

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 4 (55) 2025**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Главный редактор:**

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

### **Научный редактор:**

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

### **Технический редактор:**

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

*К.И. Рудь*

### **Дизайнер:**

*Е.О. Харченко*

## **© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2025**

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 25.12.2025. Заказ 385. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 4 (55) 2025**

---

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”, 2025**

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 25.12.2025. Order 385. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Кощкаров А.А. <b>БАЛАНС КИСЛОРОДА ПРИ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИИ В RH-ВАКУМАТОРЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>9</b>
Саубанов М.Н. <b>ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КАЧЕСТВО ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ.....</b>	<b>9</b>
Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Юмбаев А.А., Чернов В.П., Корнилов С.Н., Калмыков В.Н. <b>ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ЛПХНД-71.....</b>	<b>15</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>20</b>
Пивоварова К.Г., Тагирова В.М. <b>ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕРМООКСИДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СМАЗОК, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВАНИЯ ПРОКАТА ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ .....</b>	<b>20</b>
<b>МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>24</b>
Сычков А.Б., Савченко С.А., Тулупов О.Н., Моллер А.Б. <b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НА ЛИНИИ «СТЕЛМОР» В ПОДШИПНИКОВОМ БУНТОВОМ ПРОКАТЕ ИЗ СТАЛИ ШХ15.....</b>	<b>24</b>
<b>ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>32</b>
Тютеряков Н.Ш., Залилов Р.В., Козлов Р.А., Осипова О.А., Юдин Д.В. <b>ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ СОРТОВЫХ СТАНОВ .....</b>	<b>32</b>
Андросенко М.В., Куликов С.С., Рябенко А.В., Савельева И.А., Тулупов О.Н., Кенарь Е.В., Козлов Р.А. <b>АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ РОЛИКОВ КОНВЕЙЕРА АМСОМ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА .....</b>	<b>36</b>
<b>ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ .....</b>	<b>41</b>
Мишурин О.А., Муллина Э.Р., Муллина Д.Д., Шувалова М.М., Лизогуб В.А., Сапрыкина П.И. <b>К ВОПРОСУ ПОИСКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ СОЕДИНЕНИЙ МАРГАНЦА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.....</b>	<b>41</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>4</b>
Koshkarov A.A. <b>OXYGEN BALANCE DURING DECARBONIZATION IN A RH DEGASSER .....</b>	<b>4</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>9</b>
Saubanov M.N. <b>THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE QUALITIES OF TITANIUM CASTINGS BY CENTRIFUGAL CASTING .....</b>	<b>9</b>
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Yumabaev A.A., Chernov V.P., Kornilov S.N., Kalmykov V.N. <b>THERMAL CONDITIONS OF GRAPHITE PHASE PRECIPITATION IN THE WORKING LAYER OF THE LPHND-71 ROLLING ROLL .....</b>	<b>15</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>20</b>
Pivovarova K.G., Tagirova V.M. <b>TRIBOLOGICAL AND THERMO-OXIDATIVE CHARACTERISTICS OF LIQUID DRAWING LUBRICANTS USED FOR CALIBRATING ROLLED PRODUCTS AFTER SHOT BLASTING .....</b>	<b>20</b>
<b>METAL SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS.....</b>	<b>24</b>
Sychkov A.B., Savchenko S.A., Tulupov O.N., Moller A.B. <b>ENSURING QUALITY INDICATORS OF STRUCTURE FORMATION ON THE STELMOR LINE IN BEARING ROLLED PRODUCTS MADE OF ШХ15 STEEL.....</b>	<b>24</b>
<b>METALLURGICAL PRODUCTION EQUIPMENT .....</b>	<b>32</b>
Tyuteryakov N.Sh., Zalilov R.V., Kozlov R.A., Osipova O.A., Yudin D.V. <b>EVALUATION OF THE RELIABILITY INDICATORS OF GUIDE FITTINGS SECTION ROLLING MILL .....</b>	<b>32</b>
Androsenko M.V., Kulikov S.S., Ryabenko A.V., Saveleva I.A., Kenar E.V., Tulupov O.N., Kozlov R.A. <b>ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION AND STRENGTH CALCULATION OF THE AMCOM CONVEYOR ROLLERS FOR METALLURGICAL SLAG PROCESSING .....</b>	<b>36</b>
<b>PREPARATION OF RAW MATERIALS FOR METALLURGICAL PRODUCTION.....</b>	<b>41</b>
Mishurina O.A., Mullina E.R., Mullina D.D., Shuvalova M.M., Lizogub V.A., Saprykina P.I. <b>TO THE QUESTION OF FINDING ALTERNATIVE SOURCES OF MANGANESE COMPOUNDS FOR METALLURGICAL ENTERPRISES .....</b>	<b>41</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.18.046.554 – 982

Кошкарлов А.А.

## БАЛАНС КИСЛОРОДА ПРИ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИИ В RH-ВАКУУМАТОРЕ

**Аннотация.** В настоящее время основная часть автокузовных деталей выполняется из IF-стали (Interstitial Free) — сталь без свободных атомов внедрения, с очень низким содержанием углерода и азота в твёрдом растворе (феррите). Содержание углерода в ней менее 0,003%. В статье произведен анализ плавов IF-сталей, проведенных в кислородно-конвертерном цехе с вакуумным обезуглероживанием, раскислением и легированием металла титаном при вакуумировании металла в вакуумном агрегате RH-типа. Производился анализ ранее выплавленных плавов IF-сталей, на его основании был произведен балансовый расчет изменения содержания углерода в металле при его обезуглероживании в вакууме. Основная часть кислорода, который растворяется в жидком металле, поступает в металл при его продувке в кислородном конвертере. При этом автором выявлены дополнительные источники поступления кислорода в металл при вакуумной обработке. Основным дополнительным источником кислорода можно считать кислород, поступающий вместе с транспортирующим газом — аргоном. Также было установлено, что часть растворенного углерода взаимодействует с остаточными элементами (хром, титан, ванадий, ниобий и др.), которые в виде карбидов содержатся в жидком растворе металла.

**Ключевые слова:** IF-стали, вакуумирование, карбиды, окисленность металла, чистота аргона

Основным потребителем сталей типа IF являются производители автокузовных деталей. Это связано с их особенными свойствами: во-первых, с обеспечением очень глубокой вытяжки металла и хорошим перераспределением напряжений; во-вторых, они гарантируют равномерность толщины и прочность штампованных деталей кузова; в-третьих, IF-стали характеризуются высокой пластичностью и равномерным удлинением при штамповке [1, 2].

В современных конвертерных цехах глубокое обезуглероживание осуществляют при вакуумировании нераскисленного металла на агрегатах RH-типа (рис. 1). При этом содержание углерода в нем снижается с 0,020–0,050, до 0,001–0,003%. Окисление углерода идет за счет растворенного кислорода в металле и других источников кислорода [3–7]. В связи с этим есть необходимость оценить участие кислорода из всех этих источников.

В статье проведены результаты анализа паспортов пяти опытных промышленных плавов IF-сталей. При проведении анализа этих плавов учитывались следующие параметры, необходимые для материального расчета:

- содержание углерода до и после вакуумной обработки;
- окисленность металла до вакуумной обработки, перед раскислением металла и по ходу вакуумного обезуглероживания;
- расход и чистота аргона, применяемого при вакуумной обработке;
- время вакуумирования нераскисленного металла.

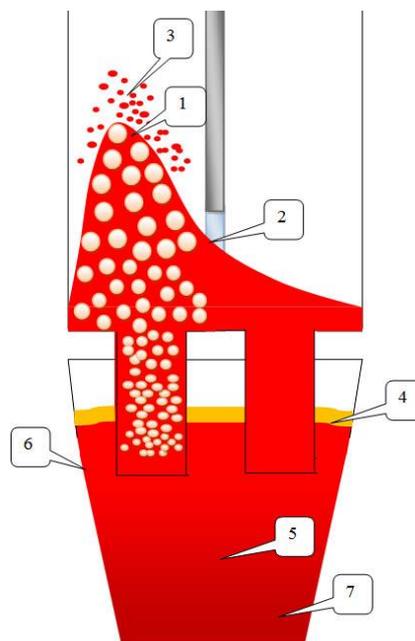


Рис. 1. Схема зон взаимодействия при обработке металла на циркуляционном вакууматоре:  
 1 – зона обезуглероживания металла в поверхностном слое металла в вакуум-камере;  
 2 – зона взаимодействия металла с кислородом продувки; 3 – зона взаимодействия капель металла с атмосферой вакуум-камеры;  
 4 – зона взаимодействия металла и шлака;  
 5 – зона перемешивания металла в ковше;  
 6 – зона взаимодействия металл-шлак-футеровка или металл-футеровка; 7 – зона взаимодействия застойных областей металла в ковше с потоком металла из вакуум-камеры

Изначально необходимо определить основные статьи прихода кислорода в металл. Основной статьей поступления кислорода является начальная окисленность металла (полученная за счет растворения кислорода в металле при продувке в конвертере). К дополнительным (второстепенным) статьям поступления кислорода стоит отнести:

- кислород, поступающий в металл в процессе продувки его аргоном во время вакуумирования;
- кислород, поступающий в металл из атмосферного воздуха, который может просачиваться в вакуум-камеру через поры, щели, клапаны и т.д.;
- кислород, поступающий в металл из шлака в процессе диссоциации оксидов.

Учитывая, что в процессе вакуумной плавки не производится постоянного мониторинга чистоты поступающего аргона, то для расчета баланса будет использоваться среднее значение содержания кислорода в 1 м<sup>3</sup> аргона. Данное содержание кислорода рассчитано из полученных данных замеров чистоты аргона в разные промежутки времени, которое составляет 0,00005 % (0,5 ppm).

Объем поступившего кислорода с аргоном можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{O} = \frac{O_{Ar} \cdot M_{мет}}{100\% \cdot \mu_{[O]} \cdot k} V_{м} \cdot V_{Ar}, \quad (1)$$

где  $V_{O}$  – объем поступившего кислорода в металл из аргона, м<sup>3</sup>;

$O_{Ar}$  – содержание кислорода в аргоне, %;

$M_{мет}$  – масса металла, кг;

$V_{м}$  – молярный объем, м<sup>3</sup>/кмоль;

$\mu_{[O]}$  – молярная масса кислорода, кг/кмоль;

$k$  – стехиометрический коэффициент;

$V_{Ar}$  – потребление аргона во время вакуумирования нераскисленного металла, м<sup>3</sup>.

В табл. 1 приведены данные из паспортов плавов

по содержанию кислорода перед вакуумированием ( $[O]_{нач.}$ ) и до раскисления металла ( $[O]_{до\ раск.}$ ), а также поступление аргона до раскисления металла ( $Ar_{нераск}$ ) и какое количество кислорода поступило с ним ( $V_{O}$  поступ. с Ar).

Данную статью можно считать одной из важных при расчете баланса, так как в процессе вакуумной обработки сталей типа IF происходит большое потребление аргона.

Стоит отметить, что часть углерода в металле связана в прочные карбидные соединения с Cr, Ti, V, Nb и Mo, на диссоциацию которых требуется избыточное содержание кислорода в металле (3). Другая часть углерода находится в менее прочных связях (2). При вакуумном обезуглероживании металла в первую очередь будут протекать реакции окисления углерода менее прочных карбидных связей с другими элементами [8, 9].



Зная содержание данных элементов в металле, можно произвести расчет содержания карбидов:

$$N_{карб} = \frac{[A]}{a \cdot M_{эл}} \cdot M_{карб}, \quad (4)$$

где  $N_{карб}$  – содержание карбида в металле, %;

$[A]$  – содержание химического элемента в металле, %;

$a$  – стехиометрический коэффициент элемента, содержащегося в карбиде;

$M_{эл}$  – молярная масса элемента, кг/моль;

$M_{карб}$  – молярная масса карбида, кг/моль.

В табл. 2 представлены данные по содержанию данных элементов в пробах опытных плавов, а так же расчет их карбидов.

Таблица 1

Содержание кислорода в металле до вакуумирования и раскисления в вакуум-камере и поступление кислорода с аргоном

	Масса металла, кг	$Ar_{нераск.}$ , м <sup>3</sup>	$V_{O}$ поступ. с Ar, м <sup>3</sup>	$[O]_{Ar}$ , %	$[O]_{нач.}$ , %	$\Sigma[O]$ , % (4+5)	$[O]_{до\ раск.}$ , %
	1	2	3	4	5	6	7
1	349940	122,2	14,36	0,0059	0,0508	0,0566	0,02
2	356820	113,8	13,64	0,0055	0,0586	0,0641	0,0228
3	383170	100,3	12,91	0,0048	0,0607	0,0655	0,0317
4	352110	65,6	7,76	0,0031	0,0392	0,0423	0,0074
5	357838	101,1	12,16	0,0049	0,0452	0,0500	0,0137

Содержание элементов в опытных плавках и их карбидах

	Содержание элементов в металле, %				
	Cr	Ti	V	Nb	Mo
1	0,0204	0,0006	0,0002	0,0014	0,0017
2	0,018	0,0006	0,0002	0,0011	0,0049
3	0,02	0,0004	0,0002	0,0014	0,0021
4	0,0285	0,0006	0,0004	0,0016	0,0024
5	0,0203	0,001	0,0002	0,0019	0,0061
	Содержание карбидов в металле, %				
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	VC	NbC	MoC
1	0,024	0,001	0,000	0,002	0,002
2	0,021	0,001	0,000	0,001	0,006
3	0,023	0,001	0,000	0,002	0,002
4	0,033	0,001	0,000	0,002	0,003
5	0,023	0,001	0,000	0,002	0,007
	Содержание углерода в карбидах, %				
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	VC	NbC	MoC
1	0,00628	0,000150	0,000044	0,000182	0,000210
2	0,00554	0,000150	0,000044	0,000143	0,000606
3	0,00616	0,000100	0,000044	0,000182	0,000260
4	0,00877	0,000150	0,000088	0,000208	0,000297
5	0,00625	0,000250	0,000044	0,000247	0,000755

На основании полученных значений процентного содержания карбидных связей, которые содержатся в металле, можно произвести расчет связанного в них углерода:

$$[C] = N_{\text{карб}} \cdot \frac{bM_{[C]}}{(a \cdot M_{\text{эл}}) + (b \cdot M_{[C]})}, \quad (5)$$

где  $[C]$  – содержание углерода в карбиде, %;  
 $a$  и  $b$  – стехиометрические коэффициенты;  
 $M_{[C]}$  – молярная масса углерода, кг/моль.

В табл. 3 приведены данные расчета количества углерода, связанного в карбиды Cr, Ti, V, Nb и Mo, и количества углерода, содержащегося в менее прочных связях ( $[C]$  ост), а также количество углерода, прореагировавшего ( $\Delta C$ ) с растворенным кислородом в металле.

Таблица 3

Анализ содержания и изменения углерода в опытных плавках

	[C] нач., %	$\Sigma[C]$ в карб., %	[C] ост, % (1-2)	[C] кон., %	$\Delta[C]$ , %
	1	2	3	4	5
1	0,0364	0,00687	0,02953	0,0019	0,02763
2	0,032	0,00648	0,02552	0,0028	0,02272
3	0,0241	0,00674	0,01736	0,0023	0,01506
4	0,031	0,00952	0,02148	0,0035	0,01798
5	0,0371	0,00755	0,02955	0,0027	0,02685

Основываясь на проведенный расчет табл. 3, можно рассчитать необходимое количество растворенного кислорода для окисления углерода, который содержится в менее прочных связях [10]:

$$\Delta[O]_{\text{расч}} = \frac{\Delta[C] \cdot \mu_{[O]}}{\mu_{[C]}}. \quad (6)$$

Для сравнения расчетов по формуле (6), согласно данным табл. 3, со значениями в табл. 1, была составлена табл. 4, где отражен расход растворенного кислорода в металле.

Таблица 4

Изменение растворенного кислорода в металле при его вакуумном обезуглероживании

	$\Delta[C]$ , % (см. табл. 3)	$\Delta[O]_{\text{расч.}}$ , % (по формуле (6))	$\Delta[O]$ , % (см. табл. 1, гр. 6-7)
1	0,02763	0,0368	0,0366
2	0,02272	0,0303	0,0413
3	0,01506	0,0201	0,0338
4	0,01798	0,0240	0,0349
5	0,02685	0,0358	0,0363

Остаточная окисленность металла, которая определяется при помощи контрольно-измерительных приборов, показывает содержание кислорода, который связан и образует оксидные соединения, преимущественно с Mn и P.

По результатам проведенного расчета наблюдалось совпадение значений требуемого кислорода для проведения обезуглероживания металла ( $\Delta[O]_{\text{расч.}}$ ) со значениями изменения кислорода в опытных плавках ( $\Delta[O]$ ) либо были ниже значений  $\Delta[O]$ . В случае когда  $\Delta[O]_{\text{расч.}}$  меньше  $\Delta[O]$ , можно предположить, что кислород с транспортирующим газом не поступал.

Рассматривая возможность поступления кислорода из атмосферного воздуха, который может просачиваться в вакуум-камеру через поры, щели, клапаны и т.д., следует учитывать, что данный кислород не поступает в зону барботажа металла. При этом стоит считать величину поступающего кислорода из атмосферного воздуха очень малой, так как при больших объемах просачивающегося воздуха в вакуум-камере не создавалось глубокого разряжения (1–1,5 мбар). Поэтому данная статья не считается лимитирующей и при расчете баланса статья упраздняется из-за очень низкого влияния.

Необходимо учитывать, что во время заглужения патрубков вакуум-камеры в сталеразливочный ковш в вакуум-камеру поступает некоторый объем шлака, состоящий преимущественно из оксидных соединений, которые в процессе вакуумной обработки могут диссоциировать на компоненты с выделением кислорода в металл. Но при выплавке сталей марок группы IF масса покровного шлака минимальная (зачастую она составляет около 80 мм или менее), поэтому поступлением кислорода от диссоциации оксидов шлака в металл можно пренебречь.

### Выводы

1. По результатам анализа выявлено, что при вакуумной обработке происходит насыщение металла кислородом до 60 ppm за счет кислорода, который поступает в металл с транспортирующим газом аргоном.

2. Углерод в нераскисленном металле присутствует в виде оксидных и карбидных связей, часть которых легко поддается вакуумному обезуглероживанию металла, а другая часть остается неизменной.

### Сведения об авторах

**Кошкарлов Александр Андреевич** – аспирант кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: alex\_koshkarov@mail.ru

3. Контрольно-измерительные средства отображают общее содержание кислорода, который присутствует в металле в виде оксидных связей.

### Список источников

1. Протасов А.В., Майоров А.И., Комолов И.В. Рациональный выбор оборудования для внепечной обработки стали в современном сталеплавильном цехе // *Черная металлургия: Бюл НТИ*, 2006.
2. Бигеев А.М., Бигеев В.А. *Металлургия стали: Теория и технология плавки стали*. М., 2000. 544 с.
3. Yu Huang, Guo-guang Cheng, Qiming Wang, Shijian Li & Wei-xing Dai. Mathematical model for decarburization of ultralow carbon steel during RH treatment. *Ironmaking & Steelmaking* 2019. Vol. 47. №6. Pp. 655-664.
4. Кудрин В.А. *Теория и технология производства стали*. М.: Мир, 2003. 528 с.
5. Shen-yang Song, Jing Li, Wei Yan, Yu-xiang Dai, Yang Liu. Comparative Study on the Cleanliness of Ultra-low Carbon Al-Killed Steel by Different Refining Processes. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020. Vol.73, № 7. Pp. 1-11.
6. Морозов А.П., Агапитов Е.Б. *Совершенствование комплексной обработки стали в циркуляционных вакууматорах: монография*. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 73 с.
7. Новик Н.М. *Внепечная вакуумная металлургия стали*. М.: Наука, 1986. 250 с.
8. Поволоцкий Д.Я. *Раскисление стали*. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
9. Кньюппель Г. *Раскисление и вакуумная обработка стали*. Ч. II. Основы и технология ковшовой металлургии: пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
10. Разработка и использование компьютерных тренажеров в металлургии / Комолова О.А., Григорьевич К.В., Горкуша Д.В., Теребикина Д.О. // *Тяжелое машиностроение*. 2017. №1-2. С. 55-61.

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

### OXYGEN BALANCE DURING DECARBONIZATION IN A RH DEGASSER

**Koshkarov Alexander A.** – Graduate Student of the Department of Metallurgy and Chemical Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alex\_koshkarov@mail.ru

**Abstract.** Currently, the main part of car body parts is made of IF steel (Interstitial Free) - steel without free embedding atoms, with a very low content of carbon and nitrogen in the solid solution (ferrite). Its carbon content is less than 0.003%. The article analyzes the melting of IF-steels carried out in the oxygen-converter shop with vacuum decar-

burization, deoxidation, and titanium alloying of the metal during metal vacuum in a RH-type vacuum unit. An analysis of previously smelted IF-steels was conducted, and based on it, a balance calculation of the change in carbon content in the metal during its decarburization in a vacuum was performed. The main part of the oxygen that dissolves in the liquid metal enters the metal when it is blown in an oxygen converter. In this case, the author identified additional sources of oxygen supply to the metal during vacuum treatment. The main additional source of oxygen can be considered to be oxygen, which enters along with the transporting gas - argon. It was also established that part of the dissolved carbon interacts with residual elements (chromium, titanium, vanadium, niobium, and others), which are present as carbides in the liquid solution of the metal.

