависимость усвоения титана от содержания растворенного в металле алюминия. Для получения усвоения титана не менее 45% необходимо иметь содержание растворенного в стали алюминия не ниже 0,0425%.

#### Список источников

1. Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А. Основы производства и обработки металлов. М.: МГВМИ, 2005. 416 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали. М.: Тепло-техник, 2008. 544 с.
3. Современные процессы ковшевой десульфурации чугуна / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 17–23.
4. Ковшевая обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунев // Теория и технология металлургического производства. 2016. №2 (19). С. 26 – 29.
5. Ушаков С.Н. Десульфурация стали на агрегате «ковш-печь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2 (33). С. 4–10.
6. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
7. О выходе годного металла при производстве конвертерной стали / А.Н. Завалишина, А.М. Столяров, И.М. Потапов, Д.В. Юдин, В.П. Чернов // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4 (43). С. 23-26.

Сведения об авторах

**Малютин Николай Сергеевич** – бакалавр, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

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

**Юдин Данил Владиславович** – бакалавр, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

---

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

---

LADLE TREATMENT OF PIPE STEEL OF STRENGTH CLASS K60

**Malyutin Nikolay S.** – Bachelor of Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Stolyarov Alexander M.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru.

**Yudin Danil V.** – Bachelor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** Tube steel of strength class K60 is produced in the oxygen converter shop of PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works». Semi-product is melted in oxygen converters, and steel is obtained as a result of continuous processing of metal at the ladle processing section of the continuous casting department. The paper considers the peculiarities of ladle processing of pipe metal at this section. For this purpose the array of production data from 50 melts of steel of strength class K60 is analyzed. The ladle treatment of metal was carried out sequentially at ACP (first part), UHS and ACP (second part). The total duration of ladle treatment was 141 min or 2 h and 21 min on average. For its reduction it is recommended to reduce the first part of processing on ACP to 45 min, the second part - to 20 min, vacuumizing – to 30 min. This will reduce the total treatment duration by 31 min or 22% (relative) on average. The calculated values of sulfur and hydrogen removal rate are quite high – 71.4 and 71.9% on average, respectively, the nitrogen removal rate is much lower – 14.1%. The highest assimilation was obtained for niobium – 62.7%, lower – 42.4 and 30.2% for titanium and calcium, respectively. When analyzing the data, a statistically significant (with a probability of 99.9%) increasing linear dependence of titanium assimilation on the content of aluminum dissolved in the metal was established. According to the revealed dependence for obtaining titanium assimilation not less than 45% it is necessary to have the content of dissolved aluminum in steel not lower than 0.0425%.

**Keywords:** pipe steel, ladle-furnace unit, vacuator, ladle, processing, technology

---

Ссылка на статью:

Малютин Н.С., Столяров А.М., Юдин Д.В. Ковшевая обработка трубной стали класса прочности K60 // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 9-12.

Malyutin N.S., Stolyarov A.M., Yudin D.V. Ladle treatment of pipe steel of strength class K60. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 9–12.

## РЕЦИКЛИНГ АСПИРАЦИОННОЙ ПЫЛИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАНГАНЦА

**Аннотация.** В статье представлены результаты лабораторных исследований и производственных испытаний, направленных на решение проблемы рециклинга аспирационной пыли, образующейся при выплавке ферросиликомарганца в рудовосстановительных электродуговых печах АО «Узметкомбинат». В ходе выполнения работы была разработана специальная методика изготовления и исследования образцов брикетов в лабораторных условиях, позволившая значительно снизить трудоемкость исследований и ускорить достижение результатов. Исследования позволили разработать и оптимизировать состав брикетов и технологию их изготовления, определить критерии качества брикетов и методы их контроля. Апробация полученных брикетов в производственных условиях показала, что они вполне могут использоваться в качестве компонента шихты при выплавке ферросиликомарганца взамен традиционной кусковой марганцевой руды. Полученные результаты дают возможность практически полностью утилизировать аспирационную пыль выплавки ферросплавов (вернуть в производство содержащийся в пыли марганец), на 13-15% уменьшив количество подлежащих захоронению техногенных отходов, и на 6-8% сократить потребности в марганецсодержащем сырье при соответствующем снижении себестоимости конечной продукции.

**Ключевые слова:** ферросиликомарганец, рудовосстановительная печь, пылевидные отходы, брикетирование, рециклинг

### Введение

Черная металлургия – один из основных источников промышленных выбросов и техногенных отходов. В целом на предприятиях отрасли образуются сотни миллионов тонн отходов, которые постоянно накапливаются в отвалах, шламохранилищах и на промышленных полигонах, создавая серьезную экологическую опасность [1, 2]. При этом в составе большинства этих отходов содержатся ценные компоненты, в первую очередь востребованные в производстве металлы. К таким потенциально ценным техногенным отходам относятся и значительная часть отходов ферросплавного производства: аспирационные пыли выплавки большинства ферросплавов, а также пыли и мелочь их дробления и отсева [3].

Пыль дробления ферросплавов имеет дисперсность от десятых долей до нескольких миллиметров и состав аналогичный составу ферросплавов, при дроблении которых она образовалась. Задача её возвращения в производство достаточно успешно решена уже на многих предприятиях: пыль дробления брикетируют, как правило, с добавлением цемента и используют так же, как обычные кусковые материалы, для легирования металла в печи, в ковше и установках внепечной обработки. Однако количество образования пыли дробления относительно невелико и составляет не более 0,2-0,25% от объема производства ферросплавов [4].

Аспирационные пыли плавки ферросплавов образуются в значительно больших количествах – от 7-10 до 20-25% от объема производимых сплавов. Однако рециклинг этих пылей представляет серьезные трудности, что связано, в первую очередь, с их высокой дисперсностью (от 0,1-0,3 до 40-60 мкм), неоднородностью и нестабильностью состава. Как правило, металлы, содержащиеся в них, находятся в оксидах или

более сложных соединениях. Их восстановление может быть реализовано в тех же рудотермических печах, однако это требует предварительной гомогенизации, в некоторых случаях сушки и обогащения, и обязательного окускования, так как ни дуговые, ни шахтные печи не могут работать с тонкодисперсными материалами [3, 5].

Наиболее популярным процессом окускования является брикетирование. Но изготовление брикетов для каждого материала требует поиска оптимального состава (имеет значение не только химический состав, но и гранулометрия компонентов), технологии приготовления смеси (последовательность ввода компонентов, продолжительность и способы перемешивания компонентов) и способов уплотнения. Брикет должен обладать не только заданными размерами, но и требуемой плотностью, объемной и поверхностной прочностью, достаточной для их транспортировки, складирования, дозировки и подачи в реакционную зону печи. При этом брикеты должны иметь минимальное количество связующего и влаги, чтобы не ухудшать технические параметры плавки [6 - 8].

На АО «Узметкомбинат» ежегодно изготавливается около 10000 т ферросиликомарганца MnC-17, используемого для нужд собственного электросталеплавильного производства, при этом ежемесячно образуется 200-220 т аспирационной пыли, то есть в среднем около 2500 т в год. Содержание MnO в этой пыли колеблется в пределах 24-28%, что сопоставимо с содержанием оксида марганца в руде (36-44%), используемой в качестве основного шихтового материала. С аспирационной пылью сегодня в отвалы ежегодно попадает около 500 т марганца. Таким образом, рециклинг этой пыли является важной задачей и с экономической, и с экологической точки зрения.

### Методика исследований

Стандартной методики для исследования свойств брикетов из техногенных отходов нет, соответственно,

для выбора и оптимизации состава, способа смешивания компонентов и технологии изготовления брикетов из аспирационной пыли выплавки ферросиликомарганца была разработана оригинальная методика лабораторных исследований, основанная на методах испытания формовочных смесей (ГОСТ 23409-78), строительных (ГОСТ 8462-85 и ГОСТ 310.4-81) и огнеупорных материалов (ГОСТ 4071-2021), позволившая достаточно оперативно и с минимальными затратами решить поставленные задачи.

Для приготовления брикетировочной смеси использовался лабораторный лопастной смеситель. Влажность исходных материалов контролировалась на приборе ускоренного определения влажности с функцией автоматического взвешивания в процессе сушки. Для испытаний на прочность при сжатии в сыром и отвержденном состоянии изготавливались цилиндрические образцы диаметром 50 мм, такие же образцы использовались при проведении испытаний на осыпаемость после отверждения. Испытания в отвержденном состоянии проводили также на прочность при изгибе на образцах типа балочка с прямоугольным сечением 25×25 мм. Изготовление образцов осуществлялось с помощью лабораторного копра. Прочностные испытания в сыром состоянии на сжатие и в сухом состоянии на изгиб проводили на лабораторной испытательной машине 04116Б, в сухом состоянии на сжатие – на гидравлическом прессе П-125 (рис. 1).



а



б



в

Рис. 1. Прочностные испытания образцов из брикетировочной массы:  
а – на сжатие сырых образцов;  
б – на изгиб отвержденных образцов;  
в – на сжатие отвержденных образцов

Аспирационная пыль выплавки ферросиликомарганца в рудовосстановительной электродуговой печи представляет собой тонкодисперсный порошок с размером частиц от 0,1-0,5 до 30-50 мкм светло-коричневого или серо-коричневого цвета с насыпной плотностью около 900 кг/м<sup>3</sup>.

Исследовались варианты составов брикетов на жидкостекольном, органическом и цементном связующем. Наилучшие результаты, исходя из критериев наибольшей удельной прочности (прочность, отнесенная к содержанию связующего) и минимальной стоимости брикетов, были получены при использовании цементной связующей композиции. При оптимизации состава на цементной связке варьировалось относительное количество связующего (табл. 1), а при оптимальном содержании связующего исследовалось влияние количества воды на прочность брикетов: соотношение «вода / связующее» изменялось в интервале от 0,41 до 0,24. Отверждение брикетов, изготовленных с использованием связующего на базе цемента, осуществлялось в условиях естественной сушки при 20-35°С в течение суток.

Таблица 1

Рецептура смеси для брикетов на цементном связующем

Наименование компонентов смеси	Содержание, %				
	90	93	95	97	100
Пыль газоочистки выплавки ферросиликомарганца	90	93	95	97	100
Цементное связующее	10	7	5	3	0
Вода сверх (100%)	12	12	12	12	12

**Результаты лабораторных исследований и производственных испытаний**

Результаты исследования влияния количества цементного связующего и воды на прочностные характеристики брикетов представлены на рис. 2 и табл. 2.

Таблица 2

Влияние содержания воды на прочность брикетов

Состав брикетировочной смеси	Вода сверх 100%	Прочность на сжатие, МПа	
		в сыром состоянии	в отвержденном состоянии
Пыль газоочистки выплавки ферросиликомарганца 97%	7	0,45	0,90
	8	0,51	1,03
	9	0,68	1,56
Цементное связующее 3%	10	0,94	3,29
	12	2,74	8,32

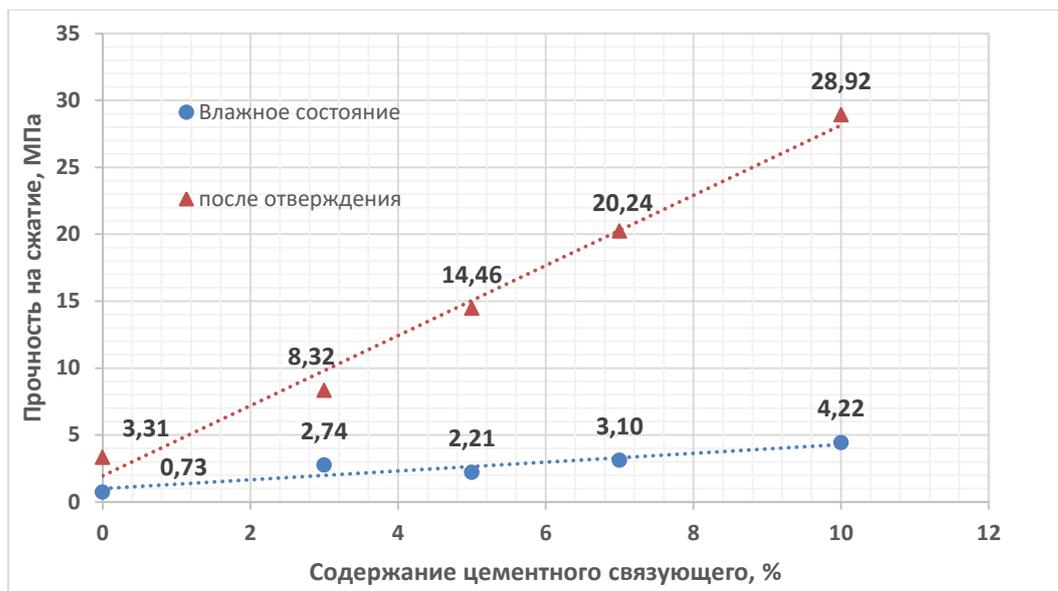


Рис. 2. Зависимость прочности брикетов на сжатие от содержания связующего

Из графиков, приведенных на рис. 2, видно, что прочность брикетов как в сыром состоянии, так и после отверждения практически линейно растет с увеличением содержания связующего. Окончательный выбор состава брикетов осуществлялся исходя из принципа, что содержание связующего и влаги должно быть минимальным, но достаточным, чтобы обеспечить требуемые физико-механические и технологические свойства, то есть исключить или минимизировать разрушение брикетов. На основании практических данных были определены пороговые значения прочности брикетов: сырая прочность при сжатии – не ниже 1 МПа, прочность отвержденных брикетов при сжатии – не ниже 3,5 МПа. В качестве рабочего состава брикетов был принят следующий: пыль – 97%, связующее – 3%, вода сверх 100% – 12%. Фазовый химический состав полученных брикетов представлен в табл. 3.

се с размером ячеек: Ø50×30 мм. Полученные брикеты представлены на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Брикеты из пыли плавки ферросиликомарганца: а – общий вид; б – опытная партия

Таблица 3  
Химический состав брикетов из аспирационной пыли плавки МнС-17, %

MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	S
23,5-27,1	26,0-27,5	5,3-5,5	11,5-11,8	6,8-7,0	6,9-7,1	0,35-0,37	5,4-5,7

На завершающей стадии исследований проводились производственные испытания брикетов с оценкой степени их разрушения при транспортировке, дозировании и подаче в плавильную печь и их влияния на технологические параметры плавки: производительность печи, коэффициент усвоения марганца, удельное образование шлака, удельный расход электроэнергии и восстановителя. Приготовление смеси осуществлялось в шнековом смесителе непрерывного действия, изготовление брикетов – на валковом прес-

Изготовленные брикеты при минимальном содержании связующего (~3%) имели достаточную сырую прочность – 2,74 МПа и высокую прочность по-

сле отверждения на воздухе – 8,3 МПа, что почти в 2,5 раза выше прочности покупных брикетов из рудного сырья. Это обеспечило минимальные потери материала в процессе сушки, транспортировки, складирования и подачи брикетов по системе конвейеров от суточных бункеров в рабочее пространство рудовосстановительной печи: суммарные потери (степень разрушения брикетов) составили не более 5%, при том, что степень разрушения покупных брикетов из рудного сырья составляет, как правило, 25-30%.

Опытная партия брикетов (около 33 т) использовалась в процессе выплавки ферросиликомарганца вместо традиционно используемых брикетов из отсева рудной мелочи и в том же отношении к остальным компонентам шихты: марганцевая руда – 80 %; марганцевый концентрат – 10%; брикеты из аспирационной пыли – 10%.

Коэффициент восстановления и усвоения марганца из полученных брикетов в процессе плавки составил 80-85%, что соответствует показателям рудных материалов и на 10-12% превышает аналогичную характеристику покупных брикетов из рудной мелочи. Выплавка ферросиликомарганца с использованием брикетов из аспирационной пыли прошла без замечаний и практически не повлияла на ход плавки, производительность печи и объёмы выбросов. Полученный в результате ферросиликомарганец полностью соответствовал требованиям ГОСТ 4756-91 к сплаву марки MnC-17. При этом, несмотря на меньшее содержание марганца в брикетах из аспирационной пыли, чем в брикетах из отсева марганцевой руды, при проведении производственных испытаний было отмечено снижение удельного расхода электроэнергии на ~ 5% и кокса на ~ 4%, а также меньшее удельное образование шлака – примерно на 5%, что объясняется более высокой прочностью и меньшей осыпаемостью полученных брикетов по сравнению с покупным брикетированным сырьем.

#### Выводы

Производственные испытания – выплавка ферросиликомарганца с использованием брикетов из ас-

пирационной пыли рудовосстановительной печи показали, что полученные брикеты являются полноценной заменой традиционной марганецсодержащей шихты. Разработанные технические решения позволят примерно на 7% сократить количество закупаемой марганцевой руды (на ~ 1600 т ежегодно) и на 13-15% сократить количество захораниваемых сегодня техногенных отходов ферросплавного производства. А ожидаемый экономический эффект от рециклинга пылевидных отходов выплавки ферросиликомарганца для комбината составит около 250 тыс. долларов в год.

#### Список источников

1. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 469 с.
2. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия. М.: Высш. шк., 1998. 447 с.
3. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: в 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окискованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / Ладыгичев М.Г. и др. М.: Машиностроение, 2001. 896 с.
4. Проценко Т.Л., Жуковский Е.Ф. Экспериментальные исследования процесса брикетирования пыли производства ферросилиция // Вестник БГТУ им. Шухова. 2014. № 6. С. 187-191.
5. Ровин С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
6. Носков В.А. Исследование технологических параметров и режимов получения брикетов из металлургических отходов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 5. С. 115-117.
7. Кочкин В.Д., Алиферов А.И., Золотарев В.В. Способы и установки для утилизации мелкодисперсных отсевов ферросплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. Т. 31. № 1. С. 91-102.
8. Peng Z., Gregurek D., Wenzel C., and White J.F. Slag Metallurgy and Metallurgical Waste Recycling // JOM. 2016. Vol. 68. Iss.9. P.2313-2315.

#### Сведения об авторах

**Ровин Сергей Леонидович** – доктор технических наук, заведующий металлургическим научным центром АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Ташкентская область, Республика Узбекистан. E-mail: s.rovinsl@uzbeksteel.uz

**Гараев Роман Салимович** – первый заместитель председателя правления – исполнительный директор АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Ташкентская область, Республика Узбекистан. E-mail: garaevrs@uzbeksteel.uz

**Каримов Ахрор Муратович** – ведущий инженер-исследователь АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Ташкентская область, Республика Узбекистан. E-mail: a.karimov@uzbeksteel.uz

**Фозилов Бунеджон Рахматиллаевич** – ведущий инженер-исследователь АО «Узметкомбинат», г. Бекабад, Ташкентская область, Республика Узбекистан. E-mail: fozilov.b@uzbeksteel.uz

## RECYCLING OF ASPIRATION DUST OF ELECTRIC ARC MELTING OF FERROSILICON MANGANESE

**Rovin Sergey L.** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Metallurgical Research Center of JSC Uzmetkombinat, Bekabad, Tashkent region, Republic of Uzbekistan. E-mail: s.rovinsl@uzbeksteel.uz

**Garayev Roman S.** – First Deputy Chairman of the Board – Executive Director of JSC Uzmetkombinat, Bekabad, Tashkent region, Republic of Uzbekistan. E-mail: garaevrs@uzbeksteel.uz

**Karimov Akhror M.** – leading research engineer of JSC Uzmetkombinat Bekabad, Tashkent region, Republic of Uzbekistan. E-mail: a.karimov@uzbeksteel.uz

**Fozilov Bunedjon R.** – leading research engineer of JSC Uzmetkombinat, Bekabad, Tashkent region, Republic of Uzbekistan. E-mail: fozilov.b@uzbeksteel.uz

**Abstract.** The article presents the results of laboratory studies and production tests aimed at solving the problem of recycling aspiration dust generated during smelting of ferrosilicon manganese in ore-reducing electric arc furnaces of JSC «Uzmetkombinat». In the course of the work, a special technique for the manufacture and study of briquettes in laboratory conditions was developed, which made it possible to significantly reduce the labor intensity of the studies and accelerate the achievement of results. The studies made it possible to develop and optimize the composition of briquettes and the technology of their manufacture, determine the criteria for the quality of briquettes and methods for their control. Testing of the obtained briquettes in production conditions showed that they can be used as a component of the charge in the smelting of ferrosilicon manganese instead of traditional lump manganese ore. The obtained results make it possible to almost completely utilize aspiration dust from ferroalloy smelting (return the manganese contained in the dust to production), reducing the amount of man-made waste subject to disposal by 30-35%, and reducing the need for manganese-containing raw materials by 10-12%, with a corresponding reduction in the cost of the final product.

**Keywords:** ferrosilicon manganese, ore recovery furnace, pulverized waste, briquetting, recycling

---

Ссылка на статью:

Рециклинг аспирационной пыли электродуговой плавки ферросиликомарганца / Ровин С.Л., Гараев Р.С., Каримов А.М., Фозилов Б.Р. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 13-17.  
Rovin S.L., Garayev R.S., Karimov A.M., Fozilov B.R. Recycling of aspiration dust of electric arc melting of ferrosilicon manganese. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 13-17.

УДК 669.213.63:543.57

Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В.

**ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛИСТЫХ СОРБЦИОННО-АКТИВНЫХ ЗОЛОТЫХ РУД**

**Аннотация.** Цель – исследование и численная оценка эффекта занижения результатов пробирного анализа хвостов цианирования сорбционно-активных золотосодержащих продуктов. В настоящее время около 20% руд, поступающих на технологические исследования в институт «Иргиредмет», имеют высокую сорбционную активность, связанную с наличием в сырье углерода в органической форме. Хвосты цианирования этих руд и их концентратов имеют сложности с определением содержания золота – пробирный анализ зачастую даёт заниженные результаты, не отражающие действительное содержание золота в твёрдой фазе. Для численной оценки этого занижения были проведены опыты по «заражению» хвостов цианирования углистых золотосодержащих концентратов руд двух месторождений РФ, а также каменного угля одного из месторождения Иркутской области и активированного угля производства КНР известным количеством золота из щелочных цианидных растворов, моделирующих условия цианидного выщелачивания. «Заражённые» известным количеством золота продукты были проанализированы пробирно-атомно-абсорбционным анализом на золото. Для изученных продуктов количество сорбированного золота, рассчитанное по убыли его концентрации в жидкой фазе, составило 1,79–34,30 г/т. Из этого количества 0,39–9,64 г/т или 18,3–50,7% не было определено пробирно-атомно-абсорбционным анализом. Предположительно занижение результатов пробирного анализа связано с тем, что золото, изначально находящееся в сорбированном состоянии, не образует металлических частиц с крупностью, достаточной для смачивания расплавом свинца с последующим извлечением в веркблей, и увлекается в боросиликатные шлаки. Полученные в работе результаты имеют важные практические последствия, так как указывают на недооценку потерь золота на промышленных предприятиях, перерабатывающих сорбционно-активные руды и концентраты, и требуют разработки усовершенствованных методов анализа.

**Ключевые слова:** золото, хвосты цианирования, сорбционная активность, углистое вещество, пробирный анализ, погрешность

**Введение**

В период с 2010 по 2024 годы научно-исследовательский и проектный институт «Иргиредмет» провёл технологические исследования золотосодержащих руд более 160-ти месторождений, расположенных на территории России и стран ближнего зарубежья. Среди них руды 35 месторождений отличались высокой сорбционной активностью (СА или в англоязычной литературе – preg-robbing) твёрдой фазы пульпы в цианистом процессе, не позволяющей эффективно проводить их прямое цианирование. В ряде случаев при обогащении руд получали концентраты, также проявляющие неприемлемо высокую СА и требующие особых способов переработки. Указанный факт отражает современный масштаб проблемы переработки сорбционно-активного золотосодержащего сырья.

Во всех указанных случаях СА была связана с присутствием в рудах углерода в органической (некарбонатной) форме. Эта форма представляет собой одну из множества промежуточных стадий геологического превращения относительно легких насыщенных (минимум связей С-С) органических веществ в антрациты с высокой степенью карбонизации (максимум связей С-С). Для наименования указанных форм углерода общепринятыми являются термины «органический углерод», «органическое вещество», «углистое (углеродистое) вещество» [1, 2]. СА органических форм углерода в цианистом процессе может отличаться на порядки – быть на уровне активированных углей, вообще не проявляться или проявляться слабо.

Вопросам переработки углистых сорбционно-активных золотосодержащих руд посвящено большое

количество исследований различных авторов, которые отражены в обзорах [1–7].

При исследовании сорбционно-активных руд и концентратов нами и другими авторами [3] было отмечено, что данные руды и хвосты их цианирования представляют сложный продукт с аналитической точки зрения. Во многих случаях до 50% золота, сорбированного твёрдой фазой пульпы при цианировании, не определяется пробирным анализом – он даёт существенное занижение содержания золота и не является достоверным. Выявлению и оценке этих закономерностей посвящена настоящая статья.

Цель исследования – выявление погрешности пробирного анализа твёрдых продуктов, содержащих сорбированное золото, и её численная оценка.

**Материалы и методы исследования**

Исследования проведены на хвостах цианирования двух углистых сорбционно-активных золотосодержащих концентратов руд двух месторождений РФ, а также на каменном угле одного из месторождений Иркутской области и товарном активированном (активном) угле производства КНР. Краткий химический состав и крупность указанных продуктов приведены в табл. 1.

Методика проведения опытов состояла в контактировании проб указанных продуктов с золотосодержащим раствором с известной концентрацией золота. При этом количество сорбированного твёрдой фазой золота определяли по убыли концентрации золота в жидкой фазе. Далее проводили стандартный пробирный либо пробирно-атомно-абсорбционный анализ золота в твёрдой фазе после опыта, сравнивая результат анализа и расчётный результат по содержанию золота в твёрдой фазе.

© Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В., 2024

Краткий химический состав и крупность исследованных сорбционноактивных продуктов

Характеристики исследуемых продуктов		Значения			
Наименование продукта		Хвосты цианирования промпродукта гравитации руды месторождения №1	Хвосты цианирования флотоконцентрата руды месторождения №2	Каменный уголь одного из месторождений Иркутской области	Активный уголь производства КНР
Краткое наименование продукта		Продукт №1	Продукт №2	Продукт №3	Продукт №4
Содержание компонентов	SiO <sub>2</sub> , %	30,5	64,6	2,5	Не определяли
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	8,0	12,2	1,8	
	Fe(общ.), %	27,8	6,00	0,52	
	S(общ.), %	26,8	0,23	1,4	
	C(орг.), %	1,4	3,8	84,2	98,2
Au, г/т	4,50	0,70	0,009	<0,005	
Массовая доля класса минус 0,071 мм, %		92	87	95	90
Массовая доля класса минус 0,16 мм, %		100	100	100	100

Методика опытов по «заражению» твёрдых проб золотом была одинакова для всех изученных продуктов. В каждом опыте навеску твёрдого материала 200 г смешивали с 200 мл синтетического раствора Na[Au(CN)<sub>2</sub>], содержащего также NaOH для обеспечения pH на уровне ~ 11 и NaCN в количестве ~ 0,5 г/дм<sup>3</sup>. Также для каждого продукта проведён холостой опыт без добавки золота. Полученную смесь агитировали при температуре 22-25 °С в течение 48 ч, затем смесь фильтровали на воронке Бюхнера, а кек промывали 100 мл дистиллированной воды, объединяя основной и промывной фильтраты. После замера объёма объединённого фильтрата его направляли на атомно-абсорбционный анализ золота. Промытый кек сушили при 105°С до постоянной массы, определяли массу кека (которая во всех случаях соответствовала исходной массе материала) и сдавали на пробирно-атомно-абсорбционный анализ золота.

«Заражённые» золотом пробы с расчётным содержанием золота более 10 г/т сдавали на пробирный (пробирно-гравиметрический) анализ, с содержанием золота менее 10 г/т – на пробирно-атомно-абсорбционный. Анализы выполняли по аттестованным методикам. Перед плавкой пробы озолняли в муфельной печи в течение 4-6 ч при доступе воздуха, температуре 650-700 °С и толщине слоя материала 1-2 мм, озолнение вели до полного выгорания углистой составляющей, что определяли визуально. Плавку рудных концентратов проводили также и без предварительного озолнения, при этом были получены идентичные результаты по содержанию золота. Плавку на веркблей вели в течение 45 мин при температуре 1080 °С. Состав шихты для огарков (в пересчёте на 25 г исходного материала до обжига): свинцовый глёт – 75 г, сода – 60 г, бура – 30 г, стекло – 5 г, мука – 4. Состав шихты на 25 г необожженных концентратов: свинцовый глёт – 40 г, сода – 120 г, бура – 30 г, металлическое железо – 3 г, мука – 3. Купелирование вели в те-

чение 45 мин при температуре 905°С. В случае выполнения пробирно-гравиметрического анализа полученные корольки обрабатывали азотной кислотой (с постепенным увеличением её концентрации) и определяли массу корточка, в случае выполнения пробирно-атомно-абсорбционного анализа – растворяли корольки в царской водке с последующим атомно-абсорбционным анализом растворов.

### Результаты и обсуждение

Результаты опытов и последующих расчётов приведены в табл. 2 и на рисунке. Для изученных продуктов количество сорбированного золота (прирост содержания Au в твёрдой фазе, рассчитанный по убыли его концентрации в жидкой фазе) составило 1,79-34,30 г/т. Из этого количества 0,39-9,64 г/т или 18,3-50,7% не было определено при последующем пробирно-атомно-абсорбционном анализе твёрдой фазы.

Предположительно, занижение результатов пробирно-атомно-абсорбционного анализа связано с тем, что золото перед началом плавки находится в твёрдой фазе в сорбированном виде, то есть в неметаллическом, распределённом, атомизированном состоянии, образуя гомогенный раствор золота в углистом веществе при относительно низкой концентрации металла. Пробирная плавка основана на смачивании частиц металлического золота расплавом металлического свинца, образуемого в ходе плавки, с последующим осаждением в веркблей [5, 10]. Однако, чтобы быть смоченным, золото должно образовать металлический конгломерат с некоторым критическим размером, меньше которого смачивания не происходит [5]. То есть некоторая часть атомизированного золота не образует металлических частиц достаточной крупности, не смачивается свинцом и остаётся инкапсулированной в боросиликатные шлаки в виде истинного раствора либо наноразмерных вкраплений, искажая результаты пробирного анализа.

По полученным экспериментальным данным при повышении содержания сорбированного золота относительный эффект искажения анализа снижается (рисунков, а), что может быть объяснено увеличением вероятности встречи отдельных атомов золота, совершающих активные колебания при температуре плавления, с образованием металлической частицы достаточ-

ного размера, чтобы быть смоченной расплавом свинца и извлекаться в веркблей.

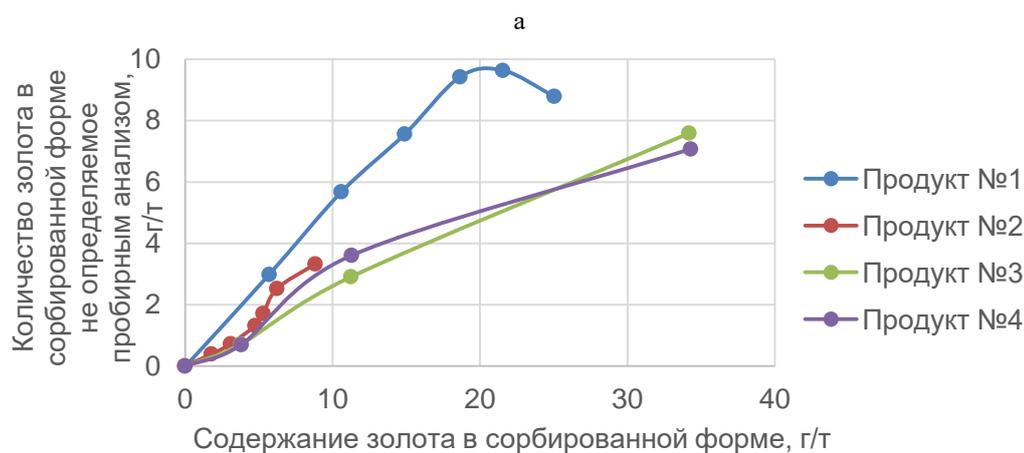
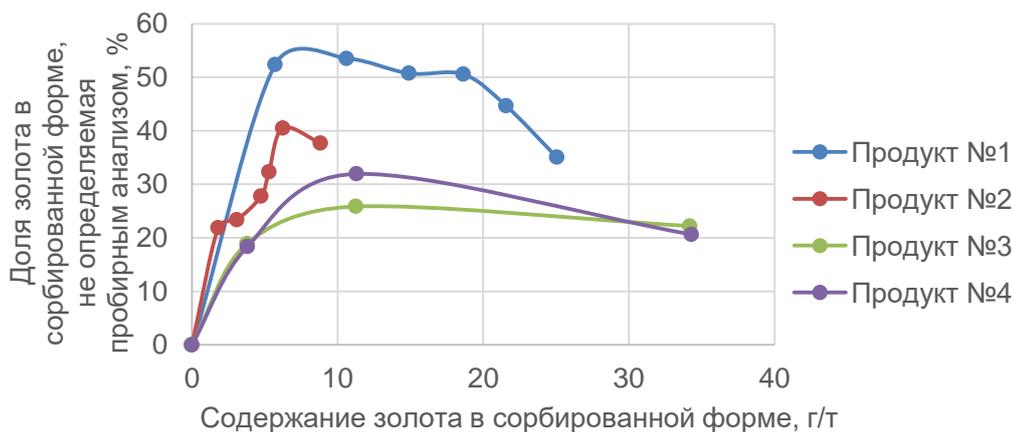
Другое предположение связано с улетучиванием золота с газообразными продуктами окисления углеродистого вещества, в том числе в виде золотоуглеродистых соединений [6].

Таблица 2

Результаты опытов по выявлению погрешности пробирного анализа продуктов, содержащих золото в сорбированной форме

Номер опыта	Экспериментальные данные				Расчётные данные			
	Начальная концентрация Au в жидкой фазе, мг/л	Конечная концентрация Au в объединённом фильтрате, мг/л	Объём объединённого фильтрата, л	Конечное содержание Au в твёрдой фазе по пробирно-атомно-абсорбционному анализу, г/т	Содержание Au в твёрдой фазе после опыта (по убыли концентрации в жидкой фазе), г/т	Количество Au, сорбированного твёрдой фазой, г/т	Количество сорбированного Au, не определённого пробирным анализом в твёрдой фазе после опыта	
							г/т	%
Продукт №1								
1	0	0	0,270	4,52	4,50	0	0	0
2	5,87	0,12	0,272	7,22	10,21	5,71	2,99	52,3
3	11,1	0,37	0,266	9,43	15,11	10,61	5,68	53,5
4	16,2	1,01	0,258	11,84	19,40	14,90	7,56	50,7
5	20,6	1,47	0,266	13,72	23,14	18,64	9,42	50,5
6	25,1	2,58	0,274	16,43	26,07	21,57	9,64	44,7
7	32,6	5,63	0,268	20,77	29,56	25,06	8,79	35,1
Продукт №2								
8	0	0	0,238	0,69	0,70	0	0	0
9	1,98	0,14	0,269	2,10	2,49	1,79	0,39	21,9
10	3,43	0,26	0,259	3,07	3,79	3,09	0,72	23,4
11	1,00	0,36	0,261	4,13	5,45	4,75	1,32	27,8
12	6,18	0,70	0,254	4,28	5,99	5,29	1,71	32,3
13	7,27	0,82	0,252	4,41	6,94	6,24	2,53	40,5
14	10,2	1,10	0,249	6,20	9,53	8,83	3,33	37,7
Продукт №3								
15	0	0	0,232	0,011	0,009	0	0	0
16	3,81	0,018	0,243	3,08	3,80	3,79	0,72	18,9
17	11,3	0,043	0,236	8,35	11,26	11,25	2,91	25,9
18	34,3	0,10	0,240	26,60	34,19	34,18	7,59	22,2
Продукт №4								
19	0	0	0,244	0	0	0	0	0
20	3,81	0,001	0,233	3,11	3,81	3,81	0,70	18,3
21	11,3	0,001	0,235	7,69	11,30	11,30	3,61	31,9
22	34,3	0,003	0,235	27,22	34,30	34,30	7,08	20,6

Примечание. Конечное содержание Au в твёрдой фазе по пробирно-атомно-абсорбционному анализу приведено по результатам трёх параллельных определений.



Зависимость доли сорбированного золота, не определяемого пробирным анализом (а), и количества этого золота (б) от общего содержания сорбированного золота в твёрдой фазе

### Заключение

Эффект занижения результатов пробирного (пробирно-атомно-абсорбционного) анализа золота в сорбированной форме был замечен нами и для многих других продуктов, не описанных в данной статье, причём часть результатов была получена в других пробирно-аналитических лабораториях на золотоизвлекающих предприятиях.

Это имеет важные практические последствия и означает, что на некоторых предприятиях, перерабатывающих сорбционно-активное сырьё, реальные потери золота с хвостами могут быть занижены. То же относится и к предприятиям, использующим методику пробирного анализа глухо упаренных проб, являющуюся потенциальным источником погрешности по схожим причинам.

Для изученных продуктов, моделирующих хвосты цианирования, классический пробирный анализ золота не является заведомо достоверным. В настоящее время в АО «Иргиредмет» проводятся исследования с целью разработки модифицированного способа, исключающего или снижающего эффект занижения результатов пробирного анализа продуктов, содержащих сорбированное золото.

### Список источников

1. Меретуков М.А. Золото и природное углеродистое вещество: научное издание. М: Издательский дом «Руда и металлы», 2007. 112 с.
2. Osseo-Asare K., Afenya P.M., Abotsi G.M.K. Carbonaceous matter in gold ores: isolation, characterization and adsorption behavior in aurocyanide solutions // Precious metals: Mining, extraction and processing, AIME, USA. 1984. P. 125–144.
3. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores // Minerals Engineering. 1991. Vol. 4. P. 1043–1055. DOI:10.1016/0892-6875(91)90082-7
4. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: В 2-х т. Иркутск: ОАО Иргиредмет, 1999. Т. 2. 786 с.
5. The behaviour of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold / Tan H., Feng D., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. // Hydrometallurgy. 2005. Vol. 78. P. 226–235. DOI:10.1016/j.hydromet.2005.03.001
6. Dunne R., Staunton W.P., Afewu K. A historical review of the treatment of preg-robbing gold ores - what has worked and changed / In: World gold 2013 (Brisbane, Australia). AusIMM, Burwood, 2013. P. 99–110.
7. Miller J., Wan R.Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores // In: Gold ore processing (2nd ed.). 2016. P. 885–907. DOI:10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9

8. Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores / Dunne R., Buda K., Hill M., Staunton W., Wardell-Johnson G., Tjandrawan V. // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2012. Vol. 121. P. 217–223. DOI:10.1179/174328512Y.0000000019
9. Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment / Yang H-y, Liu Q, Song X-l, Dong J-k // *Trans Nonferrous Metals Soc. China*. 2013. Vol. 23. P. 3405–3411. DOI:10.1016/S1003-6326(13)62881-2
10. Патент РФ 2434063 С1, МПК С22В 11/02(2006.01), G01N 33/20(2006.01). Способ определения золота в рудах и концентратах / Лобанов В.Г., Викулов В. И., Набиуллин Ф. М., Начаров В.Б., Филонов Н.А., Семина И.Н.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; заявка от 13.08.2010; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32.
11. Прообоотбирание и анализ благородных металлов: справочник / Барышников И.Ф., Попова Н.Н., Орбинская В.А. и др.; под ред. И.Ф. Барышникова. 2-е изд. М.: Металлургия, 1987. 432 с.
12. Патент РФ 2288288 С1, МПК С22В 11/02(2006.01), G01N 33/20(2006.01). Способ пробирного определения золота в рудах и продуктах их переработки / Серебряный Б.Л., Макаров Ю.Б., Симакова Л.Г., Чекашкина Л.В., Мандругин А.В.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП "ЦНИГРИ"); заявка от 25.05.2005; опубл. 27.11.2006.
13. Золото: химия для металлургов и обогатителей / Меретуков М.А., Санакулов К.С., Зимин А.В., Арустамян М.А. М: Издательский дом «Руда и металлы», 2014. 412 с.
14. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.

### Сведения об авторах

**Бывальцев Александр Владимирович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»), Иркутск, Россия. E-mail: torrot\_2008@mail.ru.

**Войлошников Григорий Иванович** – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научно-методической и инновационной деятельности, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»), Иркутск, Россия. E-mail: greg@irgiredmet.ru.

**Хмельницкая Ольга Давыдовна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»), Иркутск, Россия. E-mail: hod@irgiredmet.ru.

**Богородский Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»), Иркутск, Россия. E-mail: bogorodskiy@irgiredmet.ru.

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### PROBLEMS OF PROCESSING CARBONACEOUS SORPTION-ACTIVE GOLD ORES

**Byvaltsev Alexander V.** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irkutsk Russia. E-mail: torrot\_2008@mail.ru.

**Voiloshnikov Grigoriy I.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director for Science, Methodology and Innovations, JSC Irgiredmet, Irkutsk, Russia. E-mail: greg@irgiredmet.ru.

**Khmelnitskaya Olga D.** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia. E-mail: lab15@irgiredmet.ru.

**Bogorodskiy Evgeniy V.** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Hydrometallurgy Laboratory, Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia. E-mail: bogorodskiy@irgiredmet.ru.

**Abstract.** The aim: the study and numerically assess the effect of underestimating the results of fire assay analysis of cyanidation tailings of preg-robbing gold bearing products. At present, about 20% of ores submitted for technological research to the Irgiredmet Institute have high preg-robbing activity associated with the presence of carbon in organic form in the raw material. There are some problems with gold grade determination in cyanidation tailings of these ores and concentrates. Fire assay supplies understated results that do not present the actual gold content in the solid phase of tails. In order to quantify this underestimation, experiments were carried out to "contaminate" the cyanidation tailings of

carbonaceous gold-bearing concentrates of ores from two Russian deposits as well as coal from one of the deposits in the Irkutsk region and activated carbon produced in China with a known amount of gold from alkaline cyanide solutions simulating cyanide leaching conditions. Products "contaminated" with a known amount of gold were analyzed by fire assay with AAS ending. For the tested products the amount of adsorbed gold calculated by changes of its concentration in the liquid phase was from 1.79 to 34.30 g/t. The 0.39-9.64 g/t, or 18.3-50.7% of this amount, was not determined by fire assay with AAS ending. Presumably, the underestimation of the results of the fire assay is due to the fact that gold initially in the adsorbed state does not form metal particles with a particle size sufficient to be wetted with molten lead with subsequent extraction to lead alloy and is carried away into borosilicate slags. The results obtained in the work have important practical consequences as they indicate an underestimation of gold losses at industrial plant processing of preg-robbing ores and concentrates and require the development of improved methods of analysis.

**Keywords:** gold, cyanidation tailings, preg-robbing activity, carbonaceous matter, fire assay, uncertainty

---

Ссылка на статью:

Проблемы переработки углистых сорбционноактивных золотых руд / Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В.// Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 18-23.  
Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmel'nitskaya O.D., Bogorodskiy E.V. Problems of processing carbonaceous sorption-active gold ores. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 18-23.

