

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 3 (46) 2023**

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

## **Редакционный совет**

### **Председатель ред. совета:**

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

### **Члены ред. совета:**

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

*А.Н. 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», 2023**

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д.38).  
16+, в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ от 29.12.10.

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

### **Адрес редакции:**

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

### **Адрес типографии:**

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

### **Адрес издателя:**

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

Выход в свет 28.09.2023. Заказ 332. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 3 (46) 2023**

---

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the journals can be found into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

---

## **Editorial Board Members**

### **Chairman:**

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

### **Honorary Board Members:**

*S.V. Denisov* – D.Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

*A.N. Emelyushin* – D.Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

*I.Y. Illarionov* – D.Sc., Professor,  
Chuvash State University

*A.A. Kazakov* – D.Sc., Associate Professor,  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

*V.M. Kolokoltsev* – D. Sc., Professor,  
President of Nosov Magnitogorsk State Technical  
University

*Z. Konopka* – D.Sc., Professor,  
Czestochowa University of Technology, Poland

*O. Ostrowski* – D.Sc., Professor,  
University of New South Wales, Australia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

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

*K.I. Rud*

### **Designer:**

*E.O. Harchenko*

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

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

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

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

### **Editorship address:**

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia  
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.

E-mail: TTaPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

### **Printing office:**

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

### **Editorial office:**

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

Publication date 28.09.2023. Order 332. Circulation: 500.  
Open price.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Шубина М.В., Махоткина Е.С., Шубин И.Г., Емельюшин А.Н., Петроченко Е.В. <b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЖИГА И РЕАГЕНТОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ.....</b>	<b>4</b>
Ганин Д.Р. <b>РАЗВИТИЕ СПОСОБОВ КАЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ УСТАНОВОК НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА .....</b>	<b>10</b>
Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Щелоков Н.С., Посохин М.А., Потапов И.М., Киричко А.Д. <b>РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЕВАНАДАЦИИ ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД СУРОЯМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....</b>	<b>19</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>25</b>
Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б., Чернов В.П., Кулаков Б.А., Дубровин В.К.. <b>ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОВЫСЫХАЮЩЕЙ ПРОТИВОПРИГАРНОЙ КРАСКИ НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАННОГО АЛЮМОХРОМОВОГО КАТАЛИЗАТОРА .....</b>	<b>25</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>30</b>
Пивоварова К.Г., Тагирова В.М., Новикова Т.А., Гун И.Г., Рамазанов К.Н., Федосеев С.А. <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОЛЁСНЫХ БОЛТОВ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ.....</b>	<b>30</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>4</b>
Shubina M.V., Makhotkina E.S., Shubin I.G., Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. <b>INFLUENCE OF ROASTING PARAMETERS AND REAGENTS ON THE VANADIUM EXTRACTION FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS .....</b>	<b>4</b>
Ganin D.R. <b>DEVELOPMENT OF METHODS OF ROCKING MOLDS IN CONTINUOUS METAL CASTING PLANT .....</b>	<b>18</b>
Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Shchelokov N.S., Posokhin M.A., Potapov I.M., Kirichko A.D. <b>DEVELOPMENT OF DEVANADATION TECHNOLOGY FOR IRON PRODUCED FROM SUROYAMSK DEPOSIT TITANOMAGNETITE ORES .....</b>	<b>19</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>25</b>
Feoktistov N.A., Pivovarova K.G., Ponamareva T.B., Chernov V.P., Kulakov B.A., Dubrovin V.K.. <b>OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF SELF-DRYING NON-STICK PAINT BASED ON SPENT ALUMOCHROME CATALYST .....</b>	<b>29</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>30</b>
Pivovarova K.G., Tagirova V.M., Novikova T.A., Gun I.G., Ramazanov K.N., Fedoseev S.A. <b>TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE PRODUCTION OF HIGH-STRENGTH WHEEL BOLTS FROM SPECIAL ALLOY STEELS.....</b>	<b>34</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669. 292.3 : 669. 054. 82

Шубина М.В., Махоткина Е.С., Шубин И.Г., Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЖИГА И РЕАГЕНТОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

**Аннотация.** Значительные объемы отходов горно-металлургического производства (рудные хвосты и металлургические шлаки) ухудшают экологическую обстановку промышленных регионов, но вместе с тем представляют собой уникальный источник многих технически ценных редких и рассеянных металлов, одним из которых является ванадий. Показаны перспективы по рынку ванадия (на спрос и цены) и оптимистичность прогнозов его потребления на ближайшие годы. В связи с этим включение в промышленную переработку ванадийсодержащих отходов решает одновременно две актуальные проблемы – ресурсосбережение и сохранность окружающей среды. Цель проведенного исследования – извлечение ванадия из рудных хвостов уральских титаномагнетитов и ванадийсодержащих шлаков металлургического производства разного химического состава с применением гидрOMETALLУРГИЧЕСКОГО метода. Задачи исследования: определение влияния разных химических реагентов для обжига и температурных режимов этого процесса на степень извлечения ванадия; сравнение эффективности извлечения ванадия при водном и кислотном выщелачивании. Содержание ванадия в полученных растворах и твердых образцах определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС). Анализ результатов исследования показал следующее: выбор реагентов и режимов обжига шихты с ванадийсодержащими отходами необходимо проводить с учетом их химического состава; наилучшими реагентами для обжига являются  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; наибольшие степени извлечения ванадия составили почти 75–92% и получены при содержании в шихте 50% реагента для обжига, после обжига при температуре 950°C и последующего водного или кислотного выщелачивания.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовая руда, хвосты, металлургические шлаки, ванадий, обжиг, выщелачивание, степень извлечения ванадия

### Введение

На территории России в настоящее время накоплено около 80 млрд т техногенных отходов, среди которых значительную часть составляют хвосты рудных месторождений и шлаки металлургического производства. Наибольшие объемы таких отходов расположены в Уральском федеральном округе с развитой инфраструктурой горно-металлургической промышленности (на долю Свердловской области приходится до 30% отходов в РФ) [1]. Вместе с тем отходы горно-металлургического производства представляют собой уникальный источник многих технически ценных редких и рассеянных металлов, одним из которых является ванадий [2]. Ванадийсодержащие отходы – это побочные продукты переработки комплексных титаномагнетитовых железных руд. В таком техногенном сырье происходит накопление значительного количества токсичных и потенциально опасных элементов [3]. В связи с этим включение в промышленную переработку ванадийсодержащих отходов решает одновременно две актуальные проблемы – ресурсосбережение и сохранность окружающей среды. К положительным факторам, способствующим снижению затрат на освоение ванадийсодержащих техногенных ресурсов, можно отнести следующие:

– расположение отвалов с отходами на территориях с развитой промышленной и транспортной ин-

фраструктурой;

- размещение техногенного сырья на земной поверхности, а не в недрах;
- раздробленное состояние материалов отходов;
- рост цен на рынке ванадия.

В связи с дефицитом ванадия его общая рыночная цена увеличилась в 2018 году более чем на 30% для феррованадия и на 70% для оксида ванадия (V), и ожидается сохранение тенденции роста цен на ближайшие годы [4]. Это связано с введением новых стандартов на стальную арматуру с большим количеством ванадия и возрастающий спрос на сталь с высокой прочностью на растяжение. В процессе восстановления мирового производства стали после пандемии COVID-19 потребление ванадия увеличилось и к 2021 году уже составило 118000 т [5]. Значительный спрос на этот металл связан с расширением применения ванадиевых аккумуляторных батарей. Оценка специалистов (Atlantic) показывает, что на данный сектор потребления к 2025 году будет приходиться до 50% спроса на ванадий, а напряженность рынка ванадия прогнозируется до 2024 года вследствие роста как традиционных, так и новых потребителей этого металла [6–8].

В связи с оптимистичностью прогнозов по рынку ванадия (на спрос и цены) актуальным является исследование возможности утилизации ванадийсодержащих техногенных ресурсов для расширения сырьевой базы ванадия и улучшения экологической обстановки промышленных регионов [9–12]. Цель проведенного исследования – извлечение ванадия из руд-

ных хвостов уральских титаномагнетитов и ванадий-содержащих шлаков металлургического производства разного химического состава с применением гидрометаллургического метода. Достижение поставленной цели осуществлялось решением следующих задач: определение влияния разных химических реагентов для обжига и температурных режимов этого процесса на степень извлечения ванадия; сравнение эффективности извлечения ванадия при водном и кислотном выщелачивании.

### Материалы и методы исследования

Исследование проводили с использованием следующего ванадийсодержащего техногенного сырья: рудные хвосты уральских титаномагнетитов и металлургические шлаки (1, 2 и 3), среди которых шлаки 1 и 2 – производственные, а шлак 3 получен в лабораторных условиях в процессе выплавки ванадиевого чугуна из концентрата Уральской титаномагнетитовой руды.

Гидрометаллургическое извлечение ванадия из указанных материалов проводили в две стадии:

- окислительный обжиг шихты (исследуемый материал + реагент для обжига в переменных количественных соотношениях) при разных температурах;
- водное и кислотное выщелачивание спека для перевода ванадия в виде ванадата в получаемый раствор [13, 14].

Для определения содержания ванадия в исследуемых образцах применяли метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС), реализуемый с помощью энергодисперсионного спектрометра [15].

Для исследования рудного техногенного сырья использовали образцы рудных хвостов уральских титаномагнетитов разного химического состава (табл. 1) [16].

В качестве реагентов для обжига (реакционные добавки) применяли хлорид натрия NaCl, соду – карбонат натрия Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, оксид кальция CaO, сульфат натрия Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и их смеси в разных количественных соотношениях в шихте. Окислительный обжиг проводили при температурах в диапазоне 700–950°C.

Таблица 1

Химический состав образцов рудных хвостов Уральских титаномагнетитов

Обозначение образца	Массовая доля, %								
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P	Fe <sub>общ.</sub>
№1	<b>0,15</b>	6,36	5,07	35,6	0,1	15,3	0,11	0,1	13,8
№2	<b>0,29</b>	12,02	3,81	31,7	0,12	10,6	0,12	-	17,81
№3	<b>0,36</b>	9,44	3,12	28,6	0,3	10,0	0,11	-	22,89
№4	<b>0,53</b>	7,52	1,93	22,4	0,52	8,7	0,08	-	30,60

В окислительном обжиге шихты из рудных образцов с NaCl использовали разное количество этого реагента – 37 и 50% от общей массы шихты. Шихту обжигали и охлаждали в муфельной печи, а перед выщелачиванием полученный спек измельчали. Вы-

щелачивание проводили в две ступени при температурах 60–78°C: водное – в течение 2 часов и кислотное раствором серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH = 1) – в течение 1 часа.

Для исследования ванадийсодержащих металлургических шлаков использовали образцы с разным химическим составом (табл. 2) [17].

Таблица 2

Химический состав образцов металлургических шлаков

Образцы шлака	Массовая доля, % (не более)							
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Fe
Шлак 1	<b>18,0</b>	12,0	8,0	15,0	5,0	14,0	5,83	1,5
Шлак 2	<b>1,02-1,2</b>	17,1-21,0	7,5-10,2	22,5-26,3	-	-	3,4-5,93	22,6-24,8
Шлак 3	<b>5,83</b>	2,67	-	21,3	0,38	1,5	2,95	39,9

В качестве реагентов для обжига применяли соду Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, количество которой в шихте варьировалось в разных опытах: 20, 33 и 50 % от общей массы шихты. Шихту из шлака с содой обжигали 1,5 часа при температурах в диапазоне 800–1100°C в разных опытах. После обжига спека, содержащего шлак 1 или 2 проводили водное выщелачивание в течение 1, 2 и 3 часов при разных температурах в диапазоне 50–80°C, а для спека со шлаком 3 – только кислотное выщелачивание.

### Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование рудных хвостов уральских титаномагнетитов, химический состав которых приведен в табл. 1, показало взаимосвязь между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  и содержанием ванадия в исходных образцах. Эта зависимость представлена на рис. 1 и получена в экспериментах с применением реакционной добавки NaCl для окислительного обжига.

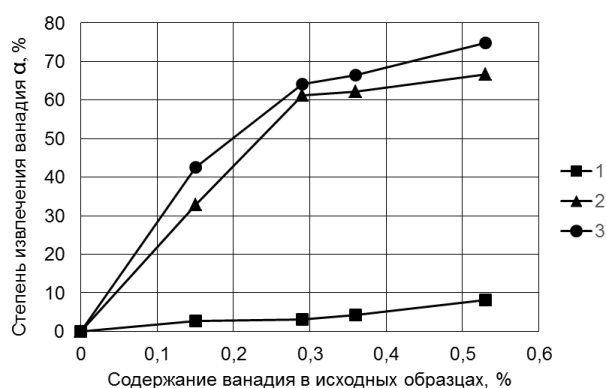


Рис. 1. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  и исходным содержанием ванадия в рудных хвостах:

- 1 – после первой ступени выщелачивания (водное);
- 2 – после второй ступени выщелачивания (кислотное);
- 3 – после двухступенчатого выщелачивания

Согласно полученным результатам, увеличение содержания ванадия в образцах хвостов с 0,15 до 0,53% привело к возрастанию степени извлечения ванадия  $\alpha$  на 32%, то есть почти в 1,8 раза. Проведение двухступенчатого выщелачивания (1-я ступень – водное, 2-я ступень – кислотное) показало целесообразность выполнения только кислотного выщелачивания вследствие малого прироста  $\alpha$  (до 8%) при водном выщелачивании. Применение в качестве выщелачивающего агента  $H_2SO_4$  позволило получить  $\alpha$  около 75%.

Результаты исследования показали значительное влияние количественного содержания в шихте реагента для обжига ( $NaCl$ ) на степень извлечения ванадия из рудных хвостов. При увеличении содержания реагента в шихте с 37 до 50%  $\alpha$  возрастает почти на 20% практически во всех хвостах разного химического состава (рис. 2).

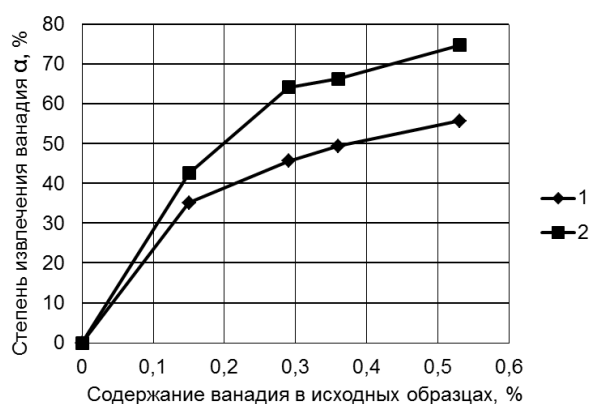


Рис. 2. Зависимость степени извлечения ванадия  $\alpha$  из рудных хвостов при разном содержании в шихте реагента  $NaCl$  для обжига:

- 1 – при содержании реагента в шихте 37%;
- 2 – при содержании реагента в шихте 50%

Наряду с реагентом  $NaCl$  для окислительного обжига в шихте использовали и другие реакционные добавки:  $CaO$ ,  $Na_2SO_4$ , смеси этих реагентов, в том числе смеси с  $NaCl$ . Они оказались неэффективны, поскольку полученная степень извлечения ванадия не превышала 28,5–31,2%. Вместе с тем применение реагента  $Na_2CO_3$  позволило существенно повысить  $\alpha$  до 70,75% для некоторых образцов хвостов.

В целом полученные в исследованиях невысокие степени извлечения ванадия из рудных хвостов могут быть связаны со значительным содержанием в них  $SiO_2$  (22,4–35,6%) (см. табл. 1), что негативно влияет на условия окисления материалов при обжиге шихты вследствие образования силиката натрия и спекания шихты [18, 19].

При исследовании рудных хвостов выявили существенную зависимость между степенью извлечения ванадия и температурой окислительного обжига (рис. 3). Возрастание этой температуры в диапазоне 700–950°C привело к увеличению  $\alpha$ , составившей 71% при использовании реагента  $NaCl$  и 75% при обжиге с ре-

агентом  $Na_2CO_3$ . При температуре 950°C получено наибольшее значение  $\alpha = 83,1%$  из шихты с  $Na_2CO_3$  (50% в шихте).

