

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 1 (36) 2021

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, по специальностям: 05.16.02 Металлургия черных, цветных и редких металлов; 05.16.04 Литейное производство; 05.16.05 Обработка металлов давлением, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). 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.  
Ченстоховского технологического  
университета, 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

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

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

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

### Научный редактор:

**Н.Ш. Тютряков** – 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», 2021

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 30.03.2021. Заказ 82. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 1 (36) 2021**

---

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

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

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

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

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

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

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

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

*V.B. Deev* – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow,  
Russia

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

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

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

*A.A. Kazakov* - D.Sc., Associate Professor,  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic 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., No-  
sov 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”, 2021

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; tmp@ magtu.ru

### **Printing office:**

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

### **Editorial office:**

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

Publication date 30.03.2021. Order 82. Circulation: 500.  
Open price.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ</b> .....	4
Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П. <b>КОМПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИЛУМИНОВ</b> .....	4
Кунакбаева А.Т., Столяров А.М., Потапова М.В. <b>УСВОЕНИЕ СЕРЫ ПРИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКЕ АВТОМАТНОЙ СТАЛИ</b> .....	11
Парпиев О.Р., Паизуллаханов М.С., Нодирматов Э.З. <b>ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ НА БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ</b> .....	15
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ</b> .....	21
Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. <b>КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА COLD STRETCHING ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ КЛАССА 500 В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»</b> .....	21
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	27
Анцупов В.П., Ячиков М.И., Ячиков И.М., Савинов А.С. <b>ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕПЛАВА ЭЛЕКТРОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ДИСКОВЫХ НОЖЕЙ, В УСТАНОВКЕ ЭШП</b> .....	27
Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Марков А.И. <b>ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛИТЕЙНОГО СТЕРЖНЯ ИЗ СМЕСЕЙ СО СВЯЗУЮЩИМ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ</b> .....	36

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS</b> .....	4
Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovsky A.P. <b>COMPLEX MODIFICATION OF INDUSTRIAL SILUMINS</b> .....	4
Kunakbaeva A.T., Stolyarov A.M., Potapova M.V. <b>DESULFURIZATION OF FREE-CUTTING STEELS IN LADLE-FURNACE</b> .....	14
Parpiev O.R., Paizullakhanov M.-S., Nodirmatov E.Z. <b>FEATURES OF METALLURGICAL WASTE PROCESSING IN A LARGE SOLAR FURNACE</b> .....	15
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE</b> .....	21
Stolyarov A.Yu., Zaitseva M.V., Stolyarov F.A. <b>FINITE-ELEMENT MODELING OF THE COLD STRETCHING PROCESS TO ASSESS THE POSSIBILITY OF MANUFACTURING METIZ COLD-DEFORMED REINFORCING BARS OF CLASS 500 IN THE CONDITIONS OF JSC«MMK-METIZ»</b> .....	25
<b>FOUNDRY</b> .....	27
Ancupov V.P., Yachikov I.M., Yachikov M.I., Savinov A.S. <b>SPECIFIC FEATURES OF PRODUCING AND REMELTING AN ELECTRODE MADE FROM USED DISC KNIVES IN ESR FURNACE</b> .....	27
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Markov A.I. <b>FORMATION OF A FOUNDRY CORE FROM MIXTURES WITH A BINDER BASED ON INORGANIC SALTS</b> .....	39

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.74

Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П.

## КОМПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИЛУМИНОВ

**Аннотация.** Обсуждается проблема повышения механических свойств литейных алюминиевых сплавов с помощью комплексного модифицирования их структуры. Широко используемые в промышленности флюсы преимущественно направлены на модифицирование только одной структурной составляющей Al-Si-сплавов, что не позволяет унифицировать процесс модифицирования в производственных условиях. Ввиду этого разработан новый модифицирующий флюс, оказывающий комплексное воздействие на структуру силуминов. В его состав входят:  $TiO_2$  – компонент, содержащий модификатор эвтектического кремния; KF – компонент, способствующий переходу титана и бария в расплав. Исследовано влияние комплексного модификатора на основе диоксида титана на макро-, микроструктуру и механические свойства литейных алюминиево-кремниевых сплавов: АК12, АК9ч, АК7ч, АК5М, АК18. Установлено, что предел прочности  $\sigma_b$  силуминов превышает аналогичные характеристики для сплавов, модифицированных стандартным натрийсодержащим флюсом до 32 %, относительное удлинение  $\delta$  увеличивается до 54 %. Показано, что повышение механических свойств сплавов является следствием комплексного влияния компонентов флюса на макро- и микроструктуру, заключающееся в одновременном измельчении зерна, измельчении и более равномерном распределении выделений  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии за счет титана, измельчении и облагораживании кремния в эвтектике с помощью бария и калия, измельчении первичного кремния. Достоверность исследований подтверждается использованием современных испытательных систем, существенным объемом экспериментальных данных и повторяемостью результатов на большом количестве образцов в идентичном исходном состоянии.