УДК 669.162.1

Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ, УПАКОВАННОЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОНТЕЙНЕР, ПРИ ДВИЖЕНИИ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ КОЛОШНИКА К ГОРНУ

**Аннотация.** Математическим моделированием получена система уравнений, позволяющая прогнозировать температуру замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении ее от колошника до горна печи. Характеристики окалины, упакованной в металлический контейнер: содержание железа 69,5%; теплоемкость 681-1246 Дж/(кг·°C) в зависимости от содержания в окалине воды и масла в температурном интервале 100–1500°C; насыщенная плотность окалины, помещенной в металлический контейнер – 2089 кг/м<sup>3</sup>; радиус металлического контейнера – 0,041 м.

Решающее действие на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи. Для условий ее загрузки в зону рудного гребня колошника печи объемом 1370 м<sup>3</sup> определили, что масло начнет испаряться из металлического контейнера на расстоянии 88% от её рабочей высоты и продлится до уровня 77%.

**Ключевые слова:** замасленная окалина, утилизация техногенных отходов, тепло-физические свойства, теплопередача, температура, доменная печь

### Введение

Одним из направлений повышения экологичности процесса производства и обработки черных металлов является рециклинг техногенных отходов в производство. В частности, проблема утилизации образующихся на металлургическом предприятии железосодержащих мелкодисперсных отходов в основном решается путем их использования в качестве компонентов агломерационной шихты [1-4]. Трудности вызывает рециклинг по этой схеме замасленной прокатной окалины, содержащей до 20-30% масел [5-7]. Способы ее утилизации, предполагающие предварительную химическую или термическую обработку, брикетирование не нашли широкого применения. В этой связи актуальной представляется разработка способа утилизации замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь без предварительного обезмасливания [8-10].

Согласно патенту [10] для загрузки замасленной окалины в доменную печь вместо малопрочных брикетов, с применением замасленной окалины, можно использовать металлическую упаковку в виде контейнера, плавящегося при температуре не менее 1500°C. Данный способ имеет преимущество перед теми, которые подразумевают предварительное обезмасливание и дальнейшее брикетирование или агломерацию, так как устраняет недостатки, связанные с дополнительным оборудованием, временем подготовки, дополнительным хранением и утилизацией извлеченных органических соединений, очищением загрязненной воды. Однако данный способ не был реализован в производстве, в связи с чем целесообразно моделирование ряда процессов, в частности прогнозирование температуры замасленной окалины в доменной печи.

### Материалы и методы исследования

Исследуемая замасленная окалина (рис. 1) содержала 69,5% железа (табл. 1). Содержание масла, не связанного химически с поверхностью частиц окалины, определенного экстракцией органическим растворителем, и влаги составляло от 10 до 20%.



Рис. 1. Образец замасленной окалины

Таблица 1

Средний химический состав образцов замасленной окалины

Элемент/оксид	Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	ZnO
Массовая доля, %	69,5	1,18	0,95	0,10	0,20	1,14	0,116	0,14

Образцы замасленной окалины упаковали в металлический контейнер, изготовленный из стали 3, размерами 85×83,4 мм, объемом 420 см<sup>3</sup> (рис. 2).

Для математического прогнозирования движения замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, рассчитали изменение температуры шихты и газа по высоте доменной печи объемом 1370 м<sup>3</sup> с суточной производительностью в среднем за год 3800 т.

© Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В., 2024



Рис. 2. Металлический контейнер объемом 420 см<sup>3</sup>, наполненный замасленной окалиной

Некоторые параметры работы печи были следующими:

- теоретическая температура горения – 1960°C;
- температура колошникового газа в зоне рудного гребня – 204°C;
- выход фурменного газа – 1645 м<sup>3</sup>/т чугуна;
- состав колошникового газа, %:
  - CO<sub>2</sub> – 18,61;
  - CO – 25,6;
  - H<sub>2</sub> – 10,8;
- уровень засыпи – 1 м.

На основе метода конечных разностей [11] получены зависимости изменения температуры окускованной замасленной окалины при движении от колошника до горна доменной печи за счет ее нагрева газом и шихтой. Для этого в расчетах использовали характеристики замасленной окалины, определенные в лаборатории кафедры металлургии и химических технологий (МиХТ) [12-13]:

- теплоемкость – 681-1246 Дж/(кг·°C) в зависимости от содержания в окалине воды и масла в температурном интервале 100–1500°C;
- насыпная плотность окалины, помещенной в металлический контейнер – 2089 кг/м<sup>3</sup>;
- радиус металлического контейнера – 0,041 м.

### Результаты

Получены зависимости температуры контейнера с замасленной окалиной от расположения его в различных горизонтах по высоте доменной печи для условий его нагрева потоком газа (система уравнений

(1) и передачи тепла от шихты (система уравнений (2)).

$$\begin{cases} T_{3.0.г}(H_n) = (1,64H^2 - 58,56H + 1484) \cdot \frac{W_{Г.н.}}{100}; \\ T_{3.0.г}(H_{33г}) = (-5,4H + 1053) \cdot \frac{W_{Г.33г}}{100}; \\ T_{3.0.г}(H_B) = (1,22H^2 - 242,45H + 12028) \cdot \frac{W_{Г.В.}}{100}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{3.0.ш}(H_n) = (1,79H^2 - 60,13H + 1430) \cdot \frac{W_{Ш.н.}}{100}; \\ T_{3.0.ш}(H_{33г}) = (-5,02H + 999) \cdot \frac{W_{Ш.33г}}{100}; \\ T_{3.0.ш}(H_B) = (-0,62H^2 + 84,89H - 2248) \cdot \frac{W_{Ш.В.}}{100}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_{3.0.г}(H_n)$ ,  $T_{3.0.г}(H_B)$ ,  $T_{3.0.г}(H_{33г})$  – температура замасленной окалины соответственно в нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоне замедленного теплообмена при условии нагрева только газом;  $T_{3.0.ш}(H_n)$ ,  $T_{3.0.ш}(H_{33г})$ ,  $T_{3.0.ш}(H_B)$  – температура замасленной окалины соответственно в нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоне замедленного теплообмена при условии нагрева только шихтой;

$H$  – расстояние от оси фурменного очага до горизонта, в котором расположен контейнер с замасленной окалиной, выраженное в % от рабочей высоты печи;  $W_{Г.н.}$ ,  $W_{Г.В.}$ ,  $W_{Г.33г}$  – теплоемкость потока газа для условий соответственно нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоны замедленного теплообмена (составляет 100% от общей теплоемкости потоков газа и шихты в данной ступени теплообмена для условий нагрева только потоком газа);

$W_{Ш.н.}$ ,  $W_{Ш.В.}$ ,  $W_{Ш.33г}$  – теплоемкость потока шихты для условий соответственно нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоны замедленного теплообмена (составляет 100% от общей теплоемкости потоков газа и шихты в данной ступени теплообмена для условий нагрева только потоком шихты).

Поскольку в доменной печи нагрев замасленной окалины будет осуществляться одновременно от шихты и газа в соотношении теплоемкостей их потоков ( $W_{ш}$  и  $W_g$ ) в локальной зоне по радиусу колошника, где размещаются контейнеры, то уравнения (1) и (2) можно преобразовать в результирующее уравнение (3):

$$\begin{cases} T_{3.0.}(H_n) = (1,64H^2 - 58,56H + 1484) \cdot \frac{W_{Г.н.}}{100} + (1,79H^2 - 60,13H + 1430) \cdot \frac{W_{Ш.н.}}{100}; \\ T_{3.0.}(H_{33г}) = (-5,4H + 1053) \cdot \frac{W_{Г.33г}}{100} + (-5,02H + 999) \cdot \frac{W_{Ш.33г}}{100}; \\ T_{3.0.}(H_B) = (1,22H^2 - 242,45H + 12028) \cdot \frac{W_{Г.В.}}{100} + (-0,62H^2 + 84,89H - 2248) \cdot \frac{W_{Ш.В.}}{100}. \end{cases} \quad (3)$$

Теплоёмкости потоков шихты и газа рассчитали для условий их движения в зоне рудного гребня при фактической температуре, давлении и составе газа по известным формулам [14-17]:

$$W_{ш} = c_{ш} \cdot P_{ш}; \quad (4)$$

$$W_{г} = c_{г} \cdot V_{г}, \quad (5)$$

где  $c_{ш}$  – теплоёмкость единицы веса шихты;  
 $P_{ш}$  – интенсивность движения шихты в весовом измерении;  
 $c_{г}$  – теплоёмкость единицы объёма газа;  
 $V_{г}$  – объёмная интенсивность газового потока.

Рассчитали высоты кольцевых зон рудного гребня верхней ( $H_{в}$ ) и нижней ( $H_{н}$ ) ступеней интенсивного теплообмена по формулам, полученным из закономерностей теплообмена [14-17]:

$$H_{в} = \frac{3 \cdot w_{ш}^B \cdot c_v}{a_v^B \cdot (1 - m_{ср})}; \quad (6)$$

$$H_{н} = \frac{3 \cdot w_{ш}^H \cdot c_{кажв}}{a_v^H \cdot (m_{н} - 1)}, \quad (7)$$

где  $w_{ш}^B$  – теплоемкость потока шихты кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(т·К);  
 $w_{ш}^H$  – теплоемкость потока шихты кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(т·К);  
 $c_v$  – теплоемкость насыпного 1 м<sup>3</sup> шихты кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $c_{кажв}$  – кажущаяся теплоемкость 1 м<sup>3</sup> шихты кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $a_v^B$  – объемный коэффициент теплопередачи кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $a_v^H$  – объемный коэффициент теплопередачи кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $m_{ср}$  – среднее значение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней ступени теплообмена;  
 $m_{н}$  – отношения теплоемкостей потоков шихты и газа в нижней ступени теплообмена.

Для существующих условий работы доменной печи объемом 1370 м<sup>3</sup> в исследуемый период среднее соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа  $\frac{W_{ш}}{W_{г}}$  в зоне рудного гребня для условий верхней и нижней ступеней интенсивного теплообмена соответственно составляло 0,9 и 1,8. В зоне замедленного теплообмена

1,0. Исходя из суммы теплоёмкостей потоков шихты и газа, равной единице, теплоёмкости потоков газа и шихты равны:  $W_{г.н.} = 36\%$ ,  $W_{г.зст} = 50\%$ ,  $W_{г.в.} = 53\%$ ,  $W_{ш.н.} = 64\%$ ,  $W_{ш.зст.} = 50\%$ ,  $W_{ш.в.} = 47\%$ .

Высота кольцевых зон рудного гребня верхней и нижней ступеней интенсивного теплообмена составила 4,74 и 3,7 м соответственно. Изменение температуры шихты и газа по высоте доменной печи приведено на рис. 3.

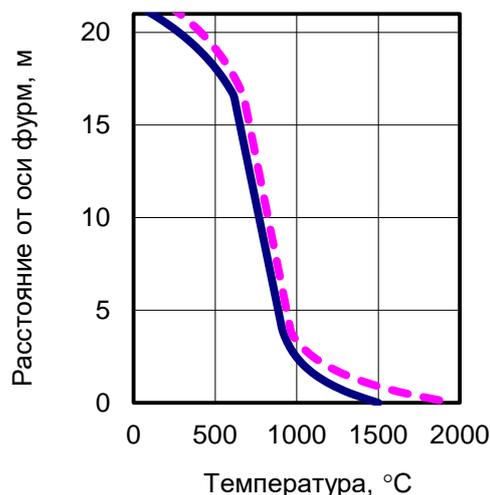


Рис. 3. Температура шихты (—) и газа (---) по высоте доменной печи

Таким образом, решением системы уравнений (3) для исследуемых условий работы доменной печи объемом 1370 м<sup>3</sup> является изменение температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, представленное на рис. 4.

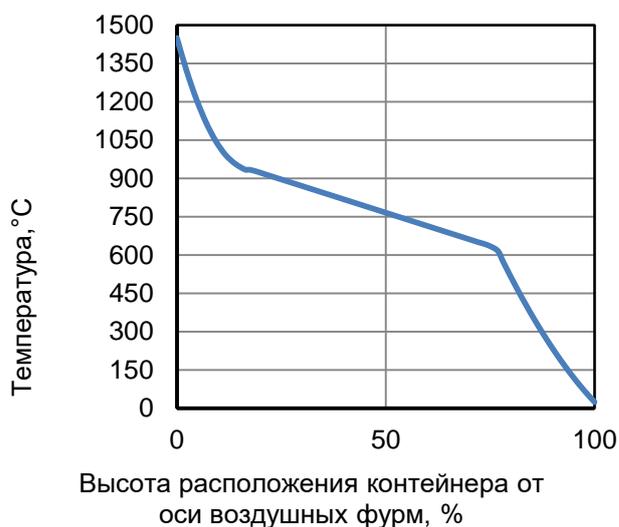


Рис. 4. Прогнозная температура окускованной замасленной окалины и образовавшихся из неё продуктов при движении от колошника в направлении горна печи

Анализ рис. 4 свидетельствует о том, что на горизонте  $H$  в интервале 77-88% от общего расстояния от оси фурменного очага до уровня засыпи температура контейнера с замасленной окалиной составит 230-600°C, что соответствует началу и концу испарения масла из замасленной окалины. Согласно рис. 3 и 4 решающее влияние на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи. От поверхности шихты до уровня, соответствующего 600°C, изменение температуры замасленной окалины отличается от изменения температуры остальных материалов, так как в замасленной окалине присутствуют вода и масло, теплоёмкость которых значительно превышает теплоёмкость железорудного сырья. В зонах более 600°C температура окалины и образовавшихся из неё продуктов идентична средней температуре окружающих материалов.

### Заключение

1. Математическим моделированием получена система уравнений, позволяющая прогнозировать температуру окускованной замасленной окалины и образовавшихся из неё продуктов при движении от колошника в направлении горна печи.

2. Решающее действие на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи.

3. В доменной печи объемом 1370 м<sup>3</sup> на расстоянии по высоте 77-88% от оси воздушных фурм температура контейнера с замасленной окалиной составит 230-600°C, что соответствует началу и концу испарения масла из замасленной окалины.

### Список источников

1. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 11-22.
2. Вдувание комбинированного топлива из маслоотходов и замасленной окалины в доменную печь / И.Ф. Курунов, А.Л. Петелин, Д.Н. Тихонов, С.Ф. Ерохин // Металлург. 2004. № 7. С. 33 – 35.
3. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Савеня А.Н. Новая технология совместной переработки техногенных отходов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2013. № 1. С. 21-26.
4. Танутров И.Н. Технологическое моделирование совместного выщелачивания замасленной прокатной окалины и красного шлама / И.Н. Танутров, М.Н. Свиридова, Ю.А. Чесноков, Л.А. Маршук // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 891-898.
5. Ровин С.Л., Ровин Л.Е. Новая концепция рециклинга дисперсных железосодержащих отходов //

- Труды X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, 2020. М.: НИТУ «МИСиС», 2020. С. 238-243.
6. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 3. С. 46-56.
  7. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 1. С. 37-44.
  8. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 545 с.
  9. Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин., А.В. Павлов, А.А. Полинов // Черные металлы. 2021. № 12. С. 10-15.
  10. Патент № RU 2131929 С1 Российская Федерация, МПК C21B 5/00. Способ получения чугуна с использованием доменного производства на металлургическом предприятии: № 98111633/02: заявл. 1998.06.26: опубл. 1999.06.20 / В.Н. Селиванов, Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, Р.В. Сейфулов., В.И. Губанов.
  11. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
  12. Дзюба А. В. Выявление теплоёмкости замасленной окалины в интервале температур 80–900°C / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, В.И. Сысоев, Н.И. Муравьев, А.В. Павлов // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIX Международной конференции, Аша, 10–12 сентября 2024 года. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 60-65.
  13. Определение теплопроводности замасленной прокатной окалины / Дзюба А.В., Сысоев В.И., А.С. Савинов, А.С. Харченко, И.В. Решетова, Н.С. Щелоков // Материалы XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. В 7 т. М., 2024. Т. 6. С. 246.
  14. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.C. Prediction of blast furnace thermal state in real-time operation // Solid State Phenomena. 2020. V. 299. P. 518–523.
  15. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер и др. // Известия

- высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2021. № 8 (64). С. 508-598.
16. Павлов А.В. Совершенствование технологии доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / А. В. Павлов; [Место защиты: Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова]. Магнитогорск, 2016. 162 с.
17. Информационно-моделирующая система контроля тепловых потерь в нижней части доменной печи / Н.А. Спиринов, И.А. Гуринов, В.В. Лавров, А.С. Истомин, Л.А. Зайнуллин // Металлург. 2024. № 2. С. 71-75.

#### Сведения об авторах

**Харченко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Савинов Александр Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Сибатуллин Салават Камилевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Дзюба Андрей Викторович** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Сысоев Виктор Иванович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Харченко Елена Олеговна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Павлов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, начальник доменного цеха ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### FORECASTING THE TEMPERATURE OF OILED SCALE PACKED IN A METAL CONTAINER WHEN MOVING IN A BLAST FURNACE FROM THE BLAST-FURNACE MOUTH TO THE IRON RECEIVER

**Kharchenko Aleksander S.** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Savinov Aleksander S.** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Sibagatullin Salavat K.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Professor, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Dzyuba Andrey V.** – graduate student Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Sysoev Victor I.** – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Kharchenko Elena O.** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Pavlov Alexander V.** – Candidate of Technical Sciences, Head of the blast furnace shop, MAGNITOGORSK IRON & STEEL WORKS PJSC, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** A system of equations was obtained using mathematical modeling to predict the temperature of oily scale packed in a metal container as it moves from the furnace throat to the hearth. Characteristics of scale packed in a metal container: iron content 69.5%; heat capacity 681-1246 J/(kg·°C) depending on the content of water and oil in the scale in the temperature range of 100–1500°C; bulk density of scale placed in a metal container 2089 kg/m<sup>3</sup>; radius of the metal container – 0.041 m. For the conditions of its loading into the ore crest zone of the furnace throat with a volume of 1370 m<sup>3</sup>, it was determined that oil will begin to evaporate from the metal container at a distance of 88% of its working height and will continue to the level of 77%.

**Keywords:** oily scale; disposal of industrial waste; thermal and physical properties; heat transfer; temperature; blast furnace

---

Ссылка на статью:

Прогнозирование температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении в доменной печи от колошника к горну / Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 24-29.

Kharchenko A.S., Savinov A.S., Sibagatullin S.K., Dzyuba A.V., Sysoev V.I., Kharchenko E.O., Pavlov A.V. Forecasting the temperature of oiled scale packed in a metal container when moving in a blast furnace from the blast-furnace mouth to the iron receiver. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 24-29.

УДК 539:41, 620.178.1

Гаврилова Т.О.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

**Аннотация.** В настоящее время в металлургии происходят значительные качественные изменения: расширяется сортамент металлопродукции и увеличивается доля производства специальных сталей, повышаются требования к их качеству и эксплуатационным свойствам. Эти изменения обусловлены растущими потребностями различных отраслей промышленности, таких как автомобилестроение, авиация, станкостроение, строительная индустрия и энергетика, где высокие эксплуатационные свойства стали становятся ключевыми факторами для обеспечения надежности и безопасности конечной продукции. Современные технологии обработки и производства стали позволяют добиться исключительных свойств, включая повышенную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость. В свою очередь, применение таких спецсталей в критически важных компонентах машин и оборудования способствует увеличению их срока службы и снижению затрат на обслуживание. Кроме того, активное внедрение инновационных методов, таких как аддитивные технологии и автоматизация процессов, открывает новые возможности в создании металлопродукции. Это не только сокращает время производства, но и обеспечивает высочайшее качество на всех стадиях – от получения сырья до финальной обработки изделия. Таким образом, металлургия стремительно трансформируется, отвечая вызовам времени и высоким требованиям современного рынка. В результате проведенных исследований определены основные параметры технологии получения азотированных хромистых СВС-лигатур для специальных сталей и сплавов, применяемых в аддитивном производстве и выплавке азотистых сталей и сплавов. Управление структурообразованием азотсодержащих спецсталей может быть достигнуто при помощи совершенствования технологии спутного горения при СВС-синтезе хромистых лигатур, а также строгого нормирования как химического, так и гранулометрического состава азотсодержащих металлических порошков для производства спецсталей с применением аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, металлпорошки, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, прямое лазерное сплавление, азотированный никель-хромовый сплав

Аддитивные технологии (АМ-технологии) подразумевают послойное добавление материалов по цифровой модели, главным образом используя металлпорошковые композиции с диаметром частиц  $10\div 100$  мкм. В 2021 году введен ГОСТ Р 59035-2020, который устанавливает требования к таким порошкам, включая сферическую форму частиц, текучесть, влажность, насыпную плотность после утряски, уплотняемость.

В России лидирует производитель АО «Полема». Наиболее распространенным методом производства порошков для АМ является атомизация (распыление), включая газовую, вакуумную и центробежную. Газовая атомизация использует VIGA-технологию, где металл плавится в вакууме. Технология EIGA применяется для реактивных металлов, а Plasma Atomization обеспечивает особую чистоту порошков.

Основные виды аддитивных технологий – Bed Deposition и Direct Deposition. Первый слой порошка формируется на платформе, затем нагревается лазером (например, SLS и DMLS). DMLS требует меньшей энергии, но готовая деталь обладает менее высокими прочностными характеристиками по сравнению с SLM [1].

Задача эксперимента состояла в доказательстве возможности получения металлоизделий высокой чистоты и качества с использованием азотированного хрома, что осуществляется в три последовательных этапа. Также некоторые сложнопрофильные детали невозможно в некоторых случаях получить традиционными методами [2].

Первый этап проходил на базе ООО «НТПФ «Эталон» (г. Магнитогорск). Основной целью является разработка технологии получения азотированного хрома особой чистоты с помощью СВС технологии и его апробация в производственных условиях. На этом этапе был получен порошок высокой чистоты с составом: азот – 15,1%, кремний – 0,08%, углерод – 0,011%, сера – 0,014%, фосфор – 0,026%, алюминий – 0,18%, хром – 82,7%, железо – 1,27% и кислород – 0,2%. Общий объем составил 20 кг, фракция – 0-63 мкм.