**Keywords:** IF-steels, vacuuming, carbides, metal oxidation, argon purity

---

Ссылка на статью:

Кошкарлов А.А. Баланс кислорода при обезуглероживании в RH-вакууматоре // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 4-8.

Koshkarov A.A. Oxygen balance during decarbonization in a RH degasser. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 4-8.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Саубанов М.Н.

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КАЧЕСТВО ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ

**Аннотация.** Для анализа влияния водорода на образование дефектов титановых отливок и определение оптимальной конструкции литниковой системы центробежного литья проведены экспериментальные работы. Атомно-абсорбционным спектрометрическим анализом установлено, что химические реакции высокотемпературного взаимодействия титана с тугоплавкими окислами идут глубоко с образованием не только промежуточных субокислов, но и чистых магния, алюминия и кремния. Определены условия, при которых возможно выделение водорода из жидкого или затвердевающего титана сплавов ТЛЗ, ТЛ5 и его участие в формировании структурных пустот и раковин при заливке титановых отливок центробежным способом. Установлено, что при производстве титановых фасонных отливок в периклазовых формах на основе MgO содержание водорода расширяет в отливках усадочные раковины и поры, соответственно, в исходных слитках (электродах) необходимо, чтобы содержание водорода было не более 0,003%, и прокатку периклазовых форм производить при  $T = 1000-1050^{\circ}\text{C}$ . Разработаны оптимальные конструкции и размеры литниковой системы и специальная опочная оснастка для получения качественных титановых отливок.

**Ключевые слова:** растворимость водорода, атомно-абсорбционный спектрометрический анализ, равновесные системы, диссоциации газов и паров, тугоплавкие окислы, высокая химическая газотворность, литниковая система

В условиях промышленного производства сложно-профильных и крупногабаритных титановых отливок центробежным способом недостаточно изучены влияние газовой среды, в частности водорода, на технологические процессы плавки и заливки с учетом особых условий формирования отливок в вакууме и свойств титановых сплавов. В отличие от других элементов, образующих твердые растворы внедрения, водород, кислород и азот в титановых сплавах, изменяя кристаллическую решетку титана, влияют на все свойства, технологические процессы, образование дефектов [1, 2]. Поведение водорода при высоких температурах представляет особый интерес, так как это единственный газ, растворимость которого в титане обратима и изменяется пропорционально давлению, недостаточно полными представляются объяснения влияния водорода на плотность титановых отливок [3].

Цель работы – исследовать влияние водорода на образование дефектов и определить оптимальные конструкции и размеры литниковой системы при изготовлении титановых отливок центробежным методом.

Результаты анализов и опытные данные промышленных плавов в вакуумно-дуговых гарнисажных печах показали, что за цикл плавки и заливки прирост содержания  $\text{H}_2$  в титане за счёт натекания составляет 0,003-0,005%.

В процессе центробежной заливки жидким титаном возможен локальный размыв углов и рыхлых участков периклазовой (на основе магнезита MgO) формы и попадание частиц смеси в отливку [4]. Указанное приводит к углублению процессов диссоциации газов и паров, контактирующих с жидким титаном. Атомно-абсорбционным спектрометрическим анализом экспериментально исследовался ход реакций в системах MgO-Ti,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ti и  $\text{SiO}_2$ -Ti на спектро-

аналитической установке. По измеренным значениям абсорбции света рассчитывалась абсолютная концентрация атомов и давление насыщенного пара магния (Mg), алюминия (Al) и кремния (Si) в исследуемых интервалах температур. Полученные экспериментально математические зависимости обобщены в табл. 1.

Экспериментально доказано, что химические реакции высокотемпературного взаимодействия титана с тугоплавкими окислами идут глубоко с образованием не только промежуточных субокислов, но и чистых магния, алюминия и кремния. Равновесное давление пара кремния над системой  $\text{SiO}_2 - \text{Ti}$  в пределах ошибки опыта соответствует давлению над чистым элементом.

### Исследование растворимости водорода в интервале температур 1300-2000°C

При изучении растворимости водорода в сплавах ТЛ5, ТЛЗ, ВТ1Л, ТЛ7 в интервале температур 1300-2000°C газом насыщались в среднем 50-60 образцов диаметром 25 мм.

Содержание водорода по результатам спектрального анализа (табл. 2) в сравнении с данными вакуумнагрева в большинстве случаев было повышенным на 6-15%.

Изобары растворимости водорода в сплавах ТЛЗ и ТЛ5 приводятся на графиках на рис. 1.

График, обобщающий опытные данные по растворимости водорода в различных сплавах титана при давлении 33,3 Па, приводится на рис. 2.

По уменьшению растворимости водорода в жидком металле (рис. 1-3) исследованные сплавы можно расположить в следующий ряд: сплав ТЛ7, ВТ-1, ТЛЗ и ТЛ5. Средние значения растворимостей водорода в жидком металле при давлении 333 Па в точке плавления для этих сплавов соответственно равны, % по массе: 0,029; 0,027; 0,025 и 0,024.

Таблица 1

Опытные данные атомно-абсорбционной спектроскопии, характеризующие реакции в системах типа MgO+Ti

№ п/п	Схемы химических реакций в системе	Зависимость $LgP=A-B/T$ (мм рт. ст.), для исследованного интервала температур	Значения парциальных давлений паров, ГПа (мм.рт.ст.),		
			1300 К	1700 К	2000 К
1	$\{MgO\} + \{Ti\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} TiO \\ Ti_2O_3 \\ Ti_3O_5 \\ TiO_2 \end{matrix} \right\} + \{Mg\}$	$LgP_{Mg} = (3,86 \pm 0,2) - (9800 \pm 300)/T$ ; $T = \text{от } 1250 \text{ до } 1370\text{К}$	$0,265 \cdot 10^{-3}$ ( $0,2 \cdot 10^{-3}$ )	-	-
2	$\{Al_2O_3\} + \left\{ \begin{matrix} Ti \\ TiO \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} TiO \\ TiO_2 \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} Al \\ AlO \\ Al_2O \end{matrix} \right\}$	$LgP_{Al} = 10,85 - 25520/T$ ; $T = \text{от } 1725 \text{ до } 1940\text{К}$	-	$0,93 \cdot 10^{-4}$ ( $0,7 \cdot 10^{-4}$ )	$0,157 \cdot 10^{-1}$ ( $0,12 \cdot 10^{-1}$ )
3	$\{SiO_2\} + \left\{ \begin{matrix} Ti \\ TiO \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} TiO \\ TiO_2 \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} Si \\ SiO \end{matrix} \right\}$	$lgP_{Si} = (8,7 \pm 0,3) - (20725 \pm 560)/T$ ; $T = \text{от } 1620 \text{ до } 2020\text{К}$	$0,425 \cdot 10^{-3}$ ( $0,32 \cdot 10^{-3}$ )	$0,332 \cdot 10^{-1}$ ( $0,25 \cdot 10^{-1}$ )	

Таблица 2

Содержание водорода по сечению образцов сплава ТЛЗ, залитых в медную изложницу после выдержки жидкого металла в газовой среде 1,5-2 мин при температуре опыта

Номер образца	Содержание водорода, % по массе		
	Метод вакуум - нагрева	Спектральный метод	
		На глубине 0,5 мм от поверхности	В центре образца
18	0,026	0,027	0,029
23	0,030	0,030	0,034
25	0,033	0,036	0,034
26	0,043	0,048	0,042
27	0,039	0,033	0,039

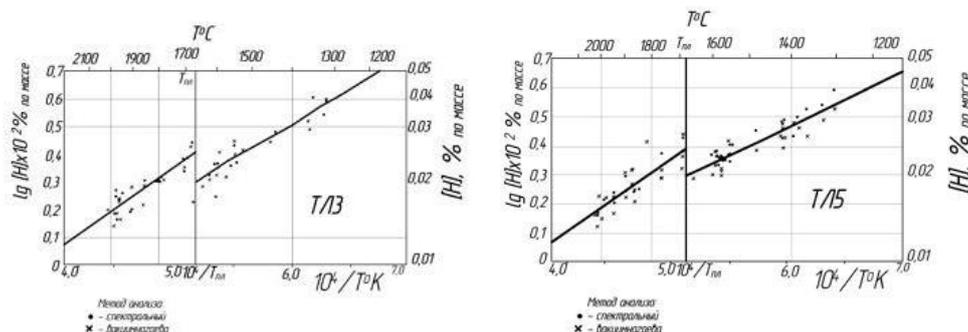


Рис. 1. Изобары растворимости водорода в литейных сплавах титана ТЛ3, ТЛ5 при  $P_H = 33,3$  ГПа (25 мм рт. ст.). Метод анализа: спектральный и вакуум-нагрева

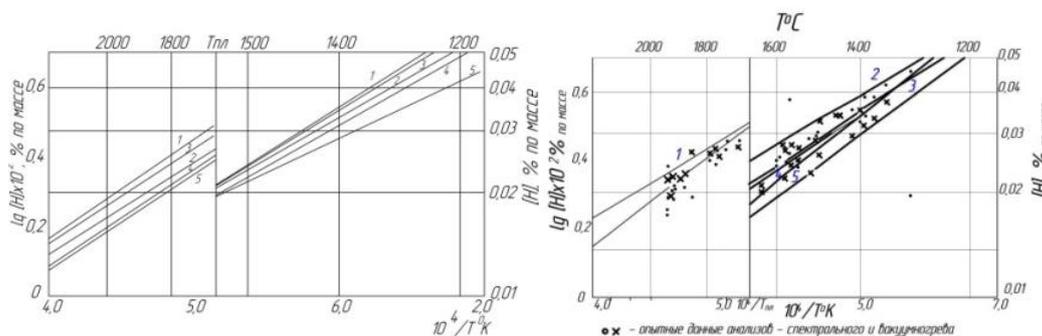


Рис. 2. Опытные данные по растворимости водорода в литейных сплавах титана: 1 – иодидный титан; 2 – ВТ1Л; 3 – ТЛ7; 4 – ТЛ3; 5 – ТЛ5.  $P_H = 33,3$  ГПа. Изобара растворимости водорода в титане при  $P_{H_2} = 33,3$  ГПа, опытные данные анализов – о-спектрального и х-вакуум-нагрева экспериментальные (Для сравнения взяты значения 1, 2, 3, 4 и 5 по данным других авторов)

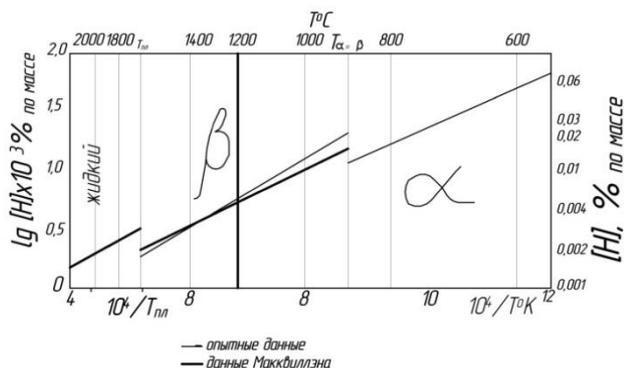


Рис. 3. Изобара растворимости водорода в иодидном титане при  $P_{H_2} = 33,3$  ГПа:

— опытные данные, — данные Макквиллена А.Д.

### Анализ результатов исследований

Обработка полученных данных (см. табл. 1) в виде графиков изотерм в координатах  $[H]=f(P_{H_2})$  и изобар в координатах  $lg[H]=f(\frac{10^4}{T})$  показала, что в исследованных интервалах температур и парциальных давлений водорода в газовой фазе (от 15 до 130 мм рт. ст.) его растворимость в исследуемых сплавах имеет прямолинейную зависимость и подчиняется закону Сивертса (характер растворения водорода в твердом и жидком титане экзотермический), то есть в этом отношении противоречий с работами других авторов нет.

Вышеуказанные данные показывают, что определенные нами значения растворенности водорода в титане при температурах 1300-1650°C достаточно удовлетворительно совпадают с данными В.И. Лакемского [5] и С. Дэшмана [6], полученными экстраполяцией от температуры 1100°C и заметно отличаются от значений В.В. Фролова [7], А.Д. Макквиллена [8], полученных также экстраполяцией от 1100°C.

По данным указанных авторов теплота растворения водорода в титане соответственно равна: 27830, 21200, 26100 и 24550 кал/г-моль. В нашем случае 23800 кал/г-моль – среднее значение растворимости водорода в жидком титане при давлении 33,3 Па, в точке плавления для сплавов ТЛЗ, ТЛ5 соответственно равно 0,025 и 0,024% по массе.

Полученные вышеуказанные данные и зависимости позволяют определить те условия, при которых возможно выделение водорода из жидкого или затвердевающего титана и его участие в формировании структурных пустот и дефектов при заливке отливок разной конструкции и развеса из титановых сплавов при центробежной заливке. Такими условиями являются: более низкое, чем парциальное давление водорода, давление в рассматриваемом элементарном объеме или слое металла; уменьшение растворимости водорода при переходе титана из жидкого состояния в твердое; возможное перераспределение водорода по сечению затвердевающей отливки.

Проведен спектральный анализ содержание водорода на образцах вырезанных по различным сечениям опытных отливок (рис. 4)

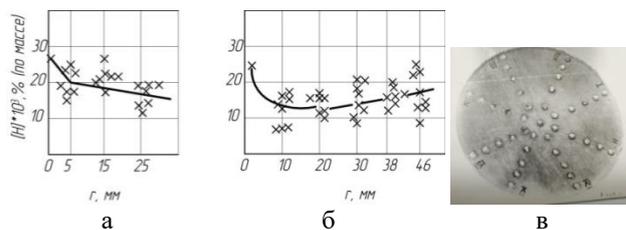


Рис. 4. Распределение водорода по сечениям отливок различных толщин:

а – диаметр 56 мм; б – диаметр 105 мм;

в – сечения отливок, подвергнутые спектральному анализу (M=1:2)

В зоне газосадочных раковин в опытных отливках спектральным анализом обнаружено повышенное до 0,007–0,011% (по массе) содержание водорода. В других зонах титановых отливок содержание водорода было в пределах 0,003-0,005%. Уменьшение средней линейной скорости кристаллизации сплава ТЛЗ позволило приблизить ее к скорости диффузионного массопереноса водорода в охлаждающихся слоях титановой корпусной опытной отливки за счет увеличения толщины отливки на 20-30% и подогрева форм. В результате устранен брак по газосадочным раковинам.

Анализы показывают на возможность импульсного выделения водорода из титана с образованием крупных раковин и пор в гранулах шаровидной формы и всплесках, образующихся в результате разбрызгивания жидкого титана завихрением при истечении из сопла воронки или ударе струи о поверхность воронки или формы. Пустоты в каплях металла, затвердевающих в полете или в тонком слое металла (всплеске, свободно затвердевающим на поверхности формы), образуются при отсутствии металлостатического и внешнего давления (заливка в вакууме).

По результатам экспериментальных работ доказано, что газом, ответственным за расширение усадочных пор и раковин, в титановых отливках любой толщины является водород.

Установлено, что объемы усадочных раковин и пор уменьшаются в среднем на 40-60%, при затвердевании не питаемых тепловых узлов и зон титановых отливок в поле центробежных сил. Расчеты полученных зависимостей показывают, что в условиях титанового литья влияние водорода  $H_2$  на формирование пустот может проявляться в зонах низкого металлостатического давления и при неравновесно повышенных концентрациях этого газа в тепловых узлах, где завершается формирование этих пустот и затвердевание титана. Центробежная заливка форм предупреждает отрицательное действие водорода на качество тонкостенных отливок.

Заливка и затвердевание титана в поле центробежных сил направленным давлением, изменяющим-

ся от  $4 \cdot 10^3$  до  $0,5 \cdot 10^3$  ГПа (4,0-0,5 атм), ограничивает формирование крупных газовых раковин в титановых отливках.

По мере увеличения давления столба жидкого титана от 65 до 105 ГПа (или от 50 до 80 мм рт. ст.) объем раковин уменьшается от 14,5 до 8,0% (рис. 5).



Рис. 5. Объем раковин от давления столба жидкого титана

Установлено, что повышение жидкотекучести прямо пропорционально увеличению плотности тока в процессе выплавки титана в электродуговой вакуумной печи. При увеличении плотности тока от 0,3 до 0,9 А/м<sup>2</sup> длина спирального образца увеличивается в три раза (от 200 до 600 мм). Указанные данные учтены при разработке конструкции и размеров литниковой системы для получения титановых отливок сложной конструкции.

Разработаны методики конструирования и расчета литниково-питающей системы для центробежной заливки крупных титановых отливок.

Установлено, что в вакууме полным сечением работает только стояк, в котором можно обеспечить сплошность потока, а в литниковом ходе всегда образуется кавитационная полость по центру потока [9]. Уменьшение пропускной способности литниковых систем в вакууме должно приниматься во внимание при разработке технологических процессов получения титановых отливок, соответственно, сечения литниковых систем должны быть увеличены. Коэффициент увеличения  $K_y$  может быть представлен как отношение коэффициентов расходов жидкости в системе при нормальном давлении  $\mu_n$  и в вакууме  $\mu_v$ :  $K_y = \frac{\mu_n}{\mu_v}$ . Для расширяющихся литниковых систем

этот коэффициент будет находится в пределах 1,1–1,3. Производственная проверка расширяющихся литниковых систем, спроектированных на основе данных моделирования, подтвердила и их высокую эффективность. В частности, опыт подтвердил хорошую работу литниковых систем, расположенных непосредственно в форме и имеющих соотношение площадей сечений отдельных элементов равным:

$$F_{ст} : \sum F_{л.х} : \sum F_{пит} = 1 : (1,15 \div 1,25) : (1,25 \div 1,5).$$

Соответственно определено отклонение горизонтальных литниковых каналов от радиального направления в сторону, противоположную вращению на расчетный угол:  $X = 15 \div 25^\circ$ .

Разработаны чертежи опочной оснастки и технология заливки титановых отливок методом центробежного литья в вакууме (рис. 6).

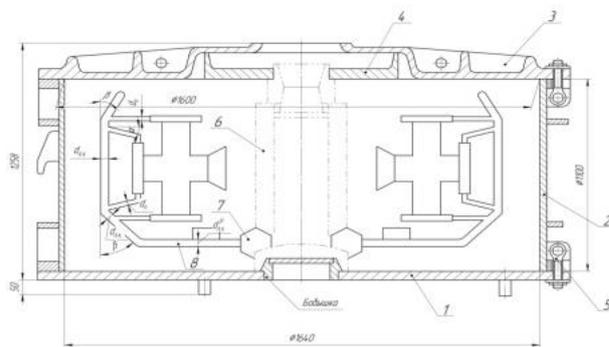


Рис. 6. Разработанная конструкция специальной опочной оснастки и схемы литниковой системы для центробежной заливки крупных титановых отливок: 1 — дно опоки; 2 — корпус опоки; 3 — крышка опоки; 4 — вкладыш (ловушка) из стали 12Х18Н9ТЛ; 5 — болт откидной М20×105; 6 — стояк (металлоприемник); 7 — переходные графитовые втулки для соединения формы со стояком; 8 — радиальный литниковый ход; 9 — литниковый ход; 10 — питатели (Для фиксации блоков форм использовали отходы — окатыши периклазовых смесей)

Применение стояка с плавными переходами в производственных условиях показал положительные результаты (рис. 7).



Рис. 7. Разработанная конструкция стояка из периклазовой смеси для центробежной заливки титановых отливок

Экспериментально определены и уточнены толщины титановой настывли (корки), образующейся на внутренних поверхностях литниковой системы, уменьшающие их фактические сечения при центробежной заливке отливок из титановых сплавов разного развеса для учета их при расчетах литниковой системы. Для исключения взаимодействия жидкого титана с материалом литейной формы выбрана температура обжига 1000-1050<sup>0</sup>С периклазовых(MgO) форм.

### Выводы

1. В результате исследования растворимости водорода в интервале температур 1300-2000<sup>0</sup>С определены условия, при которых возможно выделение водорода из жидкого или затвердевающего титана и его участие в формировании структурных пустот и дефектов при заливке отливок разной конструкции и развеса из титановых сплавов ТЛЗ, ТЛ5, ТЛ7Л, ВТ1Л при центробежной заливке.

2. Экспериментально доказано, что выделение водорода из литейной периклазной (MgO) формы и исходного титанового электрода влияет на расширение усадочных раковин и пор при производстве титановых отливок.

3. Увеличение толщины стенок титановых отливок на 20-30% и подогрев периклазовой формы до 200<sup>0</sup>С позволяет уменьшить среднюю линейную скорость кристаллизации сплава ТЛЗ и исключает образование усадочных раковин.

4. Атомно-абсорбционным спектроскопическим анализом установлено, что химические реакции высокотемпературного взаимодействия титана с тугоплавкими окислами MgO-Ti, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Ti и SiO<sub>2</sub>-Ti идут глубоко с образованием не только промежуточных субокислов, но и чистых магния, алюминия и кремния.

5. Установлено, что прокатка периклазовых литейных форм при температурах 1000-1050<sup>0</sup>С обеспечивает термостойкость и инертность материала к жидкому титану.

6. Выбраны оптимальные конструкции и размеры литниковой системы, исключающие попадание ча-

стиц материалов формы в отливку и образование газовых раковин в процессе производства титановых отливок методом центробежного литья.