**Ключевые слова:** алюминиевые литейные сплавы, силумины, комплексное модифицирование, титан, барий, диоксид титана, механические свойства, микроструктура, макро- и микроструктура, расплав.

### Введение

Литейные алюминиево-кремниевые сплавы являются востребованными материалами ввиду исключительно благоприятного сочетания литейных, механических и ряда специальных эксплуатационных свойств [1]. В настоящее время существует несколько направлений по усовершенствованию свойств данных сплавов, но не теряет своей актуальности модифицирование расплава, благодаря чему достигается необходимый уровень механических свойств сплавов.

Модифицированию силуминов посвящено большое количество научно-исследовательских работ, но до сих пор не существует универсальных и надежных способов модифицирования. Большинство модификаторов не отвечает полностью требованиям производства. Так, широко используемые в промышленности флюсы преимущественно направлены на модифицирование только одной структурной составляющей Al-Si-сплавов, что не позволяет унифицировать процесс модифицирования в производственных условиях.

В последнее время особое внимание исследователей уделяется вопросам модифицирования силуминов путем комплексного воздействия на структуру сплавов [2-5]. Применение модификаторов, оказывающих модифицирующее воздействие на различные структурные составляющие сплава, оказывается эффективнее, чем использование модификатора одного типа. В результате расширяется область применения

модификатора. Однако такие комплексные составы часто состоят из дорогостоящих веществ, что является недостатком, ограничивающим масштабы применения существующих модификаторов.

Поэтому для понижения стоимости таких составов при сохранении их высокой эффективности необходим поиск новых, более доступных модификаторов, разработка технологий их производства и применения как модификаторов алюминиевого расплава.

В настоящей работе изложены результаты изменения механических свойств, макро- и микроструктуры различных силуминов за счет обработки расплава комплексным модифицирующим флюсом, состоящим из смеси  $TiO_2 + BaF_2 + KF$ . Данный флюс разработан в МАИ на кафедре «ТиСАПР МП» [6].

Для модифицирования эвтектики ( $\alpha+Si$ ) в состав флюса входит барий – поверхностно-активный элемент для эвтектического кремния, который вводится с помощью фтористой соли. При введении в расплав бария частицы эвтектического кремния измельчаются и принимают округлую форму. Основным достоинством использования бария является сохранение модифицирующей способности в течение длительного времени [7]. При этом фтористая соль бария является недефицитным веществом и имеет сравнительно невысокую стоимость.

Для модифицирования  $\alpha$ -твердого раствора предлагается использовать титан, являющийся наиболее эффективным модификатором зерна в алюминиевых сплавах и измельчающий дендриты  $\alpha$ -твердого раствора в силуминах [8]. Введение титана предлага-

ется с помощью его оксида, вместо традиционных лигатур и солей. Диоксид титана является наиболее доступным и недорогим соединением среди всех титаносодержащих веществ.

Для модифицирования силуминов необходимо обеспечить восстановление диоксида титана расплавом до титана с последующим образованием дополнительных центров кристаллизации  $TiAl_3$ . Поэтому в состав флюса входит фтористая соль калия, которая улучшает смачиваемость алюминием диоксида титана, растворяет оксид, тем самым способствуя алюминотермическому восстановлению оксида [9-11]. При этом фтористый калий имеет относительно низкую стоимость и повышает вероятность перехода бария из его фторида в расплав за счёт образования легкоплавкой эвтектики [12].

В работе изучали универсальность свойств комплексного флюса, то есть возможность применения модификатора для широкой группы силуминов. Исследовали влияние модифицирующего флюса на основе диоксида титана на силумины марок АК12, АК7ч, АК9ч, АК5М, АК18.

### Материалы и методы исследования

Для исследования были выбраны широко используемые сплавы: АК12, АК9ч, АК7ч, АК5М, АК18. Химический состав сплавов АК12, АК9ч, АК7ч, АК5М соответствует ГОСТ 1583-93, сплава АК18 – ГОСТ 30620-98.