Второй этап прошел на базе АО «Полема» (г. Тула), где в задачу входило получение металлического порошка азотистого никель-хромового сплава марки ПР-АН55Х45, обладающего жаростойкостью [3-6] и высокой стойкостью к окислению [7]. Было изготовлено 200 кг порошка сферической формы, разделенного на две партии по гранулометрическому составу.

Третий этап состоял в создании 9 образцов для оценки качества на базе Института лазерных и сварочных технологий (г. Санкт-Петербург).

Для создания металлического порошка марки ПР-АН55Х45 применялась установка газового распыления расплавов в вакуумной камере, изображенная на рис. 1.

Этот аппарат выпускает сферические металлические порошки, подходящие для селективного лазерного сплавления, с частицами диаметром от 40 до 200 мкм. Рис. 2 демонстрирует технологическую схему производства данного порошка.



Рис. 1. Установка распыления с вакуумной камерой

Первая партия порошка никель-хромового сплава с азотом была распылена в инертной газовой среде азота с фракцией частиц 40-160 мкм. Химический состав порошка ПР-АН55Х45 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав опытного порошка ПР-АН55Х45

Массовая доля, %						
Ni	Cr	N	C	Fe	Al	Другие
Основа	43-47	0,5-0,7	<0,1	<0,2	<0,3	S < 0,01 P < 0,01 O < 0,5 Si < 0,2

Современная технология лазерного выращивания металлических деталей является авангардным направлением аддитивных технологий, позволяющим создавать компоненты для сложных систем аэрокосмической и оборонной техники. На рис. 3 показана установка лазерного выращивания.

Процесс начинается с формирования равномерного слоя металлического порошка на подложке и его последующего сплавления лазером. Выращивание образцов осуществлялось на установке прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-А3 по технологии Bed Deposition и SLM (Selective Laser Melting, селективное лазерное плавление). В процессе применялся аргон высокой чистоты для локальной защиты обрабатываемой зоны. Лазерный луч фокусировался в точку диаметром 0,9 мм. В ходе эксперимента варьировались энергия и скорость перемещения рабочего инструмента, а также расход присадочного материала для достижения определённых толщин слоёв: 0,15 мм; 0,3 мм и 0,45 мм. Расход порошка был подобран соответственно этим параметрам. Мощность лазера оставалась постоянной. Параметры эксперимента представлены в табл. 2. Типовая форма выращенного образца показана на рис. 4.

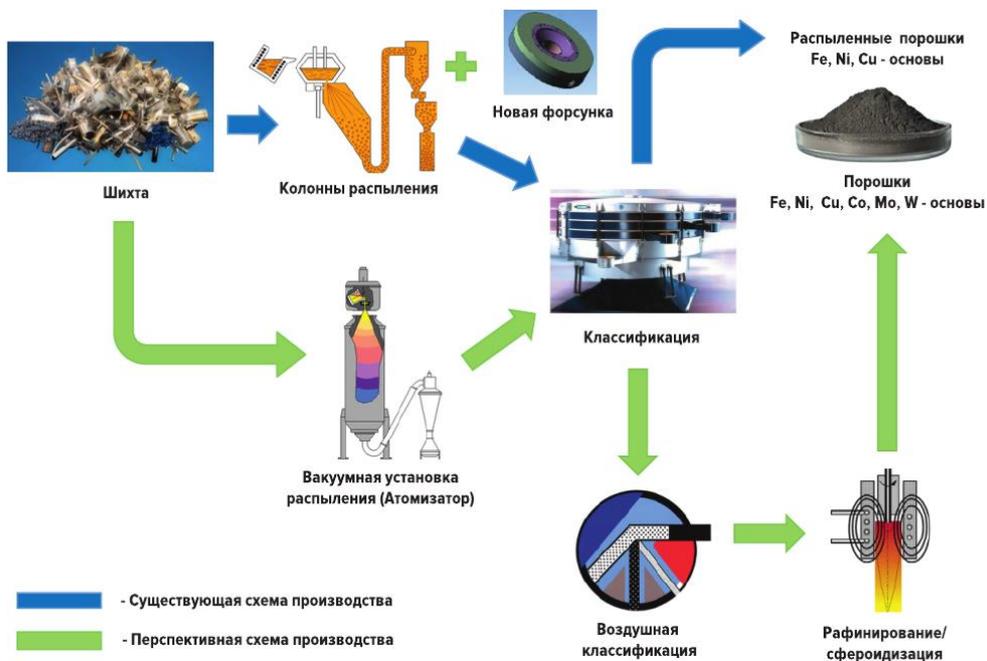


Рис. 2. Схема производства металлических порошков



Рис. 3. Установка лазерного выращивания металлических деталей ИЛИСТ

Таблица 2

Варьируемые параметры при выращивании из материала ПР-АН55Х45

Номер образца	Скорость перемещения рабочего инструмента, мм/с	Расход порошка, г/мин
1	10	2,65
2		5,30
3		7,95
4	15	3,98
5		7,95
6		11,92
7	20	5,30
8		10,61
9		15,91

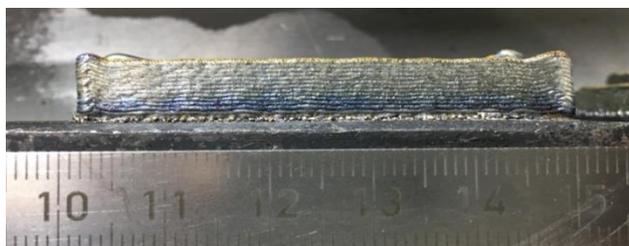


Рис. 4. Образец из материала ПР-АН55Х45, выращенный методом прямого лазерного выращивания

Эксперимент показал возможность формирования образцов во всем диапазоне исследованных параметров. Образцы имели равномерную структуру без дефектов, таких как наплывы и утонения, что свидетельствует о стабильности процесса. Однако было замечено, что уменьшение энергии приводит к появлению трещин и несплавлений. Пористость присутствовала почти во всех образцах. Типичные фотографии структур приведены на рис. 5.

Эксперимент проводился в три этапа: сначала с однородным гранулометрическим составом - Партия 1; далее с разнородным составом - Партия 2, и, наконец, с подогревом платформы до 200°C. Результаты металлографического исследования представлены в табл. 3.



Рис. 5. Фотографии микрошлифов материалов, полученных из порошка ПР-АН55Х45: а – образец №5 без макродефектов; б – образец №4 с трещинами и порами

Таблица 3

Результаты металлографического исследования

Номер образца	Дефекты, выявленные по результатам металлографического контроля		
	Партия 1	Партия 2	Партия 2 + подогрев платформы до 200°C
1	-	-	-
2	Поры	Поры	Поры
3	-	Поры	-
4	Поры, трещина	Поры	-
5	-	-	-
6	Поры	-	-
7	Поры	поры	-
8	Несплавления между частицами	Несплавления между частицами	-
9	Поры, несплавления между частицами	Несплавления между частицами	Несплавления между частицами

Аналогичные исследования структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni-Cr-CrN, также применяющих аддитивную технологию DMLS, были реализованы в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», подтверждая выводы эксперимента [1].

### Заключение

Таким образом, существует потенциальная возможность использования порошка марки ПР-АН55Х45 в аддитивном производстве изделий посредством прямого лазерного выращивания. Процесс протекает с уверенным формированием наносимого слоя, что свидетельствует о равноудалённости распределения присадочного материала в отношении лазерного луча и зоны обработки. Во всех девяти образцах не выявлено дефектов, выходящих на поверхность. Образцы, изготовленные в режимах с повышенной погонной энергией (скорость рабочего инструмента составляет 20 мм/с), содержат меньшее количество дефектов. Оптимальный расход порошка варьируется от 5 до 10 г/мин. При снижении энергии на

единицу длины наблюдается тенденция к возникновению несплавлений между частицами порошка и трещин. Дополнительный подогрев платформы строительства до 200°C способствует улучшению качества образцов. Необходимость дальнейших исследований структуры и свойств материала из сплава ПР-АН55Х45, полученного методом прямого лазерного выращивания, представляется обоснованной.

#### Список источников

1. Исследование структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni–Cr–CrN с высоким содержанием азота, полученных с применением аддитивной технологии прямого лазерного сплавления порошковых материалов / Зиатдинов М.Х., Жуков А.С., Евсеев Н.С. и др. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 118-130.
2. Khaing M.V., Fuh J.Y.N., Lu L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 113. P. 269-272. DOI: 10/1016/S0924-0136(01)00584-2
3. Sustaita-Torres I.A. et al. Aging of a cast 35Cr-45Ni heat resistant alloy // Mater. Chem. Phys. 2012. V. 133. No. 2 P. 1018-1023.
4. Zhang Y. et al. High-temperature deformation and fracture mechanisms of an advanced heat resistant Fe-Cr-Ni alloy // Materials Science and Engineering. A. 2017. V. 686. P. 102-112.
5. Xie Y. et al. Corrosion behaviour of Ni-Cr alloys in wet CO<sub>2</sub> atmosphere at 700 and 800°C // Corros. Sci. 2019. V. 146. P. 28-43.
6. Zhu J. et al. Fabrication of ZrO-NiCr functionally graded material by powder metallurgy // Mater. Chem. Phys. 2001. V. 68. P. 130-135/
7. Kazakov A.A. Phase formation control in liquid and solidifying steels and nickel-chromium alloys // Advanced materials: St-Petersburg State Technical University Transactions. 1996. No. 463. P. 8-21 (in Russian).

#### Сведения об авторах

Гаврилова Татьяна Олеговна – директор ООО «Эталон-ПРО», Магнитогорск, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVA TECHNOLOGIES IN METALLURGY

Gavrilova Tatiana O. – Director of "Etalon-PRO" LLC, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Currently, significant qualitative changes are taking place in metallurgy: the range of metal products is expanding and the share of production of special steels is increasing, requirements for their quality and operational properties are increasing. These changes are driven by the growing needs of various industries, such as automotive, aviation, machine tool industry, construction industry and energy, where high performance properties of steel are becoming key factors to ensure the reliability and safety of final products. Modern steel processing and production technologies allow us to achieve exceptional properties, including increased strength, corrosion resistance and wear resistance. In turn, the use of such special steels in critical components of machinery and equipment helps to increase their service life and reduce maintenance costs. In addition, the active introduction of innovative methods, such as additive technologies and process automation, opens up new opportunities in the creation of metal products. This not only reduces production time, but also ensures the highest quality at all stages – from receiving raw materials to the final processing of the product. Thus, metallurgy is rapidly transforming, responding to the challenges of the time and the high demands of the modern market. As a result of the conducted research, the main parameters of the technology for obtaining nitrided chromium SHS ligatures for special steels and alloys used in additive manufacturing and smelting of nitrogenous steels and alloys have been determined. The control of the structure formation of nitrogen-containing special steels can be achieved by improving the technology of sputtering combustion in the SHS synthesis of chromium ligatures, as well as strictly rationing both the chemical and granulometric composition of nitrogen-containing metal powders for the production of special steels using additive technologies.

**Keywords:** additive technologies, metal powders, self-propagating high-temperature synthesis, direct laser fusion, nitride nickel-chromium alloy

---

Ссылка на статью:

Гаврилова Т.О. Особенности применения аддитивных технологий в металлургии // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 30-33.

Gavrilova T.O. Features of the application of additive technologies in metallurgy. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 30-33.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.042

Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К.

## ОЦЕНКА ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛИТЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКАХ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Аннотация.** В статье рассмотрено решение практической задачи по управления температурным градиентом в прокатном валке в процессе термической обработки с целью прогнозирования и предотвращения разрушения изделия в термической печи. Представлен комплекс технологических мероприятий для устранения трещинообразования в прокатном валке из высокохромистого чугуна. Рассмотрено влияние утепления торцов прокатного валка в процессе термической обработки на градиент температур. Представлены результаты прогноза максимального градиента температур в зависимости от параметров утепления: вариант расположения утеплителя на торце изделия в области примыкания шейки валка к его бочке, а также толщины теплоизоляции. Расчётным путём показано наиболее оптимальное утепление торца прокатного валка, приводящее к уменьшению градиента температур по сечению изделия. Также показано, какой вариант утепления не оказывает значительного влияния на градиент температур.

**Ключевые слова:** прокатный валок, рабочий слой, градиент температур, термическая обработка, трещинообразование

### Введение

Прокатный валок является одним из важнейших элементов прокатного стана. Валки влияют на параметры процесса прокатки и его стабильность, на производительность прокатного стана. Тепловой режим работы валков влияет на ход процесса прокатки, а также на все процессы и явления в очаге деформации [1].

Прокатные валки изготавливают из кованных или литых заготовок. Полученные заготовки, независимо от их способа изготовления, проходят следующие обязательные технологические этапы: механическая обработка заготовок на металлообрабатывающих станках до чистовых размеров, термическая обработка, технический контроль и дефектовка [2].

Особое место в производстве валков занимают литые валки, изготовленные из чугуна. Такие валки получают заливкой в стационарные формы (с «промывкой» или «полупромывкой»), а также центробежным способом. С помощью этих способов возможно получать двухслойные валки из различных материалов, например рабочий слой из легированного чугуна, а сердцевина – из высокопрочного. Такой способ заливки валков позволяет обеспечить получение заданных и необходимых эксплуатационных свойств. Однако стационарный способ заливки валков имеет свои недостатки, такие как: различие в химическом составе по сечению валка, неравномерность толщины рабочего слоя, перерасход графитизатора и легирующих элементов. Из-за обозначенных недостатков стационарного способа литья валков более предпочтительным и рентабельным по изготовлению является способ центробежного литья валков. Под воздействием центробежной силы происходит равномерное распределение расплава во вращающемся кокиле. Макроструктура рабочего слоя получается более плотная. С помощью центробежного способа литья получают

цилиндрические заготовки для рабочего слоя валков из сплавов типа HiCr-Steel-CE, HSS, Semi-HSS, HiCr, HiCr-CE, HiCr-Steel и т.д. [3–5].

Стоит отметить тот факт, что более 40% рабочих прокатных валков (далее ПВ) приобретались за рубежом. В последние годы в связи с нестабильной ситуацией остро встал вопрос о переходе металлургических предприятий на отечественную продукцию. В связи с этим появились новые требования по повышению качества валков из-закратно возросшего спроса на них у отечественных потребителей. Учитывая, что на территории Российской Федерации имеется всего два крупнейших завода по производству валков – это Магнитогорский и Кушвинский заводы прокатных валков, совокупная мощность которых является недостаточной для закрытия всей потребности в ПВ у отечественных потребителей, острым вопросом является повышение производительности указанных предприятий за счёт снижения количества бракованных изделий.

Следует отметить, что подавляющее количество брака в виде трещинообразования происходит по вине несоблюдения технологии, а также нарушения режима термической обработки прокатных валков. Именно термическая обработка является важнейшим этапом, так как она непосредственно влияет на технические и эксплуатационные характеристики готового изделия [6].

Неверно подобранный режим термической обработки, помимо снижения механических характеристик рабочего слоя изделия, может привести к нарушению сплошности и, как следствие, к его разрушению при эксплуатации [7].

Напряжения, возникающие после термообработки, обусловлены перепадом температурного поля по сечению отливки валка. Особенно это ярко проявляется на чугунных прокатных валках исполнения HiCr. Учитывая, что валок изготавливают трехслойным (рабочий слой, промежуточный и сердцевина), уровень напряжений зависит от коэффициентов термического расширения, механических характеристик материалов слоёв валка, а также от их теплового состояния [8].

© Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К., 2024

Косвенный анализ напряженно-деформированного состояния можно провести через величину температурных градиентов, возникающих по радиусу бочки валка.

Целью работы является прогнозирование НДС в прокатных валках в процессе их термической обработки через расчёт температурных градиентов.

**Основная часть**

С целью анализа и выявления напряженно-деформированного состояния был применен математический аппарат расчета теплового состояния валка. Адаптацией под данный профиль занимался научный коллектив Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. В результате был получен программный продукт (Therma Roll), задачей которого является вычисление теплового поля валка по его объему с учетом изменения теплофизических характеристик в зависимости от вида и температуры материала [9, 10]. Проведенный анализ теплового состояния прокатного валка указывает на возникшие максимумы градиентов температурного поля в точках 2 и 3 (рис. 1).

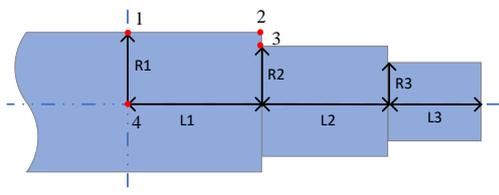


Рис. 1. Представление валка в математической модели (точками обозначены зоны контроля температурных параметров)

Температурные градиенты являются основным источником возникающих в теле валка температурных напряжений, ведущих к его разрушению. Также наибольшее значение градиента наблюдается в точках 1-3. В точке 3 наблюдается значительная величина градиента в момент резкого изменения температуры печи, что приводит к увеличению градиента.

Уменьшение величины градиента в точке 3 за счет реализации технологических мероприятий способствует уменьшению термонапряжений, приводящих к возникновению трещин в районе примыкания бандажа к стальной сердцевине валка (рис. 2).

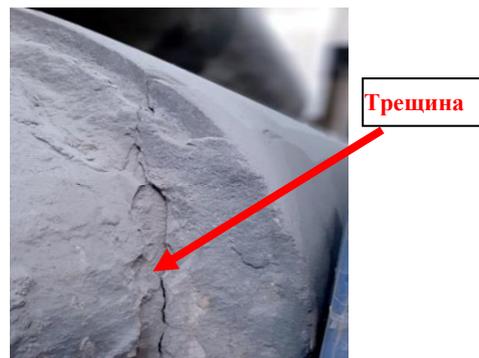


Рис. 2. Трещина, возникшая на боковой грани в точке 3

Одним из эффективных способов снижения величины термонапряжений в точках 2 и 3 без изменения температурного графика режима термической обработки является применение утеплителя. В настоящее время уже применяется утепление шеек валков, однако эффективность такого способа утепления остаётся спорной.

В данном исследовании рассматривались четыре варианта (типа) расположения теплоизоляционного материала на торце бочки валка, которые могут быть реализованы на практике (рис. 3).

Теплопроводность  $L = 0,05 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)}$ , теплоемкость  $C = 1000 \text{ Дж / (кг град)}$ , плотность  $0,1 \text{ т/м}^3$ .

В ходе моделирования исследовалось влияние толщины используемого теплоизоляционного материала  $h_{из}$  равного 18, 25, 36,50, 100 мм, на тепловое поле в теле отливки. Для вариантов с перехлестывающей через ребро изоляцией длина перехлеста составляла 0,25 м.

Первый вариант моделирования проводился для режима термообработки валка. В точках 2 и 3 с расположением утеплителя «Тип 1» все последующие эксперименты также будут проводиться для аналогичного режима и точек, контролировалась температура и величина градиента в характерных точках и определялось максимальное значение этой величины.

Цифрами на рис. 4 обозначены расчетные кривые, полученные: 1 – без утеплителя; 2 – с утеплителем толщиной 18 мм; 3 – 25 мм; 4 – 36 мм; 5 – 50 мм.

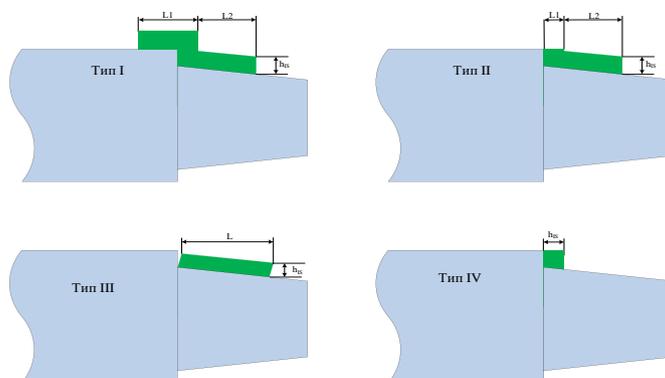


Рис. 3. Варианты расположения утеплителя на торцах бочки валка

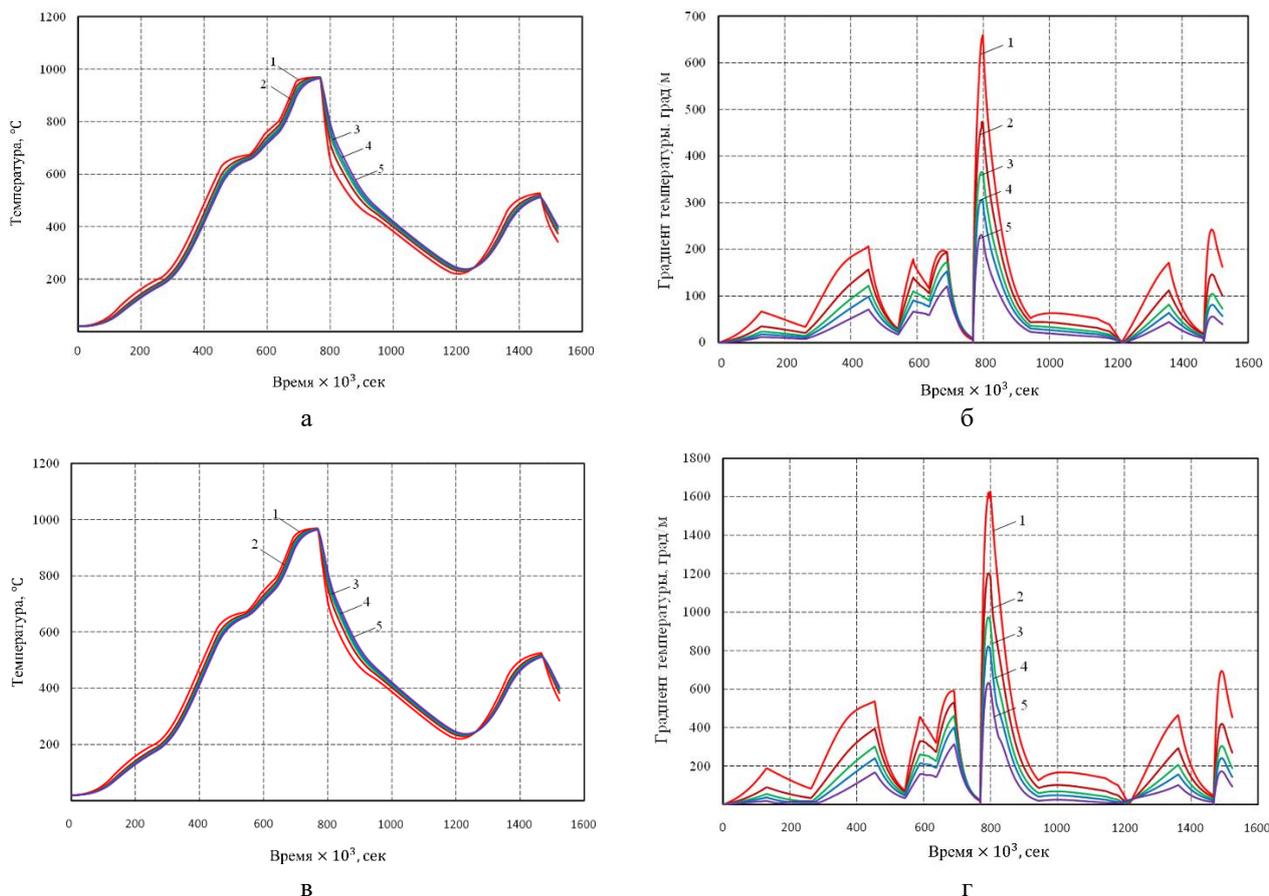


Рис. 4. Изменение температуры и градиента в точке 2 (а, б) и 3 (в, г) при закалке валька с различной толщиной утеплителя (кроме точки 1)

Анализ полученных данных показывает, что варианты утепления «Тип 1» дает существенный результат и влияет на величину градиента температур в точках 2 и 3, это можно отчетливо увидеть на графиках, приведенных на рис. 5.