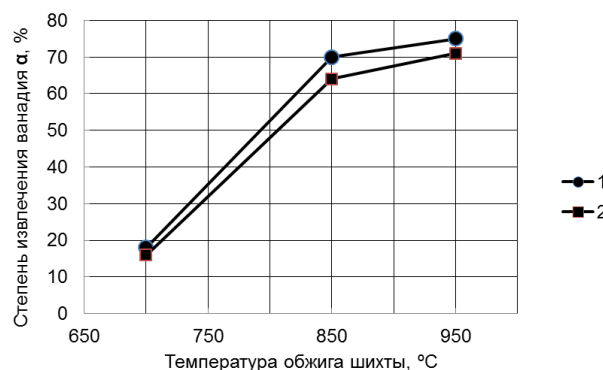


Рис. 3. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из рудных хвостов и температурой обжига шихты:

- 1 – хвосты с  $Na_2CO_3$  (содержание в шихте 50%);
- 2 – хвосты с  $NaCl$  (содержание в шихте 50%)

Исследование металлургических шлаков, имеющих разный химический состав (см. табл. 2), показало взаимосвязь между степенью извлечения ванадия и содержанием в шихте реагента для обжига  $Na_2CO_3$  (рис. 4). Увеличение количества  $Na_2CO_3$  в шихте в интервале значений 20–50%  $\alpha$  возрастает до 31% (шлак 2) и до 65% (шлак 1). При этом более низкие значения  $\alpha$  при обработке шихты со шлаком 2 связаны с высоким содержанием  $SiO_2$  (см. табл. 2) и переходом ванадия в стекловидную фазу, то есть нерастворимую форму, что затрудняет извлечение соединений ванадия при выщелачивании [18]. Кроме того, в составе шлака 2 отсутствует  $MnO$ , что тоже снижает степень извлечения ванадия [18, 20].

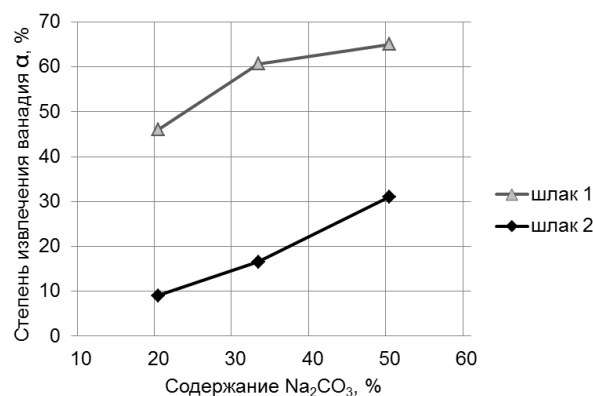


Рис. 4. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из шлаков и содержанием в шихте реагента  $Na_2CO_3$

По результатам экспериментов выявлена зависимость между степенью извлечения ванадия из шлаков разного химического состава и температурой окислительного обжига (рис. 5). Наилучшие результа-

ты по значению  $\alpha = 67\%$  (для шлака 1) и  $\alpha = 33\%$  (для шлака 2) получены после обжига при температуре  $950^\circ\text{C}$ . Более высокие температуры обжига приводят к переходу ванадия в химически связанное состояние в стекловидной фазе в виде соединения, содержащего  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{VO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , а также  $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ , что негативно отражается на степени извлечения ванадия [21, 22].

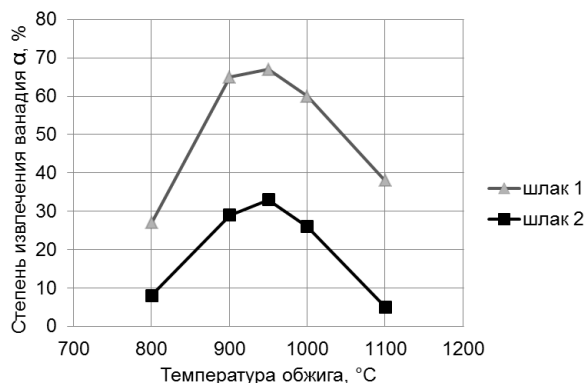


Рис. 5. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из шлаков и температурой обжига шихты

При исследовании шлака 3 (см. табл. 2) на возможность извлечения ванадия применяли два разных состава шихты: одна шихта включала навеску шлака и содовую добавку ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), а вторая – кроме указанных компонентов содержала еще дополнительный окислитель перманганат калия  $\text{KMnO}_4$ . После обжига шихты при температуре  $950^\circ\text{C}$  (1,5 часа) провели выщелачивание 20%-м раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1,5 часа). В результате экспериментов  $\alpha$  составила почти 92 %.

### Заключение

В результате проведенных исследований по гидрометаллургическому извлечению ванадия из техногенных ванадийсодержащих отходов горно-металлургического производства можно сделать следующие выводы:

- промышленная утилизация рудных хвостов уральских титаномагнетитов и металлургических шлаков обеспечит решение двух проблем – рациональное использование природных ванадийсодержащих ресурсов и сокращение территорий с опасными для окружающей среды отходами;
- при переработке ванадийсодержащих отходов необходимо учитывать их химический состав для выбора реагентов и режимов обжига;
- наилучшую эффективность в качестве реагентов для обжига шихты с исследованными материалами показали  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;
- применение в шихте с рудными хвостами реагента  $\text{NaCl}$  для обжига позволяет проводить одностадийное кислотное выщелачивание с  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , а увеличение в шихте содержания этого реагента способствует росту степени извлечения ванадия;

– химический состав рудных хвостов титаномагнетитов существенно влияет на степень извлечения ванадия: увеличение содержания ванадия с 0,15 до 0,53% приводит к росту степени извлечения почти до 75%;

– при извлечении ванадия из металлургического шлака необходимо рационально выбирать содержание реагента для обжига, режимы обжига и выщелачивающий агент: после обжига шихты с содержанием реагента 50% при температуре  $950^\circ\text{C}$  и последующего водного выщелачивания степень извлечения ванадия составила 33–67%, а проведение сернокислотного выщелачивания при тех же предшествующих условиях обработки обеспечило степень извлечения почти 92%.

### Список источников

1. Техногенное сырье – важнейший резерв развития: <http://rareearth.ru/ru/pub/20161025/02891.html>.
2. Разработка технологии переработки хвостов кусинских титаномагнетитовых руд с извлечением титана и ванадия / Бигеев В.А., Гришин И.А., Потапова М.В., Соколова Е.В. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докл. 76-й межд. науч.-техн. конф. Магнитогорск, 2018. Т.1. С. 93.
3. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Исследование влияния режимов выщелачивания на степень извлечения ванадия из металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 4 (31). С. 13-16.
4. Global Vanadium Market Size and Trends, By Application (Iron & Steel, Energy Storage, Chemical, And Titanium Alloys), By Region (Asia Pacific, Europe, North America, South America, Middle East and Africa) and Forecast from 2018 to 2025 // Metals and Minerals. Apr 2019: <http://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/vanadium-market>.
5. Terry Perles. Vanadium Market Analysis, TTP Squared, Inc. January 26, 2021: [https://www.ferroalloy.com/en/news/VANITEC%20ESC%20Market%20Data%20Jan%2022%202021%20\(002\).pdf](https://www.ferroalloy.com/en/news/VANITEC%20ESC%20Market%20Data%20Jan%2022%202021%20(002).pdf).
6. Upward momentum builds in vanadium market, February 18, 2021: <https://directorstalk.net/upward-momentum-builds-in-vanadium-market>.
7. Vanadium Miners News For The Month Of July 2021, July 29, 2021: <http://seekingalpha.com/article/4442508-vanadium-miners-news-for-the-month-of-july-2021>.
8. Обзор рынка ванадия и ванадийсодержащей продукции в СНГ. Изд. 5-е. Москва, 2009. [https://www.marketing-magazin.ru/imgs/goods/800/rynok\\_vanadija.pdf](https://www.marketing-magazin.ru/imgs/goods/800/rynok_vanadija.pdf).
9. Ancheta J. HYDRO-MPC technology for heavy oil refining // Journal of Mining Institute. 2017. № 224. С. 229-234.
10. Akhmetov A.F., et al. The state of vanadium (V) in crude oil and petroleum residues // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. №10(21). С. 42553-42555.

11. Mingyu Wang, Sheng Huang, Bianfang Chen, Xuewen Wang. A review of processing technologies for vanadium extraction from stone coal // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. С.90-98: <http://doi.org/10.1080/25726641.2018.1505207>.
12. Kologrieva U., Volkov A., Zinoveev D., Krasnyanskaya I., Stulov P. The Investigate of Vanadium-Containing Slurry Oxidation Roasting Process for Vanadium Extraction. December 2020: [http://www.researchgate.net/publication/347793726\\_The\\_Investigate\\_of\\_Vanadium-Containing\\_Slurry\\_Oxidation\\_Roasting\\_Process\\_for\\_Vanadium\\_Extraction](http://www.researchgate.net/publication/347793726_The_Investigate_of_Vanadium-Containing_Slurry_Oxidation_Roasting_Process_for_Vanadium_Extraction).
13. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из шлака процесса ИТМКЗ // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докладов*. Магнитогорск, 2013. № 1. С. 168-171.
14. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение титана из шлака процесса прямого восстановления титаномагнетитов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. Докладов*. Магнитогорск, 2015. № 1. С. 255-258.
15. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, ecological and resource-efficient aspects of vanadium production and use of technogenic vanadium sources // *Solid State Phenomena*. 2017. № 265. С. 994 – 998.
16. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Результаты экспериментов по извлечению ванадия из отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 5. С. 617–623.
17. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Рециклинг ванадийсодержащих отходов // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2 (19). С. 71–73.
18. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. М.: Металлургия, 1991. 432 с.
19. Zhang Y.M., Bao S.X., Lio T., Chen T.J., Huang J. The technology of extracting vanadium from ston coal in China, History, current status and future prospects. // *J. Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 109. Pp. 116–124.
20. Mahdavian A. Recovery of vanadium from Esfahan Steel Company steel slag; optimizing of roasting and leaching parameters / A. Mahdavian, A. Shafyei, E. Keshavarz Alamdari, D.F. Haghshenas // *International Journal of ISSI*. 2006. Vol. 3. № 2. Pp. 17–21.
21. Комплексная переработка ванадиевого сырья: химия и технология / В.Г. Мизин, Е.М. Рабинович, Т.П. Сирина, В.Г. Добош, М.Е. Рабинович, Т.И. Красненко. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 500 с.
22. Song Wen-chen, Li Hong. A new process for vanadium extraction from molten vanadium slag by direct oxidation and sodium activating method // *Iron Steel Vanadium Titanium*. 2012. No.33 (6). Pp. 1–5.

#### **Сведения об авторах**

**Шубина Марианна Вячеславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [shubina\\_mar@mail.ru](mailto:shubina_mar@mail.ru)

**Махоткина Елена Станиславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Шубин Игорь Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ТОМ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Емелюшин Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [emelushin@magtu.ru](mailto:emelushin@magtu.ru).

**Петроченко Елена Васильевна** – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

---

#### *INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

#### **INFLUENCE OF ROASTING PARAMETERS AND REAGENTS ON THE VANADIUM EXTRACTION FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS**

**Shubina Marianna V.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [shubina\\_mar@mail.ru](mailto:shubina_mar@mail.ru).

**Makhotkina Elena S.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.



**Shubin Igor G.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Materials Processing Technologies Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Emelyushin Aleksei N.** – doctor of technical sciences, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [emelushin@magtu.ru](mailto:emelushin@magtu.ru).

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

**Abstract.** Significant volumes of waste from mining and metallurgical production (ore tails and metallurgical slags) worsen the ecological situation in industrial regions, but at the same time, they represent a unique source of many technically valuable rare and trace metals, one of which is vanadium. The prospects for the vanadium market (in terms of demand and prices) and the optimism of its consumption forecasts for the coming years are shown. In this regard, the inclusion of vanadium-containing waste in industrial processing simultaneously solves two actual problems – resource saving and environmental protection. The study purpose is the vanadium extraction from the Ural titanomagnetite ore tails and vanadium-containing metallurgical slags of different chemical composition using the hydrometallurgical method. The study objectives are: to determine the effect of various chemical reagents and the temperature regimes for oxidizing roasting on the vanadium extraction degree; comparison of vanadium extraction efficiency in aqueous and acid leaching. The vanadium content in the resulting solutions and solid samples was determined by X-ray fluorescence spectroscopy (XFS). The study result analysis showed the following: the choice of reagents and roasting regimes of the charge with vanadium-containing waste must be carried out taking into account their chemical composition; the best roasting reagents are NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; the highest vanadium extraction degree amounted to almost 75–92 % and were obtained with a 50 % roasting reagent content in the charge, after roasting at a temperature of 950 °C and subsequent aqueous or acid leaching.

**Keywords:** titanomagnetite ore, ore enriched tails, metallurgical slags, vanadium, oxidizing roasting, vanadium leaching, vanadium extraction degree.

---

Ссылка на статью:

Влияние параметров обжига и реагентов на извлечение ванадия из техногенного сырья / М.В. Шубина, Е.С. Махоткина, И.Г. Шубин, А.Н. Емельюшин, Е.В. Петроченко // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 4-9.  
Shubina M.V., Makhotkina E.S., Shubin I.G., Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. Influence of roasting parameters and reagents on the vanadium extraction from technogenic raw materials. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 4-9.

УДК 621.746.07

Ганин Д.Р.

## РАЗВИТИЕ СПОСОБОВ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ УСТАНОВОК НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА

**Аннотация.** Рассмотрена история зарождения и развития способов возвратно-поступательного движения (качания) кристаллизаторов, используемых на установках непрерывной разливки стали (УНРС) и машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Приведены сведения о способах качания кристаллизаторов установок непрерывной разливки металла (УНРМ), в том числе об используемых в них технических параметрах (закон качания, амплитуда, частота, время опережения). Рассмотрено и проанализировано влияние параметров законов качания кристаллизаторов УНРС на качество поверхности непрерывнолитых заготовок.

Приведены критерии оптимальности выбора режимов движения кристаллизаторов для конкретных случаев (время опережения и другие) с целью обеспечения необходимых требований стабильности литья и качества поверхности непрерывнолитой заготовки.

**Ключевые слова:** УНРМ, УНРС, МНЛЗ, закон качания, способ качания, возвратно-поступательное движение кристаллизатора, непрерывное литье

### Постановка проблемы

Для исключения зависания формирующейся корки слитка на рабочих стенках кристаллизатора в результате сопротивления при его вытягивании, вызванного ферростатическим давлением и прилипанием к стенкам жидкого металла, на подавляющем большинстве УНРМ применяют периодическое возвратно-поступательное движение (качание) кристаллизатора вдоль движения слитка с заданной амплитудой и частотой либо периодическое перемещение слитка с остановками или перемещением в обратном направлении на определенную величину, например при разливке некоторых цветных металлов и на горизонтальных УНРМ [1]. Известно влияние качания кристаллизатора УНРМ на затвердевание и качество формирующихся слитков и заготовок, получающихся из них при прокатке [2].

Оптимальным режимом разливки является тот, который наилучшим образом удовлетворяет требованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки, обеспечивает необходимое время опережения при максимальной частоте и минимальной амплитуде качания при прочих равных условиях (тип УНРМ, марка разливаемого металла, форма и размеры поперечного сечения заготовки, режим охлаждения в кристаллизаторе, скорость вытягивания слитка и др.). Параметры качания кристаллизатора (закон качания, частота, амплитуда, время опережения (время, характеризующее продолжительность проскальзывания кристаллизатора относительно вытягиваемой заготовки при движении вниз) в оптимальном режиме считаются оптимальными.

Вопрос выбора оптимального режима качания кристаллизатора для конкретного способа непрерывной разливки не является решенным. В связи с этим актуальны изучение истории развития законов качания кристаллизаторов УНРМ, а также анализ влияния

основных параметров этих законов на качество непрерывных слитков с целью выявления критериев оптимальности выбора режимов качания кристаллизаторов УНРМ для конкретных случаев.

### Основная часть

При освоении непрерывной разливки, когда кристаллизаторы были стационарными, наблюдались частые «зависания» корки слитка на их стенках при отрыве ее верхней тонкой части от движущегося слитка из-за трения о стенки кристаллизатора. Происходили «прорывы» металла под кристаллизатором с аварийной остановкой разливки. Литье в такой кристаллизатор не обеспечивало высоких скоростей вытягивания заготовки, а в случае зависаний слитка при этом способе было невозможно управлять разливкой. Для исключения этого явления кристаллизатор должен периодически двигаться вниз вместе со слитком.