### Список источников

1. Ечин А.Б. Дефекты в отливках, возникающие при центробежном литье интерметаллидных титановых сплавов // Литейное производство. 2021. №1. С. 29-33.
2. Исследование взаимодействия титана с высокоогнеупорными окислами / Бодрев Н.В., Николаев Г.Н., Филин Ю.А. [и др.] // Вопросы судостроения, серия Металлургия. 1978. Вып. 21.
3. Ходоровский Г.Л. Разработка теоретических основ и технологических процессов формирования отливок из титановых сплавов в авиастроении: дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИАТ, 1973.
4. Расчет физико-химического взаимодействия титановых сплавов с материалами литейной формы / А. Ганеев, А.О. Деменок, С.В. Бакерин, Б.А. Кулаков, И.Р. Мухамадеев, А.Р. Гарипов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2016. Т.16. №3. С. 70-78.
5. Лакемский В.И., Калинин Н.И. Растворимость водорода в жидком титане // Автоматическая сварка. 1963. №9. С. 31-35.
6. Дэшман С.Д., Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964.
7. Фролов В.В. Поведение водорода при сварке плавлением. М.: Машиностроение, 1966.
8. Макквиллэн А.Д., Макквиллэн М.К. Титан. М.: Металлургия, 1958.
9. Саубанов М.Н., Леушин И.О., Илларионов И.Е. Анализ формовочных материалов и смесей для производства титановых отливок // Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении: материалы Всероссийской научно-технической конференции / ФГБОУ СамГТУ. Самара: ООО «Полиграфия», 2023. С. 344-350.

### Сведения об авторах

**Саубанов Марат Нинарович** – кандидат технических наук, главный металлург, АО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького», Зеленодольск, Россия. E-mail: ogmet@zdship.ru

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE QUALITIES OF TITANIUM CASTINGS BY CENTRIFUGAL CASTING

**Saubanov Marat N.** – Candidate of Technical Sciences, main metallurgist, JSC «Zelenodolsk plant named after A.M.Gorky», Zelenodolsk, Russia. E-mail: ogmet@zdship.ru

**Abstracts.** Experimental work was carried out to analyze the effect of impurities and the determination of optimal structure of the pouring gate system on the quality of titanium castings during the centrifugal casting. It was established by atomic absorption spectrometric analysis that the chemical reactions of high-temperature interaction of titanium with refractory oxides go deep with the formation of not only intermediate suboxides, but also pure magnesium, aluminum and silicon. There were determined the conditions where it is possible to release hydrogen from liquid or solidifying titanium alloys TL3, TL5 and its participation in the formation of structural voids and shells by pouring titanium castings using a centrifugal method. It was found that by the production of titanium shaped castings in periclase molds based on MgO, the hydrogen content expands the shrinkage shells and pores in the castings. Respectively, it is necessary in the initial ingots (electrodes) that the hydrogen content should be less than 0.003%, and calcination of periclase molds shall be performed at  $T = 1000-1050^{\circ}\text{C}$ . Optimal structure and sizes of the pouring gate system and special mold pattern were developed to produce high-quality titanium castings.

**Keywords:** hydrogen solubility, atomic absorption spectroscopic analysis, equilibrium systems, dissociation of gases and vapors, refractory oxides, high chemical gas release, pouring gate system

---

Ссылка на статью:

Саубанов М.Н. Влияние водорода на качество титановых отливок при центробежном литье // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 9-14.

Saubanov M.N. The effect of hydrogen on the qualities of titanium castings by centrifugal casting. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 9-14

УДК 621.74

Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Юмабаев А.А., Чернов В.П., Корнилов С.Н., Калмыков В.Н.

**ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ЛПХНД-71**

***Аннотация.** В статье исследованы тепловые условия выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71, влияющие на его эксплуатационные характеристики. В ходе работы были экспериментально изучены процессы кристаллизации рабочего слоя из легированного чугуна (при 1200–1250 °С) в условиях центробежной силы, а также заливка сердцевины серым чугуном (1370–1450 °С). С помощью СКМ «ПолигонСофт» смоделированы условия первичного выделения графитовой фазы. Полученные данные имеют практическую значимость для оптимизации технологии производства и повышения ресурса работы прокатных валков ЛПХНД-71.*

***Ключевые слова:** графитовая фаза, изотермический отжиг, кристаллизация, прокатные валки, тепловые условия*

**Введение**

Современное состояние металлургической отрасли характеризуется высокой степенью конкуренции и необходимостью постоянного совершенствования производственных показателей. Важнейшим фактором, влияющим на эффективность прокатного производства и качество готовой продукции, являются характеристики и эксплуатационные свойства прокатных валков.

В структуре рабочего слоя вала графитовая фаза играет определяющую роль, формируя комплекс важнейших эксплуатационных характеристик: износостойкость, термостойкость, антифрикционные свойства, устойчивость к высоким нагрузкам и работоспособность при экстремальных температурных режимах.

Современные требования к качеству прокатной продукции и условиям её производства обуславливают необходимость детального исследования процессов формирования структуры рабочего слоя вала. Особое внимание уделяется изучению тепловых условий выделения графитовой фазы в рабочем слое, поскольку именно этот параметр влияет на эксплуатационные свойства валков.

Технологическая оптимизация производства валков невозможна без глубокого понимания механизмов формирования графитовой фазы. Исследование этих процессов открывает перспективы для разработки инновационных технологий, позволяющих повышать эксплуатационный ресурс валков, улучшать качество прокатной продукции, снижать производственные затраты и увеличивать конкурентоспособность металлургических предприятий.

Таким образом, комплексное изучение тепловых условий формирования графитовой фазы в структуре рабочего слоя прокатного вала представляет собой актуальную научную и практическую задачу, решение которой способствует развитию современных технологий производства валков для чистовых клетей станков горячей прокатки.

Цель работы – изучение тепловых условий выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71.

**Изучение состояния вопроса**

В железоуглеродистых сплавах углерод может находиться в двух состояниях: в свободном виде (в форме графита) или в связанном – в виде химического соединения (в форме цементита, карбидов). Оба этих компонента могут выделяться при кристаллизации из жидкого расплава, из аустенита, а также в результате эвтектического и эвтектоидного превращений.

Цементит с содержанием 6,67% С по химическому составу ближе к аустениту (до 2,14% С), чем к графиту (100% С). Именно поэтому в реальных условиях охлаждения его кристаллизация происходит в первую очередь. Однако графит обладает большей термодинамической стабильностью по сравнению с цементитом, поскольку система аустенит + графит характеризуется меньшим термодинамическим потенциалом. В результате при медленном охлаждении термодинамические условия способствуют преимущественно выделению графита, а не цементита, что и будет происходить при наиболее медленных скоростях охлаждения. Вторичным явлением также может являться распад цементита на графит, происходящий при определённых температурных условиях кристаллизации [2].

При охлаждении сплава заэвтектического состава ( $C > 4,26\%$ ) графит выделяется из жидкого расплава (ниже линии  $C' D'$ ), такой графит называют первичным. Он входит в состав эвтектики, а также выделяется из аустенита (графит вторичный) и при эвтектоидном превращении. Первичные выделения графита из жидкого расплава выполняют важную функцию центров кристаллизации для последующих выделений графита.

Дальнейшая кристаллизация будет заключаться в присоединении атомов углерода к уже имеющимся графитовым включениям за счет самодиффузии и отвода атомов железа от фронта кристаллизации. Рост графитных включений происходит преимущественно в длину, что приводит к образованию частиц, похожих по форме на лепестки или пластины, поэтому

графит такой формы называют пластинчатым. После полного охлаждения структура сплавов будет состоять из феррита (железа) и графитовых включений пластинчатой формы – неметаллической фазы, не имеющей связи с ферритной металлической основой. Таким образом, вся видимая в структуре графитная фаза будет являться совокупным результатом первичной (эвтектической) кристаллизации и превращений в твердом состоянии при термической обработке.

Причиной выделения графитовой фазы в рабочем слое из легированного чугуна является медленное охлаждение, что является предпосылкой для дальнейшего изотермического отжига [4].

Изотермический отжиг – вид термической обработки чугуна, направленный на улучшение его структуры и свойств. Этот метод особенно эффективен для превращения цементита в графит. Его применение обуславливается еще тем, что сокращается время обработки по сравнению с обычным отжигом, более полное графитизирование структуры чугуна, а также улучшение механических свойств материала и снижение внутренних напряжений.

Процесс изотермического отжига основан на двух ключевых этапах: нагрева до температуры выше точки A1 и выдержки при постоянной температуре для завершения структурных превращений.

Изотермический отжиг включает в себя несколько этапов – предварительный нагрев (650-750°C), основной нагрев (850-870°C), охлаждение (760-780°C), выдержка (при постоянной температуре) и окончательное охлаждение (на воздухе или в печи).

#### Методы и методика проведения эксперимента

Материалом для исследования является рабочий слой индифинитного центробежно-литого прокатного вала, изготовленного в условиях производства.

Подготовку образцов для изготовления шлифа и дальнейшего исследования осуществляли при помощи отрезного станка, с целью получения необходимых размеров образца для запрессовки в смолу. Изготовление шлифов осуществляли при помощи системы шлифподготовки.

Микроструктуру образцов выявляли травлением в реактиве Марбле.

Изучение микроструктуры проводили при помощи оптического микроскопа при увеличениях от 50 до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображения, адаптированного в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82 и ГОСТ 8233-56. При увеличениях от 300 до 5000 крат использовали сканирующий электронный микроскоп методом растровой электронной микроскопии.

Для моделирования процесса применяли СКМ «ПолигонСофт».

#### Результаты и обсуждения

Температура заливки чугуна в кокиль 1200-1300°C. Кристаллизация рабочего слоя из легированного чугуна начинается при температуре 1150-1200°C во вращающемся кокиле в условиях действия центробежной силы в результате отвода тепла через стенки формы.

Интенсивность отвода тепла меняется со временем и зависит от толщины закристаллизовавшегося металла, что, в свою очередь, влияет на размер дендритов. В тонком поверхностном слое кристаллизуются хаотично ориентированные первичные дендриты аустенита. Далее образуются вытянутые столбчатые кристаллы, которые при обычной кристаллизации располагаются нормально к стенке кристаллизации, а при действии центробежной силы теряют устойчивость относительно направления теплоотвода и ориентируются перпендикулярно этому направлению.

После выделения из жидкой фазы первичных дендритов аустенита кристаллизация заканчивается при температуре 1110–1130°C, хоть и значение фактической температуры солидус при этих условиях кристаллизации равняется примерно 1128°C.

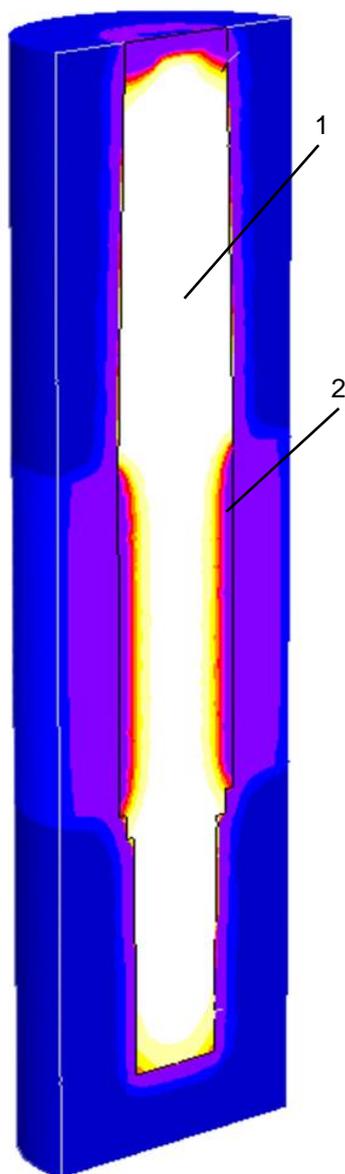
При температуре 1000–1100°C происходит остановка центробежной машины и примерно при 1070°C происходит перенос заливочной формы на плац. Далее при достижении температуры закристаллизовавшегося рабочего слоя 980–1000°C происходит заливка сердцевины серым чугуном, температура которого 1370–1450°C. В результате этого рабочий слой легированного чугуна нагревается и частично подсплавляется.

Для моделирования условий первичного выделения графитовой фазы и на основании снятых температурно-временных характеристик кристаллизации реального прокатного вала провели моделирование данного процесса в СКМ «ПолигонСофт». Снятые температурно-временные характеристики кристаллизации рабочего слоя, а также сердцевины вала представлены графически.

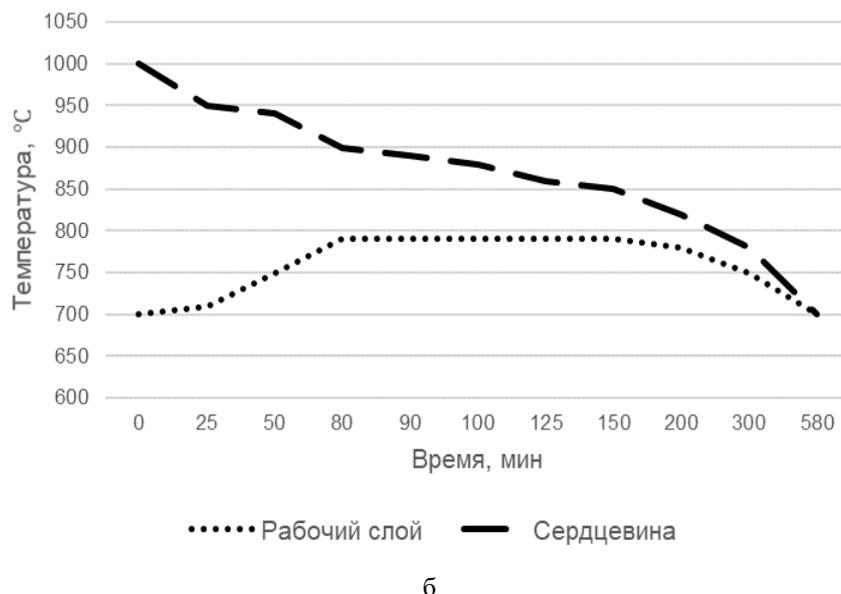
При заливке сердцевины в структуре рабочего слоя происходят процессы частичного распада карбидной фазы и выделение включений графита, это связано с длительным пребыванием рабочего слоя в изотермических условиях при высоких температурах.

Через 80 мин прекращается нагрев рабочего слоя и наступает изотермическая выдержка, которая длится более 2 ч.

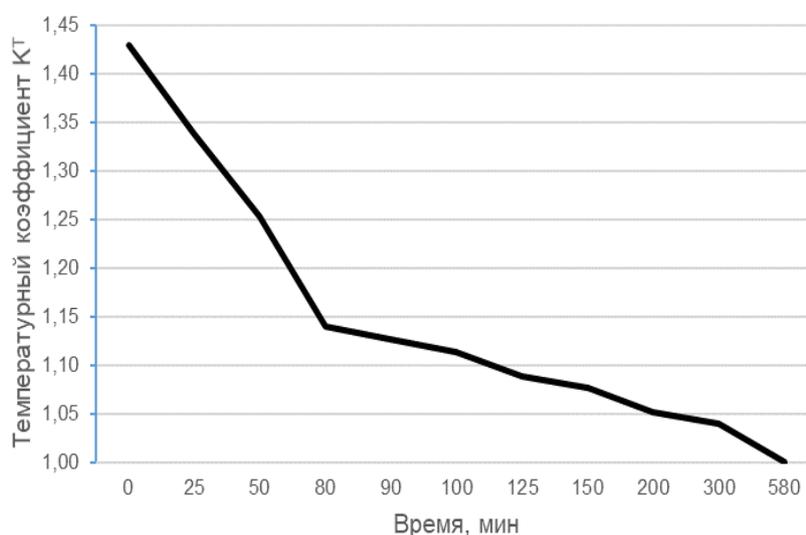
Исходя из полученных данных, вывели соотношение температуры сердцевины к поверхности рабочего слоя, который ввели как безразмерный температурный коэффициент, служащий индикатором термодинамических условий и позволяющий непрямым методом отслеживать зоны, где преобладают условия графитизации (при  $K^T=1-1,15$ ) и процессы карбидообразования (при  $K^T=1,15-1,45$ ) (см. рисунок).



а [1]



б



в

Визуализированная модель кристаллизации сердцевины прокатного вала (а), изменение температурных зон рабочего слоя после заливки сердцевины (б) и изменение температурного коэффициента (в):

1 – сердцевина; 2 – поверхность

Формирование структуры рабочего слоя чугуна заканчивается частичным превращением аустенита в мартенсит.

Таким образом, окончательная структура чугуна рабочего слоя состоит из мартенситно-аустенитной металлической основы, эвтектических карбидов, избыточных фаз в виде вторичных карбидов и включений графита [3].

#### Выводы

1. Установлены основные температуры заливки кокиль (1200-1300°C), а также температуры начала (1150-1200°C) и конца кристаллизации (1110-1130°C).

2. Проанализированы фазовые превращения при заливке сердцевины.

3. С помощью программного комплекса СКМ «ПолигонСофт» выполнено моделирование условий первичного выделения графитовой фазы и температурно-временных характеристик кристаллизации рабочего слоя и сердцевины вала.

4. Введен безразмерный температурный коэффициент, который позволяет количественно оценить градиент температур в системе и прогнозировать зоны преимущественного выделения графита и карбидов.

## Список источников

1. Моделирование тепловых полей при сваривании рабочего слоя прокатного вала с сердцевиной / В.М. Колокольцев, А.С. Савинов, Н.А. Феокистов [и др.] // Литейное производство. 2021. № 8. С. 30-34.
2. Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов / В.М. Колокольцев, Н.А. Феокистов, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Черные металлы. 2024. № 3. С. 28-32. DOI: 10.17580/chm.2024.03.05.
3. Влияние технологии получения на структуру и свойства рабочего слоя прокатных валков из чугуна ЛПХНД-71 / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалищин, Д.В. Куряев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 4(778). С. 7-11.
4. Вдовин К.Н. Прокатные валки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 443 с.
5. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков / К.Н. Вдовин, Н.В. Копцева, Д.С. Горленко [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 55-59.
6. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных прокатных валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 3. С. 78-89. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-78-89.
7. Куряев Д.В., Цыбров С.В. Исследование влияния легирующих элементов на основные свойства чугунных прокатных валков // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2017. № 16. С. 79-84.
8. Цыбров С.В., Вдовин К.Н., Зайцева А.А. Повышение эксплуатационных характеристик индифинитных валков центробежного литья // Литейщик России. 2012. № 3. С. 30.
9. Волчук В.Н. Исследования влияния химического состава чугунных прокатных валков на их механические свойства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 5(194). С. 12-18.
10. Производство прокатных валков в условиях ЗАО «МЗПВ» / Д.В. Куряев, А.В. Авдиенко, Д.М. Иванов, А.Б. Бойко // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 2(21). С. 32-33.

## Сведения об авторах

**Щенникова Вероника Алексеевна** – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shchennikova\_00@mail.ru.

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

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

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

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

**Корнилов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kornilov\_sn@mail.ru.

**Калмыков Вячеслав Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: prmpi@magtu.ru.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**THERMAL CONDITIONS OF GRAPHITE PHASE PRECIPITATION IN THE WORKING LAYER OF THE LPHND-71 ROLLING ROLL**

**Shchennikova Veronica A.** – graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shchennikova\_00@mail.ru.

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

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

**Yumabaev Azamat A.** – Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

**Chernov Viktor P.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@.ru.

**Kornilov Sergey N.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kornilov\_sn@mail.ru.

**Kalmykov Vyacheslav N.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: prmpi@magtu.ru.

**Abstract.** The article investigates the thermal conditions of graphite phase precipitation in the working layer of the LPHND-71 rolling roll, which affect its operational characteristics. During the study, the crystallization processes of the working layer made of alloyed cast iron (at 1200–1250 °C) under centrifugal force conditions were experimentally examined, as well as the pouring of the core with gray cast iron (1370–1450 °C). Using the SCM «PolygonSoft», the conditions for the primary precipitation of the graphite phase were simulated. The obtained data are of practical importance for optimizing production technology and increasing the service life of LPHND-71 rolling rolls.

**Keywords:** graphite phase, isothermal annealing, crystallization, rolling rolls, thermal conditions

---

Ссылка на статью:

Тепловые условия выделения графитовой фазы в рабочем слое прокатного вала ЛПХНД-71 / Щенникова В.А., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Юмабаев А.А., Чернов В.П., Корнилов С.Н., Калмыков В.Н. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 15-19.  
Shchennikova V.A., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Yumabaev A.A., Chernov V.P., Kornilov S.N., Kalmykov V.N. Thermal conditions of graphite phase precipitation in the working layer of the LPHND-71 rolling roll. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 15-19.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.774.3

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М.