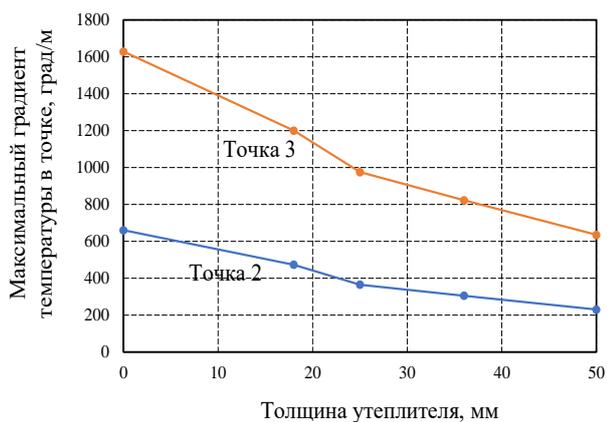


Рис. 5. Изменение величины максимального градиента температуры в точках 2 и 3 в зависимости от толщины утеплителя

Исходя из данных, представленных на рис. 5, видно, что использование утеплителя толщиной 50 мм приводит к тому, что величина градиента в точке 3 становится соизмеримой с величиной градиента в точке 1. Исходя из этого, можно предположить, что термонапряжения в точке 3 снизятся до приемлемых значений, не приводящих к разрушению валька.

Аналогичная серия экспериментальных моделирований была проведена для оставшихся трех типов расположения утеплителя. В результате этого были получены зависимости максимальной величины градиента температур в характерных точках 2 и 3 в зависимости от толщин утеплителя.

Полученные результаты были скомпонованы в виде графика для большей наглядности и приведены ниже на рис. 6. Также для удобства сравнения в дополнение был приведен график с утеплителем «Тип 1».

Полученные в ходе эксперимента результаты указывают на то, что не все варианты утепления торца бочки прокатного валька одинаково эффективны в процессе снижения градиента температур в точках 2 и 3.

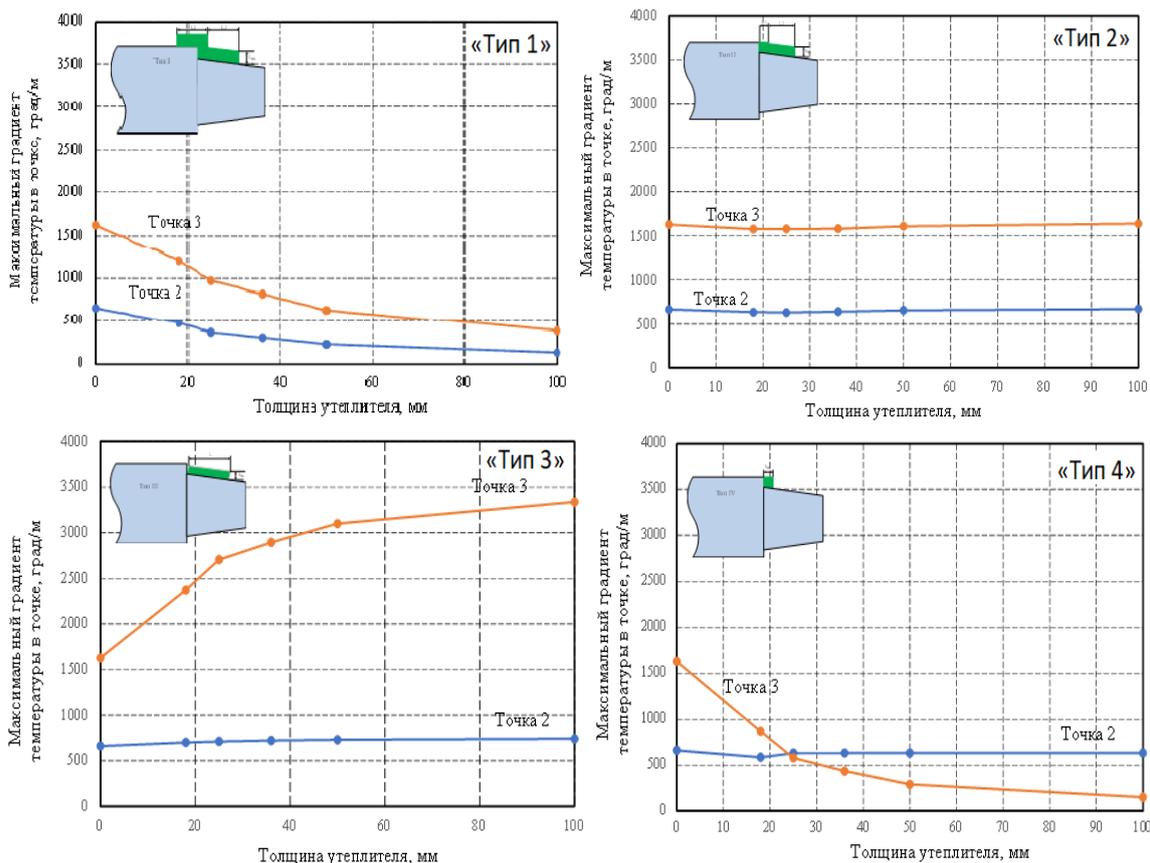


Рис. 6. Изменения максимального градиента температур в точках 2 и 3 в зависимости от толщины утеплителя с разными его типами

В свою очередь, некоторые из них показали обратный результат. Так, например, вариант утепления «Тип 2» практически не влияет на величину градиентов температур в обозначенных точках.

Стоит отметить результаты, полученные с вариантом утепления «Тип 1» и «Тип 4», показавшие высокую эффективность в процессе снижения градиента температур.

Так, вариант утепления «Тип 1» приводит к значительному уменьшению величины градиентов температур в точке 2 и 3, а вариант утепления «Тип 4» существенно снижает градиент температур в точке 3, напротив, в точке 2 эта величина остаётся практически неизменной.

Ещё стоит отметить тот факт, что при использовании изоляционного материала с коэффициентом температуропроводности равным  $5 \cdot 10^{-7}$ , наиболее эффективная толщина изоляции составляет 50 мм. При дальнейшем увеличении толщины изоляции её эффективность по уменьшению градиентов температуры при использовании схемы изоляции «Тип 1» снижается. График соотношения теплового потока и толщины изоляции, указывающий на это, приведен на рис. 7. Цифрами показаны графики зависимостей при разных значениях температуропроводности: 1 –  $5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с; 3 –  $5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

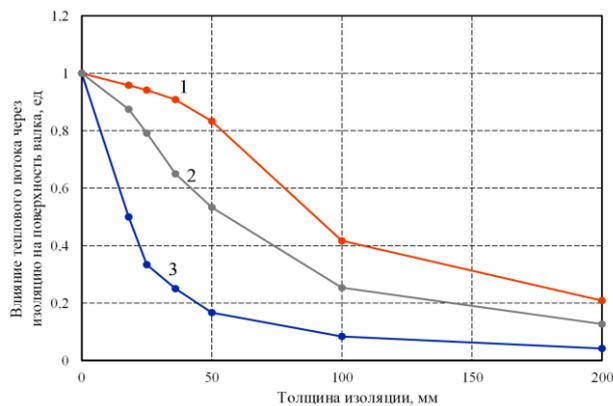


Рис. 7. Величина степени влияния теплового потока на поверхность вала через изоляционный материал в зависимости от толщины и температуропроводности теплоизоляционного материала

### Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что снижение градиента температуры в характерных точках возможно за счет утепления торцов бочки и шейки вала.

Стоит отметить то, что выбранная схема утепления существенно влияет на величину изменения гра-

диента температур, и эта величина зависит от толщины используемого теплоизоляционного материала.

В свою очередь, существуют варианты утепления («Тип 2» и «Тип 3»), реализованные по схемам утепления «Тип 2» и «Тип 3», которые не влияют на величину градиента в характерных точках или даже приводят к его увеличению.

Напротив, варианты утепления по схемам «Тип 1» и «Тип 4» показывают удовлетворительные результаты по снижению величины градиента температур в характерных 2 и 3 точках отливки вала. Это еще раз доказывает эффективность метода снижения термических напряжений, возникающих в результате образования градиента температур.

#### Список источников

1. Прокатные валки: монография / К.Н. Вдовин, Р.Х. Гималетдинов, В.М. Колокольцев, С.В. Цыбров. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2005. 543 с. ISBN 5-89514-598-1.
2. Вдовин К.Н., Колокольцев В.М. Производство отливок из чугуна: учебное пособие. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. 234 с.
3. Основные этапы разработки технологии производства рабочих валков для чистовых клетей станов горячей прокатки / А.А. Гулаков, И.Х. Тухватулин, В.М. Колокольцев, М.Г. Потапов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 36-40.
4. Развитие производства листопркатных валков из прогрессивных материалов на Кушвинском заводе прокатных валков / Р.Х. Гималетдинов, А.А. Гулаков, И.Х. Тухватулин [и др.] // Металлург. 2021. № 2. С. 36-41.
5. Мирзоян Г.С., Цыбров С.В. Производство композитных сортопркатных валков методом центробежного литья // Производство проката. 2010. №3. С. 38–40.
6. Применение компьютерного моделирования для оценки напряженного состояния литого прокатного вала / Н.А. Феоктистов, А.А. Юмабаев, Е.В. Скрипкин, А.В. Монастырский // Литейное производство. 2024. № 2. С. 27-33.
7. Формирование напряжений изгиба в бочке биметаллического прокатного вала при его термообработке / Б.Б. Зарицкий, А.С. Савинов, Н.А. Феоктистов [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 3(38). С. 30-34.
8. Прокатные валки / К.Н. Вдовин, Д.В. Куряев, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 335 с. EDN VNRVQD.
9. Предотвращение образования трещин в бочке прокатного вала исполнения NiCr / Н. А. Феоктистов, А. С. Савинов, А. А. Юмабаев, А. В. Монастырский // Литейщик России. 2024. № 4. С. 26-31.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665854 Российская Федерация. Termo roll V.1.1 : № 2024664422 : заявл. 25.06.2024 : опубл. 08.07.2024 / А. С. Савинов, Н. А. Феоктистов, Б. Б. Зарицкий [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

#### Сведения об авторах

**Юмабаев Азамат Аслямович** – старший преподаватель кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

**Савинов Александр Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, директор института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov\_nis@mail.ru.

**Феоктистов Николай Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

**Скрипкин Евгений Викторович** – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

**Троянов Андрей Вадимович** – студент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

**Чернов Виктор Петрович** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov42@mail.ru.

**Дубровин Виталий Константинович** – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vkdubr@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

---

EVALUATION OF THE TEMPERATURE GRADIENT IN CAST ROLLING ROLLS DURING HEAT TREATMENT

**Yumabayev Azamat A.** – Assistant professor of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

**Savinov Alexander S.** – D. Sc. (Eng.), Professor, Metallurgy, Head of Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov\_nis@mail.ru.

**Feoktistov Nikolay A.** – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

**Skripkin Evgeniy V.** – graduate student Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

**Troyanov Andrey V.** – student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

**Chernov Viktor P.** – D. Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@mail.ru.

**Dubrovin Vitaly K.** – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vkdubr@mail.ru.

**Abstracts.** The article discusses the solution to a practical problem of controlling the temperature gradient in a rolling roll during heat treatment in order to predict and prevent the destruction of the product in a thermal furnace. A set of technological measures is presented to eliminate cracking in a rolling roll made of high-chromium cast iron. The effect of insulation of the ends of a rolling roll during heat treatment on the temperature gradient is considered. The results of the forecast of the maximum temperature gradient depending on the insulation parameters are presented: the option of placing the insulation at the end of the product in the area where the roll neck adjoins its barrel, as well as the thickness of the thermal insulation. Calculation shows the most optimal insulation of the end of the rolling roll, leading to a decrease in the temperature gradient across the cross section of the product. It is also shown which insulation option does not have a significant effect on the temperature gradient.

**Keywords:** rolling roll, working layer, temperature gradient, heat treatment, cracking

---

Ссылка на статью:

Оценка градиента температуры в литых прокатных валках в процессе термической обработки / Юмбаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 34-39.

Yumabayev A.A., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Troyanov A.V., Chernov V.P., Dubrovin V.K. Evaluation of the temperature gradient in cast rolling rolls during heat treatment. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 34-39.

УДК 621.74.045

Леушин И.О., Коровин В.А., Гарченко А.А., Рябова Л.И.

## О ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА ИЗЛОЖНИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Аннотация.** В центре внимания авторов находится проблема повышения эксплуатационной стойкости изложниц, широко применяющихся в практике работы металлургических предприятий и производств, решение которой актуально и по сей день. В этой связи ими поставлена цель – выявить закономерности, связывающие режимы эксплуатации изложницы с процессами, затрагивающими структуру и свойства ее материала, влияющие на качество слитка и технико-экономические показатели его производства, в частности эксплуатационную стойкость, и по результатам наметить перспективные пути ее улучшения. Для достижения цели проведен информационно-аналитический обзор публикаций по теме в открытых источниках и в условиях действующего производства выполнена исследовательская работа по мониторингу поведения материала изложницы на протяжении эксплуатации. С использованием современного лабораторного оборудования проведена термометрия рабочего цикла чугуновой изложницы, зафиксированы проявления деградации микроструктуры и ухудшение некоторых свойств, таких как прочность на разрыв, пластичность, коэффициент линейного термического расширения. Полученные результаты позволяют наметить перспективные направления решения указанной проблемы, в частности, связанные с жидкофазной обработкой чугуна и стали как материалов, наиболее широко применяемых в качестве материала изложниц.

**Ключевые слова:** изложница, эксплуатация, материал, структура, свойства, деградация

### Введение

Как известно, изложницами называют литые чугунные или стальные формы, в которых из жидкого металла получают слитки требуемой массы и геометрических размеров, необходимых для последующей обработки давлением [1]. Процесс эксплуатации изложниц, или их жизненный цикл, представляет собой ряд повторяющихся рабочих циклов, каждый из которых включает последовательно выполняемые операции:

- наполнение изложницы металлическим расплавом (налив);
- выдержка слитка;
- стрипперирование (извлечение слитка из изложницы, или «раздевание слитка»);
- охлаждение изложницы без слитка;
- подготовка изложницы к следующему наливу.

По сути, изложницы работают в условиях малоциклового теплового воздействия (термического удара), приводящего к градиенту температур и возникновению вследствие этого термических напряжений, окислению, обезуглероживанию и эрозии рабочих поверхностей, появлению на них сетки разгара, продольных и поперечных трещин, коробления, что приводит к потере прочности и, как результат, разрушению.

Как утверждает профессор А.В. Кукса [2] и другие исследователи этого вопроса [3], главной характерной особенностью эксплуатации изложницы являются «стремительные циклически повторяющиеся односторонние нагревы от заливаемой во внутреннюю полость жидкой стали и последующие охлаждения, включая период после извлечения затвердевшего слитка». Именно это предопределяет разрушение изложницы и выход ее из строя.

Как следствие, анализ условий эксплуатации изложниц и поведения их материала при циклически повторяющихся термомеханических нагрузках уже довольно длительное время находится в центре внимания многих ученых. Не угасает интерес к этой проблеме и сейчас.

В этой связи авторами ставилась цель работы – выявить закономерности, связывающие режимы эксплуатации изложницы с процессами, затрагивающими структуру и свойства ее материала, влияющие на качество слитка и технико-экономические показатели его производства, в частности эксплуатационную стойкость, и по результатам наметить перспективные пути ее улучшения.

Для достижения поставленной цели ими был проведен информационно-аналитический обзор публикаций по теме в открытых источниках и в условиях действующего производства выполнена исследовательская работа по мониторингу поведения материала изложницы на протяжении жизненного цикла.

### Информационно-аналитический обзор

Исследователям вопроса уже достаточно давно известно о таком негативном явлении, как деградация структуры и свойств изделий из железоуглеродистых сплавов (сталь, чугун) при циклическом термоусталостном нагружении [4-8].

Все возможные причины этого явления делятся на две группы: 1) не связанные с фазовыми превращениями в ходе нагружения; 2) связанные с влиянием фазовых превращений и переходов.

К проявлениям причин первой группы относятся изменения концентрации точечных дефектов, образование, взаимодействие и перераспределение новых дислокаций и микродефектов упаковки, например под воздействием деформационных процессов, а также перераспределение химических элементов, раство-

ренных в твердой фазе, путем изменения ликвационной структуры.

Признаками проявления причин второй группы выступают измельчение зерен, преимущественное растворение или выделение избыточных фаз и существенное изменение формы и размеров структурных элементов, выделяющихся из высокотемпературной фазы (аустенита) под влиянием фазовых превращений при нагреваниях железоуглеродистых сплавов выше температуры начала  $\alpha$ - $\gamma$ -превращения и последующих охлаждениях.

Многие работы ориентированы на вскрытие, объяснение механизма отрицательного влияния большого количества термоциклов, приводящих к деформационному разрушению, хотя некоторые авторы отмечают, что после первых термоциклов металлические материалы упрочняются, а структурные изменения часто таковы, что улучшают качество металла [9-11].

В монографии [4], посвященной изучению деформационных изменений при нагреваниях и охлаждениях, указывается, что структура металлов при термоциклировании, имитирующем условия работы материалов при частых нагреваниях до полиморфных превращений, изменяется следующим образом: в начале нагревания устраняются дефекты, присутствовавшие в металле в исходном состоянии, а потом под влиянием термических напряжений происходит образование новых микродефектов структуры (дислокаций и их скопления). В результате наблюдается разупрочнение металла на первых циклах и упрочнение, однако это упрочнение имеет место, лишь пока не исчерпается пластичность. После этого появляются микротрещины и прочность падает. Дальнейшее термоциклирование разрушает металл.

Более того, автор монографии впервые выдвинул гипотезу о том, что термоциклическое усталостное нагружение может инициировать новые механизмы деградации материала, которые не наблюдаются при изотермической усталости, в частности, приводящие к изменениям положения критических точек на диаграмме «железо-углерод» и, как следствие, сужению или расширению интервалов между ними.

Проведенные академиком А.А. Барановым с коллегами исследования структурных изменений при термоциклировании сталей и чугунов показали, что полиморфные, фазовые  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения существенно изменяют структуру. Так, например, термоциклирование проволочных образцов из конструкционных сталей с нагревами до 900°C приводит к росту зерен, а многократное нагревание до температуры образования двухфазной ( $\alpha + \gamma$ )-области вызывает резкое измельчение структуры [4]. Этими же авторами отмечается и коагуляция карбидных фаз при термоциклировании.

Многие исследователи подтверждают, что при быстрых нагреваниях и охлаждениях структурные составляющие сплава, обладая разными теплопроводно-

стями, теплоемкостями, коэффициентами температурного расширения, характерными температурами и прочностными свойствами, претерпевают внутреннее микропластическое деформирование, тем самым влияя на степень упорядоченности феррита — твердого раствора углерода и других элементов в  $\alpha$ -железе и физико-механические свойства материала в целом [12-14].

В качестве материала изложниц в подавляющем большинстве случаев применяют чугун (серый с пластинчатым графитом ЧПГ, высокопрочный с шаровидным графитом ЧШГ и с вермикулярным графитом ЧВГ) и лишь иногда углеродистую сталь.