В 1913 г. осуществить возвратно-поступательное движение кристаллизатора предложил А.Г. Персон, разработав способ и устройство для непрерывной разливки трубообразных изделий [3].

В 1933 г. придавать возвратно-поступательное движение кристаллизатору предложил З. Юнгханс [3-5]. Слиток транспортировался вниз с такой же скоростью, как и кристаллизатор, а обратное перемещение кристаллизатора в исходное положение осуществлялось преимущественно с увеличенной скоростью. Цикл предусматривал качание кристаллизатора с амплитудой 30-40 мм вниз со скоростью слитка, вверх – в три раза быстрее. По этому способу разливались латунь, алюминий и его сплавы. Для отлитого по способу З. Юнгханса стального слитка было характерно наличие поверхностных пороков – «колец» с шероховатой поверхностью, расстояние между которыми соответствовало пути, проходимому слитком во время равномерного возвратного движения кристаллизатора. Ширина «кольца» зависела от условий литья и времени возвратного перемещения кристаллизатора. Для устранения этих недостатков повышали скорость

возвратного перемещения кристаллизатора, чтобы сократить время движения слитка и кристаллизатора навстречу друг другу. Но «кольца» получались ярко выраженными и качество поверхности ухудшалось. Недостатками цикла также были частые зависания слитка, резкие изменения режима движения в крайних положениях кристаллизатора и сложная профилировка кулачка, на который он опирается.

Братья Мясоедовы предложили цикл, заключающийся в опускании со скоростью слитка кристаллизатора на величину  $3/4$  его хода, ускоренном движении кристаллизатора со скоростью, превышающей в два раза скорость слитка и последующем подъеме кристаллизатора со скоростью в два раза большей скорости слитка [6, 7]. В этом случае вначале происходит «залечивание» оболочки, а потом срыв прилипания с сжатием оболочки, без ее разрушения.

В 1940 г. Ф. Жакке предложил слиток перемещать периодически, с остановками, за время которых увеличивается толщина корки слитка и устраняются ее разрывы, а кристаллизатор оставить неподвижным [2].

Затем в 1953 г. на УНРС в Бэрроу для периодической разгрузки оболочки слитка при движении кристаллизатора вниз было применено отрицательное скольжение (рис. 1) [8], то есть кристаллизатору сообщали опережающее движение по отношению к слитку. При скорости движения кристаллизатора вниз, несколько превышающей скорость движения слитка, возникало скольжение слитка относительно стенок кристаллизатора, препятствующее привариванию непрерывной заготовки к стенкам. В результате, когда кристаллизатор возвращался вверх, уменьшались возникающие в корке напряжения. На корку слитка при движении вниз действовали сжимающие силы, способствующие устранению разрывов корки. При попытках литья с положительным скольжением часто возникали прорывы жидкого металла под кристаллизатором. При движении кристаллизатора с опережением срыв прилипания корочки металла к стенкам кристаллизатора происходил без разрушения оболочки, при ее сжатии. Поэтому этот способ возвратно-поступательного движения кристаллизатора значительно уменьшал склонность к образованию прорывов металла.

После применения отрицательного скольжения время опережения, характеризующее продолжительность проскальзывания кристаллизатора относительно вытягиваемой заготовки и оказывающее влияние на глубину складок качания (от чего косвенно зависит образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания»), стало считаться критерием стабильности литья и качества поверхности слитков.

В 1959 г. в СССР на двух МНЛЗ Новолипецкого металлургического завода был внедрен получивший широкое распространение синусоидальный закон качания кристаллизатора [9], в котором на определенном отрезке времени кристаллизатор опережает слиток, то есть в цикле есть период уплотнения корочки слитка

(рис. 2). Использование этого закона позволило упростить привод механизма качания кристаллизатора.

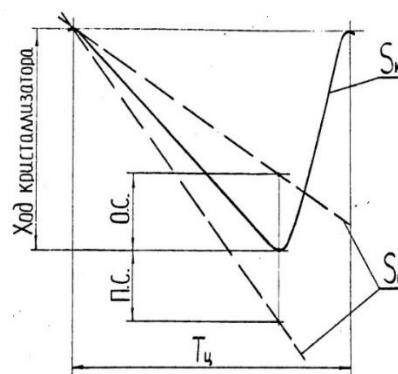


Рис. 1. Схема возвратно-поступательного движения кристаллизатора с отрицательным (о.с.) и положительным (п.с.) скольжением [8]:

$S_k$  – перемещение кристаллизатора;  
 $S_{сл}$  – перемещение слитка;  $T_{ц}$  – период качания

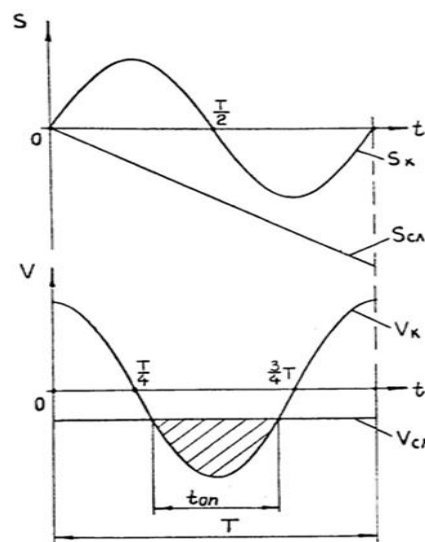


Рис. 2. Синусоидальный закон движения кристаллизатора [8]:

$S_{сл}$  – перемещение слитка;  $T$  – период качания,  
 $t_{оп}$  – время опережения

Параметры возвратно-поступательного движения кристаллизатора по синусоидальному закону определяются следующими выражениями:

$$S = A \sin(\omega t + 2\pi);$$

$$v = \frac{dS}{dt} = \omega A \cos(\omega t + 2\pi);$$

$$a = \frac{d^2 S}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + 2\pi),$$

где  $S, v, a$  – соответственно перемещение, скорость, ускорение кристаллизатора;  $A$  – амплитуда перемещения;  $\omega$  – круговая частота колебаний.

В синусоидальном законе качания кристаллизатора время опережения определяется из соотношения

$$\tau_o = \frac{1}{f} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left( -\frac{v_c}{2\pi f A} \right) \right],$$

где  $f$  – частота колебаний;

$v_c$  – скорость вытягивания слитка;

$A$  – амплитуда качаний кристаллизатора.

При синусоидальном законе качания кристаллизатора частота качания зависит от скорости вытягивания заготовки и может составлять 0–400 циклов в минуту; амплитуда зависит от типа отливаемой заготовки и находится в диапазоне 3–9 мм [10] (по другим данным – в пределах 2,0–5,5 мм [11]).

Время опережения обычно изменяется в диапазоне 0,1–0,3 с [11]. В работе Колпакова С.В. для сталей приведены величины  $[\tau_o] = 0,25–0,30$  с [12], а в работе Передреева Д.В. –  $[\tau_o] = 0,10–0,15$  с [13]. Для малоуглеродистых сталей с содержанием углерода менее 0,14% время опережения должно быть больше или равно 0,10–0,12 с; для среднеуглеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода до 0,14% – 0,1–0,2 с; для среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода больше 0,16% – 0,15–0,20 с; для нержавеющей сталей типа Х18Н9Т – 0,05–0,10 с [14, 15]. Для высокоскоростных сортовых МНЛЗ величина времени опережения выбирается на уровне 0,12–0,14 с.

Малые значения времени опережения в значительной мере снижают поступление ШОС в зазор между стенками кристаллизатора и коркой слитка, нарушая стабильность литья.

С другой стороны, для снижения глубины следов качания необходимо уменьшать время опережения слитка за счет увеличения частоты и уменьшения амплитуды качания кристаллизатора.

Методика определения оптимальных параметров синусоидального закона дана Лебедевым В.И. и Евтевым Д.П. в работе [16], где для получения максимальной скорости вытягивания при минимальной амплитуде качания рекомендуется частота 65 мин<sup>-1</sup>. Авторы без теоретического и экспериментального обоснования предлагают определять амплитуду качания  $A$  в зависимости от скорости движения слитка  $V_c$  по формуле

$$A = 0,22V_c.$$

В работе Кобелева В.А. [17] также приведена методика определения оптимальных параметров синусоидального закона качания, но в качестве необходимого времени опережения необоснованно принимаются значения из диапазона 0,5–1,0 с, а в качестве оптимальных частот диапазон, равный 16–32 мин<sup>-1</sup> и практически неиспользуемый на современных УНРС.

Особенностью трапецеидального закона качания кристаллизатора является возможность обеспечить большее время опережения. Этому закону свойствен-

ны резкие изменения режима движения в крайних положениях кристаллизатора и большие ускорения, вызывающие значительные динамические нагрузки на привод механизма качания, что ограничивает повышение частоты качания. Различные циклы трапецеидального закона качания осуществляют с помощью кулачков, а привод может быть механическим или гидравлическим. Существуют три основных цикла трапецеидального закона качания кристаллизатора: 1) время хода кристаллизатора вверх меньше времени его хода вниз (рис. 3); 2) время хода кристаллизатора вверх больше времени его хода вниз (рис. 4); 3) время хода кристаллизатора вверх равно времени хода кристаллизатора вниз.

В 50–60-е гг. наибольшее распространение получил трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (1:3) [18]. В этом цикле кристаллизатор 3/4 времени цикла движется вниз синхронно со слитком, а затем быстро (в течение 1/4 времени цикла) возвращается в исходное положение (рис. 5). На рис. 3, 4 приняты следующие обозначения:  $t_b$  – время хода кристаллизатора вверх;  $t_n$  – время хода кристаллизатора вниз;  $m = t_b/t_n$  – коэффициент цикла;  $\tau_1, \tau_2$  – время положительного скольжения соответственно в начале и в конце хода кристаллизатора вниз;  $t_1, t_2$  – время равноускоренного и равнозамедленного движения кристаллизатора при ходе вверх (для цикла  $m \leq 1$ ) или вниз (для цикла  $m \geq 1$ );  $V_b, V_n$  – максимальные скорости движения кристаллизатора соответственно при его ходе вверх и вниз;  $V_{сл}$  – скорость вытягивания слитка;  $t_{оп}$  – время опережения.

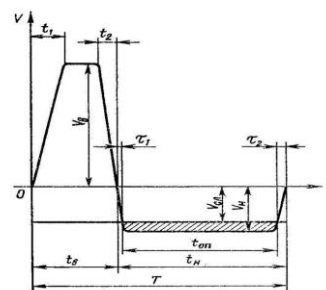


Рис. 3. График скоростей кристаллизатора и слитка при цикле трапецеидального закона [18]:  $m < 1$

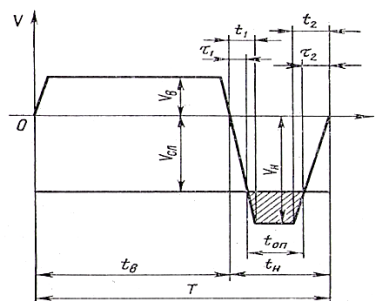


Рис. 4. График скоростей кристаллизатора и слитка при цикле трапецеидального закона [18]:  $m > 1$

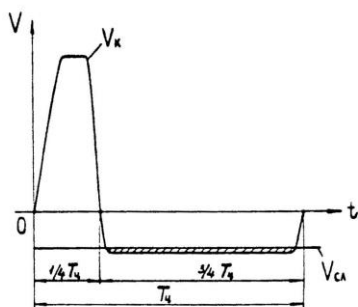


Рис. 5. Трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (цикл 1:3) [18]

При использовании трапецеидального закона во время движения кристаллизатора вверх при наибольших изменениях относительной скорости между кристаллизатором и слитком и наибольших напряжениях по возможности поддерживают низкими ускорение и замедление. При движении кристаллизатора вниз ускорение и замедление должны быть высокими, так как изменение скорости кристаллизатора уменьшает возникающие в слитке напряжения. После успешного использования в Бэрроу цикла качания кристаллизатора 1:3 с отрицательным скольжением он был рекомендован как наиболее целесообразный при высокоскоростной разливке. Также был испытан цикл 3:1 (рис. 6), получаемый реверсированием кулачка. В этом цикле, несмотря на уменьшение времени опережения в три раза, его было достаточно, чтобы процесс литья был стабильным.

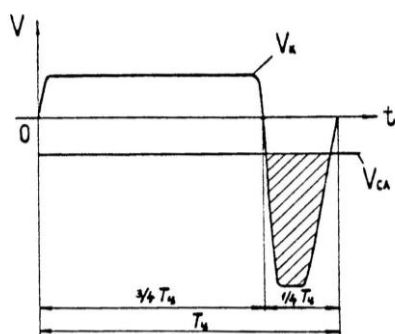


Рис. 6. Трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (цикл 3:1) [18]

По данным А.М. Энгояна и В.М. Шусторовича, для данного закона время опережения должно составлять 0,15–0,18 с [19]. На разных МНЛЗ трапецеидальный закон осуществляли с ходом кристаллизатора, равным 9,5–50 мм, и частотой качания 37,5–50 мин<sup>-1</sup> [18]. Закону свойственны большие ускорения, вызывающие значительные динамические нагрузки на привод качания [19].

В работе [18] разработана методика определения оптимальных параметров трапецеидального закона

качания кристаллизатора, установлен критерий оптимального опережения для различных циклов трапецеидального закона и доказывается, что мнение, что цикл Юнгханса-Росси наиболее эффективен при высокоскоростной разливке, ошибочно. Рациональное использование циклов с  $m < 1$  ограничивается имеющимися при этом место ускорениями кристаллизатора. В цикле Юнгханса-Росси (1:3) динамические нагрузки как минимум в девять раз выше, чем в цикле 3:1.

По мнению автора работы [18], наиболее целесообразным, особенно при высокоскоростной разливке, является применение синусоидального закона и циклов трапецеидального закона, имеющих коэффициент цикла  $m \geq 1$ .

Максимальным приближением к трапецеидальному графику скорости является трехсинусоидальный закон движения кристаллизатора, получаемый путем сложения нескольких синусоидальных движений [20, 21], например по уравнению

$$Y = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t, \quad (7)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  – амплитуды колебаний;  
 $\omega$  – круговая частота;  
 $t$  – время.

График скорости кристаллизатора при таком законе движения представлен на рис. 7. Трехсинусоидальный закон движения лучше синусоидального по отношению времени «залечивания»  $t_3$  к продолжительности цикла  $T_{ц}$ : при трехсинусоидальном  $t_3/T_{ц} = 0,5$ , а при синусоидальном  $t_3/T_{ц} = 0,27$ .

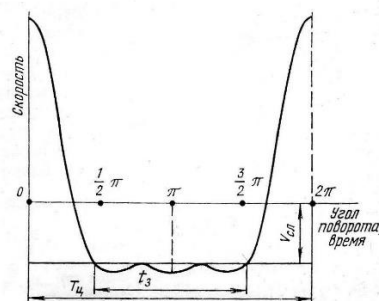


Рис. 7. График скорости кристаллизатора при трехсинусоидальном законе движения [20]

Ускорение при трехсинусоидальном законе качания получается более высоким. Динамические нагрузки на привод механизма качания, возникающие при использовании этого закона, в семь раз выше, чем при синусоидальном. Трехсинусоидальный закон качания кристаллизатора может быть выполнен с помощью кривошипно-шатунного механизма с балансирами.

Известны и другие законы качания кристаллизатора, которые не были опробованы в промышленности [22-26].

На заводе фирмы «Armco» используется практика инвертированного регулирования частоты, когда

амплитуда качания кристаллизатора увеличивается, а частота уменьшается с увеличением скорости разливки (рис. 8.) [27]. В этом случае поддерживается малое и относительно постоянное время движения заготовки с отставанием по отношению к движению кристаллизатора в стабильном интервале качания. Время движения заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора в процессе его качания при этом увеличивается. В случае повышения скорости разливки при движении заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора обеспечивается усиленный расход ШОС там, где это необходимо более всего.