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СМАЗОК, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВАНИЯ ПРОКАТА ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

**Аннотация.** В статье исследуются трибологические и термоокислительные характеристики жидких волоочильных смазок, применяемых при калибровании проката после дробеструйной обработки поверхности. Данный метод подготовки исключает использование традиционных подсмазочных покрытий (фосфатных, борированных), что делает жидкую смазку единственным барьером, предотвращающим износ инструмента и формирующим качество поверхности изделия. В условиях экстремальных давлений, высоких скоростей волоочения и значительного тепловыделения работоспособность смазки определяется её способностью формировать стабильную граничную плёнку с низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью, а также устойчивостью к термическому разложению и окислению. Проведён анализ компонентного состава современных смазок, включающего базовые масла (минеральные, синтетические сложные эфиры, водные эмульсии) и пакеты противозносных (AW) и противозадирных (EP) присадок на основе хлора, серы и фосфора. Показано, что наибольшей эффективностью обладают синтетические сложные эфиры, характеризующиеся высокой полярностью, обеспечивающей прочную адгезию к металлу, и повышенной термоокислительной стабильностью. Для объективной оценки свойств смазок применяется комплекс методик: трибометрические испытания на четырёхшариковой машине (определение показателя износа, критической нагрузки задира и нагрузки сваривания) и анализ термической стабильности методами дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ). На примере конкретных смазочных материалов («Политрен ХП-16», «Multidraw AL WM») продемонстрированы их критические температурные пороги, определяющие пригодность для скоростного калибрования.

**Ключевые слова:** калиброванный прокат, волоочение, дробеструйная обработка, жидкие волоочильные смазки, трибологические характеристики, термоокислительная стабильность, противозносные присадки, противозадирные присадки, дифференциально-сканирующая калориметрия, термогравиметрия

В условиях роста требований к качеству калиброванного проката, особенно в автомобилестроении и машиностроении, где критичны размерная точность, шероховатость и отсутствие поверхностных дефектов (задиры, рисок), особое значение приобретает оптимизация процесса волоочения – ключевого передела, формирующего как геометрию, так и структурно-механические свойства изделия [1]. Все эти параметры напрямую зависят от условий трения и теплоотвода в очаге деформации, а значит – от трибологических и термоокислительных характеристик применяемой смазки.

Производство калиброванного проката основано на процессе волоочения с малыми обжатиями (калибрование) горячекатаной или термически обработанной заготовки, предварительно подвергнутой травлению или механической поверхностной обработке (дробеструйная, дробеметная и др.). В частности, при механическом удалении окалина на поверхности заготовки формируется более развитый, чем после травления, микрорельеф [2].

Калибрование после дробеструйной обработки исключает применение традиционных подсмазочных покрытий (фосфаты, бура и др.). Это делает жидкие смазки единственным источником граничного (или в идеале – почти гидродинамического) смазывания в очаге деформации [3, 4]. В этих условиях эффектив-

ность смазки определяется не только её составом (базовое масло + присадки), но и её способностью выдерживать экстремальные трибологические и термические нагрузки [5]. При превышении термоокислительного предела смазки происходит её деструкция (разложение): рост кислотного числа, снижение вязкости, образование смол и осадков, что неминуемо приводит к разрушению смазочной плёнки, переходу в режим сухого трения и появлению дефектов.

Дробеструйная обработка устраняет окалину и создаёт равномерно шероховатую поверхность, но не формирует пористой структуры, как при фосфатировании, и потому не обеспечивает удержание смазки. В этих условиях необходима высокая адгезия смазки к металлу (полярность, поверхностная активность) [3].

Основу современных жидких смазок для калибрования после дробеструйной обработки составляют базовые масла (минеральные, синтетические или водные эмульсии) и различные функциональные присадки, придающие смазке граничные смазывающие свойства.

Наиболее эффективными с точки зрения трибо- и термостабильности являются синтетические сложные эфиры, например Multidraw AL WM [6]. Их преимущество обусловлено:

– высокой полярностью молекул, обеспечивающей прочную адсорбцию на металлической поверхности;

- отсутствием низкомолекулярных фракций, испаряющихся в зоне деформации;

- высокой термоокислительной стабильностью.

В результате использования синтетических сложных эфиров температура поверхности проволоки на выходе из волоки удерживается менее 30 °С, что является критерием стабильной работы смазки и эффективного теплоотвода [6].

Минеральные масла (например, Multipress РЕК с противозадирными присадками) широко применяются благодаря низкой стоимости, однако уступают синтетическим маслам по коэффициенту трения и термоустойчивости [6].

Соединения, содержащие хлор, серу, фосфор, используются в качестве противоизносных (AW) и противозадирных (EP) присадок [7]. Механизм действия заключается в формировании хемосорбированных или реакционных (сульфидных, фосфидных, хлоридных) плёнок толщиной 10–100 нм на поверхности металла при достижении пороговой температуры активации присадки. Эти плёнки обладают низким сдвиговым сопротивлением и высокой несущей способностью, предотвращают локальное схватывание и переход в режим сухого трения.

AW/EP-присадки входят в состав жидких волоочильных смазок, применяемых после дробеструйной обработки. Наиболее распространены присадки на основе:

- хлора (например, Росойл-101М, Политрен ХП-16);

- фосфора (например, EXTRUDOIL 702F).

Важно отметить, что эффективность присадки зависит от базового масла и режима трения. Например, в условиях гидродинамического смазывания присадки менее востребованы, и ключевым становится вязкостно-температурное поведение базового масла [6]. В то же время при высоких обжатиях в стандартных монолитных волокнах именно EP-присадки определяют предел работоспособности смазки.

Трибологические свойства – ключевой критерий пригодности смазки для волочения калиброванного проката после дробеструйной обработки, когда отсутствие подмасочного покрытия делает смазку единственным барьером между деформируемым металлом и поверхностью волоки [5]. В таких условиях способность смазки сохранять несущую способность и обеспечивать стабильное граничное или гидродинамическое смазывание определяет не только усилие деформации, но и качество поверхности, износ инструмента и остаточные напряжения в изделии.

Трибологические свойства волоочильных смазок определяют по ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине, оценивая:

- показатель износа – диаметр пятна износа при заданной нагрузке и времени; чувствителен к противоизносным присадкам;

- критическую нагрузку задира – нагрузка, при которой резко возрастает сила трения из-за разрушения смазочной плёнки;

- нагрузку сваривания – нагрузка, при которой происходит схватывание шариков; по нагрузке сваривания судят о пределе несущей способности поверхностно-активных веществ в смазочном материале и способности масла предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей.

Термоокислительная стабильность определяет способность жидкой смазки сохранять свои физико-химические и трибологические свойства при длительном воздействии высоких температур и кислорода, что неизбежно возникает в очаге деформации при калибровании после дробеструйной обработки [8]. Физический смысл показателя заключается в том, что он характеризует сопротивляемость смазочного материала окислению и испарению, поэтому чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность смазочного материала.

Процесс калибрования сопровождается значительным тепловыделением двумя путями: пластической деформацией и трением на границе «заготовка–волока» [9]. Нагрев металла от работы деформации очень высок. Это может привести к деструкции смазочного материала, которое сопровождается [8]:

- ростом кислотного числа – продукты окисления (органические кислоты) агрессивны к поверхности инструмента и могут вызывать коррозионно-механический износ;

- снижением вязкости – уменьшение несущей способности смазочной плёнки;

- образованием смол и осадков – приводит к засорению каналов подачи смазки, нарушению её равномерного распределения на поверхности протягиваемого металла.

В результате происходит переход в режим нестабильной граничной или даже сухой смазки, рост коэффициента трения, появление «блестящего металла», задиры, риски и других поверхностных дефектов, что негативно сказывается на качестве поверхности калиброванного проката.

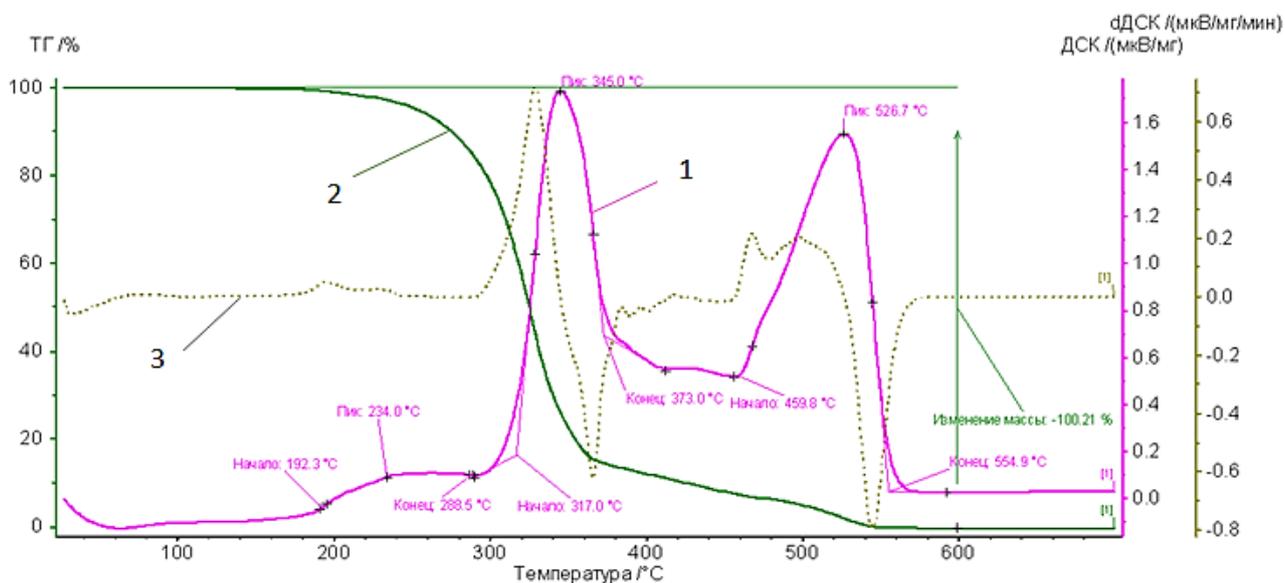
Для оценки термоокислительной стабильности смазок применяют следующие методы: термогравиметрический анализ (ТГ) и дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК). Термоокислительную стабильность оценивают по температуре, при которой наблюдаются 5%-е потери массы образца смазки, термостойкость – по температуре начала окисления смазочного материала [3,10].

Например, для смазки Политрен ХП-16 [3]:

- $T_{ox} = 192^{\circ}\text{C}$  (ДСК,  $\text{O}_2$ , 10 °С/мин);

- $T_{5\%} = 260\text{C}$  (ТГ, 20 °С/мин, воздух) (см. рисунок).

Это позволяет рекомендовать её для скоростного калибрования до 20 м/с при условии эффективного охлаждения инструмента.



Термограмма технологической смазки Политрен ХП-16 [3]:  
 1 – кривая ДСК (экзотермический пик окисления при 192°С);  
 2 – кривая ТГ (5%-я потеря массы при 260°С); 3 – кривая dДСК

Синтетическое масло Multidraw AL WM демонстрирует ещё более высокую стабильность: в тех же условиях  $T_{\text{ок}} > 210^{\circ}\text{C}$ , а температура поверхности проволоки удерживается менее  $30^{\circ}\text{C}$ , что является прямым признаком отсутствия деструкции смазки [6].

#### Заключение

1. Эффективность процесса калибровки проката после дробеструйной обработки, исключающей применение традиционных подсмазочных покрытий, в решающей степени определяется свойствами жидкой технологической смазки. Именно она становится единственным барьером, предотвращающим износ и задиры, и обеспечивающим качество поверхности.

2. Работоспособность смазки в условиях экстремальных давлений, высоких скоростей волочения (до 20 м/с) и температур в очаге деформации (до  $250^{\circ}\text{C}$  и выше) определяется двумя группами свойств: трибологическими свойствами (способность формировать стабильную граничную пленку с низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью, что напрямую влияет на усилие волочения, износ инструмента и шероховатость поверхности) и термоокислительной стабильностью (способность противостоять термическому разложению и окислению).

3. Наибольшей эффективностью обладают синтетические базовые масла (например, сложные эфиры), характеризующиеся высокой полярностью, термостабильностью и отсутствием легколетучих фракций. Противозносные (AW) и противозадирные (EP) присадки на основе хлора, серы и фосфора являются необходимым компонентом для формирования реакционных пленок, предотвращающих схватывание в условиях граничного трения.

4. Комплексная методика, сочетающая триболометрические испытания (на четырехшариковой машине) и анализ термической стабильности (ДСК/ТГ), позволяет объективно оценить и прогнозировать поведение смазочных материалов в реальных производственных условиях.

#### Список источников

1. Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г., Ульянов А.Г. Технологические аспекты производства высокопрочной калиброванной стали // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2012. № 38. С. 85-89.
2. Особенности проектирования режимов волочения калиброванного проката после дробеструйной обработки поверхности / Д.П. Канаев, А.Ю. Столяров, А.Г. Корчунов, Д.В. Константинов, М.В. Зайцева // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2022. Т. 20. № 5. С. 223-229.
3. Пивоварова К.Г., Корчунов А.Г., Тагирова В.М. Влияние эксплуатационных свойств технологической смазки на качество поверхности калиброванного проката после дробеструйной обработки // *Черные металлы*. 2024. № 6(1110). С. 26-30.
4. Кальченко А.А., Пащенко К.Г., Кургузов С.А. Волочение проволоки в режиме жидкостного трения // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. №1(32). С. 26-30.
5. Трение и смазки при волочении проволоки в монолитных волоках: учебное пособие / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2025. 293 с.
6. Del Rey J. C. et al. Effect of Die Design and Lubricant on ZnAl15% Wire Drawing: An Experimental

- Approach with Pressure/Hydrodynamic and Conventional Drawing Dies. *Lubricants*. 2025;13(11):481.
7. Медведева В.В. Повышение триботехнических характеристик консистентных смазочных материалов путем применения дисперсных частиц гидросиликатов магния: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Медведева. С.-Петербург, 2018. 143 с.
  8. Huang M. et al. Investigation into friction and wear characteristics of 316L stainless-steel wire at high temperature. *Materials*. 2022;16(1):213.
  9. Santos T. et al. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process. *Revista de Metalurgia*. 2023. 59(1):e234.
  10. Результаты апробации метода определения показателей термоокислительной стабильности смазочных масел / Б.И. Ковальский, В.Г. Шрам, О.Н. Петров, А.Н. Сокольников, Д.В. Агровиченко // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 1. С. 139-144.

### Сведения об авторах

**Пивоварова Ксения Григорьевна** – д-р техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением им. М.И. Бояршинова, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kgpivovarova@gmail.com, +79068544143

**Тагирова Венера Марсовна** – аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: odinaeva.vm@mmk-metiz.ru

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### TRIBOLOGICAL AND THERMO-OXIDATIVE CHARACTERISTICS OF LIQUID DRAWING LUBRICANTS USED FOR CALIBRATING ROLLED PRODUCTS AFTER SHOT BLASTING

**Pivovarova Ksenia G.** – DrSc(Eng.), docent, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kgpivovarova@gmail.com

**Tagirova Venera M.** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: odinaeva.vm@mmk-metiz.ru

**Abstract.** The article investigates the tribological and thermo-oxidative characteristics of liquid drawing lubricants used in the calibration of rolled products after surface shot blasting. This preparation method eliminates the use of traditional sub-lubricant coatings (phosphate, borated), making the liquid lubricant the only barrier that prevents tool wear and forms the product's surface quality. Under conditions of extreme pressure, high drawing speeds, and significant heat generation, the lubricant's performance is determined by its ability to form a stable boundary film with a low friction coefficient and high load-carrying capacity, as well as its resistance to thermal decomposition and oxidation. An analysis of the component composition of modern lubricants is carried out, including base oils (mineral, synthetic esters, aqueous emulsions) and packages of anti-wear (AW) and extreme pressure (EP) additives based on chlorine, sulfur, and phosphorus. It is shown that synthetic esters are the most effective, characterized by high polarity, which ensures strong adhesion to metal, and increased thermo-oxidative stability. A set of methods is used for the objective assessment of lubricant properties: tribometric testing on a four-ball machine (determination of wear index, seizure load, and weld load) and analysis of thermal stability by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG). Using specific lubricants ("Politren HP-16", "Multidraw AL WM") as examples, their critical temperature thresholds, which determine suitability for high-speed calibration, are demonstrated.

**Keywords:** calibrated rolled products, drawing, shot blasting, liquid drawing lubricants, tribological characteristics, thermo-oxidative stability, anti-wear additives, extreme pressure additives, differential scanning calorimetry, thermogravimetry

---

Ссылка на статью:

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М. Триботехнические и термоокислительные характеристики жидких волоочильных смазок, применяемых для калибрования проката после дробеструйной обработки // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 20-23.  
 Pivovarova K.G., Tagirova V.M. Tribological and thermo-oxidative characteristics of liquid drawing lubricants used for calibrating rolled products after shot blasting. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 20-23.

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.771.252

Сычков А.Б., Савченко С.А., Тулупов О.Н., Моллер А.Б.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НА ЛИНИИ «СТЕЛМОР» В ПОДШИПНИКОВОМ БУНТОВОМ ПРОКАТЕ ИЗ СТАЛИ ШХ15

**Аннотация.** Актуальность работы заключена в высокой научной и практической значимости разработки технологии производства подшипниковой марки стали ШХ15, улучшения ее структурообразования на современном мелкосортно-проволочном стане 370/150 из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) сечением 250×300 мм, имеющего высокую скорость прокатки – 100 м/с и более, проволочный 10-клетьевого и редуционно-калибровочный 4-клетьевого блоки, оказывающие значимое влияние на структурообразование проката. Целью данной работы является исследование и формирование однородной микроструктуры и свойств бунтового проката путем разработки режимов предварительной термической обработки (ПТО – гомогенизирующего отжига (ГО) литой структуры НЛЗ) и окончательной ТО (ОТО) – сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация – СО), обеспечивающих максимальную технологичность переработки бунтового проката у потребителей. Исследования качественных характеристик осуществлялись по следующим показателям: макро-структура (НЛЗ) сечением 250×300 мм на макротемплетах, микроструктура и механические свойства бунтового проката диаметром 5,5–18,5 мм – в соответствии с методическими стандартами. Впервые установлено, что уровень карбидной сегрегации достигается путем значительной степени вытяжки и частичной гомогенизации макро-структуры НЛЗ и раскатов при обработке в линии стана 370/150. НЛЗ для производства бунтового проката диаметром более 8,5 мм необходимо подвергать предварительной ТО – ГО (температура 1200°C в течение не менее 6 ч). Разработаны и внедрены эффективное двухстадийное охлаждение бунтового проката из стали ШХ15 на линии «Стелмор» (температура виткообразования – 860–870°C, скорость воздушного охлаждения – 18-20°C/с) с получением сорбитообразного перлита в количестве не менее 95% с межпластинчатым расстоянием 0,07-0,14 мкм, толщиной пластин цементита не более 0,08 мкм и незначительных (менее 5%) участков тонкопластинчатого и среднеластинчатого перлита, без подкалки. Результаты исследований позволили достичь поставленную в настоящей статье цель.

**Ключевые слова:** микроструктура, линии двухстадийного охлаждения «Стелмор», бунтовой прокат, сталь подшипникового назначения, непрерывнолитая заготовка, комплекс качественных показателей, сорбит, зернистый перлит, световой микроскоп, энергодисперсионный микроанализатор

### Введение

Высокие требования, предъявляемые к исходному материалу при производстве роликовых и шариковых подшипников, привели к дальнейшему развитию и совершенствованию качества металла на всех этапах производства. В условиях Белорусского металлургического завода (БМЗ), начиная с получения непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) крупного сечения – 250×300 мм и заканчивая бунтовым прокатом, произведенным на современном проволочном стане 370/150 со сложным напряженно-деформационным состоянием (НДС) – высокая скорость деформации, определяемая линейной скоростью рабочих валков – 100 м/с и более, кратность прокатки – до 37 рабочих катающих клетей, суммарный коэффициент вытяжки равен 3074, соответствующих требованиям мировых стандартов и конечных заказчиков-потребителей [1].

Особенностью современных рынков является использование бунтового проката как исходного сырья для производства роликов и шариков методом холодной объёмной штамповки (ХОШ) для подшипников малых и средних размеров, что, в свою очередь, накладывает дополнительные требования к качеству

бунтового проката [2]. Важными характеристиками работы подшипниковой стали являются высокие значения износостойкости и прочности, сопротивления усталости при малой хрупкости, упругости – эластичности. Все перечисленные характеристики обеспечиваются получением однородного по сечению химического состава и микроструктуры металла. Присутствие в стали неметаллических включений, карбидной сегрегации, разнотерности и других негативных структурных и качественных показателей приводят к возникновению и росту концентрации микронапряжений в процессе эксплуатации подшипника и его преждевременному разрушению (выкрашиванию, растрескиванию и др.) [3].

В производстве подшипников широкого назначения на постсоветском пространстве основную долю сортамента по-прежнему занимает сталь типа ШХ15, имеющая существенный недостаток – структурную неоднородность, вызванную заэвтектоидным химическим составом – высоким содержанием углерода (0,95–1,05%) и хрома (1,30–1,65%). Это приводит, в свою очередь, к развитию ликвационных процессов и образованию карбидной неоднородности.

Высокие требования к качественным характеристикам металлопроката определены особыми требованиями, предъявляемыми к подшипникам, что поз-

воляет увеличить срок службы узлов, машин, агрегатов и др. [4]. Кроме того, тенденцию к повышению качества металлопродукции, в частности металла для изготовления деталей подшипников, обуславливает и растущая конкуренция на международном рынке [5].