Сложное напряженное состояние, возникающее в изложнице в условиях малоциклового температурного нагружения (в различных источниках: термоциклирование, термоусталостное нагружение), вызывает в наружных поверхностных слоях при изгибе стенок изложницы наиболее опасное двухосное растяжение, резко снижающее ее конструкционную прочность [15, 16]. Этому способствуют длительные температурные воздействия на графит и металлическую основу чугуна, приводящие к ослаблению границ зерен за счет выделения вторичных фаз (распад первичного цемента или цементита перлита, окисление графитных включений, оплавление фосфидной эвтектики и других легкоплавких составляющих, межкристаллитное окисление). Эти процессы существенно понижают пластичность и сопротивляемость чугуна разрушению. Изменения структуры и свойств чугуна изложницы вплоть до разрушения при термоциклировании зависят от формы, величины и распределения графита, неметаллических включений и наличия в материале литейных дефектов.

Изучению особенностей зарождения и развития микротрещин при термоциклировании в чугунах с различной формой графита посвящена работа [17]. Представленные в ней результаты исследований свидетельствуют о следующем.

В образцах из ЧПГ появление микротрещин было выявлено уже через 10–30 циклов нагрева-охлаждения, причем их распространение происходило от микротрещин в пластинках графита в металлическую матрицу в направлении к неметаллическим включениям и раковинам. В свою очередь, неметаллические включения, газовые раковины, усадочная пористость, а также точечные включения графита играли роль зародышей микротрещин, ускоряли их развитие и существенно снижали сопротивление разрушению при термической усталости и в итоге способствовали формированию разветвленной сетки микротрещин древовидного типа.

В ЧШГ эту негативную роль играли оксиды железа и сернистые включения магния и формировалась сетка микротрещин, часто в форме черных пятен или вырожденных сфероидов. При этом зарождение трещин было зафиксировано в крупных включениях свободного цементита или на границе раздела цементита с перлитом.

Поведение ЧВГ в условиях термоусталостного нагружения оказалось аналогичным поведению ЧШГ. При этом была выявлена интересная закономерность: микротрещины во включениях графита вермикулярной формы появляются тем позднее, чем большее значение имеет коэффициент их формы. При низком значении коэффициента формы трещины образуются на концах включений (как в пластинчатом графите) и инициируют развитие трещин в матрицу с максимальной скоростью. Максимальная длина микротрещин для чугунов с пластинчатым, вермикулярным и шаровидным графитом подчиняется соотношению 5:3:1, а сопротивление термической усталости соответственно 1:1,25÷1,4:1,6÷1,8. Получается, что в сравнении с ЧПГ ЧВГ имеет сопротивление термической усталости на 25-40%, а ЧШГ на 60-80% выше.

Авторы работы [18] выяснили, что с точки зрения обеспечения конструкционной жесткости деталей ферритные нелегированные чугуны с шаровидной и вермикулярной формами графита и серый легированный чугун с перлитной структурой практически равноценны. Большая толщина и закругленность графитовых пластин в ЧВГ уменьшают концентрацию внутренних напряжений по границам «графит-матрица», что обуславливает более высокие прочностные свойства, чем у ЧПГ, при одинаковой металлической основе. Высокие пластические свойства ЧШГ и ЧВГ позволяют при кратковременных механических нагрузках предохранить материал от аварийного разрушения за счет пластической деформации. С повышением температуры длительная прочность перлитного чугуна с вермикулярной формой графита остается несколько выше, чем ферритного, хотя за счет постепенного распада перлита эта разница уменьшается.

При исследовании влияния количества тепломов на возникновение и развитие трещин было установлено, что трещины быстрее зарождаются и распространяются в ЧВГ с перлитной металлической основой. В перлитном ЧШГ также наблюдается раннее появление трещин, но их рост вначале замедлен, а затем ускоряется, приводя к концу испытаний к наибольшей длине образовавшихся трещин. Позже возникают и медленнее распространяются трещины в ферритном ЧВГ, что обусловлено как температурной стабильностью ферритной матрицы, так и ее высокой пластичностью. В этих условиях ЧПГ менее стоек в сопротивлении к зарождению и развитию термоусталостных трещин из-за более быстрого внутреннего окисления вдоль пластин графита.

В статье [19] говорится о выявленной ее авторами зависимости между энергией динамического разрушения и температурой для ЧВГ и ЧШГ с различным содержанием перлита, а также корреляции между комплексным параметром, объединяющим сопротивление разрушению и твердость, и сопротивлением усталостному разрушению для ЧВГ, имеющих перлитную и ферритную структуру. Установлено, что для

ЧВГ с преимущественно ферритной структурой (20% перлита) предел усталости составляет 173 МПа, а относительный предел усталости – около 0,45. При перлитной структуре (97% перлита) эти величины составляют соответственно 194 МПа и 0,37. Авторами отмечается, что эти свойства близки к аналогичным показателям для ЧШГ.

Говоря об изменениях структуры и свойств материала изложницы в процессе эксплуатации, недопустимо обходить вниманием явление так называемого роста чугуна, который в наибольшей степени проявляется у перлитного серого чугуна (признаки роста у ЧПГ фиксируются уже при 400°C) и оказывает существенное влияние на величину возникающих термических напряжений. Причины этого явления – графитизация при нагреве и накопление растворенного углерода на новых центрах графитизации при охлаждении, а также выделение газов из твердого раствора в поры (например, переход водорода из атомарного состояния в молекулярное или проникновение кислорода внутрь изделия), приводящее к окислению металлической матрицы чугуна особенно по границам включений графита или по границам зерен [20]. При неблагоприятных условиях, например термоциклировании, рост чугуна может достигнуть до 30% от первоначального объема и выше. Рост особенно велик, когда имеют место неодновременные фазовые превращения железа в различных слоях металла при частых колебаниях температуры. Это приводит к объемным изменениям, создающим сжимающие и растягивающие напряжения, обуславливающие возникновение микротрещин. Микротрещины сами увеличивают объем чугуна и далее по цепочке служат добавочными каналами для окисления металлической основы агрессивными газами. В итоге, вследствие объемной деформации и неравномерного приращения объема, в изложнице создаются предпосылки для коробления и зарождения и развития трещин. Механические свойства чугуна при этом сильно понижаются: он становится мягким и менее прочным.

Белорусские исследователи (А.Н. Крутилин с коллегами [18]) отмечают негативную роль цементита в структуре чугуна, поскольку теоретически 0,1% связанного в цементит углерода вызывает при распаде перлита увеличение объема примерно на 0,18%. Как следствие, распад перлита в условиях термоциклирования материала изложницы приводит к увеличению размеров до 1,5% и значительно ускоряется с ростом температуры под воздействием динамических нагрузок.

Наименее устойчив к росту серый чугун – ЧПГ. Это можно объяснить тем, что структура графитовых включений в нем часто имеет разветвленный характер (пластинки графита связаны между собой), что создает благоприятные условия для проникновения в чугун кислорода и внутреннего окисления. В нелегированном ЧШГ распад перлита происходит при 450°C, а при 500°C резко ускоряется, что дает рост чугуна на 0,4-0,5%. У ферритных чугунов рост практически не

наблюдается. У ЧВГ, как и у ЧШГ, большая в сравнении с ЧПГ устойчивость к внутреннему окислению может быть объяснена тем, что частички графита не связаны в разветвленную сеть.

Известно, что ЧШГ при комнатной температуре хорошо противостоит трещинообразованию вследствие своей высокой прочности и большой пластичности. Однако в условиях даже малоциклового термоусталостной нагрузки при высоких скоростях охлаждения из-за меньшей в сравнении с ЧПГ теплопроводности и высокого модуля упругости на охлаждаемой поверхности изложниц из ЧШГ возникают существенные растягивающие напряжения, которые, несмотря на высокую прочность и пластичность ЧШГ, приводят к быстрому возникновению трещин, и термостойкость ЧШГ оказывается меньше, чем у ЧПГ.

Автор работы [8] убедительно доказала, что одним из основных механизмов деградации структуры изделий из конструкционных углеродистых и низколегированных сталей в условиях термоциклических нагрузок и проявляющимся в протекании процессов деформационного старения является сфероидизация перлита вплоть до его вырождения в цементит.

Механизм усталостного разрушения в малоциклового области был изучен по результатам опытов на техническом железе еще Коффином [21], которым установлено, что процесс жесткого нагружения может быть разделен на три стадии. Первая характеризуется упругопластической деформацией, в процессе которой наблюдается образование пор и дробление кристаллических блоков. Начало второй стадии сопровождается образованием на поверхности образца разветвленной системы микротрещин, а с увеличением числа циклов трещины становятся шире. Эта стадия по продолжительности занимает 95% общей долговечности. В завершающей третьей стадии упругопластическая деформация локализуется, зарождается магистральная трещина, которая распространяется вплоть до разрушения.

Таким образом, в результате работы в условиях малоциклового температурного нагружения (термического удара) в изложнице возникают и развиваются трещины термической усталости, что приводит к потере прочности ее конструкции и в конечном итоге – к разрушению. Возникновение и развитие трещин происходит в наиболее напряженных местах по мере накопления числа циклов местной пластической деформации.

Как известно, разрушение является заключительной стадией почти всякой развивающейся деформации [22]. Оно может быть неполным и полным (хрупкие и пластические разрушения при кратковременном, длительном статическом или усталостном нагружении и т.п.). Материалу изложницы, как большинству реальных материалов, присуще одновременно и упругое и пластическое состояние, поэтому и характер разрушения при эксплуатации изложницы может быть как хрупким, так и пластическим.

В работе [15] автором предлагается закономерности процесса разрушения чугунной изложницы рассматривать отдельно для докритического, критического и закритического состояний. Разрушение в докритическом состоянии связывают с прерывистым (дискретным) строением реального материала, нарушением правильности строения (структуры) материала. Включения графита в чугуне, по его мнению, можно квалифицировать как полости, а линии сдвига – как микротрещины. Они являются нарушением правильности строения, субмикро- и микросплошности в объеме одного зерна или нескольких соседних зерен.

В процессе разрушения он различает:

– превращения исходной дефектности структуры последовательно в субмикро-, микро- и макроскопические нарушения сплошности – каверны и трещины и их докритическое развитие;

– наступление критического (неустойчивого) состояния и закритическое (взрывное) развитие магистральных трещин до полного разделения тела.

Для эксплуатации чугунных изложниц характерно закритическое (реже критическое) развитие хрупких трещин.

Завершая описание важнейших для понимания и достижения цели работы процессов деградации структуры и свойств материала изложницы, следует отметить, что оно в целом вписывается в так называемую деформационную (малоцикловую) теорию усталости [23], согласно которой разрушение наступает в момент исчерпания ресурса пластичности, вследствие накопления пластической деформации в каждом цикле. В ней в центре внимания находится величина деформации. Эта теория относится к той области циклических нагрузок, где они лежат выше динамического предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , частота нагружения невысока и составляет от долей герца до нескольких герц, а разрушение происходит после сравнительно малого числа циклов.

Согласно этой теории, при циклическом нагружении в системе координат «деформация – напряжение» формируется петля гистерезиса, а физическая сущность малоциклового усталости материала основана на эффекте Баушингера – эффекте снижения пределов пропорциональности, упругости и текучести материала в результате изменения знака нагружения [24].

### Исследовательская часть

В условиях действующего производства АО «РУСПОЛИМЕТ» проводили мониторинг изменений структуры материала изложницы – чугуна с пластинчатой формой графита СЧ15. Объектом исследования служила изложница типа К13С (кузнечная, сифонная, в сборке с турбостопом глуходонная), уширенная сверху, эксплуатируемая в комплекте с прибыльной надставкой и керамическим турбостопом на вакуумно-индукционной печи ВИП-4,6 (производитель – фирма INTECO) в цехе специальной электрометаллургии ПАО «РУСПОЛИМЕТ» для получения слит-

ков массой 1,3 т из сплава на никелевой основе ХН50ВМТЮБ (ЭП648). Норматив эксплуатационной стойкости подобных изложниц, установленный на предприятии, составляет 20 наливов.

На первом этапе выполняли термометрию рабочего цикла изложницы. Замеры температуры вели контактными термопарами (термопреобразователь ТП-Н 0303.1-И-3-10000 Никробель с верхним пределом диапазона измерений 1200°C), установленными с одной стороны на двух уровнях (верх и низ) по высоте изложницы в середине стенки, а также зонах внутренней и внешней поверхностей, с интервалом 1 мин в течение рабочего цикла. Для измерений использовали безбумажный самописец марки LOGOSCREEN nt (производство фирмы JUMO GmbH & Co. KG, Германия) с TFT-дисплеем, CompactFlash-картой и USB-интерфейсом и 18 измерительными каналами. Результаты термометрии представлены на рис. 1.

Определили, что характер температурно-временных зависимостей изложницы К13С вполне соответствует графику типового термического цикла изложницы, представленного в монографии профессора Э.С. Зальцмана [25]. По ним определили, что максимальная температура внутренней поверхности в период термоудара в верхней ее части составила  $T_{ПВmax} = 656^\circ\text{C}$ , а в нижней части  $T_{ПВmax} = 642^\circ\text{C}$ . Наибольшая скорость (интенсивность) прогрева стен-

ки изложницы наблюдается в течение первого часа после ее заливки металлическим расплавом, затем она уменьшается. Максимальная средняя температура стенки изложницы была зафиксирована в конце периода прогрева и в верхней части оказалась равной  $T_{срmax} = 590^\circ\text{C}$ , а в нижней части – соответственно  $T_{срmax} = 570^\circ\text{C}$ , что несколько превышает температурный порог циклической вязкости СЧ15, равный, по некоторым данным, 550-560°C. В это же время наблюдался и максимальный температурный перепад  $\Delta T_{max}$  по толщине стенки, достигающий 200°C.

На втором этапе исследований в лаборатории Исследовательского центра АО «РУСПОЛИМЕТ» на образцах изучали микроструктуру материала изложницы до ее ввода в эксплуатацию и после вывода из эксплуатации по причине недопустимых размеров сетки трещин разгара на рабочей поверхности. Образец №1 был вырезан из тела изложницы до ввода ее в эксплуатацию, образец №2 – после вывода изложницы из эксплуатации (изложница выдержала 30 наливов). Фотографии микроструктуры образцов №1 и 2 до травления представлены на рис. 2, 3. Микроструктуру чугуна фиксировали при помощи комплекса программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet по ГОСТ 3443-87, ГОСТ 1778-2022 и ГОСТ 5639-82.

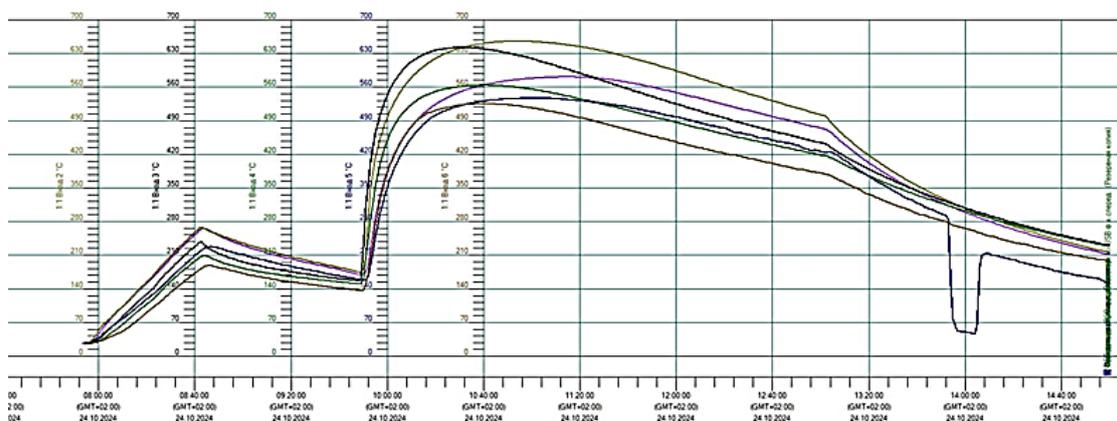


Рис. 1. Температурно-временные кривые  $T(t)$  рабочего цикла изложницы К13С (снимок со шкалы прибора; резкий скачок вниз на одной из кривых связан с несанкционированным выходом термопары в верхней части изложницы из гнезда прибора)

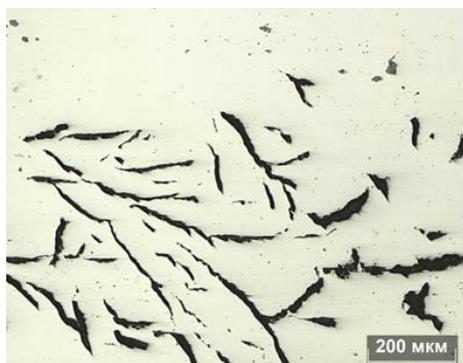


Рис. 2. Образец №1 ( $\times 100$ )



Рис. 3. Образец №2 ( $\times 100$ )



– устойчивость материала изложницы по всей толщине стенки к росту (для чугуна) и другим проявлениям деградации структуры;

– малое значение КЛТР материала изложницы;

– минимальный модуль упругости Юнга материала изложницы;

– минимальный температурный градиент как по времени рабочего цикла, так и по толщине стенки изложницы;

– высокие жаростойкость, термостойкость, жаропрочность, разгароустойчивость материала изложницы (особенно в зонах, прилегающих к ее внутренней поверхности), его повышенные теплопроводность, предел текучести, пластичность, циклическая вязкость;

– малые склонность к ползучести и межкристаллитной коррозии материала изложницы;

– высокие технологические литейные (жидкотекучесть, малая склонность к усадке) и механические свойства (хорошая обрабатываемость резанием) материала изложницы.

### Заключение

По итогам проведенного авторами информационно-аналитического обзора открытых источников, а также выполнения ими исследовательской работы в условиях действующего производства на примере изложницы типа К13С (кузнечная, сифонная, в сборке с керамическим турбостопом, глухонная) из чугуна марки СЧ15, эксплуатируемой в комплекте с приборной надставкой на вакуумно-индукционной печи ВИП-4,6 в цехе специальной электрометаллургии ПАО «РУСПОЛИМЕТ» для получения слитков массой 1,3 т из сплава на никелевой основе ХН50ВМТЮБ (ЭП648), описаны негативные последствия деградации структуры и свойств изделий из железуглеродистых сплавов при малоцикловом термомеханическом нагружении.

Поисковые исследования в области совершенствования материала изложниц целесообразно продолжить. В качестве перспективного направления таких исследований авторами статьи предлагается обратить внимание на жидкофазные методы обработки материала изложницы, которыми в настоящее время совместно с заинтересованными предприятиями активно занимаются специалисты кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.

### Список источников

1. Заверюха Н.В., Волков Л.А., Четкин А.В. Разливщик стали. М.: Металлургия, 1974. 208 с.
2. Кукса А.В. Чугунные сталеразливочные изложницы. М.: Металлургия, 1989. 152 с.
3. Иванов М.А. Чугунные изложницы повышенной стойкости для литья цинковых блоков: автореф.

дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04 / Иванов Михаил Александрович. Челябинск, 2007. 20 с.

4. Баранов А.А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов. Киев: Наукова думка, 1974. 231 с.
5. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
6. Добротворский А.М., Гюлиханов Е.Л., Масликова Е.И. Деградация структуры и свойств труб из теплостойких сталей после длительной эксплуатации на нефтеперерабатывающих предприятиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №1(238). С. 136-144.
7. Десятникова М.А. Оценка усталостной долговечности элементов конструкций при термомеханическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Нижний Новгород, 2018. 152 с.
8. Фомихина И.В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. Минск, 2018. 46 с.
9. Федюкин В.К. Закономерности и особенности фазовых превращений при термоциклической обработке и ее влияние на надежность изделий из сталей перлитного класса. Л., 1974. 30 с.
10. Баранов А.А. Рост чугуна и стали при термоциклировании. Киев, 1967. 140с.
11. Давиденков Н.Н. Лихачев В.А. Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии. М.; Л., 1962. 223 с.
12. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 192 с.
13. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П. [и др.] // Ползуновский вестник. 2005. №2 (ч. 2). С. 36-43.
14. Бердиев Д.М., Файзуллаев С.С. Повышение износостойкости зубчатых колес методом термоциклической обработки [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2023. №1(106).. Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14918> (дата обращения 18.10.2024)
15. Ромашкин В.Н. Исследование процесса изготовления стержней и форм отливок изложниц с применением жидких самотвердеющих смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. М., 1968. 23 с.
16. Пантелеева А.В., Ковалевич Е.В. Компьютерное моделирование напряженного состояния изложниц для слитков высоколегированной стали // Литейное производство. 2013. №7. С. 21-24.
17. Nechtelberger E., Pühr H., Von Nesselrode J.B., Nakayasu A.S. Cast iron with Vennicuar. Чугун с вермикулярным графитом // Compacted graphite – State of the Art. Development, Production, Properties, Applications. 49th Int. Foundry Congress, Chicago, 14-17 April, 1982. P. 17.

18. Чугун с вермикулярным графитом для деталей двигателей, работающих в условиях теплосмен / Крутилин А.Н., Розум В.А., Лось В.С., Панард Ю.Г., Кузьмич А.Н., Карась А.Н. // *Литье и металлургия*. 2005. №4(36). С. 47-50.
19. Microstructure – mechanical property relationship in compacted (vermicular) graphite cast iron / Loper C.R., Lalich M.T., Park H.K., Gyarmaty F.M. // 46th International Foundry Congress, 1979. №35. С. 237-241.
20. Энциклопедия по машиностроению XXL: Оборудование, материаловедение, механика и ...: информационный портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mash-xxl.info/?ysclid=mlvxtm0z3w343152391> (дата обращения: 13.09.2024).
21. Коффин Л.Ф. О термической усталости сталей // *Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях* / под ред. Л.Б. Гецова и М.Г. Таубиной. М.: Госэнергоиздат, 1960. С.188-258.
22. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. *Физика твердого тела для инженеров*. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
23. Викулов А.С., Потемкин А.Н., Никитин Д.Е. Усталостное разрушение материалов с позиции различных теорий [Электронный ресурс] // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2015. Т. 13. С. 3311–3315. Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2015/85663.htm>. (дата обращения 13.10.2024).
24. Лукьянец В.А. *Физические эффекты в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1993. 224 с.
25. Зальцман Э.С. *Изложницы для легированных сталей*. Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2004. 208 с.