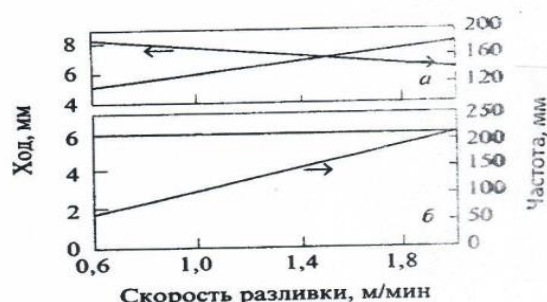


Рис. 8. Инвертированный (а) и стандартный (б) режимы качания кристаллизатора [27]: 1 – положительный шаг; 2 – отрицательный шаг

При режиме инвертированного качания поддерживается почти постоянное время отрицательного шага с целью регулирования глубины следа на слитке от качания, причем рост длительности положительного шага при увеличении скорости разливки ведет к росту расхода ШОС (рис. 9).

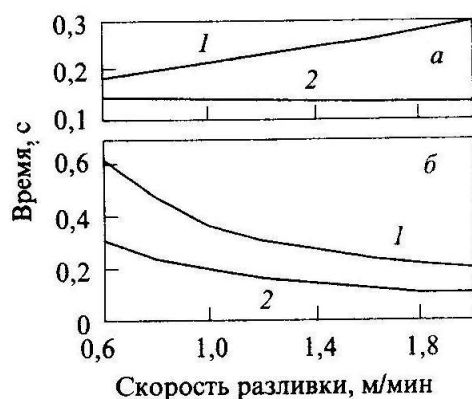


Рис. 9. Длительность положительного (1) и отрицательного (2) шага для режима инвертированного (а) и обычного (б) качания кристаллизатора [27]

На первых этапах освоения непрерывного литья возвратно-поступательное движение кристаллизатора осуществлялось простыми рычажными механизмами. На вертикальных МНЛЗ кристаллизатор перемещался

в скользящих или роликовых направляющих. На криволинейных МНЛЗ наибольшее применение получил механизм качания параллелограммного типа. До последнего времени основным типом применяющегося механизма качания являлся шарнирный четырехзвенник с подшипниками качения. Вмятины на дорожках качения колец подшипников, износ приводили к отклонениям движения кристаллизатора от заданной траектории, что снижало стойкость кристаллизатора, стабильность литья, качество поверхности отливки. Появление гидравлических механизмов качания кристаллизатора (в 1995 г. на заводе фирмы «Агтсо» гидравлического устройства качания кристаллизатора «Dinaflex» фирмы «VAI»; в 1999 г. в ОАО «Северсталь» бесшарнирного рессорного механизма качания с гидравлическим приводом ОАО «МК ОРМЕТ-ЮУМЗ», ООО «КОРАД», ОАО «СКБ ПА» (г. Ковров) и др.) дало возможность реализовать любые конфигурации законов качания кристаллизатора, в том числе несинусоидальные (асимметричные) режимы качания (рис. 10), позволяющие более плавно полностью динамически регулировать параметры качания при изменениях в процессе разливки; оперативно устанавливать при изменении технологического процесса новый режим работы кристаллизатора; минимизировать время опережения (что снижает время воздействия сжимающих нагрузок на корочку заготовки); не менее чем на 30% снижать глубину следов качания (в сравнении с синусоидальным законом); существенно повысить скорость разливки и улучшить качество поверхности и подповерхностных слоев заготовки [28].



Рис. 10. Графики изменения скорости движения кристаллизатора для синусоидального и несинусоидального закона с частотой цикла 2 Гц [28]

В работе [29] изучено влияние силы трения в кристаллизаторе при синусоидальном и несинусоидальных законах качания кристаллизатора. Экспериментально установлено, что фактическая величина опережения кристаллизатора при несинусоидальном качании на 40% выше, чем при синусоидальном. Это способствует лучшему «залечиванию» поверхностных трещин и хорошему отделению оболочки слитка от стенок кристаллизатора, уменьшает склонность к образованию и распространению трещин, улучшает качество поверхности заготовки. С помощью несинусоидальных режимов качания можно реализовывать

меньшее время опережения, при котором образуются неглубокие складки качания шириной около 250 мкм за счет уменьшения времени воздействия сжимающих нагрузок на корочку слитка [30].

### Результаты и обсуждение

Для обеспечения стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высоко-го качества конструкция механизма качания кристаллизатора должна обеспечивать точное воспроизведе-ние заданного закона качания. Этим требованиям удовлетворяет гидравлический механизм качания кристаллизатора.

Оптимальный режим качания кристаллизатора (закон качания, частота, амплитуда и время опережения) должен наилучшим образом удовлетворять тре-бованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки. Одним из основных критериев стабильно-сти литья и качества поверхности непрерывного слит-ка является время опережения. Время опережения оказывает влияние на глубину складок качания, что косвенно влияет на образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания».

Режим качания оказывает влияние на оптималь-ный расход ШОС в кристаллизатор, силу трения меж-ду заготовкой и стенками кристаллизатора (в зависи-мости от содержания углерода, кремния и марганца в разливаемой стали, вязкости шлака, толщины гарни-сажа), усилие вытягивания заготовки и качество по-верхности слитка. Для стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высоко-го качества конструкция механизма качания кристал-лизатора должна обеспечивать точное воспроизведе-ние заданного закона качания. Оптимальный расход ШОС зависит от амплитуды и частоты качаний кри-сталлизатора, скорости разливки, времени опереже-ния, вязкости жидкого шлака и других параметров [28, 31-37] и может определяться зависимостями:

$$Q_n = \frac{0,7}{(\eta^{0,5} \cdot V_p)},$$

$$Q_n = \frac{0,55}{(\eta^{0,5} \cdot V_p)},$$

$$Q_n = \frac{0,6}{(\eta \cdot V_p)};$$

– для сталей [C]<0,08%:

$$Q_s = 0,4 \cdot \left(\frac{1}{A^{0,3}}\right) \cdot \left(\frac{60}{f}\right) (\eta \cdot V_p^2)^{0,5} + 0,22;$$

– для сталей 0,08%<[C]<0,16%:

$$Q_s = 0,74 \cdot \left(\frac{1}{A^{0,3}}\right) \cdot \left(\frac{60}{f}\right) (\eta \cdot V_p^2)^{0,5} + 0,17;$$

$$Q_s = \frac{k \cdot \beta}{T_{sol}^{1,6} \cdot \eta^{0,5}} \cdot \frac{A^{0,4}}{V_p} \cos^{-1} \left( \frac{1000 \cdot V_p}{2\pi \cdot f \cdot A} \right);$$

$$Q_s = \frac{0,015 \cdot f \cdot \tau_o}{\eta^{0,5} \cdot V_p},$$

где  $Q_n$  – расход ШОС, кг/м<sup>2</sup>;

$f$  – частота качаний кристаллизатора, Гц;

$A$  – амплитуда качаний кристаллизатора, мм;

$\eta$  – вязкость жидкого шлака, П (пуаз);

$V_p$  – скорость разливки, м/мин;

$T_{sol}$  – температура затвердевания, К;

$\tau_o$  – время опережения заготовки кристаллизатором, с;

$k, \beta$  – коэффициенты.

В свою очередь, время опережения, кроме режима движения кристаллизатора, зависит от марки стали и ее перегрева, используемых ШОС, влияющих на трение между слитком и кристаллизатором, конструкции кри-сталлизатора (правильно спрофилированный, хорошо охлаждаемый кристаллизатор обеспечивает равномер-ное и эффективное охлаждение поверхности слитка и высокую прочность его корки). Малые значения вре-мени опережения в значительной мере снижают по-ступление ШОС в зазор между стенками кристаллиза-тора и коркой слитка, нарушая стабильность литья. С другой стороны, для снижения глубины следов качания необходимо уменьшать время опережения слитка за счет увеличения частоты качания и уменьшения ам-плитуды качания кристаллизатора.

На качество поверхности слитка влияет сила трения между заготовкой и стенками кристаллизато-ра. Зависимость усилия трения оболочки слитка о стенки кристаллизатора от вязкости шлака может быть описана эмпирическим соотношением [11]:

$$F_{max} = \frac{\eta_{1300}^v}{\delta \left[ \frac{\pi N}{200} + \frac{\pi}{2} + 1 \right]},$$

где  $\delta$  – толщина шлакового зазора (гарнисажа), м;

$N$  – степень опережения кристаллизатора, с;

$v$  – средняя скорость вытягивания слитка, м/с.

В результате качания кристаллизатора на по-верхности заготовки формируются поперечные углубления в виде складок, располагающиеся при-мерно на одинаковом расстоянии друг от друга. При синусоидальном законе качания кристаллизатора с постоянной амплитудой расстояние  $h$ , мм, между складками определяется зависимостью [11, 28]

$$h = \frac{v}{f},$$

где  $v$  – скорость разливки, мм/мин;

$f$  – частота качания кристаллизатора, мин<sup>-1</sup>.

Расстояние между складками пропорционально скорости вытягивания слитка и уменьшается при увеличении частоты качания.

Важным параметром оптимизации закона качания кристаллизатора является глубина проникновения складок качания  $d_c$ , которая может колебаться от нескольких десятых долей миллиметра до 1,5–2,0 мм и более.

Более высокая скорость разливки приводит к образованию менее глубоких складок качания. Глубина складок качания снижается с уменьшением величины интервала между складками и с увеличением частоты качания кристаллизатора.

При применении несинусоидальных законов качания (см. рис. 6, 8) в пределах одного цикла качания время движения кристаллизатора вверх больше, чем время движения вниз, поэтому время движения кристаллизатора с опережением больше чем при движении по синусоидальному закону; увеличивается расход ШОС и уменьшается сила трения между заготовкой и кристаллизатором; во время движения с отставанием снижена скорость движения кристаллизатора относительно затвердевшей корочки слитка и, соответственно, снижается растягивающее воздействие на оболочку формирующегося слитка; во время движения с опережением относительная скорость, наоборот, увеличивается, и в это время растет сжимающая сила, действующая на оболочку слитка. Увеличение амплитуды качания способствует увеличению расхода ШОС, а увеличение частоты качаний позволяет значительно снизить расход ШОС.

Для каждого конкретного случая оптимальный режим движения кристаллизатора должен выбираться в соответствии с: маркой разливаемой стали; типом УНРС; видом механизма качания кристаллизатора; формой и размерами поперечного сечения заготовки; конструкцией кристаллизатора; маркой, расходом и вязкостью ШОС; экспериментальными данными замеров сил трения при различных марках ШОС (в зависимости от расхода ШОС, амплитуд и частот качания кристаллизатора, скоростей и других параметров разливки) и сведениями о качестве поверхности заготовки.

### Выводы

1. Для стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высокого качества конструкция механизма качания кристаллизатора должна обеспечивать точное воспроизведение заданного закона качания.

2. Оптимальный режим качания кристаллизатора должен наилучшим образом удовлетворять требованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки, одним из основных критериев которых является время опережения, влияющее на глубину складок качания и образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания». Несинусоидальные законы качания кристаллизатора обеспечи-

вают большее время опережения, увеличение расхода ШОС, снижение силы трения между слитком и кристаллизатором, высокое качество поверхности слитка.

3. Оптимальный режим движения кристаллизатора для каждого конкретного случая должен выбираться в соответствии с: маркой разливаемой стали; типом УНРС; видом механизма качания кристаллизатора; формой и размерами поперечного сечения заготовки; конструкцией кристаллизатора; маркой, расходом и вязкостью ШОС; экспериментальными данными замеров сил трения при различных марках ШОС (в зависимости от расхода ШОС, амплитуд и частот качания кристаллизатора, скоростей и других параметров разливки) и сведениями о качестве поверхности заготовки.

### Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Машины и агрегаты металлургического производства. Т. IV-5 / Н.В. Пасечник, В.М. Сеницкий, В.Г. Дрозд [и др.]; под общ. ред. В.М. Сеницкого, Н.В. Пасечника. М.: Машиностроение, 2004. 912 с.
2. Бровман М.Я. Кристаллизаторы установок непрерывного литья металлов. М.: Теплотехник, 2011. 432 с.
3. Шварцмайер В. Непрерывная разливка: Развитие и применение. М.: Металлургиздат, 1962. 386 с.
4. Deutsches Reichs Patent No 750301, B22D 11/04. Verfahren und Vorrichtung zum Giessen von Metallsträngen / Siegfried Junghans. Заявл. 20.10.1933; опубл. 15.01.1945.
5. Бойченко М.С. Непрерывная разливка стали. М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1957. 236 с.
6. Мясоедов Ал.Н., Мясоедов Арк.Н. Получение непрерывного слитка методом прямоточной кристаллизации по способу братьев Мясоедовых А.Н. и А.Н. // Цветные металлы. 1939. № 10-11.
7. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. М.: ЭКОМЕТ, 2007. 484 с.
8. Кузнецов Б.Г. Исследование механизма взаимодействия кристаллизатора со слитком и разработка рекомендаций по усовершенствованию основных узлов МНЛЗ: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.04. М.: ВНИИметмаш; ЦНИИчермет, 1979. 235 с.
9. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слывовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 270 с.
10. Основы металлургического производства / под общ. ред. В.М. Колокольцева. СПб.: Лань, 2017. 616 с.
11. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. М.: Металлургиздат, 2011. 432 с.
12. Усовершенствование методики изучения механизма образования наружных трещин в непрерывнолитых слябах / С.В. Колпаков, В.М. Кукарцев, В.И. Уманец, А.В. Лейтес // Непрерывное литье стали. № 6. 1979. С. 43-45.



13. Петреев Д.В. Влияние зазоров в механизме качания кристаллизатора на время опережения // *Сталь*. 2007. № 4. С. 67-69.
14. О синхронизации частоты качания кристаллизатора и скорости движения слитка УНРС / Е.В. Сурин, М.Я. Бровман, Ю.П. Бойко и др. // *Сталь*. 1972. № 7. С. 35.
15. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 540 с.
16. Лебедев В.И., Евтеев Д.П. Оптимальные параметры синусоидального закона возвратно-поступательного движения кристаллизатора // *Сталь*. 1973. № 4. С. 315-317.
17. Кобелев В.А. Условия применимости синусоидального закона качания кристаллизатора УНРС // *Сталь*. 1967. № 6. С.503-506.
18. Энгоян А.М. Разработка, исследование и внедрение новых режимов качания кристаллизатора МНЛЗ, обеспечивающих повышение стабильности процесса непрерывного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.04 / ВНИИметмаш. М., 1983. 237 с.
19. Энгоян А.М., Целиков А.А., Смоляков А.С. Расчет и анализ оптимальных параметров трапецеидального закона качания кристаллизатора // *Новое в создании металлургических машин: науч. тр. ВНИИметмаш. М.: ВНИИметмаш, 1985. С. 70-81.*
20. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. Киев: Техника, 1988. 252 с.
21. Левин М.З., Пироженко Н.Г., Дюдкин Д.А. Об оптимальных параметрах синусоидального графика движения кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок // *Сталь*. 1975. № 2, С. 123-124.
22. А.с. 383519 СССР, В22D 11/04. Способ перемещения кристаллизатора при непрерывной разливке / С.В. Радиллов, В.П. Локтионов, В.И. Уманец, заявл. 09.03.1970, № 1415871/22-2; опубл. 17.08.1973, Бюл. № 24, 1973.
23. Пат. 2378083 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Паршин В.М., Гончаревич И.Ф., Куклев А.В., Айзин Ю.М., Ганин Д.Р.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140037/02; заявл. 09.10.2008, опубл. 10.01.2010. Бюл. № 1.
24. Пат. 2378084 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Куклев А.В., Паршин В.М., Гончаревич И.Ф., Ганин Д.Р., Айзин Ю.М.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140038/02; заявл. 09.10.2008, опубл. 10.01.2010. Бюл. № 1.
25. Пат. 2422239 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Айзин Ю.М., Куклев А.В., Гончаревич И.Ф., Ганин Д.Р.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» - № 2010104068/02; заявл. 09.02.2010, опубл. 27.06.2011. Бюл. № 18.
26. Пат. 2428274 РФ., МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Куклев А.В., Айзин Ю.М., Лонгинов А.М., Ганин Д.Р., Гончаревич И.Ф.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140037/02; заявл. 16.11.2010, опубл. 10.09.2011. Бюл. № 25.
27. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. М.: ЭЛИЗ, 2002. 208 с.
28. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
29. Zang X., Wang X., Wan I. Investigation of Friction Force between Mould and Strand Shell under Sinusoidal and Non-sinusoidal Oscillation in Continuous Slab Casting // *Steel Research - International*. 2008. 79(7). P. 564-568. DOI:10.2374/SRI07SP098-79-2008-56.
30. Антыкуз О.В. Усовершенствование несинусоидального режима качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. 2013. № 40. С. 116-122.
31. Анисимов К.Н. Создание шлакообразующих смесей для непрерывной разливки слябовых заготовок на основе оценки их физико-химических параметров, обеспечивающих получение качественной продукции: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. [Место защиты: Центр. науч.-исслед. ин-т технологии машиностроения]. М.: 2018, 151 с.
32. Wolf M.M. The free meniscus problem // *Steel Times International*. 1992. Vol. 16. No. 2. P. 37-38.
33. Wolf M.M. History of continuous casting: 75<sup>th</sup> Steelmak. Conference Proceedings (Toronto, USA, 1992). Vol. 75. P. 183-187.
34. Ogbayashi S. et.al. Mould powder technology for continuous casting of low carbon aluminium-killed steel // *Nippon Steel Technical Report*. 1987. No. 34. P. 1-10.
35. Kwon O.et. al. Optimization of mould oscillation pattern fir the improwemtnnt of surface quality and lubrication in slab continuous casting: ISS Steelmak. Conf. Prcc 1991. Vol. 74. P.561-568.
36. Tsutsumi K. et. al. Estimation of mold powder consumption in continuous casting // *Tetsu-to-Hagane*. 1998. Vol. 84. No. 9. P. 617-624.
37. Maeda H.et. al. Melting and consumption of mold powder // *CAMP-ISIJ*. 1993. Vol. 6. No. 1. P. 290-281.