Традиционные подходы, обеспечивающие получение требуемого комплекса свойств, основаны на выборе химического состава стали, технологических параметров выплавки, внепечной обработки, разливки, прокатки и ТО НЛЗ и бунтового проката. Ранее проведенные исследования по определению влияния материалов и технологических параметров на сталеплавильном и прокатном переделах по обеспечению качественных характеристик НЛЗ и бунтового проката из стали ШХ15 недостаточны для полноценного анализа и формулирования выводов в условиях БМЗ. Это связано с узкой металлургической направленностью, особенностями оборудования и условиями производства [1].

Необходимо было также оценить целесообразность применения предварительной ТО НЛЗ – гомогенизирующего (диффузионного) отжига для исключения микрофизической дендритной ликвации и получения однородной по химическому составу, структуре и свойствам заготовки и проката из нее.

Разработка технологии поточной ТО, обеспечивающей формирование эффективных микроструктур горячекатаного проката на линии «Стелмор» и после сфероидизирующего отжига (СО), основана на изучении опыта производства на специализированных предприятиях, за счет научно обоснованного выбора:

- режимов ГО НЛЗ;
- эффективной технологии двухстадийного охлаждения бунтового проката из марки стали ШХ15 на линии «Стелмор», обуславливающей образование тонкодисперсного сорбитообразного перлита;
- температурно-временных режимов последующей ТО для сфероидизации пластинчатого перлита бунтового проката.

Актуальность работы обусловлена высокой научной и практической значимостью в разработке

технологии производства подшипниковой марки стали ШХ15 путем новых теоретических и экспериментальных исследований процессов структурообразования (минимизация карбидной неоднородности, получение однородного мелкодисперсного и зернистого перлита) на современном мелкосортно-проволочном стане 370/150 из НЛЗ крупного сечения 250×300 мм, имеющего особенности оборудования и технологического процесса (высокая скорость прокатки порядка 100 м/с и более, наличие проволочного 10-клетьевого и редуционно-калибровочного 4-клетьевого блоков, оказывающих значимое влияние на структурообразование проката и т.п.).

Целью работы является исследование и формирование качественной однородной микроструктуры и свойств бунтового проката за счет разработки эффективных режимов ПТО (ГО литой структуры) и ОТО (сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация), обеспечивающих максимальный уровень технологичности переработки такого бунтового проката у потребителей (подшипниковых заводов). Достижение поставленной цели является формированием макро- и микроструктур путем разработки технологии ПТО и ОТО стали типа ШХ15 в условиях установленного технологического оборудования – ДСП-3, УПК, НРС, 4-ручьева МНЛЗ, стан 370/150 БМЗ из НЛЗ большого сечения 250×300 мм [6].

Двухстадийное охлаждение на линии «Стелмор» стана 370/150 (рис. 1) осуществляется на первой стадии водой в секциях №1-3 после 10-клетьевого блока BGV и в секциях №4, 5 после 4-клетьевого чистового блока до температуры нормализующей прокатки и/или ниже в зоне виткообразователя. На второй стадии происходит охлаждение воздухом на линии «Стелмор» после формирования витков на виткообразователе. По роликовому транспортеру витки бунтового проката (катанки) движутся с возможностью регулирования скорости, подачи воздуха до 20 вентиляторов при открытых или закрытых термоизолирующих крышках.

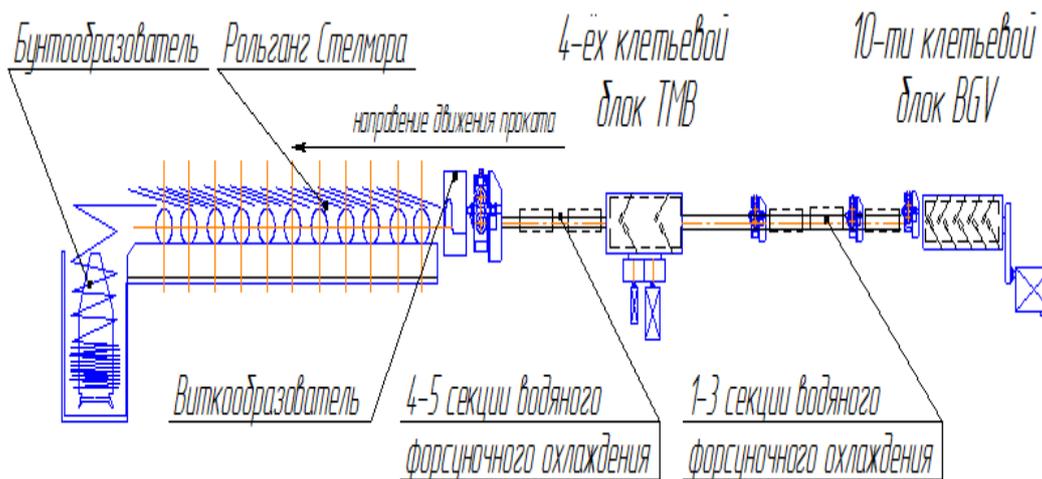


Рис. 1. Схема поточного охлаждения на линии «Стелмор» стана 370/150

**Материалы и методы исследования**

Материалом исследования является бунтовой прокат диаметром 5,5–18,5 мм из подшипниковой марки стали ШХ15. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Исследование качественных характеристик опытных плавок осуществлялось по следующим показателям: макроструктура (НЛЗ) сечением 250×300 мм на макротемплетах, микроструктура и физико-механическим испытаниям бунтового проката диаметром от 5,5 до 18,5 мм в соответствии с методическими стандартами:

– макроструктура НЛЗ – ГОСТ Р 58228, ОСТ 14-1-235; оценка дисперсности перлита – ГОСТ 8233; определение величины действительного зерна – ГОСТ 5639; измерение твердости по Бринеллю – ГОСТ 9012; требования к микроструктуре – ГОСТ 801; оценка величины обезуглероживания – ГОСТ 1763; ISO 3887; оценка качества поверхности – ГОСТ 21014; определение неметаллических включений – ГОСТ 1778 (метод Ш4); механические испытания на растяжение – ГОСТ 1497.

Микроструктурное исследование проводили при помощи:

– инвертированного металлографического микроскопа отраженного света «OLYMPUS GX-51» с цифровой приставкой (Япония);

– автоматической системы исследования микроструктуры и оценки загрязненности стали неметаллическими включениями (НВ) Thixomet;

– электронного микроскопа TESKAN VEGA GMS (Чехия) с энергодисперсионным микроанализатором для определения химического состава и размеров НВ с возможностью построения треугольника Pirelli.

Определение химического состава образцов осуществлялось на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460 (Thermo SCIENTIFIC, Swizerland) в соответствии с ГОСТ 18895-97 «Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа». Уточнение содержания углерода и серы с помощью анализатора CS-200 (LECO Corporation, USA) в соответствии с ГОСТ 22536.1-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения общего углерода и графита» и ГОСТ 12345-2001 «Стали легированные и высоколегированные. Методы определения серы». Содержание азота и кислорода определяли с помощью анализатора TC-400 (LECO Corporation, USA) в соответствии с ГОСТ 17745-90 «Стали и сплавы. Методы определения газов».

Микроструктурное исследование карбидной сегрегации проводили согласно ГОСТ 801 в соответствии со шкалами.

Микроструктура: ГОСТ 801 шкала 8 должна состоять из равномерно распределенного мелкозернистого перлита при увеличении ×500.

Карбидная ликвация: ГОСТ 801 шкала 6 увеличение ×100.

Карбидная сетка: ГОСТ 801 шкала 4 при увеличении ×500, ×1000.

В ГОСТ 801 в большинстве случаев приведены схематические изображения оцениваемых параметров.

Определение числа твердости на твердомемере НТУ 250В проводили в соответствии с ГОСТ 9012 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю», испытания бунтового проката на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497 и ISO 6892 на разрывной машине Zwick/Roell Z250.

**Результаты и их обсуждение**

В соответствии с поставленной целью исследований проведена разработка технологии формирования качественной однородной микроструктуры и свойств бунтового проката за счет установления эффективных режимов ПТО (ГО литой структуры) и ОТО (сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация), обеспечивающих максимальный уровень технологичности переработки такого бунтового проката у потребителей (подшипниковых заводов).

1. Гомогенизирующий отжиг непрерывнолитой заготовки [7, 8].

Определено влияние предварительной термической обработки (ГО – выдержка при температуре 1200°С в течение не менее 6 ч) НЛЗ на качественные показатели и степень карбидной неоднородности бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15. Выполнены исследования и проанализированы результаты качественных показателей образцов катанки из стали ШХ15.

Без применения ГО значения карбидной ликвации и карбидной сетки соответствовали требованиям потребителей при оценке структур в соответствии с ГОСТ 801 установлено, что карбидная ликвация соответствовала требованиям на профилях 5,5; 6,5 и 11,5 мм, на других профилях превышала допустимые значения (2-3-й балл), требования по показателям структурная полосчатость и карбидная сетка неудовлетворительные на профилях 12,5 и 10,5 мм соответственно (рис. 2, 3).

С применением ГО по результатам исследований установлено, что уровень карбидной ликвации по всем профилям соответствовал требованиям согласно ГОСТ 801 (0,5-1 баллов) при норме – не более 2 баллов. Структурная полосчатость по ГОСТ 801 1-2 балла при норме не более 2 баллов (рис. 4, 5).

Таблица 1

Химический состав марки стали ШХ15

Массовая доля элементов согласно ГОСТ 801, %											
Марка стали	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Ni+Cu	Ti	O <sub>2</sub>
					не более						
ШХ15	0,95-1,05	0,20-0,40	0,17-0,37	1,30-1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	0,50	0,010	15 ppm

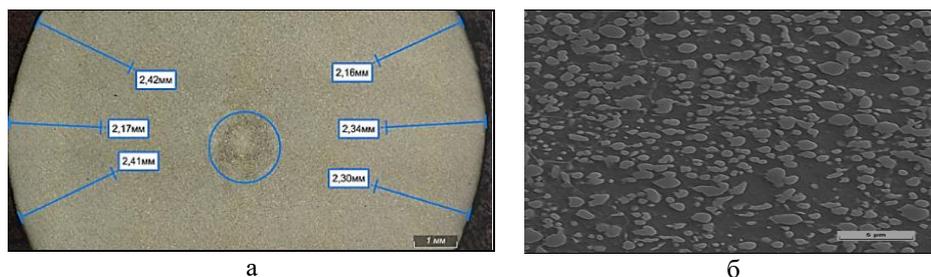


Рис. 2. Макроструктура бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали ШХ15 из НЛЗ без ГО, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты,  $\times 50$  (а), зернистый перлит после СО из НЛЗ без ГО,  $\times 10000$  (б)

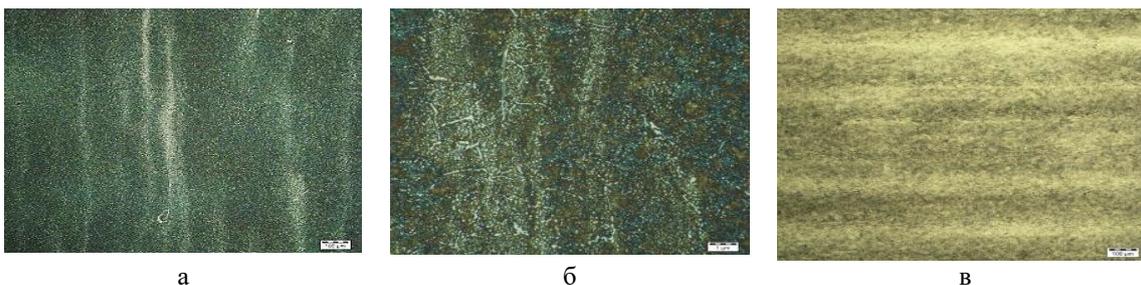


Рис. 3. Карбидная неоднородность бунтового проката без применения ГО НЛЗ, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты: а – ликвация,  $\times 100$ ; б – сетка,  $\times 1000$ ; в – структурная полосчатость,  $\times 100$

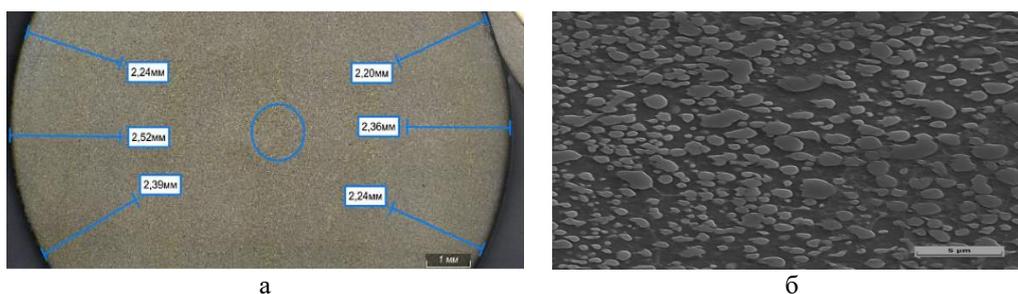


Рис. 4. Макроструктура бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали ШХ15 из НЛЗ с ГО, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты,  $\times 50$  (а), зернистый перлит после СО из НЛЗ с ГО,  $\times 10000$  (б)

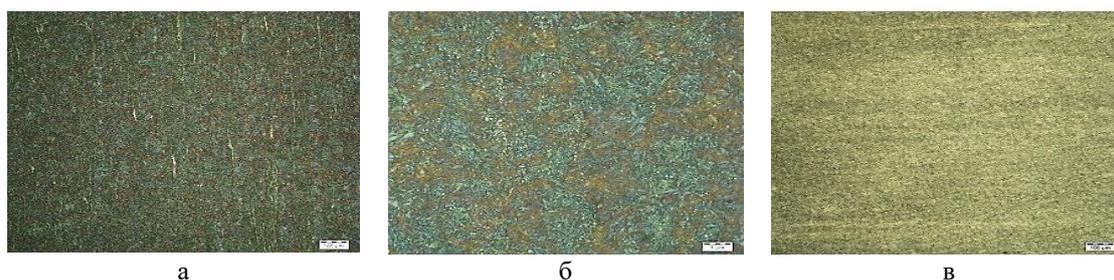


Рис. 5. Карбидная неоднородность бунтового проката с применением ГО НЛЗ, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты: а – ликвация,  $\times 100$ ; б – сетка,  $\times 1000$ ; в – структурная полосчатость,  $\times 100$

Установлено, что получение требуемой микроструктуры проката обеспечивается на профилях диаметрами 5,5; 6,5 и 8,5 мм за счет значительной суммарной вытяжки при горячей деформации. Это обу-

словливает на профилях бунтового проката малых диаметров (не более 8,5 мм или суммарным обжатием не менее 1286,4) энергоэкономную технологию производства. Качество бунтового проката диаметрами от

9,5 до 18,5 мм достигается за счет проведения ГО НЛЗ, при котором минимизируется химическая неоднородность за счет диффузионных процессов.

Наилучшей исходной микроструктурой под сфероидизирующий отжиг при прокатке катанки из ШХ-сталей на проволочных станах является мелкодисперсный пластинчатый перлит. Получение равномерной мартенситной и бейнитной структуры затруднительно, а катанка в бунтах с закалочной структурой металла склонна к изломам. Сфероидизация грубопластинчатого перлита не позволяет получить полностью мелкозернистую перлитную структуру, поскольку Сг и Mn, распределяясь в цементите, замедляют процесс сфероидизации из-за большого межпластинчатого расстояния.

Результаты исследований макро- и микроструктуры, твердости согласно ГОСТ 801 и дополнительно механических свойств (относительного удлинения, предела текучести, временного сопротивления разрыву) бунтового проката диаметром 5,5; 11,5 и 18,5 мм из стали ШХ15 показали:

- структура бунтового проката с ГО НЛЗ после прокатки имеет гарантированное отсутствие осевой ликвации;

- размер аустенитного зерна бунтового проката соответствует номеру 8 без ГО и номеру 7 с ГО;

- мелкодисперсный сорбитообразный перлит получен при использовании разработанного управляемого поточного двухстадийного охлаждения как без ГО, так и с ГО металла;

- твердость бунтового проката без ГО и с ГО НЛЗ соответствует требованиям ГОСТ 801;

- с увеличением размера сечений катанки относительное удлинение, предел текучести, временное сопротивление разрыву из НЛЗ с ГО уменьшаются, так как в металле, испытывающем полиморфное превращение при гомогенизации в области высокотемпературной фазы, возможен рост зерна.

Однородная структура катанки после ГО НЛЗ позволила гарантированно получить микроструктуру с полной глобулизацией пластинчатого перлита после сфероидизирующего отжига в бунтовом прокате и значительное улучшение механических свойств заготовки для изготовления деталей подшипников.

2. Сорбитизация структуры пластинчатого перлита при двухстадийном охлаждении на линии «Стелмор» [9-12].

Изучен и проанализирован процесс водяного форсуночного и воздушного охлаждения бунтового проката из стали ШХ15 при проведении двухстадийной поточной термообработки в условиях стана 370/150, заключающийся в том, что раскат на первой стадии охлаждают с помощью воды до температуры  $t_k = 870 \pm 20^\circ\text{C}$  и на второй стадии воздушным охлаждением с установленной скоростью (18-20 °C/с) в зависимости от скорости перемещения витков в линии «Стелмор», количества и мощности включения вентиляторов и диаметра готового профиля.

Выполнены измерения температур витков бунтового проката на первом вентиляторе при разных режимах его работы и определена математическая зависимость изменения температуры катанки в зависимости от интенсивности подачи воздуха.

Разработаны методики управления водяным охлаждением на пяти секциях водяного охлаждения (3+2 секции) и воздушным охлаждением БСО на рольганге Стелмора в линии катанки стана 370/150. Для диаметров 5,5–18,5 мм охлаждение с установленной скоростью обеспечивается расчетным количеством задействованных вентиляторов от 3-х до 10-ти и мощностью включения от 25 до 90%.

По результатам измерений и обработки полученных данных методом наименьших квадратов получены 3 линейные зависимости – множественные регрессии по расходу воды и температуры охлаждения бунтового проката на свободном воздухе:

$$- W = 75,309 \cdot d - 178,57;$$

$$- T_{\text{центр}} = 1227,8 - 55,14 \cdot d - 34,2 \cdot n - 172,31 \cdot V_T - 3,92 \cdot P;$$

$$- T_{\text{края}} = 1121,06 - 40,54 \cdot d - 31,54 \cdot n - 215,9 \cdot V_T - 2,22 \cdot P,$$

где  $W$  – расход воды, м<sup>3</sup>/ч;  $d$  – диаметр проката, мм;  $n$  – количество вентиляторов;  $V_T$  – скорость транспортировки витков, м/с;  $P$  – мощность вентиляторов, %.

Уравнения регрессии характеризуются следующими статистическими характеристиками:

- Для водяного охлаждения объем расчетной выборки  $N = 80$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 5,987$  и  $F_{(\text{расч})} = 990,05$ , коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 2,447$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 31,47$ , множественной корреляции  $R = 0,997$ , коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,994$ ,  $R_{(\text{табл})} = 0,22$ , ошибка оценки зависимой переменной по уравнению составила 2,5%, что меньше 5%, это свидетельствует о том, что уравнение статистически значимо.

- Для воздушного охлаждения раската на линии «Стелмор»:

- для центра витка объем расчетной выборки  $N = 2251$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 2,38$  и  $F_{(\text{расч})} = 4344,8$ ; коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 1,96$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 110,34$ ; 56,10; 76,41; 34,37; 67,25 (для параметров - свободный член  $d, n, V_T, P$ ), множественной корреляции  $R = 0,94$ ; коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,89$ ;  $R_{(\text{табл})} = 0,041$ .

- для края витка объем расчетной выборки  $N = 2351$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 2,38$  и  $F_{(\text{расч})} = 2871,1$ ; коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 1,96$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 91,41$ ; 37,64; 65,41; 38,28; 34,27 (для параметров Свободный член  $d, n, V_T, P$ ), множественной корреляции  $R = 0,91$ ; коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,83$ ;  $R_{(\text{табл})} = 0,040$ .

Определена требуемая интенсивность охлаждения для бунтового проката диаметром от 5,5 до 18,5 мм с учетом условий [1] и результатов эксперимента.

3. Сфероидизирующий отжиг на структуру зернистого перлита [13].

Для того чтобы сформировать структуру исходного аустенита, необходимо четко регулировать важнейшие параметры стадии сфероидизирующего отжига. Продолжительность выдержки при температуре отжига выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимую полноту превращения перлита в аустенит, а также максимально выровнять температуры во всем объеме металла. Если форма выделения карбидов, зависящая от состояния аустенита, определяется температурой отжига металла, то величина выделившихся карбидов, дисперсность карбидной фазы, определяется скоростью охлаждения. В проведенных исследованиях по четырем режимам показано, что изменение температуры и скорость охлаждения во всех режимах одинаковы. Итак, установлены зависимости:

– 1-й режим – 10% сокращения времени СО – достигнута необходимая коалесценция дисперсных частиц;

– 2-й режим – 25% сокращения времени СО – сформированы сфероидальные частицы по границам зерен;

– 3-й режим – 50% сокращения времени СО – установлено равновесное – однородное распределение карбидов;

– 4-й режим – 75% сокращения времени СО – степень сфероидизации не достигнута.