### 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.

**Коровин Валерий Александрович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: v.korovin2015@yandex.ru.

**Гарченко Александр Александрович** – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: garchenko.a.a@yandex.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.

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### ON DEGRADATION OF STRUCTURE, PROPERTIES AND DESTRUCTION OF MOLD MATERIAL DURING OPERATION

**Leushin Igor O.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

**Korovin Valery A.** – Dr. Sci. (Tech), Associate Prof., Professor of of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

**Garchenko Alexander A.** – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

**Ryabova Liubov I.** – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

**Abstracts.** The authors focus on the problem of increasing the operational durability of molds, widely used in the practice of metallurgical enterprises and industries, the solution of which is still relevant today. In this regard, they set a goal - to identify patterns linking the modes of operation of the mold with the processes affecting the structure and properties of its material, affecting the quality of the ingot and the technical and economic indicators of its production, in particular, operational durability, and based on the results to outline promising ways to improve it. To achieve the goal, an information and analytical review of publications on the topic in open sources was carried out and, under the conditions of existing production, research work was carried out to monitor the behavior of the mold material during

operation. Using modern laboratory equipment, thermometry of the working cycle of a cast iron mold was carried out, manifestations of microstructure degradation and deterioration of some properties, such as tensile strength, ductility, coefficient of linear thermal expansion were recorded. The obtained results allow us to outline promising directions for solving the specified problem, in particular, those related to liquid-phase processing of cast iron and steel as materials most widely used as mold material.

**Keywords:** mold, operation, material, structure, properties, degradation

---

Ссылка на статью:

О деградации структуры, свойств и разрушении материала изложницы в процессе эксплуатации / Леушин И.О., Коровин В.А., Гарченко А.А., Рябова Л.И. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 40-48.  
Leushin I.O., Korovin V.A., Garchenko A.A., Ryabova L.I. On degradation of structure, properties and destruction of mold material during operation. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 40-48.

# ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.979-82.001.8

Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ НАГРЕТОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМ КОВОЧНЫМ КОЛОННЫМ ПРЕССОМ

**Аннотация.** В работе исследуются тепловые и механические процессы, возникающие в колоннах гидравлического ковочного пресса «United» (США) с усилием 22,5 МН в результате воздействия нагретой заготовки. Основное внимание уделено влиянию неравномерного нагрева колонн на напряженно-деформированное состояние элементов пресса, износ его узлов и снижению эксплуатационной точности оборудования. Для изучения термического воздействия была проведена серия замеров температуры поверхности колонн с использованием тепловизора Thermo CAM P60, обладающего высокой точностью измерений. Экспериментальные замеры подтверждают, что нагрев колонн по высоте и окружности неравномерен, что обусловлено процессами теплообмена между заготовкой и прессом, а также состоянием поверхности колонн (шероховатость, окисные пленки, смазочные слои). Последствия неравномерного нагрева включают возникновение дополнительных термических напряжений, перекося архаива, усиленный износ направляющих втулок и уплотнений гидроцилиндров, а также увеличение напряжений в системе «архива-колонна-гайка». Эти факторы в длительной перспективе приводят к снижению жесткости пресса, уменьшению точности поковок и повышенной вероятности поломок дорогостоящих элементов оборудования. Для анализа термических процессов была изготовлена уменьшенная в 30 раз масштабная модель пресса. На модели исследовались тепловые деформации станины и влияние эксцентричного расположения заготовки на неравномерность нагрева колонн. Каркас для индикаторов часового типа был теплоизолирован для исключения влияния температуры. В заключении подчеркивается важность комплексного подхода к изучению условий работы колонных прессов, включая применение конечно-элементного моделирования и проведение масштабных исследований на работающем оборудовании.

**Ключевые слова:** гидравлический пресс, колонны пресса, тепловое воздействие, неравномерный нагрев, напряженно-деформированное состояние, износ узлов, точность поковок, термические напряжения, перекося архаива, конечно-элементное моделирование

Продукция, изготавливаемая с использованием гидравлических ковочных прессов с колонной конструкцией станины (крупногабаритные поковки), обладает высокой востребованностью в современной промышленности. В условиях текущих геополитических и экономических реалий, включая введение санкционных ограничений и прекращение поставок крупногабаритных деталей для прессов от украинских производителей (таких как НКМЗ, Днепропресс и др.), обеспечение потребностей в высококачественных поковках с минимальными затратами становится приоритетной задачей. Для достижения этой цели необходимо поддерживать гидравлические прессы в максимально исправном и работоспособном состоянии на протяжении длительного времени.

Гидравлические прессы с колонной конструкцией станины относятся к категории оборудования для обработки материалов, которое эксплуатируется в условиях повышенных нагрузок. Такие условия включают вероятность смещения оси заготовки относительно оси пресса в процессе обработки, контакт с окалиной, а также воздействие высоких температур. Эти факторы в совокупности с продолжительным сроком эксплуатации оказывают негативное влияние

на долговечность комплектующих узлов и деталей пресса. Кроме того, они приводят к снижению геометрической точности изготавливаемых поковок, что может сказываться на качестве конечной продукции.

Принципиальная схема колонного гидравлического пресса приведена на рис. 1. Для того чтобы рабочий инструмент 10 произвел положительную работу над деталью 9, плунжер 6 толкается сжатой жидкостью, подаваемой в главный цилиндр 5. Плунжер, в свою очередь, толкает подвижную поперечину 3, которая перемещается вдоль направляющих колонн 7, жестко соединяющих неподвижные верхнюю 1 и нижнюю 2 поперечины. Для возврата подвижной поперечины в исходное верхнее положение гидропривод переключается и начинает подавать жидкость в возвратные цилиндры 4, толкающие вверх плунжеры 8.

Многочисленные исследования, посвященные повышению надежности колонных гидравлических прессов, в основном сосредоточены на изучении надежности базовых элементов конструкции при наличии эксцентриситета силы нагружения пресса в процессе обработки заготовки. Однако влияние таких факторов, как температура и окалина, на работу пресса остается недостаточно изученным. Между тем еще в середине XX века известный исследователь гидравлических прессов Э. Мюллер отмечал, что неравно-

© Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К., 2024

мерный нагрев колонн по их сечению и длине может вызывать значительные отклонения в распределении напряжений в материале колонн.

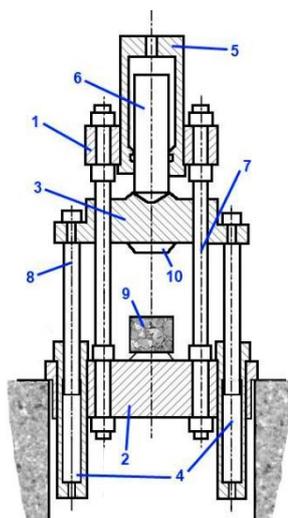


Рис. 1. Принципиальная схема колонного гидравлического пресса

Кроме того, неравномерность температурного распределения может наблюдаться не только в пределах одной колонны, но и между различными колоннами пресса. Это связано с эксцентриситетом расположения заготовки относительно центра пресса во время обработки.

Процесс теплообмена между горячей заготовкой и элементами пресса можно охарактеризовать как сложный и многокомпонентный. Во-первых, он является нестационарным, так как температурное поле в системе «пресс – заготовка» изменяется во времени. Во-вторых, теплообмен включает радиационно-конвективные процессы, в которых взаимодействуют тепловое излучение, конвекция и теплопроводность.

Согласно основным законам теплообмена, наибольшее влияние на нагрев деталей пресса оказывают процессы теплового излучения и теплопроводности. При этом передача тепла излучением зависит от множества факторов, включая форму, размеры, температуру и степень нагретости заготовки (плотность теплового потока), состояние поверхности элементов пресса, расстояние между заготовкой и прессом, а также другие параметры. Учет этих факторов имеет ключевое значение для оценки теплового воздействия на детали пресса и разработки методов повышения их надежности.

Плотность потока излучения ( $E$ , Вт/м<sup>2</sup>) является лучеиспускательной способностью тела и зависит от потока собственного излучения ( $Q$ , Вт) и площади излучения ( $F$ , м<sup>2</sup>):

$$E = \frac{dQ}{dF}, \quad (1)$$

Плотность потока собственного излучения тела (лучеиспускательная способность) называют и интегральной интенсивностью излучения тела.

Выражение интенсивности теплового излучения имеет следующий вид:

$$E = C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $C_0$  – коэффициент, зависящий от физических свойств излучающей поверхности;

$T_1$  – абсолютная температура излучающей поверхности, К;

$T_2$  – абсолютная температура облучаемой поверхности, К;

$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$  – приведенная степень черноты излучающего и облучаемого тела;

$\varphi$  – коэффициент, учитывающий долю облучения, падающего на тело;

$\alpha$  – угол падения лучей.

В случае близкого расположения излучающего и облучаемого тела (система «заготовка-пресс» попадает под это условие) выражение (1) принимает следующий вид:

$$E = C_0 \frac{F}{L^2} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $F$  – площадь источника излучения, м<sup>2</sup>;

$L$  – расстояние от источника излучения до облучаемого тела, м.

Поглощающая и отражающая способность элементов пресса определяется состоянием их поверхности, которое количественно характеризуется оптической шероховатостью. Оптическая шероховатость определяется как отношение высоты микронеровностей поверхности к длине волны падающего излучения. Неровности поверхности, в частности впадины между элементами шероховатости, способствуют увеличению поглощения падающего излучения за счет многократного внутреннего отражения.

Кроме того, наличие на поверхности деталей различных покрытий, таких как краска, окислы или смазочные материалы, значительно снижает их отражающую способность. Это приводит к увеличению степени черноты поверхности, что усиливает поглощение теплового излучения. Таким образом, состояние поверхности деталей пресса оказывает существенное влияние на процессы теплопередачи и, следовательно, на их тепловую нагрузку.

Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела представлена на рис. 2 и характеризуется потоком излучения  $Q$  – энергией, излучаемой за единицу времени со всей поверхности тела.

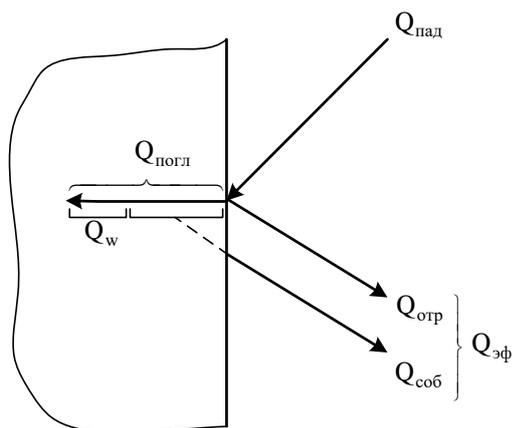


Рис. 2. Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела:

$Q_{пад}$  – поток излучения падающие на поверхность тела;  $Q_{погл}$  – поток излучения, поглощенный телом;  $Q_{отр}$  – поток излучения, отраженный от поверхности тела;  $Q_{соб}$  – поток собственного излучения тела

Исследование температурного распределения на поверхности нагретой колонны гидравлического прессы «United» (США) с усилием 22,5 МН проводилось с использованием тепловизора **Thermo CAM P60** производства компании **Flir Systems** (США). Данный прибор обладает диапазоном измерения температур от  $-40$  до  $+1500^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  или  $\pm 2\%$  от показаний, что обеспечивает высокую точность измерений.

Экспериментальные замеры температур колонн проводились в процессе обработки стального слитка из стали 45, имеющего габариты: длина – 2500 мм, диаметр – 500 мм. Скорость перемещения бойка прессы составляла  $V = 45$  мм/с, а время одного цикла работы прессы  $n = 10$  циклов в минуту. Измерения температуры поверхности колонн выполнялись после определенного количества рабочих циклов прессы, результаты которых представлены на рис. 3 и 4.

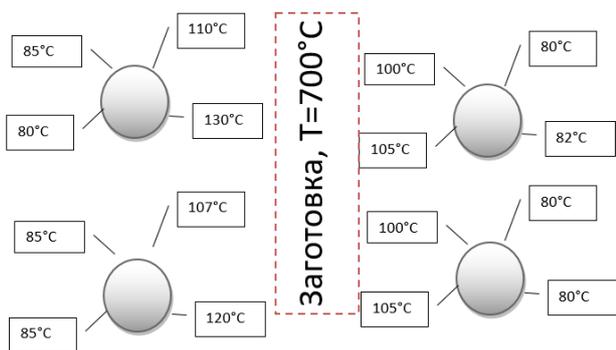


Рис. 3. Нагрев колонны прессы «United» США на высоте 100 мм от торца металлического кожуха

Геометрические параметры прессы следующие: расстояние между осями колонн прессы  $a = 3658$  мм и  $b = 1372$  мм; диаметр колонн  $d = 457$  мм; полная высота колонн  $H = 12\ 000$  мм; максимальное расстояние

между бойками  $h_{max} = 1500$  мм; расстояние до траверсы  $B = 500$  мм; высота траверсы  $B = 750$  мм.



Рис. 4. Схема распределения температуры по высоте колонны прессы «United» США

Анализ результатов замеров показал, что температурное распределение на поверхности колонн по окружности и по высоте является неравномерным. Эта неравномерность обусловлена несколькими факторами:

- В процессе обработки заготовка теряет тепло неравномерно, что приводит к различным уровням теплового воздействия на колонны.

- При обработке слитка с симметричным расположением относительно колонн возникают различия в нагреве из-за неодинакового расстояния от поверхности заготовки до отдельных участков колонн.

- Поверхность колонн характеризуется классом шероховатости  $R_z = 3,2-6,3$  мкм, а также наличием окисной пленки и смазочного слоя, которые влияют на их отражательную и поглощающую способность.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что нагрев колонн прессы зависит от сложного взаимодействия тепловых потоков между заготовкой и элементами прессы, а также от состояния поверхности колонн. Это требует учета данных факторов при анализе тепловых нагрузок и разработке методов повышения надежности оборудования.

Влияние теплопередачи во время выполнения технологических операцийковки значительно меньше, нежели лучистого теплообмена, что объясняется наличием в конструкции различного рода зазоров. Но тем не менее теплообмен путем теплопередачи осуществляется и наиболее наглядным примером является нагрев подвижной поперечины в результате ее соприкосновения с нагретыми до высокой температуры верхним бойком, аналогично происходит нагрев деталей подвижного стола, находящихся в зоне взаимодействия с нижним бойком.

Неравномерный нагрев колонн прессы приводит к возникновению дополнительных термических напряжений, которые накладываются на напряжения, вызванные приложением рабочей нагрузки, а также

на напряжения, обусловленные эксцентриситетом нагружения пресса. В результате это приводит к неравномерной выборке зазоров в направляющей системе пресса, что, в свою очередь, вызывает неравномерный износ направляющих втулок.

Перекося архитрава, возникающий в результате различий в нагреве колонн, усиливает износ направляющих втулок и уплотнений гидроцилиндров. Кроме того, это приводит к увеличению напряжений в системе контакта «архитрав-колонна-гайка». При длительной эксплуатации такие факторы становятся причиной снижения жесткости пресса, что приводит к ухудшению точности изготавливаемых поковок и увеличению вероятности поломок дорогостоящих базовых деталей пресса.

Для исследования процессов нестационарного радиационно-конвективного теплообмена, возникающих во время технологических операцийковки, была изготовлена масштабная модель пресса с уменьшением размеров в 30 раз (рис. 5). Для анализа деформации станины под воздействием нагрева к конструкции модели был дополнительно смонтирован каркас, на котором размещались индикаторы часового типа ИЧ 02. С целью исключения нагрева каркаса его поверхность была изолирована теплоизолирующим слоем, состоящим из минеральной ваты и фольги.



Рис. 5. Модель станины пресса

В рабочее пространство модели пресса помещалась заготовка цилиндрической формы (диаметр 16 мм), нагреваемая путем пропускания через нее электрического тока. Процесс, имитирующий размещение нагретой заготовки в рабочем пространстве пресса, а также схема теплоизоляции рамы модели от нагретых деталей представлены на рис. 6.

Для изучения зависимости неравномерности нагрева колонн от расположения заготовки проводилось смещение последней относительно центральной

оси пресса. Это позволило проанализировать влияние эксцентриситета заготовки на тепловое распределение в колоннах и выявить механизм формирования термических напряжений, вызывающих перекося архитрава и ускоренный износ компонентов пресса. Данные по замерам температуры колонн при центральном размещении нагретой заготовки и смещенном приведены в табл. 1.



Рис. 6. Процесс, имитирующий расположение нагретой заготовки в рабочем пространстве пресса, и теплоизоляция рамы от нагретых деталей модели пресса

Параллельно с замерах температуры производился съем показаний с индикаторов, фиксирующих деформацию станины в результате неравномерного нагрева колонн. Данные индикаторов приведены в табл. 2. Как видно по результатам замеров, неравномерный нагрев колонн вызывает неравномерное удлинение колонн, соответственно, перекося архитрава. Это вызывает необходимость экранирования теплового излучения нагретой заготовки.

Зависимость нагрева колонн от расположения нагретой заготовки

Расположение поковки относительно оси прессы, мм	Температура заготовки, °С	Продолжительность эксперимента, мин	Температура колонны №1, °С	Температура колонны №2, °С	Температура колонны №3, °С	Температура колонны №4, °С
0	1000	5	190	192	190	191
0,5	1000	5	181	184	205	200
1	1000	5	175	179	230	220

Примечание. Смещение нагретой заготовки производилось в сторону колонн 3, 4.

Деформация станины прессы в результате нагрева колонн

Температура колонны №1, °С	Температура колонны №2, °С	Температура колонны №3, °С	Температура колонны №4, °С	Индикатор №1, мкм	Индикатор №2, мкм	Индикатор №3, мкм	Индикатор №4, мкм
25	25	25	25	0	0	0	0
155	162	205	200	81	81,5	81,5	82
160	170	205	203	83	84,8	89,9	85
165	170	214	210	84	85	94,2	92
170	173	228	215	85	86	115	96
175	179	230	220	85	87	130	115

Примечание. Нумерация индикаторов соответствует номерам колонн прессы и каждый индикатор располагается непосредственно над соответствующим торцом колонны.

### Заключение

В статье подчеркнута необходимость применения комплексного подхода к исследованию условий эксплуатации колонного гидравлического прессы. Такой подход позволяет учитывать взаимодействие различных факторов, влияющих на надежность и долговечность оборудования.

Приведены результаты исследований теплового воздействия нагретой заготовки на детали и узлы колонного прессы. Установлено, что неравномерный нагрев колонн приводит к дополнительным термическим напряжениям, перекоосу архитрава, ускоренному износу направляющих втулок, уплотнений гидроцилиндров и других элементов, что в конечном итоге снижает жесткость прессы и точность изготовления поволоков.

Выявлена целесообразность проведения дальнейших исследований условий работы ковочных прессы с учетом комплексного влияния различных факторов. Для этого рекомендуется привлекать современные программные инструменты для конечно-элементного моделирования тепловых и механических процессов, а также проводить масштабные эксперименты на работающем промышленном оборудовании. Такой подход позволит повысить точность анализа и разработать рекомендации по увеличению надежности и долговечности ковочных прессы.

### Список источников

1. Мюллер Э. Гидравлические прессы. М.: Машгиз, 1959.
2. Сурков И.А. Установление причин и предупреждение разрушений колонн мощных гидравлических прессы // КШП. ОМД. 2004. №3. С 42-45.
3. Луканин В.Н. Теплотехника. М.: Высш. шк., 1999.
4. Новиков В.И., Кадошников В.И. Моделирование тепловой деформации колонн ковочного прессы // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й Межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2013. С. 354-356.
5. Новиков В.И., Кадошников В.И., Куликова Е.В. Повышение надежности работы деталей, отвечающих за перемещение подвижной поперечины в гидравлическом ковочном прессы // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2012. №2. С. 24 -28.
6. Прогнозирование термонапряженного состояния цилиндрического объекта в процессе его термообработки / Савинов А.С., Харченко М.В., Ангольд К.В., Рудь К.И. // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 4-9.
7. Ефимов А.В. Влияние внешних воздействий на структуру и свойства стальных отливок // Теория и технология металлургического производства. 2018. №3(26). С. 8-11.

Сведения об авторах

**Андросенко Мария Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.androsenko@magtu.ru

**Савельева Ирина Александровна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Москвина Елена Алексеевна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Куликов Семен Сергеевич** – бакалавр, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Новиков Валерий Иванович** – инженер, ООО «Механоремонтный комплекс», Магнитогорск, Россия.

**Емелюшин Алексей Николаевич** – профессор, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: emelushin.magtu.ru

**Дубровин Виталий Константинович** – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vkdubr@mail.ru.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**INVESTIGATION OF NON-STATIONARY HEAT TRANSFER BETWEEN A HEATED WORKPIECE AND A HYDRAULIC FORGING COLUMN PRESS**

**Androsenko Maria V.** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.androsenko@magtu.ru.

**Savelyeva Irina A.** – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Moskvina Elena A.** – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Kulikov Semyon S.** – Bachelor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Novikov Valery I.** – Engineer at LLC «Mechanoremontny Kompleks», Magnitogorsk, Russia.

**Emelyushin Alexey N.** – Dr. Eng., Prof. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: emelushin.magtu.ru

**Dubrovin Vitaly K.** – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vkdubr@mail.ru.

**Abstracts.** This study investigates the thermal and mechanical processes occurring in the columns of the "United" (USA) hydraulic forging press with a force of 22.5 MN due to the influence of a heated workpiece. The focus is on the impact of non-uniform heating of the columns on the stress-strain state of the press elements, wear of its components, and the reduction in operational precision of the equipment. To analyze the thermal effects, a series of surface temperature measurements were conducted using the Thermo CAM P60 thermal imager, which provides high measurement accuracy. Experimental data confirm that the temperature distribution along the height and circumference of the columns is non-uniform, due to heat exchange between the workpiece and the press, as well as the surface condition of the columns (roughness, oxide films, and lubrication layers).