### Сведения об авторах

**Ганин Дмитрий Рудольфович** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал ФГАУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: [dmargin@mail.ru](mailto:dmargin@mail.ru)

## DEVELOPMENT OF METHODS OF ROCKING MOLDS IN CONTINUOUS METAL CASTING PLANT

**Ganin Dmitry R.** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Novotroitsk Branch of the Federal State Autonomous Institution of Higher Education “National Research Technological University “MISiS”, Novotroitsk, Russia. E-mail: [dmrgan@mail.ru](mailto:dmrgan@mail.ru)

**Abstract.** *The history of the origin and development of the methods of reciprocating motion (rocking) of molds used in steel continuous casting plants (UNRS) and continuous casting machines (CCM) is considered. Information is given on the methods of rocking the molds of continuous casting plants (UNRM), including the technical parameters used in them (rocking law, amplitude, frequency, lead time). The influence of the parameters of the rocking laws of the UNRS molds on the quality of the surface of continuously cast billets is considered and analyzed.*

*Criteria are given for the optimal choice of mold motion modes for specific cases (advance time, etc.) in order to ensure the necessary requirements for casting stability and the quality of the surface of a continuously cast billet.*

**Keywords:** *UNRM, UNRS, CCM, rocking law, rocking method, mold reciprocating motion, continuous casting*

---

Ссылка на статью:

Ганин Д.Р. Развитие способов качания кристаллизаторов установок непрерывной разливки металла // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 10-18.

Ganin D.R. Development of methods of rocking molds in continuous metal casting plant. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 10–18.

УДК 669.12.094.1

Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Щелоков Н.С., Посохин М.А., Потапов И.М., Киричко А.Д.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЕВАНДАЦИИ ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД СУРОЯМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Аннотация.** Разведанные запасы титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения в Челябинской области составляют 11 млрд т. Для их добычи и переработки актуально строительство нового металлургического предприятия. Наиболее перспективной схемой получения металла на планируемом производстве является традиционная, состоящая из следующих этапов: добычи руды, ее обогащения, производства из концентратов агломерата и окатышей, выплавки чугуна в доменных печах и получения стали в кислородном конвертере. Ранее для установления основных технологических параметров нового производства в лабораторных условиях Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова были изучены процессы выплавки чугуна из агломерата, полученного из титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения. В рамках настоящего исследования был изучен процесс деванадации чугуна с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия. Была отработана технология деванадации с получением двух продуктов -- передельного чугуна и ванадиевого шлака. В работе было установлено, что при выплавке чугуна целесообразно получение ванадия в нем не менее 0,22 %. Найдены зависимости основного показателя эффективности деванадации – содержания оксида ванадия в шлаке от концентрации ванадия в чугуне и количества шлака. Подтверждена принципиальная возможность проведения деванадации экспериментального суроямского чугуна с получением ванадиевого шлака, содержащего до 12 %  $V_2O_5$  с применением в качестве окислителя воздушного дутья.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовая руда, Суроямское месторождения, агломерат, химический состав, чугун, деванадация, ванадиевый шлак

### Введение

Ванадий является одним из наиболее ценных легирующих элементов. Вопрос его влияния на свойства стали получил широкое освещение в работах многих авторов [1-7]. Свойства стали улучшаются уже при небольших концентрациях ванадия в ней (0,01–0,05%).

Известно, что главным источником ванадия для черной металлургии являются комплексные железные титаномагнетитовые руды [8-13]. В Российской Федерации месторождения ванадийсодержащих магнетитовых руд – Качканарское, Медведевское, Холинское – находятся на Среднем Урале [14-16]. В относительной близости от Качканарского находится другое крупное месторождение ванадийсодержащего титаномагнетита – Суроямское (11 млрд т), освоение которого может еще больше расширить отечественное ванадиевое производство. Однако освоение этого месторождения потребует строительства не только карьера и обогатительной фабрики, но и нового металлургического завода, который позволил бы получать ванадиевые шлаки. То есть проблему Суроямского месторождения в будущем следует решать комплексно и вместе со строительством рудника и обогатительной фабрики создавать металлургический комбинат, производящий ванадийсодержащие шлаки.

Для определения основных технологических параметров нового производства на базе МГТУ были изучены процессы деванадации чугуна, выплавленного из Суроямского агломерата с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия.

### Методы и результаты

На первом этапе исследований Суроямскую руду подвергали обогащению: одной стадии сухой и двум стадиям мокрой магнитной сепарации. Агломерат из полученного концентрата имел следующий химический состав (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав агломерата, полученного из концентрата опытной партии руды Суроямского месторождения, %

Fe ( $Fe_3O_4$ )	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
62,6 (86,50)	2,36	4,51	2,22	1,90	1,11	0,19	0,24

При проведении лабораторных экспериментов на следующем этапе ставилась задача выплавить ванадиевый чугун, пригодный для дальнейшей деванадации в достаточном количестве (не менее 3–5 кг). Исследование процесса восстановления суроямского агломерата заключались в его моделировании в лабораторной индукционной печи ИСТ-006.

В лабораторных условиях удалось не только получить ванадиевый чугун, но и осуществить его деванадацию. Процесс окисления ванадия вели в шмотном тигле, помещенном в индукционной печи ИСТ-0.002. В качестве окислителя использовалось воздушное дутье.

### Результаты исследований и их обсуждение

Расчет процесса восстановления суроямского агломерата был выполнен для следующих условий: в качестве восстановителя принимался коксик произ-

© Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Щелоков Н.С., Посохин М.А., Потапов И.М., Киричко А.Д., 2023

водства ПАО «ММК» (С – 84,15%, S – 0,3%, H<sub>2</sub>O – 0,35%, зола – 12,49%, летучие – 3,02%), известь Агаповского месторождения использовалась в качестве флюса. Расчет процесса восстановления велся на 100 кг агломерата.

Расчетный химический состав и количество чугуна и шлака приведены в табл. 2.

На этапе лабораторных исследований для получения достаточного количества чугуна было проведено 5 плавов. Температура процесса достигала 1500°C. Расход агломерата на плавку составил 1500–1750 г, коксика 500–750 г, извести 80–200 г. В каждой плавке получали в среднем от 1000 до 1150 г чугуна и от 450 до 950 г шлака. Химический состав чугуна опытных плавов представлен в табл. 3, а шлака – в табл. 4.

В работе математическим моделированием были определены основные параметры деванадации чугуна. Важнейшим параметром является количество образующегося шлака, его определяли по формуле [17, 18]

$$g_{\text{шл}} = \frac{100 \cdot (1,62 + 1,78[V]_{\text{чуг}})}{100 - (\text{FeO})_{\text{общ}}} \quad (1)$$

Эта зависимость графически представлена на рис. 1.

Другой ключевой параметр деванадации – содержание пентоксида ванадия в шлаке V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, может быть определен из выражения [11, 12]

$$(V_2O_5)_k = \frac{[V]_{\text{чуг}} - [V]_{\text{кон}}}{0,56 \cdot 10^{-2} \cdot g_{\text{шл}}} \quad (2)$$

Графически последняя зависимость для остаточной концентрации ванадия в полупродукте [V]<sub>к</sub> = 0,035% (среднее значение для условий ККЦ «ЕВРАЗ-НТМК») приведена на рис. 2.

В литейной лаборатории МГТУ им Г.И. Носова деванадацию чугуна проводили следующим образом. В индукционную печь поместили 920 г опытного ванадиевого чугуна. Воздушное дутье подавалось через кварцевую трубку, к которой была прикреплена термопара. Интенсивность дутья составляла 150 л/мин, время продувки 7 минут. Дополнительно для обеспечения оптимальной температуры процесса (не выше 1400°C) во время продувки в тигель подавались суроямские окатыши (около 20 г). Масса металла-полупродукта на выходе составила 826 г, шлака – 42 г.

Химический состав ванадиевого шлака и полупродукта самой успешной плавки приведен в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 2

Расчетный состав и количество чугуна и шлака

Чугун											
	C	Fe	Mn	Si	P	S	V	Ti	Итого		
кг	2,369	56,374	0,088	0,223	0,002	0,038	0,121	0,114	59,214		
%	4,000	95,203	0,149	0,377	0,003	0,064	0,204	0,193	100		
Шлак											
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Всего
кг	8,95	4,30	1,27	4,76	2,24	0,76	0,00	1,67	1,71	0,02	25,68
%	34,85	16,76	4,93	18,54	8,71	2,96	0,00	6,51	6,66	0,09	100,00

Таблица 3

Химический состав чугуна опытных плавов

Номер плавки	Массовая доля, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V
1	не опр.	0,43	0,29	0,022	0,018	0,06	0,055	0,050	0,023	0,36	0,135
2	не опр.	0,84	0,19	0,023	0,001	0,17	0,070	0,009	0,001	0,53	0,190
3	4,89	0,34	0,175	0,028	0,003	0,16	0,075	0,089	0,002	0,28	0,255
4	не опр.	0,28	0,44	0,030	0,017	0,13	0,072	0,013	0,041	0,41	0,330
5	не опр.	0,26	0,425	0,029	0,014	0,12	0,065	0,011	0,016	0,39	0,325

Таблица 4

Химический состав шлака опытных плавов

Номер пробы	Массовая доля, %										
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>общ</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	49,4	19,4	18,59	9,12	2,18	2,11	0,27	0,44	0,36	0,07	0,12
2	53,3	22,3	5,83	7,47	3,23	2,55	0,41	0,36	0,22	0,17	0,17
3	13,2	28,2	4,03	7,57	5,70	5,89	0,38	0,21	0,09	0,03	0,08
4	51,3	27,38	2,49	6,49	5,61	3,38	0,28	0,09	0,06	-	0,10
5	56,7	24,72	3,84	9,98	7,26	6,33	0,65	0,10	0,12	-	0,13

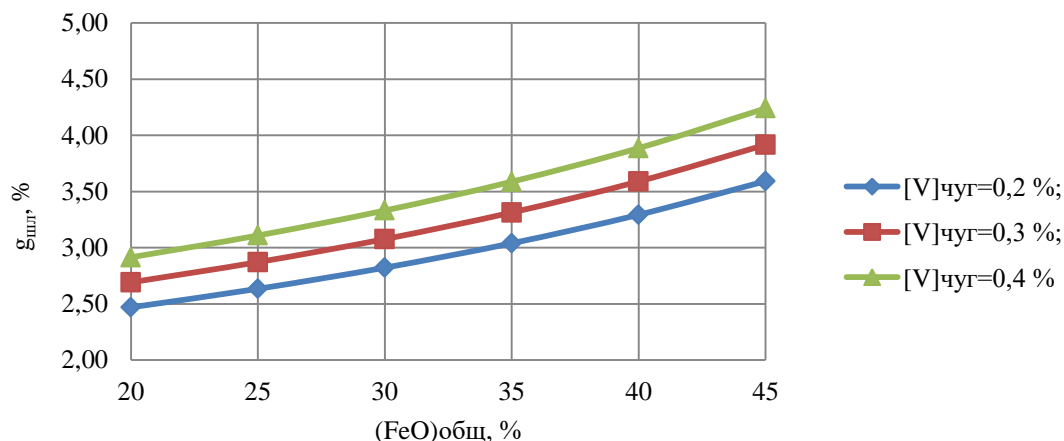


Рис. 1. Зависимость количества ванадиевого шлака  $g_{\text{шл}}$  от содержания в нем оксидов железа  $(\text{FeO})_{\text{общ}}$  и концентрации ванадия в чугунае  $[\text{V}]_{\text{чуг}}$

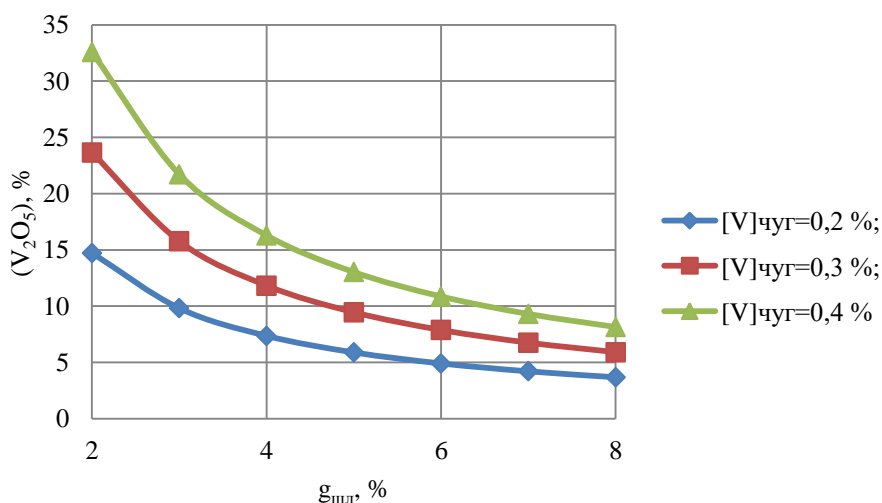


Рис. 2. Зависимость содержания оксида ванадия в шлаке  $(\text{V}_2\text{O}_5)_k$  от количества шлака  $g_{\text{шл}}$  и концентрации ванадия в чугунае  $[\text{V}]_{\text{чуг}}$

Таблица 5

Химический состав ванадиевого шлака после лабораторной деванадации

Массовая доля, %											
Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	MoO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
31,2	21,6	13,7	4,02	4,21	3,58	2,88	2,26	0,57	0,46	0,17	0,07

Таблица 6

Химический состав полупродукта после деванадации

Массовая доля, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V
3,8	0,003	0,010	0,023	0,020	0,018	0,065	0,016	0,002	0,001	0,017

После этого весь опытный ванадиевый шлак объединили, усредненное содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  в нем составило 8,76%. Затем методом кислотного выщелачивания, идентичным технологии, реализуемой на ПАО «Ванадий» (г. Тула) [19, 20], была получена техническая пятиокись ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5 = 90,16\%$ ).

**Заключение**

По результатам проведенных исследований была отработана технология выплавки чугуна из агломерата, полученного из концентрата Суоямского месторождения, и последующей его деванадации с получением двух продуктов: передельного чугуна и ванадиевого шлака.

Получены количественные характеристики конвертерного процесса деванадации, были приведены зависимости основного показателя эффективности деванадации – содержания оксида ванадия в шлаке от таких параметров, как концентрация ванадия в чугуне и количество шлака.

Установлено, что при выплавке чугуна обеспечивается содержание ванадия в нем не менее 0,22%. Это позволяет получить ванадиевый шлак, содержащий до 12% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Из такого шлака методом кислотного выщелачивания может быть получена техническая пятиокись ванадия с содержанием V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> более 90%.

Полученные результаты могут служить убедительным подтверждением целесообразности вовлечения титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения в промышленную переработку.