Определена ключевая роль циклического сфероидизирующего отжига с уточненным временем выдержки в области подкритических температур (620–780°C). Установлено, что данный процесс не является простым суммированием идентичных операций. Напротив, каждый последующий термоцикл вносит качественные изменения в микроструктуру, что обуславливает необходимость тщательного подбора количества циклов и длительности выдержек. Установлена прямая зависимость кинетики коалесценции карбидной фазы от длительности выдержки при маятниковом отжиге: с уменьшением времени по режимам от №1 к №3 наблюдается рост среднего размера глобулярных карбидов. Росту дисперсности карбидных частиц сопутствует снижение их объемной доли и увеличение среднего межкарбидного расстояния в структуре сфероидизированного перлита. Режим №1, обеспечивающий минимальный размер карбидов (0,484–0,560 мкм) и их максимальную плотность распределения, формирует наиболее однородную и дисперсную структуру. Режим №2 фиксирует процесс коалесценции: карбиды укрупняются, их объемная доля снижается, а расстояние между ними увеличивается по сравнению с Режимом №1. Это демонстрирует эволюцию структуры от дисперсной к равновесной сфероидальной. Микроструктура, полученная по режиму №3, характеризуется укрупненными сфероидальными карбидами, соответствующими регламентированным требованиям ГОСТ 801. Таким образом, варьируя параметры циклического отжига, можно целенаправленно управлять дисперсностью и морфоло-

гией карбидной фазы для получения заданных свойств в стали. Режим №4 демонстрирует неполную сфероидизацию (сохранение участков пластинчатого перлита), что подтверждает необходимость определенного минимального времени для протекания диффузионных процессов.

Получение мелкодисперсного пластинчатого перлита в исходной микроструктуре бунтового проката из стали ШХ15 обеспечивает существенное (до 50%) снижение времени циклического сфероидизирующего отжига.

При недостаточном времени выдержек (4-й режим) сфероидизация пластин карбидов железа не происходит, однако их дробление также не обнаружено. Это свидетельствует о том, что сфероидизация мелкодисперсного перлита происходит в одну стадию – непосредственно при трансформации пластин в глобули – режим неудовлетворительный.

### Заключение

1. Результаты исследований по влиянию ГО НЛЗ из стали ШХ15 в исходную микроструктуру бунтового проката до и после СО показали, что при прокатке НЛЗ с ГО и без ГО качественные показатели проката, произведенного на линии «Стелмор», практически идентичны. Структура катанки с ГО НЛЗ после прокатки имеет гарантированное отсутствие осевой ликвации. После СО происходит полная глобулизация пластинчатого перлита.

2. В ходе проведения исследований по разработке режима двухстадийного охлаждения бунтового проката из стали ШХ15 в условиях стана 370/150 разработаны методики управления водяным охлаждением на пяти секциях водяного охлаждения (3+2 секции) и воздушным охлаждением БСО на рольганге Стелмора в линии катанки стана 370/150. Определены главные критерии получения мелкодисперсного перлита, заключающиеся в том, что раскат на первой стадии с помощью воды охлаждают до температуры  $t_k = 870 \pm 20^\circ\text{C}$  и на второй стадии последующее воздушное охлаждение с установленной скоростью (18–20 °C/c) в зависимости от скорости перемещения витков (преимущественно 1 м/с) в линии «Стелмор», количества и мощности включения вентиляторов и диаметра готового профиля. Методом наименьших квадратов получены две линейные зависимости – множественные регрессии по водяному охлаждению и охлаждению раската на свободном воздухе, а также определена математическая зависимость изменения температуры катанки в зависимости от интенсивности подачи воздуха. Так, для  $\varnothing 5,5$  мм до  $\varnothing 18,5$  мм расчетное количество задействованных вентиляторов от 3-х до 10-ти и мощностью включения от 25 до 90 %.

3. Установлены допустимые критерии СО для получения глобулярного цементита с исходной микроструктурой мелкодисперсного перлита в бунтовом прокате из стали ШХ15, что обеспечило существенное (до 50%) снижение времени циклического СО. На

основании проведенных исследований по изучению и определению эффективной структуры установлено, что исходная грубопластинчатая форма выделения цементита на поверхности бунтового проката после горячей прокатки приводит к завышенным показателям глубины ОБС (не сфероидизированные пластины цементита) после СО бунтов катанки. Разработанный режим СО бунтового проката «маятникового» типа с двумя циклами повторения «нагрев-охлаждение» в температурном диапазоне 727+/-5 и 620+/-5°C с общим временем ТО 910–1980 мин позволил получить требуемые по ГОСТ 801 качественные параметры зернистого перлита.

4. Показано, что при горячей деформации степень ликвации уменьшается за счет многократных высокотемпературных нагревов и действия самой деформации, то есть проявляется эффект многоциклической ТМО, в результате улучшается однородность структуры, снижается балл карбидной неоднородности и размер карбидов, достигается равномерное распределение и округлая форма частиц карбидной и интерметаллидной фаз.

#### Список источников

1. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) / Е. Н. Коробова [и др.] // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). С. 3–11.
2. Борисов В.Н., Почукаева О.В., Почукаев К.Г. Отечественная инвестиционная техника на мировом рынке: динамика и структурные сдвиги. // Проблемы прогнозирования. 2020. № 5 (182). С. 3–13.
3. Капп Т.О. Роль производства подшипников в российской экономике // Научные труды Вольного экономического общества России. 2010. Т. 137. С. 240–245.
4. Мордасов Д.М., Фатеев Ю.Г., Зотов С.В. Исследование причин преждевременного разрушения подшипников буксового узла // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21, № 4. С. 686–695.
5. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
6. Становление и развитие ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» или Белорусскому металлургическому заводу – 40 лет: современный взгляд в прошлое, настоящее и будущее / С.А. Мозгов, Н.И. Анелькин, А.В. Манцевич, Д.Г. Войтеховский // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 33–46.
7. Влияние факторов нагрева на формирование карбидной сетки в стали ШХ15СГ / А. Б. Стеблов, В. И. Тимошпольский, Д. В. Ленартович [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 2 (34). С. 65–73.
8. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок на структуру и механические свойства металла бунтового проката из подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Сталь. 2025. № 8. С. 45–50.
9. Особенности формирования мелкодисперстной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Черные металлы. 2024. № 4. С. 65–73.
10. Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, А.Н. Завалишин, А.Б. Моллер [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 4. С. 70–80.
11. Xu X.J., Kong J.Q. Study on Cooling Process of Hot Rolled Wire Rod with Dual Phase Microstructure // Advanced Materials Research. 2012, vols. 415-417, pp. 779-783.
12. Xiurong, Zuo, Zhengyue Zhou. Study of Pipeline Steels with Acicular Ferrite Microstructure and Ferrite-bainite Dual-phase Microstructure // Materials Research, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 36-41
13. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.А. Гузова, А.Б. Сычков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79, № 3. С. 251–260.

#### Сведения об авторах

**Сычков Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: absyckov@mail.ru

**Савченко Сергей Александрович** – соискатель ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металлургия и термическая обработка металлов и сплавов Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Тулупов Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова Института металлургии, машиностроения и обработки матери-

алов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Моллер Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением им. Г.И. Бояршинова Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**ENSURING QUALITY INDICATORS OF STRUCTURE FORMATION  
ON THE STELMOR LINE IN BEARING ROLLED PRODUCTS MADE OF IX15 STEEL**

**Sychkov Alexander B.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: absychkov@mail.ru;

**Savchenko Sergey A.** – candidate for the degree of candidate of technical sciences in specialty 2.6.1 - Metallurgy and heat treatment of metals and alloys at the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Tulupov Oleg N.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Materials Pressure Processing named after M.I. Boyarshinov of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Moller Alexander B.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Boyarshinov Department of Materials Pressure Processing of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract** The relevance of this work lies in the high scientific and practical significance of developing a technology for producing bearing grade IX15 steel and improving its structure formation on a modern 370/150 small-section wire rod mill using continuously cast billets (CCB) with a cross-section of 250×300 mm, featuring a high rolling speed of 100 m/s or more, a 10-stand wire rod unit, and a 4-stand reduction and calibration unit, which significantly influence the structure formation of the rolled product. The aim of this work is to study and form a homogeneous microstructure and properties of rolled steel by developing modes of preliminary heat treatment (PHT - homogenizing annealing (HA) of the cast structure of CCB) and final heat treatment (FHT) - sorbitization of lamellar pearlite and its spheroidization - SO), ensuring maximum technological efficiency of processing rolled steel at consumers. Quality characteristics were analyzed using the following parameters: macrostructure (CCB) with a cross-section of 250×300 mm on macrotemplates, microstructure and mechanical properties of rolled products with a diameter of 5.5–18.5 mm – in accordance with methodological standards. For the first time, it has been established that the level of carbide segregation is achieved through a significant degree of drawing and partial homogenization of the macrostructure of the casting and rolled products during processing on the 370/150 mill line. Casting products for the production of coiled products with a diameter greater than 8.5 mm must undergo preliminary heat treatment (HT) (temperature - 1200°C for at least 6 hours). An efficient two-stage cooling system for IX15 steel coils was developed and implemented on a Stelmor line (coiling temperature: 860-870°C, air cooling rate: 18-20°C/s). This process yields at least 95% sorbitol-like pearlite with an interlamellar distance of 0.07-0.14 μm, a cementite plate thickness of no more than 0.08 μm, and minor (less than 5%) areas of thin-lamellar and medium-lamellar pearlite, without tempering. The research results made it possible to achieve the objective set forth in this article.

**Keywords:** microstructure, Stelmor two-stage cooling lines, rolled products, bearing steel, continuously cast billets, set of quality indicators, sorbitol, granular pearlite, light microscope, energy-dispersive microanalyzer.

---

Ссылка на статью:

Обеспечение показателей качества структурообразования на линии «Стелмор» в подшипниковом бунтовом прокате из стали IX15 / Сычков А.Б., Савченко С.А., Тулупов О.Н., Моллер А.Б. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 24-31.  
Sychkov A.B., Savchenko S.A., Tulupov O.N., Moller A.B. Ensuring quality indicators of structure formation on the Stelmor line in bearing rolled products made of IX15 steel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 24-31.

# ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 669.002.5-192

Тютеряков Н.Ш., Залилов Р.В., Козлов Р.А., Осипова О.А., Юдин Д.В.

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ СОРТОВЫХ СТАНОВ

**Аннотация.** Разработка надежных и долговечных конструкций валковой арматуры зачастую представляет значительные трудности, поскольку требуется как оценка долговечности ее отдельных деталей, так и анализ безотказности конструкций валковой арматуры в целом. В данной работе приведена методика определения показателей надежности и долговечности валковой арматуры. Объектом исследования выбрана валковая арматура PRD-01 и PRD-03, установленная в клетки №15. Приведены результаты статистической обработки данных по арматуре PRD-01 и PRD-03. Результаты показывают, что при выпуске 10 тыс. т проката вероятность аварийных отказов арматуры PRD-01 составляет 8,6%, а PRD-03 более 40%.

**Ключевые слова:** сортовой стан, валковая арматура, ролики, износостойкость, долговечность, надежность, средняя наработка, отказ

Повышение качества сортового проката является одной из приоритетных задач металлургического производства. В свою очередь, качество сортового проката в большей степени зависит от надежности конструкций используемой валковой арматуры.

На современных сортовых станах широко применяется валковая арматура качения, узлы которой содержат большое количество деталей: ролики, подшипники того или иного типа, оси, уплотнительные элементы и др. Надежность валковой арматуры непосредственно зависит от количества, способов соединения и долговечности этих деталей. Однако на практике чаще всего повышение надежности валковой арматуры качения сводится к применению новых, более износостойких материалов роликов, подшипниковых узлов и др. [1, 2].

Традиционный подход не позволяет, на наш взгляд, производить комплексную оценку работоспособности такой сложной и ответственной механической системы, какой является валковая арматура. Поэтому авторами предпринята попытка применить положения теории надежности как к оценке долговечности ее отдельных деталей, так и к анализу безотказности конструкций валковой арматуры в целом.

Объектом исследования была выбрана валковая арматура новых сортовых станом 450, 370 и 170 фирмы «DANIELI», пущенных на ОАО «ММК».

С этой целью были обобщены статистические данные о сроке службы наиболее изнашиваемых деталей роликотой арматуры качения: роликов, их осей, подшипников и др.

Оценку параметров надежности производили на основе традиционных общепринятых показателей безотказности, а именно:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- средняя наработка до отказа  $T$ .

При определении указанных показателей использовались известные зависимости [3]. Для деталей, выходящих из строя по причине износа, использовались формулы закона нормального распределения случайной величины:

$$P(t) = 0,5 - \Phi(u_q), \quad (1)$$

где  $u_q = \frac{t - \mu}{\sigma}$  – квантиль нормального распределения;

$\Phi(u_q)$  – функция Лапласа;

$\mu = T$  – средняя наработка;

$\sigma$  – стандарт отклонения.

В случае внезапных отказов (при поломках) пользовались экспоненциальным распределением:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

$$T = 1 / \lambda. \quad (3)$$

Используя данные средней наработки  $T$  и стандарт отклонения  $\sigma$ , полученные по результатам статистической обработки, рассчитывали значение нижней доверительной границы (НДГ) средней наработки  $\underline{T}$ .

Для экспоненциального распределения

$$\underline{T} = T \frac{2(N-1)}{\chi_{\alpha, 2N}^2}, \quad (4)$$

где  $\chi_{\alpha, 2N}^2$  – квантиль экспоненциального распределения.

Для нормального распределения

$$\underline{T} = T - t_{q; (r-1)} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{r}}, \quad (5)$$

где  $t_{q; (r-1)}$  – квантиль распределения Стьюдента.

Полученные значения НДГ использовались для расчета количества запасных частей  $n_0$ , необходимо-го для бесперебойной работы в течение месяца и года с учетом ожидаемой производительности

$$n_0 = \frac{t}{T} + u_q \sqrt{\frac{\sigma^2 \cdot t}{T^3}} \quad (6)$$

Для оценки надежности арматуры в целом была определена вероятность безотказной работы каждого элемента  $P_i(t)$  при производстве 10 тыс. т проката, и с учетом схемы их соединения определялась вероятность безотказной работы арматуры как системы.

В качестве примера приведем методику определения показателей надежности и долговечности валковой арматуры для наиболее «проблемной» клетки стана 450 – клетки №15 для арматуры PRD–01 и PRD–03 [4].

Исходными данными для расчета показателей надежности и долговечности являлись: количество прокатанного металла до выхода арматуры из строя; количество изношенных или замененных после ревизии арматуры деталей; причина замены деталей. Ре-

зультаты статистической обработки наработок деталей приведены в табл. 1 и 2 [4].

Арматура PRD предназначена для направления и удержания заготовки в калибрах валков. Состоит из двух пар роликов и комплекта накладок: приемных, промежуточных и выводных. Основное удержание осуществляется роликовыми парами. Накладки несут дополнительную функцию в случае износа ролика, при перекосах заготовки и т.п. Такая конструкция представляется наиболее удачной, поскольку в случае отказа одной роликовой пары прокатка может осуществляться на оставшейся паре и накладках. Поэтому при составлении схемы соединения деталей для расчета вероятности безотказной работы роликовые пары и накладки соединяются параллельно, поскольку выполняют функцию дублирования. Вероятность безотказной работы при таком соединении определяется по формуле

$$P_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \quad (7)$$

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных по арматуре PRD–01

Арматура	PRD–01				
Деталь	Ролик	Подшипник	Ось	Винтовые пары	Накладки
Средняя наработка $T$	11900,0	166600,0	294309,8	106800,0	294309,8
Стандарт отклонения $\sigma$	1410,3	19743,9	294309,8	67154,3	294309,8
НДГ $T$	11507,5	161105,7	294309,8	80371,6	294309,8
Комплект	20	40	20	5	30
Отказов в месяц при производстве 17000 т	1,7	0,2	0,5	0,8	0,5
Отказов в год при производстве 204 тыс. т	18,6	1,5	2,1	4,7	2,1
Запчастей на год	74,3	59,8	41,3	23,7	41,3
Запчастей на месяц	6,9	6,8	9,1	4,2	9,1
$P_i(t)$ $t = 10$ тыс. т	0,909	0,9999	0,963	0,925	0,963
$\lambda$	5,65E-04	2,05E-06	3,4E-06	4,1365E-05	3,4E-06

Таблица 2

Результаты статистической обработки данных по арматуре PRD–03

Арматура	PRD–03				
Деталь	Ролик	Подшипник	Ось	Винтовые пары	Накладки
Средняя наработка $T$	3440,0	20640,0	27520,0	10320,0	41280,0
Стандарт отклонения $\sigma$	403,3	2419,9	3226,6	1210,0	4839,8
НДГ $T$	3327,8	19966,6	26622,1	9983,3	39933,2
Комплект	4	8	4	1	6
Отказов в месяц при производстве 13500 т	4,5	0,8	0,6	1,6	0,5
Отказов в год при производстве 162 тыс. т	50,1	8,7	6,6	17,0	4,5
Запчастей на год	40,1	69,5	26,3	17,0	17,8
Запчастей на месяц	3,6	6,7	2,6	1,6	1,8
$P_i(t)$ $t = 10$ тыс. т	0,00001	0,999	0,9999	0,602	0,999
$\lambda$	0,002479	4,1365E-06	3,0996E-06	0,000529	2,07E-06

Отдельные же детали в группах (подшипники, оси, ролики и т.д.) соединяются последовательно. В случае последовательного соединения элементов подразумевается, что при включении системы работают все элементы, а при отказе одного элемента отказывает вся система. Вероятность безотказной работы такой системы

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) . \quad (8)$$

Таким образом, мы имеем смешанную схему соединения (см. рисунок), при анализе которой получено значение вероятности безотказной работы на момент выпуска 10 тыс. т проката [4].

Для PRD–01  $P_s(t = 10 \text{ тыс. т})$  равно 0,914; для PRD–03  $P_s(t = 10 \text{ тыс. т})$  равно 0,598.

По этим данным видно, что при выпуске 10 тыс. т проката вероятность аварийных отказов арматуры PRD–01 составляет 8,6%, а PRD–03 более 40%, что недопустимо. Низкие показатели надежности арматуры PRD–03 объясняются крайне низкими показателями стойкости самих роликов и регулировочной винтовой пары. Вероятность отказа роликов составляет практически 99,9%, для повышения вероятности безотказной работы роликов до 0,95 (т.е. вероятность отказа 5%) необходимо увеличить их среднюю наработку в 3,5 раза (с 3400 до 12000 т). Повышение средней наработки винтовой пары достаточно на 20%. При этих условиях вероятность безотказной работы арма-

туры PRD–03 составит 0,94, то есть вероятность аварийного выхода из строя при производстве 10 тыс. т проката не более 6%.

Аналогичные расчеты проведены для стана 370 – клетей №15, 16 с арматурой DR2BPA1; CTD02RS и стана 170 – клетки №2 с арматурой PTS-15.

Применение предложенной методики позволяет оценивать надежность и отдельных деталей и оборудования в целом, сравнивать различные исполнения узлов, выполняющих подобные функции и выявлять слабые места в их конструкции, а также определять необходимое количество запасных деталей арматуры для бесперебойной работы стана на заданный период времени.

#### Список источников

1. Чекмарев А.П., Чернобрюнко Ю.С. Роликовая арматура прокатных станов. М.: Metallurgia, 1964. 256 с.
2. Федин В.П., Грицук Н.Ф. Валковая арматура сортовых станов. М.: Metallurgia, 1975. 216 с.
3. Жиркин Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин: учебник. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 330 с.
4. Оншин Н.В., Тютюряков Н.Ш. Метод определения прогибов линеек валковой арматуры переменного сечения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1(13). С. 53-55.



Блок-схема соединения элементов арматуры PRD

#### Сведения об авторах

**Тютюряков Наиль Шаукатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Nltut80@yandex.ru

**Залилов Рустем Венирович** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

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

**Осипова Ольга Александровна** – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

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

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**EVALUATION OF THE RELIABILITY INDICATORS OF GUIDE FITTINGS SECTION ROLLING MILL**

**Tyuteryakov Nail Sh.** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Nltyut80@yandex.ru

**Zalilov Rustem V.** – Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

**Osipova Olga A.** – Senior lecturer at the Department of mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Yudin Danil V.** – Master's student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract.** The development of reliable and durable roller reinforcement structures often presents significant difficulties, since it requires an assessment of the durability of its individual parts, as well as an analysis of the reliability of roller reinforcement structures as a whole. This work presents a methodology for determining the reliability and durability of guide fittings. Guide fittings PRD–01 and PRD–03, installed in crate No. 15, were selected as the object of the study. The results of statistical processing of data on valves PRD–01 and PRD–03 are presented. The results show that when 10 thousand tons are produced, the rental probability of emergency failures of the PRD – 01 valve is 8.6%, and the PRD–03 is more than 40%

**Keywords:** section rolling mill, guide fittings, rollers, wear resistance, durability, reliability, average operating time, failure

---

Ссылка на статью:

Оценка показателей надежности валковой арматуры сортовых станов / Тютеряков Н.Ш., Залилов Р.В., Козлов Р.А., Осипова О.А., Юдин Д.В. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 32-35.  
Tyuteryakov N.Sh., Zalilov R.V., Kozlov R.A., Osipova O.A., Yudin D.V. Evaluation of the reliability indicators of guide fittings section rolling mill. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 32-35.

УДК 621.867

Андросенко М.В., Куликов С.С., Рябенко А.В., Савельева И.А., Тулупов О.Н., Кенарь Е.В., Козлов Р.А.