The consequences of uneven heating include the formation of additional thermal stresses, misalignment of the crosshead, accelerated wear of guide bushings and hydraulic cylinder seals, as well as increased stresses in the "crosshead-column-nut" system. Over prolonged operation, these factors lead to a reduction in press rigidity, decreased forging accuracy, and a higher likelihood of failures in expensive press components.

To investigate thermal processes, a scale model of the press, reduced by a factor of 30, was created. The model was used to study thermal deformations of the frame and the effect of eccentric placement of the workpiece on the uneven heating of the columns. The frame for dial-type indicators was thermally insulated to avoid temperature influence. The conclusion emphasizes the importance of a comprehensive approach to studying the operating conditions of column presses, including the use of finite element analysis and large-scale experiments on operational equipment.

**Keywords:** hydraulic press, press columns, thermal impact, non-uniform heating, stress-strain state, component wear, forging accuracy, thermal stresses, crosshead misalignment, finite element modeling

---

Ссылка на статью:

Исследование нестационарного теплообмена между нагретой обрабатываемой заготовкой и гидравлическим ковочным колонным прессом / Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 49-55.

Androsenko M.V., Savelyeva I.A., Moskvina E.A., Kulikov S.S., Novikov V.I., Emelyushin A.N., Dubrovin V.K. Investigation of non-stationary heat transfer between a heated workpiece and a hydraulic forging column press. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 49-55.

# ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

УДК 621.7

Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибаета А.С., Рахматуллина А.А.

## ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме подготовки качественного угольного сырья и снижения экологической нагрузки в районах углепользования за счет уменьшения количества серосодержащих выбросов при металлургическом производстве. Показано негативное воздействие, оказываемое предприятиями угольной и металлургической промышленности на биосферу. Рассмотрен механизм и характер влияния диоксида серы на здоровье человека. Дана характеристика серосодержащих примесей углей. Установлено, что удаление серосодержащих примесей в углях на стадиях, предшествующих термической переработке, экономически эффективно и существенно снижает экологическую нагрузку в районах углепользования. Рассмотрены способы удаления серы на этапах разработки месторождений. Установлена целесообразность использования физических, химических и микробиологических методов для эффективного обессеривания угольного сырья. Показана эффективность применения как высокоэффективных флотационных реагентов, так и реагентов-модификаторов при флотационном обогащении углей для снижения сернистости угольных концентратов. Установлена целесообразность использования метода электрохимической десульфурации угля в водной среде при воздействии тлеющего разряда с образованием активной перекиси водорода, способной эффективно окислять пиритную составляющую серы. Показана возможность получения качественных угольных продуктов как мокрыми, так и сухими методами высокоградиентной магнитной сепарации, позволяющими эффективно извлекать высокозольную породу и содержащиеся в ней сернистые соединения.

**Ключевые слова:** высокосернистые угли, десульфурация, сернистость, вредные выбросы, флотация, реагенты-модификаторы, высокоградиентная магнитная сепарация

В настоящее время сталь является важным биржевым commodity и успешно торгуется на глобальном рынке, при этом предметом торга является не сама сырая сталь (чушки), а сырье металлургической отрасли – железная руда, коксующийся уголь, стальной лом. Данное обстоятельство не в последнюю очередь обусловлено тем, что на сырье и топливо приходится 85-90% всех затрат по выплавке чугуна, из них примерно 50% – на кокс и 35-40% – на железную руду. Так, на производство 1 т чугуна расходуется 1,2-1,5 т угля с учетом потерь в процессе обогащения и коксования.

Информационно-аналитический обзор итогов работы угольной промышленности России за 2023 год [1] показал, что общий объем переработки угля в 2023 году составил 207,5 млн т. На обогатительных фабриках переработано 206,2 млн т, в том числе для коксования – 97,2 млн т, что на 8,6% больше, чем в предыдущем году.

Увеличение объемов достигается путем вовлечения в переработку низкометаморфизированных углей, что приводит к снижению качества угольных концентратов по таким важным показателям, как зольность, влажность, теплотворная способность и содержание серы.

На сегодняшний день особое внимание уделяется показателю сернистости углей. Данное обстоятельство обусловлено тем, что кокс, полученный из высокосернистых углей, снижает качество металлопродукции, помимо этого наличие серы уменьшает теплоту сгорания топлива и, как следствие, повышает его

расход в доменной печи и количество шлака. Также к немаловажным отрицательным факторам использования высокосернистых углей относятся коррозия технологического оборудования и ухудшение экологической обстановки в районах металлургического производства.

В настоящее время черная металлургия занимает второе место после теплоэнергетики по общему количеству выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, основными источниками которых являются агломерационное производство (агломерационные машины, машины для обжига окатышей), производство чугуна и стали (доменные, мартеновские и дуговые печи, установки непрерывной разливки стали, травильные отделения, ваграночные печи).

По данным аэрокосмических съемок снежного покрова, зона действия предприятий черной металлургии простирается на расстояние до 60 км от источников загрязнения. Вокруг металлургических заводов формируются техногенные зоны, где воздух, вода, снег, почва, растительность содержат в себе широкий набор вредных веществ. По данным Росгидромета и оценке Минприроды, комплексный индекс загрязнения атмосферы в городах, где находятся основные площадки крупных металлургических холдингов, в Липецке, в 2019 году составил 3 единицы. Череповец (3,9 единицы), Нижний Тагил (7 единиц), Магнитогорск (13 единиц) и Новокузнецк (17 единиц).

Преимущественно промышленные выбросы состоят из оксидов углерода (67,5% суммарного выбро-

© Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибаета А.С., Рахматуллина А.А., 2024

са в атмосферу), твердых веществ (15,5%), диоксида серы (10,8%) и оксидов азота (5,4%).

Предприятия черной металлургии выбрасывают в атмосферу более 10,3 млн т вредных веществ в год. В среднем на 1 млн т годовой производительности заводов черной металлургии выделение пыли составляет 350 т/сут, оксида углерода 400 т/сут, оксида азота – 42 т/сут [2]. Ежегодное поступление в атмосферу сернистого газа оценивается экологами в объеме 100–150 млн т.

Источником сернистых соединений, выбрасываемых в атмосферу, являются, главным образом, кокс (40-60%) и руда (5-30%). Со шлаками из металлургических агрегатов удаляется 45-55% серы, а в стальные изделия переходит до 6% серы, остальное количество серы выбрасывается в атмосферу.

Главным источником выброса  $\text{SO}_2$  является агломерирование (45-55% от общих выбросов  $\text{SO}_2$ ). Значительное количество  $\text{SO}_2$  или  $\text{H}_2\text{S}$  выбрасывается в атмосферу во время остывания и переработки шлака (10-35%). Остальное количество  $\text{SO}_2$  поступает в окружающую среду из труб котельных установок, сталелитейных и прокатных цехов.

Серосодержащие выбросы (диоксид серы, сероуглерод, сероводород и т.д.), попадая в верхние слои атмосферы, образуют химически активную серную кислоту. Экологические исследования показывают, что в настоящее время количество выбросов диоксида серы уже превышает возможность их природной нейтрализации и, как следствие, значительно увеличивается потребность в серьезных мерах для существенного уменьшения этих выбросов.

Помимо этого, было установлено, что тропосферный аэрозоль, образующийся при гидратации оксидов серы атмосферным водяным паром, способен значительно влиять на тепловой баланс планеты и, следовательно, на глобальный климат. При этом самая существенная часть эмиссии серы в атмосферу связана с сжиганием органического серосодержащего топлива. Проведенные расчеты показывают, что соответствующая доля эмиссии в течение последних 80 лет устойчиво находится на уровне (91±2%) общей [3].

Защита атмосферного воздуха является одной из наиболее актуальных проблем для всех промышленных регионов, поскольку экологические ограничения препятствуют развитию и расширению мощностей металлургических и энергетических предприятий. Главной проблемой, которая возникает в связи с наличием в атмосфере вредных выбросов, является прямое или косвенное их воздействие не только на биосферу, но и на здоровье человека.

Установлено, что загрязнение воздуха занимает третье место среди всех факторов риска, влияющих на смертность в мире. В России в 2019 году почти 80 тыс. смертей могли быть связаны с плохим качеством воздуха. По данным Роспотребнадзора, больше миллиона случаев заболеваний в 2022 году вызвано загрязнением воздуха вредными химическими компонентами.

Изменение окружающей среды в результате ее загрязнения приводит к росту заболеваемости сердечно-сосудистой системы и органов дыхания. В зоне работы металлургических производств загрязняются и источники питьевой воды, как поверхностные, так и подземные, что приводит к нарушению деятельности желез внутренней секреции, пищеварительной системы, распространению различных кишечных инфекций.

Вредные вещества техногенного происхождения, находящиеся в воздухе, проникают в организм человека самым коротким путем – непосредственно через органы дыхания и кожные покровы. Скорость распространения летучих примесей в газовой среде очень велика, они могут беспрепятственно проникать всюду, в том числе внутрь производственных и жилых помещений. Поэтому опасность от их воздействия на людей велика и требует постоянного контроля.

Всасывание диоксида серы начинается сразу после контакта этого вещества со слизистыми полости носа и глотки. Вероятностная оценка вредных эффектов от воздействия диоксида серы может осуществляться по таким показателям, как увеличение общей смертности, смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний, увеличение числа приступов астмы у астматиков, увеличение госпитализации или обращаемости за скорой медицинской помощью по поводу респираторных заболеваний лиц в возрасте 65 лет и старше. Вторичный продукт присутствия этого вещества в воздухе – серная кислота, оказывающая влияние в основном на органы дыхания. Воздействие диоксида серы (до 3-х дней) приводит к возрастанию показателя общей смертности на 0,6% при увеличении его среднесуточной концентрации на  $10 \text{ мкг/м}^3$ . В тех городах, где содержание диоксида серы в атмосферном воздухе превышает нормативные уровни, с учетом вышеприведенных критериев оценки эффектов острого воздействия этого вещества, можно ожидать, например, увеличение дополнительных случаев смертности над фоном до 2–3%.

Решение экологических задач, связанных со снижением серосодержащих выбросов в атмосферу, возможно при помощи глубокой очистки углей перед использованием. Очистка угля от золы и серы экономически эффективна и технически перспективна для любых технологий.

В России значительная часть запасов углей относится к категории высокосернистых (Кизеловский, Подмосковный и другие угольные бассейны), причем они расположены в центральных индустриально развитых районах России. В связи с этим на их территории, где проживает примерно 15 млн человек, наблюдается регулярное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [4].

Сера в углях содержится в сульфидах, органических соединениях, сульфатах и иногда в элементарном виде. Сульфидная сера представлена в основном пиритом в количестве 60-70%. Сера органическая входит в состав структуры угля и механическим спосо-

бом не может быть отделена. Сульфатная сера составляет не более 0,1-0,5%, присутствует в окисленных разностях углей и представлена в основном гипсом и сульфатами железа. Сера элементная содержится в углях крайне редко – от 0,03 до 0,15% и приурочена к окисленным разностям.

В последние годы весьма актуальное значение приобретают методы и технологии обессеривания угольного сырья на стадиях, предшествующих термической переработке, среди которых наиболее эффективными являются физические методы (гравитационное обогащение, электрическое разделение, флотация, масляная агломерация), химические (химическими реагентами и растворителями) и микробиологическими (специальными бактериями и грибами).

В настоящее время существует возможность удаления серосодержащих примесей из угля до начала выемки методами, аналогичными тем, которые используются при разработке месторождений способом скважинной геотехнологии и рассматриваются в рамках концепции техногенного ресурсопроизводства минерального сырья. С этой целью пласт угля вскрывается скважинами, в которые нагнетаются специальные растворы (например, раствор соляной или других кислот или культуры бактерий и питательная среда). После этого скважина герметизируется на время, необходимое для растворения минералов, затем ее распечатывают и в пласт нагнетается раствор для удаления продуктов реакции и нейтрализации выщелачивающих растворов. Следовательно, обрабатывая угольный пласт различными реагентами через скважины, можно добиться снижения сернистости добываемого угля [5].

В связи с этим в настоящее время перед углеперерабатывающими предприятиями стоит задача максимального удаления соединений серы при наименьших затратах. В настоящее время в технологиях обогащения, применяемых на некоторых углеобогачительных фабриках, десульфурация угля является процессом, осуществляемым попутно с обогащением по золе, при этом его эффективность резко снижается при наличии соединений серы в виде органической составляющей или тонковкрапленных в угольное вещество зерен пирита. В работе [6] представлены результаты исследований метода электрохимической десульфурации угля в водной среде при воздействии тлеющего разряда с образованием активной перекиси водорода, способной эффективно окислять пиритную составляющую серы. При проведении экспериментальных исследований использовали питание ГЦ-1000 ЦОФ «Комсомольская», предварительно подвергнутое одностадийному разделению на стендовой установке винтового сепаратора. В результате электрохимической десульфурации содержание серы в продукте снижалось на 10-20%.

Научные публикации последних лет свидетельствуют об интересе к магнитным методам обогащения каменных углей, в частности о возможности приме-

нения высокоградиентной магнитной сепарацией для расширения возможностей обогащательных технологий путем извлечения слабомагнитных серосодержащих минеральных комплексов. Объективным условием применения метода высокоградиентной магнитной сепарации углей является различие в магнитных свойствах горючей массы и неорганических примесей, в том числе и пирита.

Исследования по обогащению и десульфурации методом высокоградиентной магнитной сепарации проб энергетических углей различных марок и шихты тепловых электростанций выявили возможность извлечения магнитными методами до 70% золы и 65% общей серы. Анализ полученных результатов показал, что этим методом достаточно эффективно извлекается высокозольная порода и содержащиеся в ней сернистые соединения.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность получения качественных угольных продуктов как мокрыми, так и сухими методами высокоградиентной магнитной сепарации. Однако такая же эффективность десульфурации может быть получена и при гравитационном обогащении углей. Но магнитные технологии позволяют перерабатывать тонкодисперсные продукты как мокрым, так и сухим методом, что делает их, при соответствующих экономических предпосылках, перспективными для использования в схемах углеобогащения и на тепловых электростанциях [7].

Использование флотационного обогащения углей позволяет вовлекать в переработку мелкодисперсные фракции, а применение модифицирующих добавок как органического, так и неорганического происхождения позволяет существенно улучшить качественно-количественные показатели угольных концентратов [8, 9].

Применение неорганических реагентов-модификаторов при флотации газовых углей Кузнецкого бассейна позволяет не только повысить выход концентрата, но и снизить его зольность по сравнению с индивидуальным применением флотореагента ВКП (кубового остатка ректификации продуктов синтеза 2-этилгексанола по методу оксосинтеза) (рис. 1).

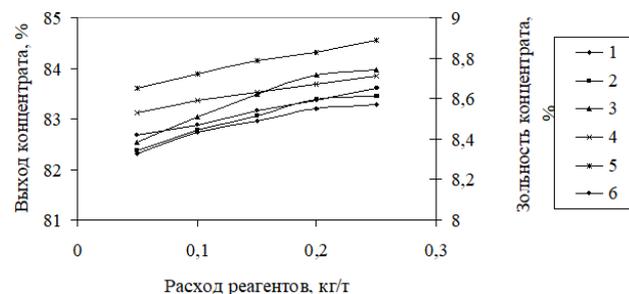


Рис. 1. Зависимость выхода концентрата (1-3) и зольности концентрата (4-6) при флотации кузнецких газовых углей от концентрации сульфата магния (1, 4), сульфата алюминия (2, 5), сульфата железа (3, 6)

Изучение депрессирующих свойств исследуемых сульфатов по отношению к серосодержащим примесям углей показало, что их использование совместно с реагентом ВКП способствует снижению содержания общей и пиритной серы в угольном концентрате (табл. 1).

Таблица 1

Результаты флотации газовых углей с применением в качестве реагентов-модификаторов неорганических серосодержащих солей

Реагенты	Извлечение в отходы, %		
	минерального вещества	общей серы	пиритной серы
ВКП	57,75	19,57	29,72
MgSO <sub>4</sub> +ВКП	58,89	27,09	39,98
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> +ВКП	58,09	20,96	30,74
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> +ВКП	59,01	23,93	36,04

Депрессия серосодержащих примесей углей происходит за счет гидрофилизации модифицированной поверхности пирита посредством образования водородных связей между атомами кислорода сульфогрупп и молекулами воды флотационной пульпы, в результате чего закрепление пузырьков воздуха на пирите существенно затрудняется, а вероятность сохранения закрепившихся пузырьков снижается, что, в свою очередь, приводит к подавлению пирита в процессе флотации [10, 11].

Таким образом, анализ процессов подготовки угольного сырья к металлургическому производству свидетельствует о необходимости и экономической целесообразности проведения десульфурации углей на стадиях, предшествующих их термической переработке, поскольку это позволит значительно улучшить экологическую обстановку в районах углепользования и металлургического производства.

#### Список источников

- Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. №3. С. 18-29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-raboty-ugolnoy-promyshlennosti-rossii-za-2023-god> (дата обращения: 11.05.2024).
- Крапчин И.П., Омарова Б.А. Влияние производственных процессов добычи, переработки и сжигания углей на экологическую обстановку в районах их существования // Вестник УГТУ. 2007. № 6. С. 48–53.
- Перспективы снижения выбросов оксидов серы в атмосферу при сжигании органических топлив / Кудрявцев Н.Ю., Клименко В.В., Прохоров В.Б., Сныгин С.Ю. // Теплоэнергетика. 1995. № 2. С. 6-11.
- Дмитриев А.П., Зильбершмидт М.Г., Шпирт М.Я. Высокосернистые отходы добычи и обогащения углей как источник минеральных ресурсов и причина экологического загрязнения окружающей среды // ГИАБ. 2007. № 11. С. 373 -378.
- Мозолькова А.В. Повышение качества углей методом подземного выщелачивания минеральных примесей // Вестник Российского университета дружбы народов. 2006. №1. С. 47-52.
- Электрохимическая десульфурация угля / Кирнарский А.С., Гаевой В.В., Нестеренко А.Ф., Рудницкий А.Г. // ГИАБ. 2002. № 8. С. 237–240.
- Пилов П.И., Мостыка Ю.С., Шутов В.Ю. Оценка магнитной десульфурации каменных углей // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. С. 125-136.
- Исследование влияния сложных эфиров линейного строения на флотацию газовых углей / Муллина Э.Р., Мишурина О.А. Чупрова Л.В., Ершова О.В. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 183.
- Изучение механизма действия сложных эфиров с оценкой их эффективности по интегральному критерию молекулярной электроотрицательности при флотации газовых углей / Медяник Н.Л., Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Кладова А.Г., Вафин В.Р. // Кокс и химия. 2018. № 11. С. 2-8.
- Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Ершова О.В. Изучение влияния химического строения реагентов-модификаторов на электрохимические свойства угольной поверхности // Успехи современного естествознания. 2015. № 11. С. 130-133.
- Муллина Э.Р., Медяник Н.Л., Орехова Н.Н. Влияние неорганических серосодержащих солей на флотацию газовых углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 3. С. 69-72.

#### Сведения об авторах

**Муллина Эльвира Ринатовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, e-mail: e.mullina@inbox.ru.

**Мишурина Ольга Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, e-mail: olegro74@mail.ru.

**Шувалова Мария Михайловна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Репина Анна Александровна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Лизогуб Виктория Андреевна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Шibaева Анастасия Сергеевна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Рахматуллина Алина Александровна** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF RAW MATERIAL PREPARATION FOR METALLURGICAL PRODUCTION**

**Mullina Elvira R.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: e.mullina@inbox.ru.

**Mishurina Olga A.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: olegro74@mail.ru.

**Shuvalova Maria M.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Repina Anna A.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Lizogub Victoria A.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Shibaeva Anastasia S.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Rakhmatullina Alina A.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstracts.** The article is devoted to the problem of preparing high-quality coal raw materials and reducing the environmental burden in areas of coal use by reducing the amount of sulfur-containing emissions during metallurgical production. The negative impact exerted by enterprises of the coal and metallurgical industries on the biosphere is shown. The mechanism and nature of the effect of sulfur dioxide on human health are considered. The characteristic of sulfur-containing impurities of coals is given. It has been established that the removal of sulfur-containing impurities in coals at the stages preceding thermal processing is economically efficient and significantly reduces the environmental burden in areas of coal use. The methods of sulfur removal at the stages of field development are considered. The expediency of using physical, chemical and microbiological methods for effective desulfurization of coal raw materials has been established. The effectiveness of the use of both highly efficient flotation reagents and modifier reagents in the flotation enrichment of coals to reduce the sulfur content of coal concentrates is shown. The expediency of using the method of electrochemical desulfurization of coal in an aqueous medium under the influence of a glow discharge with the formation of active hydrogen peroxide capable of effectively oxidizing the pyrite component of sulfur has been established. The possibility of obtaining high-quality coal products by both wet and dry methods of high-gradient magnetic separation, which make it possible to effectively extract high-ash rock and sulfur compounds contained in it, is shown.

**Keywords:** harmful emissions, high-sulfur coals, desulfurization, sulfur content, flotation, modifier reagents, high-gradient magnetic separation

---

Ссылка на статью:

Химико-технологические аспекты подготовки сырья к металлургическому производству / Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шibaева А.С., Рахматуллина А.А. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 56-60.  
Mullina E.R., Mishurina O.A., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S., Rakhmatullina A.A. Chemical and technological aspects of raw material preparation for metallurgical production. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 56-60.

---

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

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемые коллеги!*

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

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

**Журнал включает в себя следующие разделы:**

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

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

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

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

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

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

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

## Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

## Пример оформления литературы

## Список источников

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

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

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

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

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