### Список литературы

1. Ростокер У. *Металлургия ванадия*: пер. с англ. / под ред. Е.М. Савицкого. М., 1959. 194 с.
2. Ефимов Ю.В., Барон В.В., Савицкий Е.М. *Ванадий и его сплавы*. М.: Наука, 1969. 254 с.
3. *Ванадий в черной металлургии* / Н.П. Лякишев, Н.П. Слотвинский Сидак, Ю.Л. Плинер и др. М.: Металлургия, 1983. 192 с.
4. Garcia-Mateo C., Morales-Rivas L., Caballero F.G., Milbourn D., Sourmail T. Vanadium effect on a medium carbon forging steel // *Metals*. 2016. Т. 6. № 6. С. 130.
5. Pham M.K., Nguyen D.N., Hoang A.T. Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel // *International Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*. 2018. Т. 18. № 2. С. 141-147.
6. Gwon H., Kim J.-K., Shin S., Cho L., De Cooman B.C. The effect of vanadium micro-alloying on the microstructure and the tensile behavior of twip steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Т. 696. С. 416-428.
7. Sourmail T., Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Cazottes S., Epicier T., Danoix F., Milbourn D. The influence of vanadium on ferrite and bainite formation in a medium carbon steel // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2017. Т. 48. № 9. С. 3985-3996.
8. Chen S.Y., Chu M.S. A New process for the recovery of iron, vanadium, and titanium from vanadium titanomagnetite // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. Т. 114. № 6. С. 481-487.
9. Chen D., Zhao H., Hu G., Qi T., Yu H., Zhang G., Wang L., Wang W. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Т. 294. С. 35-40.
10. Zhang Y.M., Wang L.N., Chen D.S., Wang W.J., Liu Y.H., Zhao H.X., Qi T. A Method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium bearing titanomagnetite // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Т. 25. № 2. С. 131-144.
11. Gilligan R., Nikoloski A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources // *Minerals Engineering*. 2020. Т. 146. С. 106.
12. Zhao L., Wang L., Qi T., Chen D., Zhao H., Liu Y. A novel method of extract iron, titanium, vanadium, and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates // *Hydrometallurgy*. 2014. Т. 149. С. 106-109.
13. Chen D., Zhao L., Liu Y., Qi T., Wang J., Wang L. A novel process for recovery of iron, titanium, and vanadium from titanomagnetite concentrates naoh molten salt roasting and water leaching process // *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Т. 244-245. С. 588-595.
14. Аликберов В.М., Ходина М.А., Чеботарева О.С. Состояние проблемы освоения и пути развития сырьевой базы черных металлов // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017. № 4. С. 4-10.
15. Быховский Л.З., Пахомов Ф.П., Турлова М.А. Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России – крупная минерально-сырьевая база черной металлургии // *Разведка и охрана недр*. 2007. № 6. С. 20-23.
16. Минерально-сырьевая база черных и легирующих металлов в России / Е.В. Ершова, Е.В. Зублюк, О.А. Криштопа, А.М. Лаптева, Л.И. Ремизова, А.В. Руднев // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 9. С. 88-95.
17. Бигеев А.М., Колесников Ю.А. Основы математического описания и расчета кислородно-конвертерных процессов. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
18. Бигеев В.А, Носов С.К. Новые процессы производства и использования ванадиевых шлаков: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 106 с.
19. Фофанов А.А., Новоселов А.М., Сухов Л.Л. Производство ванадиевой продукции в ОАО «Ванадий-Тула» // *Металлург*. 2005. № S1. С. 47-50.
20. Пат. 2677197 Российская Федерация, МПК C22C 33/04. Способ получения феррованадия / Шаповалов А.С., Полищук А.В., Черных Д.П., Ильинских А.А., Талдыкин М.Н.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «ЕВРАЗ Ванадий Тула» – № 2018112344; заявл. 05.04.2019; опубл. 15.01.2019, Бюл. № 2. 12 с.

**Сведения об авторах**

**Бигеев Вахит Абдрашитович** – 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: [v.bigeev11@ya.ru](mailto:v.bigeev11@ya.ru)

**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», Магнитогорск, Россия. E-mail: [as.mgtu@mail.ru](mailto:as.mgtu@mail.ru)

**Потапова Марина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [marina\\_potapova8@mail.ru](mailto:marina_potapova8@mail.ru)

**Закуцкая Любовь Анатольевна** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [zakutskayalyuba@gmail.com](mailto:zakutskayalyuba@gmail.com)

**Щелоков Николай Сергеевич** – магистр кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [mr.ekman@mail.ru](mailto:mr.ekman@mail.ru)

**Потапов Иван Михайлович** – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [potapivan14@gmail.com](mailto:potapivan14@gmail.com)

**Посохин Михаил Андреевич** – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [posohinmichael@yandex.ru](mailto:posohinmichael@yandex.ru)

**Киричко Алексей Денисович** – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [kirichko.alexei@yandex.ru](mailto:kirichko.alexei@yandex.ru)

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**DEVELOPMENT OF DEVANADATION TECHNOLOGY FOR IRON PRODUCED FROM SUROYAMSK DEPOSIT TITANOMAGNETITE ORES**

**Bigeev Vakhit A.** – Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [v.bigeev11@yandex.ru](mailto:v.bigeev11@yandex.ru)

**Kharchenko Alexander S.** – Head of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [as.mgtu@mail.ru](mailto:as.mgtu@mail.ru)

**Potapova Marina V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: [marina\\_potapova8@mail.ru](mailto:marina_potapova8@mail.ru)

**Zakutskaya Lyubov A.** – postgraduate student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: [zakutskayalyuba@gmail.com](mailto:zakutskayalyuba@gmail.com)

**Shchelokov Nikolay S.** – master degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: [mr.ekman@mail.ru](mailto:mr.ekman@mail.ru)

**Posokhin Mikhail A.** – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: [posohinmichael@yandex.ru](mailto:posohinmichael@yandex.ru)

**Potapov Ivan M.** – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: [potapivan14@gmail.com](mailto:potapivan14@gmail.com)

**Kirichko Alesey D.** – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: [kirichko.alexei@yandex.ru](mailto:kirichko.alexei@yandex.ru)

**Abstract.** The explored reserves of titanomagnetite ores at the Suroyamskoe deposit in the Chelyabinsk are equaled to 11 billion tons. For their extraction and processing, it is important to build a new metallurgical enterprise. The most promising scheme for obtaining metal is the traditional technology, consisting of the following stages: mining ore, its dressing, production of sinter and pellets from concentrates, smelting vanadium iron in blast furnaces and producing steel in an oxygen converter. Previously, to establish the basic technological parameters of the new production in laboratory conditions at Nosov Magnitogorsk State Technical University the processes of smelting vanadium iron from titanomagnetite sinter was studied. In this work, the process of devanadation of this iron was studied to obtain vanadium slag, suitable for the production of ferrovanadium. The technology of devanadation was developed to produce two products – iron and vanadium slag. It was found in the work that in the course of vanadium iron smelting it is necessary to obtain vanadium concentration at least 0.22%. The dependences of the main indicator of the efficiency of devanadation – the content of vanadium oxide in the slag on the concentration of vanadium in the cast iron and the amount of slag – were found. The fundamental possibility of carrying out devanadation of experimental Suroyamsky iron to produce vanadium slag containing up to 12%  $V_2O_5$  using air blast as an oxidizer has been confirmed.

**Keywords:** titanomagnetic ore, Suroyamsky deposits, sinter, chemical composition, iron, devanadation, vanadium slag.

---

Ссылка на статью:

Разработка технологии деванадации чугуна, полученного из титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения / В.А. Бигеев, А.С. Харченко, М.В. Потапова, Л.А. Закуцкая, Н.С. Щелоков, М.А. Посохин, И.М. Потапов, А.Д. Киричко // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 19-24.

Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Shchelokov N.S., Posokhin M.A., Potapov I.M., Kirichko A.D. Development of devanadation technology for iron produced from Suroyamsk deposit titanomagnetite ores. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 19–24.



# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 669.15 – 194.56 : [621.744.079 : 666.76.32]

Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б., Чернов В.П., Кулаков Б.А., Дубровин В.К.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОВЫСЫХАЮЩЕЙ ПРОТИВОПРИГАРНОЙ КРАСКИ НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАННОГО АЛЮМОХРОМОВОГО КАТАЛИЗАТОРА

**Аннотация.** Современным литейным производством ставятся задачи по снижению себестоимости, повышению качества и товарного вида отливок, их точности, а также по повышению экологической безопасности производства. Решение этих задач во многом связано с разработкой новых противопригарных составов и их оптимизации с помощью методов планирования эксперимента. В данной статье приведены результаты исследования с применением полного факторного эксперимента  $2^3$  для оптимизации свойств и компонентного состава противопригарной краски на основе огнеупорного наполнителя алюмохромового порошка, связующего – поливинилбутирала в комбинации с модифицированной фенолоформальдегидной смолой марки СФПР–050 и растворителя – изопропилового спирта. В ходе проведения экспериментов были получены математические зависимости вязкости, плотности, толщины красочного слоя и прочности от количества огнеупорного наполнителя алюмохромового порошка, связующего поливинилбутирала и фенолоформальдегидной смолы. На основании полученных уравнений выбраны оптимальные соотношения между связующим и наполнителем, которые были использованы при замешивании краски, обеспечивающие наилучшие технологические свойства покрытия. Полученные математические зависимости являются эффективным аппаратом оперативного регулирования составов краски в условиях нестабильности свойств используемых материалов и вариации параметров технологического процесса. Практическое использование результатов исследований позволит получать преимущественно реальный экономический эффект не только за счет снижения себестоимости литейной краски в сравнении с цирконовой, но и повышения качества поверхности отливок, снижения затрат на отделение пригара от отливок.

**Ключевые слова:** противопригарная краска, самовысыхающие покрытия, алюмохромовый наполнитель, метод математического планирования, вязкость, прочность

В последние годы при производстве отливок более широко применяются технологии изготовления стержней и форм из холоднотвердеющих смесей (ХТС-процесс), покрытие которых осуществляют самовысыхающими (неводными) противопригарными красками (ПК). Из-за большого числа применяемых органических растворителей, связующих и стабилизирующих веществ составы неводных красок более разнообразны, по сравнению с водными. Среди всего многообразия составов широкое применение находят цирконовые краски. Их используют, когда необходима высокая термозащита и чистота поверхности отливок из чугуна и стали [1].

Неводные ПК представляют собой суспензию, включающую огнеупорный наполнитель (основу), связующее, суспензирующее вещество и органический растворитель, обеспечивающие получение системы с заданными технологическими свойствами.

Применяемые в настоящее время неводные противопригарные цирконовые покрытия, в том числе на ООО «МРК» ЛК-22Ц (ТУ 2223-003-81482096-2017), имеют сравнительно высокие технологические и эксплуатационные свойства, обеспечивают высокое ка-

чество литья, но для приготовления данных составов необходим дефицитный и дорогостоящий цирконовый концентрат, закупаемый в других странах. В связи с изменением логистических цепочек поставки его в нашу страну связаны с высокими транспортными расходами. Кроме того, он радиоактивен и, как следствие, является экологически небезопасным [2].

В связи с этим разрабатываются новые составы, которые будут способны заместить существующие и расширить ассортимент литейных красок. Поэтому поиск новых, дешевых и недефицитных наполнителей, в том числе и отходов производств техногенного происхождения, является одним из основных условий в достижении повышения качества и снижения себестоимости отливок.

Известно [3], что на некоторых заводах нефтехимической промышленности имеются промежуточные продукты производства, которые после переработки используются в разных отраслях промышленности. Наиболее востребованным из отходов является отработанный алюмосиликатный катализатор ИМ-2201, используемый при получении синтетического каучука [4–9].

По составу отработанные катализаторы имеют практически постоянный состав с содержанием хрома в виде оксида, в основном от 16 до 20%. Помимо ок-

© Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б., Чернов В.П., Кулаков Б.А., Дубровин В.К., 2023

сида хрома в составе имеются оксид алюминия, примерно 70–75%, возможно содержание оксида кремния (12–13%) и незначительное количество других оксидов, в основном щелочных и щелочноземельных металлов. Продукт обладает высокой огнеупорностью, нерадиоактивен, не горюч, не токсичен, с неограниченным сроком хранения, прошел экологическую экспертизу, не дефицитен и рекомендован к использованию в качестве мелкодисперсного огнеупорного наполнителя в противопопригарных красках [10–12].

Компонентный состав красок определяет технологические свойства противопопригарных покрытий и их дальнейшую область применения. Большинство самовысыхающих противопопригарных покрытий, в том числе и на основе алюмохромового наполнителя [13, 14], обладают невысокой термостойкостью, в связи с этим их применяют для покрытия форм и стержней, испытывающих при заливке металла небольшие термические нагрузки, то есть для получения мелких и средних отливок, преимущественно из чугуна и цветных металлов. Поскольку применяемые органические связующие разлагаются при нагреве в интервале температур 200–450°C, то для повышения термостойкости покрытий используют связующие в сочетании с другими более стойкими добавками, например кремнийорганическими лаками, древесным пекем, фенолоформальдегидными смолами и др.

Исходя из анализа литературных данных и результатов собственных исследований, были выбраны для разрабатываемого неводного противопопригарного покрытия в качестве огнеупорного наполнителя алюмохромовый порошок, связующего – поливинилбутираль в комбинации с модифицированной фенолоформальдегидной смолой марки СФПР–050 и растворителя – изопропиловый спирт.

При разработке состава необходимо учитывать взаимное влияние компонентов краски и их соотношение на свойства покрытия. Соотношение огнеупорного наполнителя и связующего материала с растворителем (лаком) оказывает решающее воздействие на такие технологические свойства покрытий, как седиментация, прочность, проникающая и кроющая способность и т.д. [14]. Поэтому приготовление наиболее эффективных покрытий требует оптимизации компонентного состава.

В настоящее время в экспериментальных исследованиях широко применяются методы планирования эксперимента [15–18], в связи с тем, что традиционные методы исследований требуют больших затрат сил и средств, так как основаны на поочередном варьировании отдельных независимых переменных в условиях, когда остальные переменные остаются постоянными. Кроме того, сложность такого эксперимента определяется числом всевозможных комбинаций значений переменных (факторов).

Целью данной работы является разработка состава неводной ПК на основе алюмохромового наполнителя методом математического планирования,

позволяющим сократить время разработки и получить продукт высокого качества.

С целью подбора оптимального количества между связующим и наполнителем осуществлялось планирование эксперимента для диаграмм состав–свойство. В данной работе рассмотрена методика полного факторного эксперимента 2<sup>3</sup>. Данным методом изучали влияние количества наполнителя и связующего полимера на технологические свойства неводной краски. Существенное влияние на эффективность применения ПК при производстве отливок оказывают рабочие свойства красок. Из них наиболее значимыми являются толщина высушенного слоя, определяющая противопопригарные свойства покрытия, и его прочность. Важную роль в образовании красочного слоя (КС) равномерной толщины оказывают условная вязкость (далее вязкость) и плотность ПК, которые тесно взаимосвязаны.

В ходе эксперимента варьировались три переменных фактора: количество алюмохромового наполнителя – X<sub>1</sub>; количество связующих фенолоформальдегидной смолы – X<sub>2</sub> и поливинилбутирала – X<sub>3</sub>.

В качестве функции отклика были выбраны следующие параметры (табл. 1), которые являются наиболее информативными, объективно характеризующими качество и технологические свойства противопопригарной краски (покрытия) и не требующими длительных и трудоемких испытаний.