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ РОЛИКОВ КОНВЕЙЕРА АМСОМ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА**

**Аннотация.** В статье рассмотрена технологическая схема переработки металлургических шлаков с использованием автоматизированных систем сортировки и магнитной сепарации. Значительное внимание уделяется конструированию и расчёту ленточного конвейера, выполняющего функцию основного транспортного средства комплекса. Проведён детальный анализ рабочих элементов конвейера, в частности роликов рольганга: определялись напряжения, деформации и коэффициенты запаса прочности при различных эксплуатационных условиях, включая высокие и переменные нагрузки. Моделирование показало высокую надёжность конструкции — коэффициенты запаса прочности роликов достигали 14–15, а значения возникающих напряжений оставались значительно ниже предельных допусков. Минимальные абсолютные смещения конструктивных элементов дополнительно свидетельствуют о долговечности и безопасности оборудования в реальных производственных условиях. Расчёты были выполнены с использованием современных методов анализа и программного обеспечения, что повысило точность результатов. Представленный подход к расчёту подтверждает возможность долговечной и бесперебойной эксплуатации оборудования перерабатывающего комплекса даже в сложных производственных условиях.

**Ключевые слова:** металлургические шлаки, переработка, автоматизация, ленточный конвейер, магнитная сепарация, скрап, фракционирование, рольганг, промышленная безопасность, утилизация отходов, возврат металлов, ресурсосбережение, прочностной расчёт, инженерия, прочность, напряжение

В современных условиях металлургического производства проблема рационального использования металлургических шлаков становится стратегически важной задачей, так как это позволяет не только снизить негативное воздействие промышленных отходов на окружающую среду, но и способствует возврату ценных ферромагнитных и немагнитных компонентов обратно в производство.

Переработка шлаков проходит в несколько этапов с минимальным участием персонала — за счёт интеграции автоматизированных систем и дистанционного управления. Начинается процесс с поступления шлака, который самосвалами доставляют в высокопрочный бункер с износостойкой футеровкой. Затем шлак поступает на барабанный грохот, где делится по крупности: материалы крупностью свыше 350 мм отделяются для дополнительного дробления гидромолотом экскаватора, а меньшие фракции — для дальнейшей сортировки.

Дальнейшая сортировка реализуется с помощью двухъярусного грохота, разделяющего полученный материал на фракции 0–10, 10–50 и 50–350 мм. Каждая из них подвергается особой сепарации с применением барабанных и надленточных магнитных сепараторов, максимально извлекающих ферро- и слабомагнитные металлические включения. Особое внимание уделяется ручной сортировке немагнитных включений во фракции 50–350 мм: они поступают на специальную станцию ручного отбора для извлечения цветных металлов, огнеупорного лома и других ценных компонентов. Все выделенные металлические фракции аккумулируются в бункерах и направляются обратно в металлургическое производство (в виде

скрапа) или в агломерацию и доменный цех (если имеют высокий процент железа).

Не содержащий металла шлак сортируется на товарный щебень и песок, которые могут использоваться сторонними предприятиями, например, в строительстве.

Одним из ключевых элементов, обеспечивающих бесперебойную работу транспортных систем комплекса, является ленточный конвейер (рис. 1).

Ленточный конвейер служит для транспортировки различных материалов, таких как щебень, шлак и др. Основу конструкции составляет бесконечная гибкая лента, получающая движение от приводного барабана с резиновой футеровкой (толщина 10 мм), что обеспечивает надёжное сцепление и предотвращает проскальзывание. Привод осуществляется от редуктора через ременную передачу, обеспечивая плавную тягу и стабильную работу при любых нагрузках, включая тяжелые и абразивные материалы.

Для повышения надёжности конструкции предусмотрены перегрузочные желоба и ролики с резиновыми вставками, а также датчики вращения, датчики схода ленты, аварийные выключатели и устройства очистки ленты. Все это минимизирует риски поломок и обеспечивает высокий уровень промышленной безопасности. Техническая гибкость позволяет использовать конвейер как в горизонтальном, так и в наклонном положении; производительность устройства может достигать 200 тонн в час.

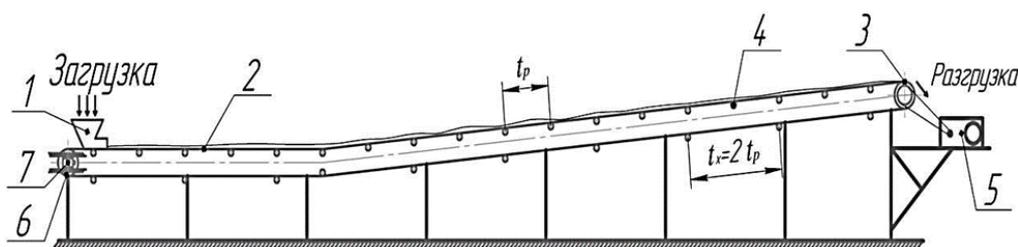


Рис. 1. Схема ленточного конвейера:

1 – загрузочное устройство; 2 – конвейерная лента; 3 – приводной барабан; 4 – опорный ролик;  
5 – привод; 6 – натяжной барабан; 7 – натяжное устройство

Ключевые преимущества технологической схемы:

- высокая степень автоматизации и минимизация ручного труда;
- гибкое разделение и глубокая очистка продукта;
- максимальное извлечение ценных компонентов и минимизация отходов;
- соответствие оборудования современным требованиям по надёжности и промышленной безопасности;
- возможность оптимизации транспортировки сырья внутри производственного комплекса за счет гибких решений по эксплуатации ленточных конвейеров.

Надежность его работы во многом определяется прочностными характеристиками отдельных конструктивных элементов, в частности роликов конвейера (рис. 2). В связи с этим следующим этапом является проведение прочностного расчёта роликов ленточного конвейера, позволяющего оценить их соответствие эксплуатационным требованиям и гарантировать долговечность и безопасность функционирования системы.

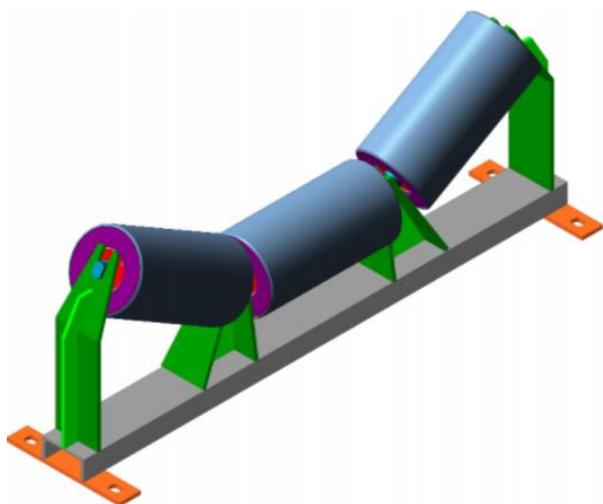


Рис. 2. Схема секции конвейера с опорными роликами

Смоделировали конструкцию секции конвейера с опорными роликами в программе КОМПАС 3D. Расчет роликов роляганга на прочность выполнен в программе Autodesk Inventor.

### Моделирование и расчет роликов на прочность

Основные параметры для расчета дисков вала и ролика приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Основные параметры для расчета дисков, вала

		Сталь 20 ГОСТ 1050-2013
Общие	Массовая плотность	7,799 г/см <sup>3</sup>
	Предел текучести	244,997 МПа
	Окончательный предел прочности растяжения	900 МПа
Напряжение	Модуль Юнга	2,12 ГПа
	Коэффициент Пуассона	0,25 бр
	Модуль упругости при сдвиге	0,848 ГПа

Таблица 2

Основные параметры для расчета ролика

		Сталь 45Х ГОСТ 4543-2016
Общие	Массовая плотность	7,82 г/см <sup>3</sup>
	Предел текучести	590 МПа
	Окончательный предел прочности растяжения	1030 МПа
Напряжение	Модуль Юнга	206 ГПа
	Коэффициент Пуассона	0,3 бр
	Модуль упругости при сдвиге	79,2308 ГПа

На рис. 3 показано распределение нагрузки на центральный ролик конвейера.

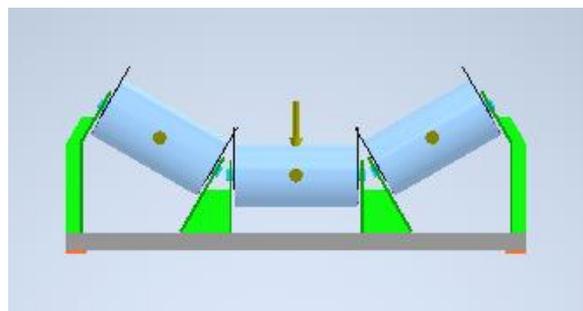


Рис. 3. Распределение нагрузки на ролике роляганга

На рис. 4 показан расчет коэффициента запаса прочности. По результатам компьютерного моделирования коэффициент запаса прочности равен 15, а напряжение по Мизесу составляет 2,99 МПа, а следовательно, имеет значительный запас прочности, для заданных условий эксплуатации конвейера. Результат расчета роликов конвейера показан в табл. 3.

Таблица 3

Результат расчета роликов конвейера на прочность

Наименование	Значение	Размерность
Масса ролика	73,8639	кг
Напряжение по Мизесу	2,99	МПа
Коэффициент запаса прочности	15	

### Моделирование и расчет роликов рольгангов на кручение

Расчет роликов рольганга на прочность выполнен в программе Autodesk Inventor.

На рис. 5 показан расчет напряжения по Мизесу, которое составляет 16,76 МПа.

На рис. 6 показан расчет коэффициента запаса прочности ролика конвейера при кручении. По результатам компьютерного моделирования коэффициент запаса прочности равен 14,616. Результаты рас-

чета ролика на кручение сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результат расчета ролика на кручение

Наименование	Значение	Размерность
Масса ролика	17,5534	кг
Напряжение по Мизесу	16,76	МПа
Коэффициент запаса прочности при кручении	14,616	

На основании результатов компьютерного моделирования значения коэффициента запаса прочности ролика ленточного конвейера при кручении, составившего 14,616, можно заключить, что рассматриваемая конструкция обладает высокой степенью надёжности и эксплуатационной долговечностью. Полученное значение указывает на значительный запас прочности относительно предполагаемых рабочих нагрузок, что обеспечивает безопасную и бесперебойную работу оборудования даже при воздействии переменных и экстремальных эксплуатационных условий. Таким образом, конструкция ролика соответствует современным стандартам промышленной безопасности, что гарантирует устойчивость функционирования всей конвейерной системы.

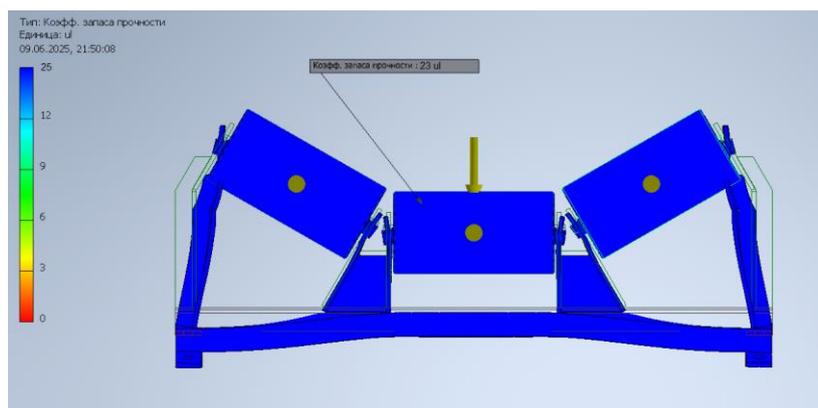


Рис. 4. Определение коэффициента запаса прочности

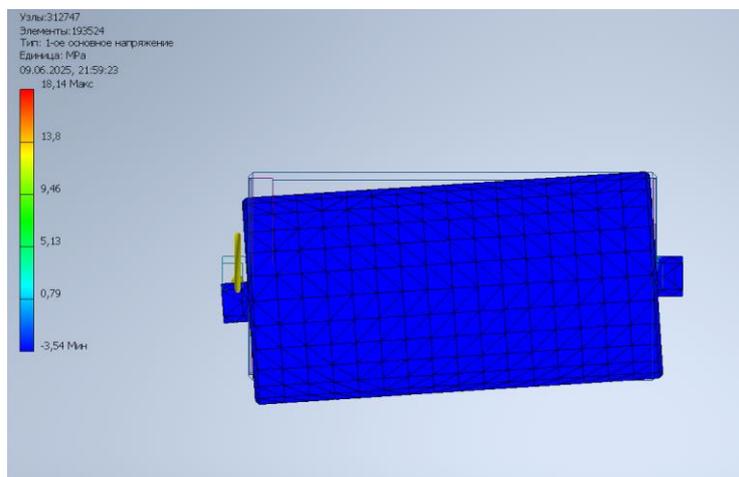


Рис. 5. Определение максимального напряжения по Мизесу при кручении

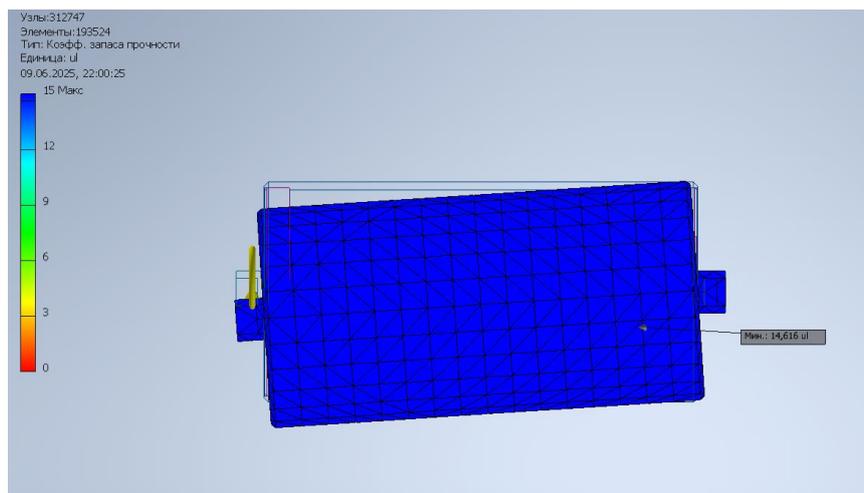


Рис. 6. Определение коэффициента запаса прочности при кручении

Как показали результаты конструктивно-прочностного анализа роликов и прочих элементов конструкции, технические параметры оборудования полностью удовлетворяют действующим эксплуатационным требованиям. Высокие значения коэффициентов запаса прочности, низкие уровни возникающих напряжений, а также минимальные абсолютные смещения элементов подтверждают надёжность, долговечность и безопасность оборудования в условиях интенсивных и переменных эксплуатационных нагрузок.

#### Список источников

1. Точилкин В.В., Извеков Ю.А., Ячиков И.М. Машины и агрегаты комплекса МНЛЗ для транспортирования металла: монография. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2024. 390 с. EDN PZULNJ.
2. Точилкин В.В., Филатова О.А. Создание и проектирование технологических машин : Электронное издание. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. ISBN 978-5-9967-1941-9. EDN VIUAGT.
3. Золотарёв А.Ю., Кондрашов С.А. Ленты, конвейеры и рольганги: расчет и эксплуатация. Москва: Машиностроение, 2017.
4. Бобров В.И., Юрков К.Г. Проектирование систем транспортировки и переработки сыпучих материалов. Москва: Инфра-Инженерия, 2019.
5. Оптимизация роликовой секции под кристаллизатором слябовой машины непрерывного литья заготовок для повышения срока службы подшипников и снижения числа ремонтов / М.В. Андросенко, Т.В. Усая, И.В. Решетова [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2025. № 1(52). С. 39-43. EDN JMZYCU.
6. Целесообразность использования методов математического моделирования при компьютерном проектировании в машиностроении / В.В. Смоленцов, М.В. Андросенко, С.С. Куликов, Д.А. Харлов // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2024. № 23. С. 214-218. EDN FUJWZT.

#### Сведения об авторах

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

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

**Рябенко Анна Вадимовна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Савельева Ирина Александровна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: i.saveleva@magtu.ru

**Кенарь Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Тулупов Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением им. М.И. Бояршинова, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: o.tulupov@mail.ru

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

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION AND STRENGTH CALCULATION OF THE AMCOM CONVEYOR ROLLERS FOR METALLURGICAL SLAG PROCESSING**

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

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

**Ryabenko Anna V.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Saveleva Irina A.** – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: i.saveleva@magtu.ru.

**Kenar Ekaterina V.** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Tulupov Oleg N.** – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Metal Forming named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: o.tulupov@mail.ru.

**Kozlov Roman A.** – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Physical Education and Sports Excellence, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail:fkism@magtu.ru

**Abstract.** The article examines a technological scheme for the recycling of metallurgical slags using automated sorting systems and magnetic separation. Significant attention is given to the design and calculation of the belt conveyor, which serves as the main transport system of the complex. A detailed analysis of the working elements of the conveyor, particularly the roller elements, is carried out: stresses, deformations, and safety factors are determined under various operating conditions, including high and variable loads. Modeling demonstrated high reliability of the construction—the safety factors for the rollers reached 14–15, and the values of the induced stresses remained well below allowable limits. Minimal absolute displacements of structural elements additionally confirm the durability and safety of the equipment in real industrial conditions. Calculations were performed using modern analytical methods and specialized software, which increased the accuracy of the results. The presented calculation approach confirms the possibility of long-term and trouble-free operation of the processing complex equipment, even under challenging production conditions.

**Keywords:** metallurgical slag, processing, automation, belt conveyor, magnetic separation, scrap, fractionation, roller conveyor, industrial safety, waste utilization, metal recovery, resource saving, strength calculation, engineering, strength, stress

---

Ссылка на статью:

Анализ технического состояния и прочностной расчёт роликов конвейера AMCOM для переработки металлургического шлака / Андросенко М.В., Куликов С.С., Рябенко А.В., Савельева И.А., Тулупов О.Н., Кенарь Е.В., Козлов Р.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 36-40.

Androsenko M.V., Kulikov S.S., Ryabenko A.V., Saveleva I.A., Kenar E.V., Tulupov O.N., Kozlov R.A. Analysis of the technical condition and strength calculation of the AMCOM conveyor rollers for metallurgical slag processing. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 36-40.

# ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

УДК 669.743.27: 669.054.83

Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Муллина Д.Д., Шувалова М.М., Лизогуб В.А., Сапрыкина П.И.

## К ВОПРОСУ ПОИСКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ СОЕДИНЕНИЙ МАРГАНЦА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

**Аннотация.** Статья посвящена актуальному вопросу комплексной переработки техногенных водных ресурсов с возможностью извлечения марганца в виде кондиционного сырья для предприятий металлургической отрасли. В работе рассмотрены природные и техногенные факторы, влияющие на процесс формирования марганецсодержащих стоков на территории горных предприятий медноколчеданного комплекса (объемы и концентрация марганца в водных системах). Приведены результаты факторного анализа процесса селективного извлечения марганца из техногенных гидроминеральных ресурсов, формирующихся в результате разработки медноколчеданных месторождений. На основании результатов эксперимента обоснована возможность получения качественных марганецсодержащих продуктов. Для извлечения марганца из водных растворов предложен метод, основанный на сочетании двух электрохимических процессов: электроокисление ионов марганца до нерастворимых гидроксоформ Mn (III, IV) и последующее электрофлотационное извлечение осадка. Экспериментальные исследования проводились с использованием бездиафрагменного двухкамерного электрофлотатора проточного типа, в котором соотношение объемов камер электроокисления и электрофлотации составило 1:3. Рациональные технологические параметры работы электрофлотатора соответствуют следующим значениям: по первой камере электролизера – pH от 4 до 6, электрообработка растворов не менее 1 мин, анодная плотность тока 300 А/м<sup>2</sup>, концентрация хлорид-ионов в диапазоне 600 – 650 мг/дм<sup>3</sup>; и по второй камере электролизера – pH от 6 до 7,5, электрообработка растворов не менее 10 мин при катодной плотности тока 100 А/м<sup>2</sup>. Качество полученных в работе марганецсодержащих продуктов позволяет утверждать, что предлагаемая технология комплексной переработки гидротехногенных марганецсодержащих георесурсов дает возможность получения дополнительной дефицитной продукции из нерудной части отходов.

**Ключевые слова:** марганец, гидротехногенное сырье, металлы, технология, электроокисление, электрофлотация

### Введение

Основными промышленными предприятиями Южного Урала являются предприятия черной и цветной металлургии, в процессах которых эффективно используются различные соединения марганца, улучшающие такие свойства стали, как твердость, прочность, сопротивляемость истиранию, ковкость и др. [1]. В связи с этим, марганец является критически важным элементом, в технологических процессах черной и цветной металлургии [2, 3].

До распада СССР проблем с марганцевыми рудами в России не было. Советский Союз занимал первое место в мире по количеству добываемых марганцевых руд: 40–50% от мирового объема. После распада Советского Союза за границы России отошли крупнейшие месторождения марганцевых руд: Чиагурское (в Закавказье), Никопольское (на Украине), Дзержинское (в Казахстане) [2].

Россия на сегодняшний день обладает запасами марганцевых руд, но они очень низкого качества, труднодоступны для добычи и переработки, поэтому не могут в достаточной мере удовлетворить все сырьевые потребности страны. Общая доля промышленно значимых запасов марганца, пригодных для рентабельной добычи по современным технологиям, в

нашей стране крайне мала (менее 5%), поэтому Россия импортирует более 90% марганцевого сырья из-за рубежа [3-5].

В связи с этим на сегодняшний день в России остро стоит вопрос об изыскании дополнительных источников получения различных соединений марганца, широко используемых в металлургической и других областях промышленности [1-4]. Следовательно, поиск альтернативных источников марганца – это критически важная задача для обеспечения сырьевой безопасности нашей страны.

Актуальными и перспективными технологическими направлениями получения марганецсодержащих продуктов являются процессы переработки шлаков и других видов вторичных отходов. Это, наряду с повышением ресурсного потенциала природного сырья, позволит организовать замкнутый экономический цикл его глубокой переработки [6-8].

Одной из основных исторически сложившихся отраслей экономики Урала являются предприятия горнорудного комплекса. Работа данных предприятий предполагает образование значительных объемов сточных вод, характеризующихся высоким содержанием ионов поливалентных металлов, среди которых в основном это медь, железо, цинк и марганец (табл. 1, 2).

Таблица 1

Среднегодовые показатели химического состава кислых сточных вод горных предприятий Южного Урала

Техногенные воды горных предприятий Южного Урала	Химический состав, мг/дм <sup>3</sup>				
	pH	Cu <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ.</sub>	Cl <sup>-</sup>
Сибайский филиал Учалинского ГОКа	2,6	254,5	234,7	416,4	212,2
Бурибаевский	2,8	273,5	267,5	507,6	581,7
Учалинский	2,9	190,2	254,1	474,3	195,4

Таблица 2

Химический состав техногенных вод горных предприятий Южного Урала

Техногенные воды горных предприятий Южного Урала	Содержание, мг/дм <sup>3</sup>				
	pH	Fe <sub>общ.</sub>	Cu <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Подотвальные воды	2,3	901,6	284,3	197,3	5708
Карьерные воды	5,4	0,54	1,93	3,82	634
Шахтные воды	6,1	1,43	3,15	1,96	745
Пруд – накопитель	7,4	0,16	0,07	8,67	440
Хвостохранилище	3,9	3,85	0,15	7,95	818

В техногенных гидроресурсах горнорудных предприятий Южного Урала марганец содержится в основном в ионной форме преимущественно в виде солей сульфатов, а также может присутствовать в незначительных количествах в виде коллоидных осадков гидроксидов и карбонатов [8, 9].

Учитывая объемы формирующихся сточных вод ГОКов Южного Урала, характеризующихся достаточно высоким содержанием ионов марганца, данная категория техногенных образований может являться альтернативным источником марганецсодержащего сырья [7-10]. Следовательно, разработка комплексной экологически безопасной технологии, позволяющей стадийно и селективно извлекать марганец и другие ценные металлы в виде товарной продукции с одновременным снижением их концентраций в стоке до норм ПДК, на сегодняшний день является одной из актуальных научно-практических задач. Решение данной задачи, помимо улучшения экологической ситуации в регионе, позволит повысить и экономическую целесообразность всего горно-металлургического производства, а также частично компенсировать нехватку марганецсодержащего сырья для предприятий металлургической отрасли.

Наиболее перспективным направлением в технологии высокоселективной переработки полиметаллических растворов являются электрохимические методы. Данные методы позволяют максимально концентрировать и извлекать ценные компоненты из технических растворов. При этом они являются экологически чистыми, исключая «вторичное» загрязнение воды анионными и катионными остатками, характерными в случае применения реагентных методов [10-14].

Наиболее эффективным и экологически безопасным методом извлечения металлов из водных растворов является электрофлотационный, который в сочетании процессов «осаждение-флотация» позволяет достигать высоких показателей извлечения ионов поливалентных металлов из растворов в виде кондиционного сырья. Эффективность электрофлотационного способа обусловлена возможностью проведения флотации при низкой скорости газового потока, малым размером образующихся газовых пузырьков, а также наличием на их поверхности электростатического заряда, что является определяющим фактором при обосновании параметров технологии безреагентного извлечения гидروفильных осадков металлов [13-17].

Сущность предлагаемого в работе метода селективного извлечения марганца заключается в электрообработке хлоридсодержащих растворов, при этом образуется молекулярный хлор, который, взаимодействуя с водой, образует активные формы хлорсодержащих окислителей, так называемый «активный хлор». Далее при контакте «активного хлора» с Mn (II) протекает окислительно-восстановительный процесс, в ходе которого ионы Mn<sup>2+</sup> окисляются до нерастворимых форм Mn<sup>3+</sup> и Mn<sup>4+</sup>.

При разработке технологии селективного осаждения ионов Mn<sup>2+</sup> из сточных вод, учитывая поликомпонентность перерабатываемых технологических растворов, предусмотрен комплекс последовательно выполняемых операций, включающий процессы предварительного стадийного извлечения меди, железа и марганца в виде кондиционного сырья. Предлагаемая комплексная технология поэтапного выделения ионов меди, железа и марганца достаточно проста, эффективна, не требует сложного аппаратного оформления и может использоваться как самостоятельно, так и в системе существующих очистных сооружений. Данная технология может быть использована для организации замкнутого цикла водоснабжения на горно-металлургических предприятиях.

Общая схема цепи аппаратов предлагаемых технологических решений представлена на рис. 1.

Экспериментальные исследования по извлечению ионов марганца проводились на электрофлотационной установке, представляющей собой емкость прямоугольной формы, внутренний объем, которого разделен на две камеры. Высота Соотношение рабочих объемов камер друг к другу 1:5. Материал катода и анода в двух камерах одинаков: катоды – сталь ГОСТ 4986-90 толщиной 1 мм; аноды – листовой титан марки ВТ-1-0 толщиной 2 мм с покрытием оксида рутения толщиной 5 мкм. Электропитание каждой камеры флотатора осуществляется автономно. В качестве источника постоянного тока для обеих камер флотатора был выбран выпрямитель типа ТЕ 50/48 с регулируемой силой тока от 0 до 50 А и напряжением от 0 до 48 В (рис. 2).

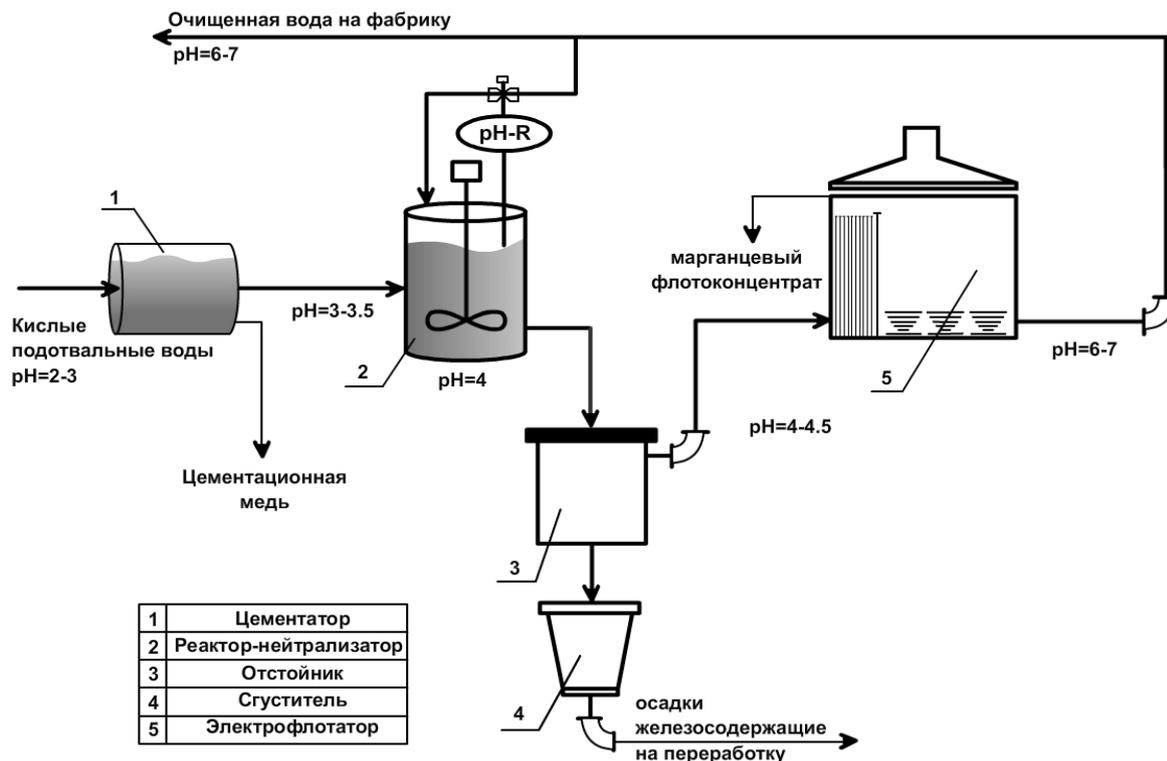


Рис. 1. Схема цепи аппаратов по переработке сточных вод горных предприятий с высоким содержанием ионов меди, железа и марганца

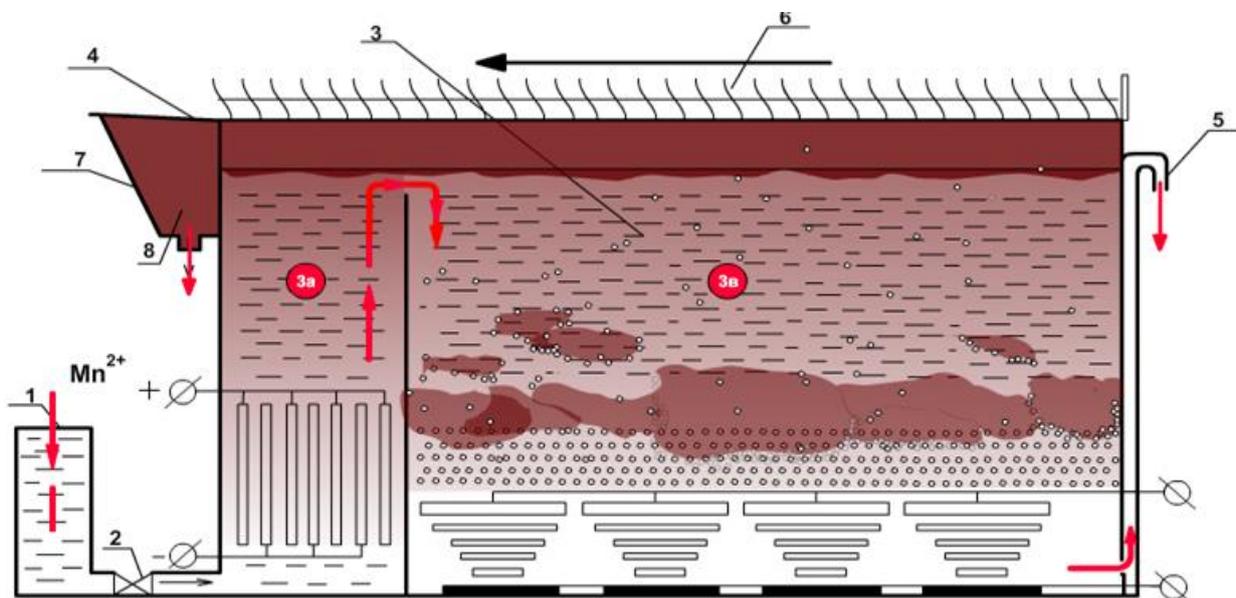


Рис. 2. Конструкция электрофлотатора:

- 1 – емкость для подачи исходных растворов; 2 – насос; 3а – камера электроокисления;
- 3в – электрофлотационная камера аппарата; 4 – перегородка, разделяющая первую и вторую камеры;
- 5 – патрубок для стока отработанного раствора; 6 – скребок-транспортер; 7 – пеносборник;
- 8 – патрубок для удаления флотошлама

Процесс электрохимического извлечения марганца из технологических поликатионных растворов осуществляется при следующих параметрах работы электрофлотационной установки:

– по первой камере электролизера: рН от 4 до 6, электрообработка растворов не менее 1 мин, анодная плотность тока на электродах  $300 \text{ A/m}^2$ , концентрация хлорид-ионов в диапазоне  $600\text{--}350 \text{ мг/дм}^3$ ;

– по второй камере электролизера: рН от 6 до 7,5, электрообработка растворов не менее 10 мин при катодной плотности тока на электродах  $100 \text{ A/m}^2$ .

Количественные характеристики переработки поликатионных технологических растворов (по содержанию марганца в системах) представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Результаты переработки поликатионных технологических растворов

Параметры содержания металла	Марганец (Mn)
Исходная концентрация в технологических растворах, $\text{мг/дм}^3$	197,3
Остаточная концентрация в технологических растворах, $\text{мг/дм}^3$	0,011
Содержание металла в твердом продукте $\beta$ , %	50,1

Таблица 4

Концентрация катионов марганца (II) в технологических растворах на входе и на выходе электрофлотационной установки

Концентрация катионов марганца в растворе до электрофлотационной обработки, $\text{мг/дм}^3$	Концентрация ионов марганца в растворе после электрофлотационной обработки, $\text{мг/дм}^3$	ПДК (рыб.хоз.), $\text{мг/дм}^3$
197,3	< 0,01	0,01
209,7	< 0,01	0,01
324,9	0,29	0,01

Общий элементный состав полученного марганцевого флотоконцентрата, образующегося в процессе электрообработки технологических растворов, представлен в табл. 5.

Таблица 5

Химический состав марганцевого флотоконцентрата, полученного по представленной технологической схеме

Символ химического элемента	Mn	Fe	Cu	Zn	P	Si
Содержание, %	50,7	2,2	0,02	0,015	–	–

Результаты химического анализа (см. табл. 5) позволяют утверждать, что получаемый на третьей стадии разработанной технологической схемы марганцевый флотоконцентрат по содержанию основного компонента (марганца), согласно ТУ-14-9-10-5-73, яв-

ляется кондиционным марганцевым концентратом I сорта и может быть пригодным для выплавки ферромарганца, согласно ГОСТ 4755-70, и силикомарганца – ГОСТ 4756-70.

Выводы:

– представленные в работе технологические решения по переработке и очистке кислых сточных вод в условиях ГОКов медноколчеданного комплекса позволяют эффективно и селективно извлекать такие металлы, как медь – до 94,3%, марганец – до 91,99% и железо – до 96%;

– полученные металлосодержащие продукты по содержанию основного металла характеризуются следующими значениями: медь в продуктах цементации – до 66,5%; железо в продуктах, полученных методом кислотно-основного осаждения, – до 52%, марганец во флотоконцентрате – 50,7%;

– полученные по технологии продукты являются кондиционным сырьем для металлургической промышленности;

– предлагаемая технологическая схема поэтапно селективного выделения меди, железа и марганца в виде кондиционных продуктов проста и эффективна, кроме того, не требует сложного аппаратного оформления;

– данная технологическая схема может быть использована для организации замкнутого цикла водоснабжения на горно-обогательном предприятии;

– внедрение данной технологии позволит существенно снизить экологическую нагрузку в регионе.

#### Список источников

1. Гладышев В.И. Марганец в доменном процессе. Екатеринбург: Издательство Чароид, 2005, 401 с.
2. Изучение возможности обогащения железомарганцевых руд Кузбасса / Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Израильский А.О. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 9. С. 904–909.
3. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г.: гос. доклад / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) / гл. ред. Д. Д. Тетенькин, Е. И. Петров. М., 2022. 622 с.
4. Воропанова Л.А. Теория, методы и практика извлечения цветных металлов из слабоконцентрированных растворов при комплексной переработке руд: дис. ... д-ра техн. наук. Владикавказ, 2003. 365 с.
5. Дюсенбеков К.Б. Марганцевые руды: объемы переработки и методы обогащения // Известия УГГУ. 2024. Вып. 3 (75). С. 124–132.
6. Мишурина О.А. Влияние природных и техногенных факторов на формирование гидротехногенных образований на территории гоков // Между-

- народный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-1. С. 82-85.
7. Мишурина О.А., Муллина Э.Р. Химические закономерности процесса селективного извлечения марганца из техногенных вод // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3 (39). С. 58-62.
  8. Абдрахманов Р.Ф. Гидроэкология Башкортостана. Уфа: Инфореклама, 2005. 344 с.
  9. Абдрахманов В.Ф., Попов В.Г. Геохимические особенности подземных вод Южного Урала // Геологический сборник. 2008. № 7. С. 219–232.
  10. Ильин В.И. Электрохимическая очистка сточных вод с водооборотом // Современные технологии и оборудование, 2005. № 12. С. 62–64.
  11. Ильин В.И. Электрофлотационная технология очистки сточных вод // Экология производства. 2004. № 3. С. 53–57.
  12. Дударев В.И., Филатова Е.Г., Кульков В.Н. Комбинированное извлечения марганца при водоочистке техногенных растворов. // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т.4. № 2. С. 301-310.
  13. Электрокоагуляционное извлечение марганца из производственных вод обогатительного комбината / Дударев В. И, Минаева Л.А, Филатова Е.Г., Саламатов В.И.// Вестник Иркутского государственного технического университета 2018. Т. 22. №1 (132). С. 194-201.
  14. Manganese: Global Industry Markets & Outlook to 2020. London, UK: Roskill Information Services, 2015. 279 p.
  15. Singh V., Chakraborty T., Tripathy S. K. A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 41. Issue 6. P. 417–438.
  16. Liu B., Zhang Y., Lu M., Su Z., Li G., Jiang T. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 286–303.
  17. Разработка технологии переработки марганецсодержащих руд месторождения Дауташ / Хакимова Д.И., Икрамова М.Э., Абед Н.С., Негматов С.С. // Композиционные материалы. 2023. №4. С. 152-154.

#### Сведения об авторах

**Мишурина Ольга Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: olegro74@mail.ru .

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

**Муллина Диана Дмитриевна** – студент гр. САР6-22, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: moonpoet0@mail.ru

**Шувалова Мария Михайловна** – студент гр. ТТП6-22, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru

**Лизогуб Виктория Андреевна** – студент гр. ТПО6-21, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru

**Сапрыкина Полина Ивановна** – студент гр. ТТП6-25, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru

**TO THE QUESTION OF FINDING ALTERNATIVE SOURCES OF MANGANESE COMPOUNDS FOR METALLURGICAL ENTERPRISES**

**Mishurina Olga A.** – PhD, Lead Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

**Mullina Elvira R.** – PhD, Lead Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

**Mullina Diana D.** – student gr.CAP6-22, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: moonpoet0@mail.ru

**Shuvalova Maria M.** – student gr.ТТП6-22, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: chem@magtu.ru

**Lizogub Victoria A.** – student gr.ТТЮ6-21, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: chem@magtu.ru

**Saprykina Polina I.** – student gr. ТТП6 -25, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: chem@magtu.ru

**Abstract.** The article is devoted to the topical issue of complex processing of technogenic water resources with the possibility of extracting manganese in the form of conditioned raw materials for metallurgical enterprises. The paper discusses natural and man-made factors affecting the formation of manganese-containing effluents on the territory of mining enterprises of the copper-pyrite complex (volumes and concentration of manganese in water systems). The results of factor analysis of the process of selective extraction of manganese from technogenic hydromineral resources formed as a result of development of copper-pyrite deposits are presented. Based on the results of the experiment, the possibility of obtaining high-quality manganese-containing products is justified. To extract manganese from aqueous solutions, a method is proposed based on a combination of two electrochemical processes: electrooxidation of manganese ions to insoluble hydroxofoms Mn (III, IV) and subsequent electroflotation extraction of the precipitate. Experimental studies were carried out using a diaphragm-free two-chamber flow-type electroflotator, in which the ratio of the volumes of the electrooxidation and electroflotation chambers was 1:3. Rational technological parameters of the electroflotator operation correspond to the following values: for the first chamber of the electrolyzer - pH from 4 to 6, electroprocessing of solutions for at least 1 minute, anode current density 300 A/m<sup>2</sup>, concentration of chloride ions in the range 600-650 mg/dm<sup>3</sup>; and in the second chamber of the electrolysis cell - pH from 6 to 7.5, electrotreatment of solutions for at least 10 minutes and 10 minutes at cathode current density of 100 A/m<sup>2</sup>. The quality of the manganese-containing products obtained in the work allows us to assert that the proposed technology for the integrated processing of hydrotechnogenic manganese-containing georesources makes it possible to obtain additional scarce products from the non-metallic part of the waste.

**Keywords:** manganese, hydrotechnogenic raw materials, metals, technology, electrooxidation, electroflotation.

---

Ссылка на статью:

К вопросу поиска альтернативных источников соединений марганца для предприятий металлургической отрасли / Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Муллина Д.Д., Шувалова М.М., Лизогуб В.А., Сапрыкина П.И. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 41-46.

Mishurina O.A., Mullina E.R., Mullina D.D., Shuvalova M.M., Lizogub V.A., Saprykina P.I. To the question of finding alternative sources of manganese compounds for metallurgical enterprises. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 41-46.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

### Уважаемые коллеги!

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

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

### Журнал включает в себя следующие разделы:

1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.
3. Литейное производство.
4. Обработка металлов давлением.
5. Подготовка сырья к металлургическому производству;
6. Управление качеством в металлургическом производстве;
7. Экономика в металлургии;
8. Оборудование металлургического производства;
9. Материаловедение;
10. Техногенные отходы металлургического производства.

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

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

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

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

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

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

*Пример оформления статьи*

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

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

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

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

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

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