Таблица 1

Параметры оптимизации и их граничные значения

Код параметра оптимизации	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Граничное значение функции отклика
Y <sub>1</sub>	Вязкость условная по вискозиметру ВЗ-246 (сопло диаметром 4 мм), при (20 ± 0,5)	°С	Не менее 16, Не более 25
Y <sub>2</sub>	Плотность (20 ± 0,2)	г/см <sup>3</sup>	Не менее 1,6
Y <sub>3</sub>	Толщина окрашенного слоя	мм	Не менее 0,5
Y <sub>4</sub>	Прочность покрытия к истиранию	кг/мм	Не менее 2,5

Основной уровень и интервал варьирования по каждому переменному фактору, верхний и нижний уровень в натуральных и кодированных обозначениях приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни планирования эксперимента

Уровень варьирования	Переменные факторы		
	(X <sub>1</sub> ) ОАК	(X <sub>2</sub> ) ФФС	(X <sub>3</sub> ) ПВБ
Основной (X <sub>0</sub> )	50	1,5	1
Интервал варьирования (ΔX <sub>i</sub> )	5	0,5	0,2
Верхний (x <sub>i</sub> = + 1)	55	2,0	1,2
Нижний (x <sub>i</sub> = - 1)	45	1,0	0,8

Исследуемые составы и план эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

План экспериментов  $2^3$  в кодовом и натуральном масштабах и результаты экспериментов

Номер опыта	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			Функция отклика			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
1	-	-	-	45	1	0,8	14,1	1,22	0,41	2,030
2	+	-	-	55	1	0,8	14,7	1,40	0,52	2,118
3	-	+	-	45	2	0,8	15,2	1,31	0,44	2,394
4	+	+	-	55	2	0,8	15,8	1,48	0,61	2,489
5	-	-	+	45	1	1,2	17,1	1,30	0,49	2,509
6	+	-	+	55	1	1,2	17,9	1,45	0,67	2,638
7	-	+	+	45	2	1,2	19,0	1,37	0,55	2,817
8	+	+	+	55	2	1,2	20,2	1,60	0,80	2,984

В результате обработки экспериментальных данных [19] были созданы математические модели в виде уравнения, связывающего параметры оптимизации: вязкости (1), плотности (2), толщины окрашенного слоя (3) и прочности (4) с переменными факторами в кодированных значениях (1)–(4) и в натуральных (5)–(8).

$$Y_1 = 16,75 + 0,40x_1 + 0,80x_2 + 1,80x_3 + 0,25x_2x_3, \quad (1)$$

$$Y_2 = 1,391 + 0,091x_1 + 0,049x_2 + 0,039x_3, \quad (2)$$

$$Y_3 = 0,561 + 0,089x_1 + 0,039x_2 + 0,066x_3 + 0,016x_1x_2 + 0,019x_2x_3, \quad (3)$$

$$Y_4 = 2,497 + 0,060x_1 + 0,174x_2 + 0,240x_3. \quad (4)$$

$$y_1 = 5,1 + 0,08X_1 - 0,9X_2 + 5,25X_3 + 2,5X_2X_3, \quad (5)$$

$$y_2 = 0,139 + 0,0182X_1 + 0,098X_2 + 0,195X_3, \quad (6)$$

$$y_3 = 0,654 - 0,0108X_1 - 0,242X_2 - 0,62X_3 + 0,0064X_1X_2 + 0,019X_1X_3, \quad (7)$$

$$y_4 = 0,175 + 0,012X_1 + 0,348X_2 + 1,2X_3, \quad (8)$$

Для проверки адекватностей полученных моделей в кодированном виде воспользовались  $F$ -критерием. Результаты рассчитанных и табличных значений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сопоставление расчетных и табличных значений  $F$ -критерия

	$F^{расч}$	$F^{табл}$
Вязкость	1,19	3,29
Плотность	1,45	3,06
Толщина окрашенного слоя	1,09	3,68
Прочность покрытия	0,42	3,06

Из табл. 4 видно, что для всех технологических свойств, выбранных в качестве параметров оптимизации, выполняется условие  $F^{расч} < F^{табл}$ . Таким образом, гипотеза об адекватности моделей не отвергается для всех полученных уравнений.

По полученным уравнениям (5)–(8) и в соответствии с принятыми граничными значениями функций отклика определен оптимальный диапазон концентраций компонентов краски, представленный в табл. 5.

Таблица 5

Компонентный состав новой самовысыхающей противопопригарной краски

Наименование компонентов	Количество компонентов, мас. %
Отходы алюмохромового порошка	45-55
Поливинилбутираль	0,9-1,2
Фенолоформальдегидная смола СФПР-050	1,0-2,0
Изопропиловый спирт	Остальное до 100 % и необходимой плотности

Таким образом, в результате проведенных работ методом математического планирования эксперимента определен оптимальный состав неводной противопопригарной краски на основе алюмохромового порошка с заданными технологическими свойствами. При этом уменьшается стоимость литейной краски за счет низкой стоимости алюмохромового порошка, являющегося отходом нефтехимической промышленности при производстве катализаторов дегидрирования углеводородов.

Проведённые испытания «горячие испытания» краски в литейной лаборатории показали, что её применение обеспечивает получение поверхности отливки высокой чистоты, а также отсутствие пригара. Кроме того, не возникло проблем с нанесением слоя краски на поверхность литейной формы. В процессе окрашивания рабочей поверхности формы краска ложилась ровным слоем, после высушивания методом поджигания не обнаружено растрескивание окрашенного слоя.

### Список литературы

1. Белобров Е.А. Цирконовые противопопригарные краски // Информационно-технический бюллетень «Литье Украины». 2013. № 12 (160) с. 37-41.
2. Кукуй Д.М., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси: учебное пособие. Мн.: БНТУ, 2005. 361 с.
3. Получение эффективных огнеупорных футеровочных материалов на основе отходов производства / А.И. Хлыстов, А.В. Божко, С.В. Соколова, Р.Т. Рязов // Успехи современного естествознания. 2004. № 2. С. 131-133.
4. Козловская И.Ю., Марцунь В.Н. Кислотное выщелачивание редкоземельных элементов из отработанного катализатора крекинга углеводородов

- нефти // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорганических веществ. 2011. Вып. XIX. С. 75-78.
5. Казакова Ю.М., Хусаинова Р.М., Вольфсон С.И. Катализаторы дегидрирования в качестве наполнителя резиновых смесей // Каучук и резина. 2008. № 4. С. 30-32.
  6. Хусаинова Р.М., Дорожкин В.П. Способы утилизации отработанных промышленных катализаторов // Отходы производства и потребления: проблемы, методы, решения: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. Пенза, 1995. С. 53.
  7. Вилшкерст Я.Я. Огнеупорные клеи на основе отработанного алюмохромового катализатора и фосфатных связующих: автореф. ... канд. техн. наук. Рига, 1988. 24 с.
  8. Физико-механические свойства керамики на основе легкоплавкой глины, модифицированной отходами производства алюмохромового катализатора / А.Ф. Хузин, А.А. Ламберов, С.Р. Егорова, О.В. Стоянов, М.Г. Габидуллин // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, № 16. С. 89-91.
  9. Петров И.Я., Трясунов Б.Г. Структура и фазовый состав окисленных ванадийтитановых и ванадийциркониевых катализаторов // Вести КузГТУ. 2007. № 4. С. 50-57.
  10. Пат. 2722845 Российская Федерация, МПК С1 Противопригарная краска для литейных форм и стержней / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» – № 2019138298; заявл. 27.11.2019; опубл. 04.06.2020. Бюл. № 16.
  11. Применение техногенных отходов в качестве наполнителя противопригарных красок / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // Литейное производство. 2019. № 3. С. 22-25.
  12. Пат. 2689473 Российская Федерация, МПК С1 В22С 3/00 Противопригарное покрытие для литейных форм и стержней / Е.Г. Антошкина; патентообладатель Е.Г. Антошкина № 2018136196; заявл. 12.10.2018; опубл. 28.05.2019. Бюл. № 16.
  13. Баранов О.Г. Исследование и разработка противопригарных покрытий на модифицированном жидкостекольном связующем: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1996. 187 с.
  14. Головня А.А. Применение материала техногенного происхождения для повышения качества отливок и ресурсосбережения в литейном производстве: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2002. 127 с.
  15. Ординарцева Н.П. Планирование эксперимента в измерениях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 03 (79). 2013. С. 72-76.
  16. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
  17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
  18. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
  19. Титов А.Ю. Повышение качества художественных отливок, изготавливаемых в формы из холоднотвердеющих смесей, за счет устранения пригара и увеличения жидкотекучести медных сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 123 с.

#### Сведения об авторах

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

**Пивоварова Ксения Григорьевна** – профессор кафедры технологий обработки материалов, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Понамарева Татьяна Борисовна** – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Чернов Виктор Петрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения Института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [tchernov@magtu.ru](mailto:tchernov@magtu.ru)

**Кулаков Борис Алексеевич** – профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий, доктор технических наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия. E-mail: [kulakovba@susu.ru](mailto:kulakovba@susu.ru)

**Дубровин Виталий Константинович** – доцент кафедры пирометаллургических и литейных технологий, доктор технических наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия. E-mail: [dubrovinvk@susu.ru](mailto:dubrovinvk@susu.ru)

## OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF SELF-DRYING NON-STICK PAINT BASED ON SPENT ALUMOCHROME CATALYST

**Feoktistov Nikolai A.** – PhD (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.ru)

**Pivovarova Ksenia G.** – D. Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Ponamareva Tatyana B.** – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Chernov Viktor P.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the department of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [tchernov@magtu.ru](mailto:tchernov@magtu.ru)

**Kulakov Boris A.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chelyabinsk, Russia. E-mail: [kulakovba@susu.ru](mailto:kulakovba@susu.ru)

**Dubrovin Vitaly K.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chelyabinsk, Russia. E-mail: [dubrovinvk@susu.ru](mailto:dubrovinvk@susu.ru)

**Abstract.** Modern foundry production sets tasks to reduce the cost, improve the quality and presentation of castings, their accuracy, as well as to improve the environmental safety of production. The solution of these problems is largely connected with the development of new non-stick formulations and their optimization using experimental planning methods. This article presents the results of a study using a complete factor experiment 2<sup>3</sup> to optimize the properties and component composition of a non-stick paint based on a refractory filler of alumochrome powder, a binder – polyvinyl butyral in combination with a modified phenol-formaldehyde resin of the SFPR-050 brand and a solvent – isopropyl alcohol. During the experiments, mathematical dependences of viscosity, density, thickness of the paint layer and strength on the amount of refractory filler alumochrome powder, polyvinyl butyral binder and phenol-formaldehyde resin were obtained. Based on the obtained equations, the optimal ratios between the binder and the filler were selected, which were used when mixing the paint, providing the best technological properties of the coating. The obtained mathematical dependences are an effective apparatus for the operational regulation of paint compositions in conditions of instability of the properties of the materials used and variations in the parameters of the technological process. The practical use of the research results will allow the company to obtain a real economic effect not only by reducing the cost of casting paint in comparison with zirconium, but also by improving the surface quality of castings, reducing the cost of separating the prig from castings.

**Keywords:** non-stick paint, self-drying coatings, alumochrome filler, mathematical planning method, viscosity, strength.

---

Ссылка на статью:

Оптимизация состава самовысыхающей противопригарной краски на основе отработанного алюмохромового катализатора / Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева, В.П. Чернов, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 25-29.

Feoktistov N.A., Pivovarova K.G., Ponamareva T.B., Chernov V.P., Kulakov B.A., Dubrovin V.K. Optimization of the composition of self-drying non-stick paint based on spent alumochrome catalyst. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 25–29.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М., Новикова Т.А., Гун И.Г., Рамазанов К.Н., Федосеев С.А.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОЛЁСНЫХ БОЛТОВ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

**Аннотация.** Производство крепежных изделий из специальных легированных сталей является насущной потребностью для российских автомобилестроительных компаний. В ОАО «ММК-Метиз» реализована комплексная программа изготовления высокопрочных крепежных изделий методами холодной объемной штамповки (ХОШ). Целью работы является разработка технологии производства высокопрочного автомобильного крепежа из экономлегированных марок стали 32CrV4, 36MnV4, 42CrMo4. При проведении исследования использовали методы световой, сканирующей электронной микроскопии. На промышленных образцах круглого проката исследованы формирование и эволюция структурного состояния горячекатаного проката в процессе сфероидизирующего отжига. В ходе лабораторного анализа установлена возможность получения сфероидизированной ферритно-перлитной структуры металлопроката. Результаты исследования внедрены при производстве опытных партий колесных болтов M16×125, M16×135, M22×85. Проведенные испытания подтвердили достижение требуемого уровня механических свойств по классам прочности 10.9 и 12.9. При анализе полученных данных был сделан вывод о необходимости формирования свойств болтов не только при помощи термической обработки, но и с помощью пластической деформации. Предложено изготавливать болты с накаткой резьбы после проведения термической обработки. Полученные результаты могут использоваться для промышленного производства автомобильного крепежа, востребованного на российском рынке.

**Ключевые слова:** сталь 32CrV4, сталь 36MnV4, сталь 42CrMo4, круглый прокат, сфероидизирующий отжиг, микроструктура, глобулярный перлит, закалка и отпуск, высокопрочные крепежные изделия

### Введение

Высокопрочные крепежные изделия находят широкое применение в машиностроении, строительстве, многих других отраслях техники и промышленности [1,2]. Количество крепежных изделий (болтов, винтов, шпилек, гаек, шайб и т.п.) в современном автомобиле составляет до 60% от общей номенклатуры деталей и 2–3% от его веса.

Однако производство высокопрочных крепежных изделий в РФ составляет не более 20% от общего объема, в то время как в экономически развитых странах мира этот показатель составляет 90-95% [1]. Имеет место тенденция дальнейшего снижения объема производства высокопрочных крепежных изделий из-за увеличения объема их поступления из Китая и других стран Юго-Восточной Азии. Поэтому расширение производства и применение крепежных изделий повышенной прочности является актуальной задачей отечественной промышленности.

При разработке конкурентоспособных технологий холодной объемной штамповки (ХОШ) возможны следующие резервы повышения качества металлопродукции на всех стадиях технологического процесса:

- разработка новых марок стали;
- оптимизация структуры металла, технологии его обработки;
- использование новых прогрессивных смазочных материалов и способов подготовки поверхности проката перед высадкой.

Внедрение этих мероприятий позволит снизить нагрузки на инструмент и даст возможность существенного усложнения геометрии деталей. Важным звеном создания ресурсосберегающих технологий ХОШ является структурный подход при подготовке материала, обеспечивающий гибкое управление его свойствами за счет изменения дисперсности зерна, количества и морфологии фазовых составляющих.

Высокопрочные крепежные изделия изготавливаются из калиброванного проката из специальных легированных сталей. Обычно используются стали, содержащие хром, марганец, молибден, бор и другие элементы. Легирующие элементы позволяют значительно повысить эксплуатационные свойства автомобильного крепежа: прочность, твердость, износостойчивость, прокаливаемость и коррозионную стойкость [3].

Металлопрокат, используемый для производства высокопрочных крепежных изделий, должен обладать высоким и стабильным комплексом трудно сочетаемых показателей прочности, пластичности, коррозионной стойкости, качественных характеристик, оптимальной структурой. Он должен выдерживать холодную осадку до 1/3 исходной высоты образца без возникновения трещин и других дефектов. Для этого необходимо низкое содержание примесей, неметаллических включений, особенно в приповерхностной зоне, где они могут являться концентраторами напряжений и приводить к образованию трещин и неблагоприятного структурного состояния стали [4].

В рамках комплексной программы по обеспечению высокопрочными крепежными изделиями ПАО «Камаз» проводилось освоение технологии изготовления колесных болтов в условиях ОАО «ММК-

Метиз» [5]. Была поставлена задача разработки технологии производства крепежа из стали марок 32CrB4, 36MnB4 и 42CrMo4. Конечной целью программы являлась локализация производства высокопрочного автомобильного крепежа в РФ.

#### Исследование влияния структурного состояния горячекатаного проката на формирование механических свойств проката

Одним из перспективных направлений производства высокопрочного крепежа является получение калиброванного проката с механическими и пластическими свойствами, позволяющими производить холодную высадку крепежных изделий с прочностными показателями класса прочности 10.9, 12.9. Чтобы получить оптимальные свойства калиброванного проката, нужно точно установить режим предварительной термической обработки.

Типичная микроструктура сортового проката из среднеуглеродистых специальных легированных сталей после горячей прокатки включает феррит, пластинчатый перлит, бейнит [6]. Сталь с пластинчатой морфологией перлита имеет худшую деформируемость и пластичность, более высокую прочность, чем с глобулярной морфологией цементита [7, 8].

Наиболее распространенной предварительной технологической операцией подготовки проката из среднеуглеродистых и легированных сталей перед ХОШ является сфероидизирующий отжиг в колпаковых печах продолжительностью до 40 часов и более [9]. Но даже после столь длительных выдержек в структуре встречаются участки со следами пластинчатого перлита и не всегда обеспечивается равномерность свойств по длине бунта. В связи с этим актуальной является задача технологии сфероидизирующего отжига металлопроката, обеспечивающей однородность структуры и свойств по сечению и длине проката и рациональные условия высадки сложнопрофильных деталей [10].

С целью исследования влияния структурного состояния горячекатаного проката на эффективность

протекания сфероидизирующего отжига проведены лабораторные исследования режимов термообработки специальных легированных сталей.

Для исследования был выбран горячекатаный прокат сталей марок:

- 32CrB4 (диаметром 17,0 и 21,0 мм);
- 42CrMo4 (диаметром 18,0 и 22,0 мм);
- 36MnB4 (диаметром 17,0 мм).

Металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV и оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 показали, что образцы проката стали марки 32CrB4 в исходном состоянии имеют ферритно-перлитную микроструктуру с соотношением перлита и феррита 50/50 (рис. 1, а, б).

Образцы проката стали марки 42CrMo4 диаметром 18 мм обладали бейнитной структурой (рис. 2, а), в то время как образцы диаметром 22 мм имели ферритно-перлитную структуру с соотношением перлита и феррита 90/10 (рис. 2, б).

Микроструктура горячекатаного проката стали марки 36MnB4 состояла из пластинчатого перлита 1-4 балла.

Образцы подвергались сфероидизирующему отжигу по разным режимам в лабораторной электропечи. Отожженные образцы исследовали методом визуального определения соотношения глобулярного и пластинчатого перлита по ГОСТ 8233. Травление образцов осуществляли с помощью раствора «Ниталь» (4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте).

По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что при отжиге горячекатаного проката с исходной микроструктурой – пластинчатый перлит с высокой долей феррита (25–50%) – кинетически затруднен процесс сфероидизации перлита. Получение бейнитной микроструктуры в исходном сортовом прокате позволяет повысить эффективность протекания глобулизации перлита. Это приводит к эффективной сфероидизации и, как следствие, получению относительного сужения отожженного проката не менее 70 % и хорошей способности к ХОШ.

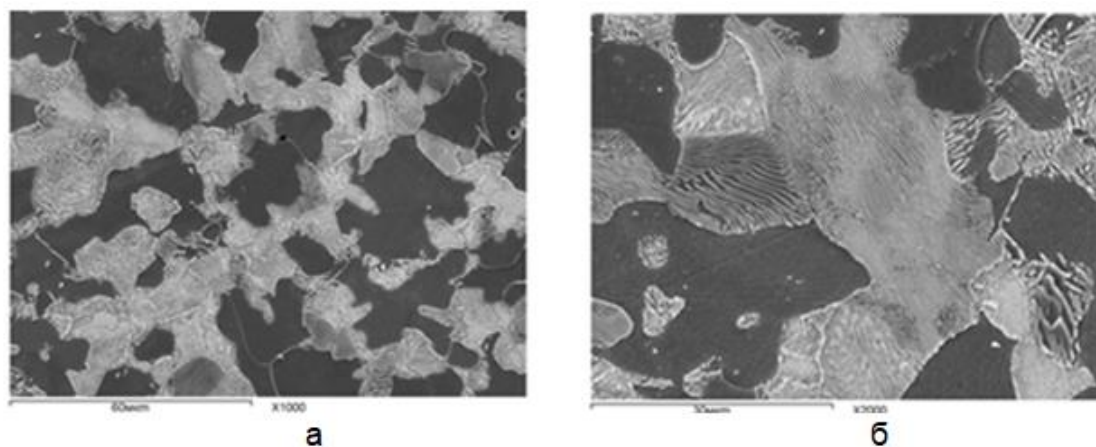


Рис. 1. Микроструктура образца проката стали марки 32CrB4: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 2000$

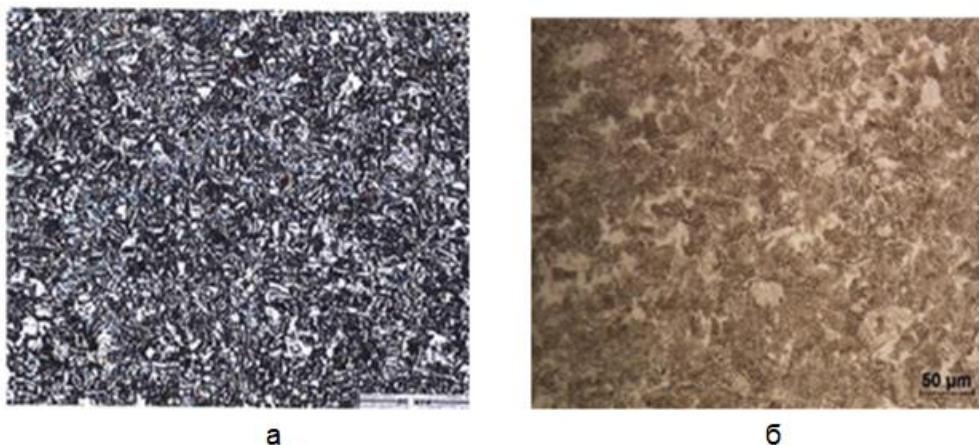


Рис. 2. Вид микроструктуры образцов проката из стали марки 42CrMo4 диаметром 18 (а –  $\times 1000$ ) и 22 мм (б –  $\times 1000$ )

### Опытно-промышленное производство колесных болтов

Производство опытных партий колесных болтов M16 $\times$ 125, M16 $\times$ 135, M22 $\times$ 85 включало в себя следующие технологические операции:

- отжиг горячекатаного проката;
- подготовка поверхности проката;
- изготовление калиброванного проката;
- штамповка заготовок болтов;
- накатка резьбы;
- термообработка крепежных изделий.

Отжиг горячекатаного проката проводился в колпаковых печах EBNER. Целью термообработки являлось формирование благоприятной для последующего деформирования микроструктуры стали с максимально возможным содержанием зернистого перлита.

При подготовке поверхности проката для дальнейших операций помимо операции травления и удаления окалины производилось нанесение фосфатного покрытия небольшой толщины, предназначенного для улучшения технологичности штамповки болтов и повышения стойкости технологического инструмента.

Штамповка болтов производилась на многопозиционных холодновысадочных автоматах и включала в себя следующие переходы:

- отрезка заготовки;
- предварительная высадка головки;
- окончательная высадка головки и формирование фаски;
- редуцирование стержня под накатку резьбы;
- обесечка облоя.

На окончательной операции производилась накатка резьбы и специального рифления на стержне болта.

Опытные образцы болтов были термообработаны в закалочно-отпускном агрегате фирмы Kohnle. Полученные результаты подтвердили достижение требуемого уровня механических свойств по классам прочности 10.9 и 12.9. На рис. 3, 4 представлены ре-

зультаты исследования микроструктуры и качества поверхности образца болта из стали 36MnB4.

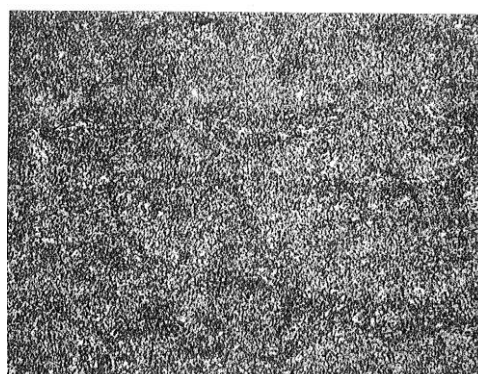


Рис. 3. Микроструктура образца болта из стали 36MnB4; сорбит отпуска,  $\times 1000$

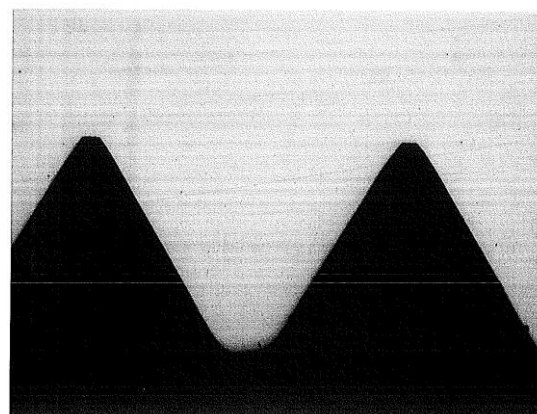


Рис. 4. Вид профиля зуба образца болта из стали 36MnB4, оптическая микроскопия,  $\times 50$

При анализе полученных данных был сделан вывод о необходимости формирования свойств болтов не только при помощи термической обработки, но и с помощью пластической деформации. Предложено изготавливать болты с накаткой резьбы после проведения термической обработки (закалка и отпуск).



Проведено компьютерное моделирование процесса накатки резьбы в программном комплексе QForm. В результате моделирования было установлено, что во впадинах резьбы после накатки образуются напряжения сжатия, а изменение напряжений в процессе деформации происходит циклично, что положительно влияет на характер напряженно-деформированного состояния изделия. При использовании общепринятой практики накатки резьбы до термической обработки напряжения по сечению болта снимаются в результате операции отпуска. Кроме того, в процессе накатки происходит вытягивание зерен в основании резьбы. Совокупность факторов затрудняет механизм образования трещин и позволяет повысить предел усталости.

В рамках дальнейших работ запланировано изготовление опытных партий болтов М22×85 из сталей 40ХН2МА и 36МnВ4, их термическая обработка и проведение накатки резьбы на закаленных образцах.

Выполненные исследования металлопроката из специальных легированных сталей 32CrВ4, 42CrМо4, 36МnВ4 подтверждают возможность производства высокопрочных крепежных изделий. Полученные результаты могут использоваться для промышленного производства автомобильного крепежа, востребованного на российском рынке.

### Выводы

В рамках комплексной программы по обеспечению высокопрочными крепежными изделиями ПАО «Камаз» проводилось освоение технологии изготовления колесных болтов в условиях ОАО «ММК-Метиз». В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлена возможность получения сфероидизированной ферритно-перлитной структуры металлопроката из сталей марок 32CrВ4, 42CrМо4, 36МnВ4.

2. Получение бейнитной структуры горячекатаного проката стали ускоряет процесс сфероидизации перлита, что приводит к получению относительного сужения отожженного проката не менее 70 % и обеспечению штампуемости.

3. Формирование свойств болтов необходимо осуществлять не только при помощи термической обработки, но и с помощью пластической деформации. Предложено изготавливать болты с накаткой резьбы после проведения термической обработки (закалка и отпуск).

### Список литературы

1. Филиппов А. А., Пачурин Г. В. Ресурсосберегающая подготовка стального проката к холодной высадке крепежных изделий // Международный жур-

нал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8 (часть 4). С. 23-29.

- Исследование закономерностей эволюции структурного состояния и свойств стали марки 42CrМо4 в процессе производства высокопрочных крепежных изделий / Канаев Д.П., Тагирова В.М., Соколов А.А., Зайцева М.В., Зайцев А.И., Колдаев А.В., Степанов А.Б., Арутюнян Н.А. // Механическое оборудование металлургических заводов. 2022. № 1(18). С. 18-36.
- Effect of composition, structural state, and manufacturing technology on service properties of high-strength Low-carbon steel main bimetal layer / A.I. Zaitsev, I.G. Rodionova, A.A. Pavlov, N.G. Shaposhnikov // Metallurgist. 2015. Vol. 59. No. 7-8. P. 684–692.
- Влияние режима температурно-деформационной обработки специальных легированных сталей на структурное состояние и свойства проката / А.В. Колдаев, А.В. Амежнов, А.И. Зайцев, А.Б. Степанов // Металлург. 2017. №10. С. 30-34.
- Столяров А.Ю., Соколов А.А. «ММК-МЕТИЗ» – новые технологические решения и развитие производства // Металлургическое оборудование механических заводов. 2022. № 1(18). С. 4-10.
- Колдаев А. В., Степанов А. Б., Зайцев А. И. Исследование закономерностей формирования структуры специальных легированных сталей для производства высокопрочных крепежных изделий методом холодной объемной штамповки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2021. № 3. С. 47-54.
- O'Brien J.M., Hosford W.F. Spheroidization cycles for medium carbon steels // Metallurgical and Materials Transactions A. 33, 1255-1261 (2002). doi:10.1007/s11661-002-0226-y.
- Гуль Ю.П., Соболенко М.А., Ивченко А.В. Комплексная интенсификация сфероидизирующего отжига низкоуглеродистых сталей для холодной высадки // Сталь. 2012. № 6. С. 44-47.
- Говоров В. А., Лавриненко В. Ю. Инновационная технология изготовления высокопрочных крепежных деталей из двухфазных сталей с учетом деформационного упрочнения // Инновационные технологии реновации в машиностроении: сб. тр. Международной научно-технической конференции / под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. М.: Московский государственный областной университет, 2019. С. 163-165.
- Зайцев А.И., Колдаев А.В., Степанов А.Б. Влияние состава и режима термообработки на структурное состояние, способность к холодной осадке круглого проката из специальных легированных сталей // Металлург. 2017. № 7. С. 66-71.

### Сведения об авторах

**Пивоварова Ксения Григорьевна** – профессор кафедры технологий обработки материалов, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

**Тагирова Венера Марсовна** – ведущий специалист технологического центра ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия; аспирант гр. ММСа-23-1, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Новикова Татьяна Анатольевна** – начальник лаборатории механических испытаний ЦКП ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия; магистрант гр. ММИТм-22-1, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Гун Игорь Геннадьевич** – профессор, доктор технических наук, директор АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия. E-mail: [tssa@mail.ru](mailto:tssa@mail.ru).

**Рамазанов Камиль Нуруллаевич** – заведующий кафедрой технологии машиностроения, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия. E-mail: [kaftm@ugatu.su](mailto:kaftm@ugatu.su).

**Федосеев Сергей Анатольевич** – профессор, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE PRODUCTION OF HIGH-STRENGTH WHEEL BOLTS FROM SPECIAL ALLOY STEELS

**Pivovarova Kseniya G.** – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: [k.pivovarova@magtu.ru](mailto:k.pivovarova@magtu.ru).

**Tagirova Venera M.** – Leading specialist OJSC «Magnitogorsk hardware and sizing plant «ММК-METIZ», Magnitogorsk, Russia; graduate student gr. MMSa-23-1 Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Novikova Tatiana A.** – Head of the Laboratory of Mechanical Tests OJSC «Magnitogorsk hardware and sizing plant «ММК-METIZ», Magnitogorsk, Russia; master's student gr. MMITm-22-1 Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Gun Igor G.** – DrSc (Eng.), Professor, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [tssa@mail.ru](mailto:tssa@mail.ru).

**Ramazanov Kamil N.** – DrSc (Eng.), Ufa, Russia. E-mail: [kaftm@ugatu.su](mailto:kaftm@ugatu.su).

**Fedoseev Sergey A.** – DrSc (Eng.), Professor, Perm, Russia.

**Abstract.** The production of fasteners from special alloy steels is an urgent need for Russian automotive companies. ММК-METIZ has implemented a comprehensive program for the production of high-strength fasteners using cold die forging (CDD) methods. The goal of the work is to develop a technology for the production of high-strength automotive fasteners from low-alloy steel grades 32CrB4, 36MnB4, 42CrMo4. When conducting the study, methods of light and scanning electron microscopy were used. The formation and evolution of the structural state of hot-rolled steel during the process of spheroidizing annealing was studied using industrial samples of round steel. During laboratory analysis, the possibility of obtaining a spheroidized ferrite-pearlite structure of rolled metal was established. The results of the study were implemented in the production of pilot batches of wheel bolts M16x125, M16x135, M22x85. The tests carried out confirmed the achievement of the required level of mechanical properties for strength classes 10.9 and 12.9. When analyzing the data obtained, it was concluded that it is necessary to form the properties of bolts not only through heat treatment, but also through plastic deformation. It is proposed to produce bolts with thread rolling after heat treatment. The results obtained can be used for the industrial production of automotive fasteners, which are in demand on the Russian market.

**Keywords:** 32CrB4 steel, 36MnB4 steel, 42CrMo4 steel, round bars, spheroidizing annealing, microstructure, globular pearlite, quenching and tempering, high-strength fasteners.

---

Ссылка на статью:

Технологические аспекты производства высокопрочных колёсных болтов из специальных легированных сталей / К.Г. Пивоварова, В.М. Тагирова, Т.А. Новикова, И.Г. Гун, К.Н. Рамазанов, С.А. Федосеев // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 30-34. Pivovarova K.G., Tagirova V.M., Novikova T.A., Gun I.G., Ramazanov K.N., Fedoseev S.A. Technological aspects of the production of high-strength wheel bolts from special alloy steels. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 30-34.

---

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 литературы

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

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

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

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

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