Экспериментальные плавки силуминов проводились в муфельной электрической печи сопротивления. Вес одной плавки равнялся 900 г. Предварительно проводили дегазацию расплава с помощью продувки инертным газом (аргоном).

Исследуемый флюс засыпали ровным слоем на поверхность расплава при температуре 770–790°C. После выдержки флюса в течение 8–10 минут при данной температуре его тщательно замешивали вглубь расплава в течение 3–5 минут. Далее расплав выдерживали в течение 15–20 минут, после чего с поверхности расплава снимали шлак. Температуру расплава доводили до 710°C, затем производили заливку в подготовленную песчано-глинистую форму.

Обработку расплава стандартным флюсом, состава (25% NaF + 62,5% NaCl + 12,5% KCl [13]) производили при температуре 730-750°C. Флюс на поверхность расплава засыпался ровным слоем в количестве 1,5% от массы плавки. После выдержки расплава в течение 10 минут при данной температуре флюс тщательно замешивали вглубь расплава. После этого с поверхности расплава снимали шлак и выстаивали расплав.

Сплавы АК7ч, АК5М после модифицирования подвергались термообработке согласно ГОСТ 1583-93 по режиму T5, сплав АК9ч термообрабатывали по режиму T6.

Определение механических свойств сплавов – временное сопротивление разрыву (предел прочности)  $\sigma_B$  (МПа), относительное удлинение  $\delta$  (%) – проводили в соответствии с ГОСТом 1497-84 на испытательной машине модели Instron 5982.

Микроструктурные исследования проводили на универсальном исследовательском моторизованном микроскопе Carl Zeiss марки Imager.Z2m AXIO.

Для травления макроструктуры сплавов АК12, АК9ч, АК7ч, АК18 использовался реактив Юм-Розери (15 г  $CuCl_2$ , 100 мл  $H_2O$ ), сплава АК5М – реактив Келлера (2,5%  $HNO_3$ , 1,5%  $HCl$ , 0,5%  $HF$ ).

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты механических испытаний различных силуминов после их обработки разработанным флюсом и стандартным натрийсодержащим флюсом представлены в таблице. Экспериментально установлено, что обработка разработанным комплексным флюсом вызывает повышение механических свойств (предел прочности  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$ ) эвтектических, доэвтектических и заэвтектических силуминов, превосходя аналогичные показатели для сплавов, обработанных стандартным флюсом, традиционно применяемым в промышленности.

Механические свойства сплавов системы Al-Si в зависимости от вида обработки

Сплав	Свойства	Без модифицирования	Стандартный флюс	Комплексный флюс
АК12	$\sigma_B$ , МПа	140	160	175
	$\delta$ , %	2,27	8,05	12,2
АК7ч (T5)	$\sigma_B$ , МПа	218	235	262
	$\delta$ , %	0,98	3,72	4,89
АК9ч (T6)	$\sigma_B$ , МПа	225	245	323
	$\delta$ , %	1,05	3,5	3,6
АК5М (T5)	$\sigma_B$ , МПа	316	317	317
	$\delta$ , %	0,67	1,25	1,92
АК18	$\sigma_B$ , МПа	150	–	182
	$\delta$ , %	0,38	–	0,74

Значительное повышение механических свойств сплавов при модифицировании опытным флюсом объясняется его комплексным влиянием на структуру сплава.

Так, для микроструктуры немодифицированного сплава АК12 характерна грубая эвтектика ( $\alpha+Si$ ) в форме игл и пластин с неравномерно распределенными выделениями  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 1, а).

Обработка расплава АК12 рассмотренными флюсами вызывает измельчение эвтектического кремния, при этом частицы эвтектического кремния приобретают глобулярную форму (рис. 1, б, в). Однако при обработке комплексным флюсом эвтектика измельчена более однородно по площади шлифа (см. рис. 1, в), нежели при обработке стандартным флюсом (рис. 1, б). Разработанный флюс также оказывает влияние на дендриты  $\alpha$ -твердого раствора, измельчая и способствуя их более равномерному распределению. Титан в составе флюса способствует измельчению макрозерна сплава, что хорошо видно на фотографиях макроструктуры (рис. 2, в). При этом стандартный флюс не изменяет размер макрозерна (рис. 2, б) по сравнению с немодифицированным сплавом (рис. 2, а). Вследствие измельчения зерна также повышаются механические свойства сплава.

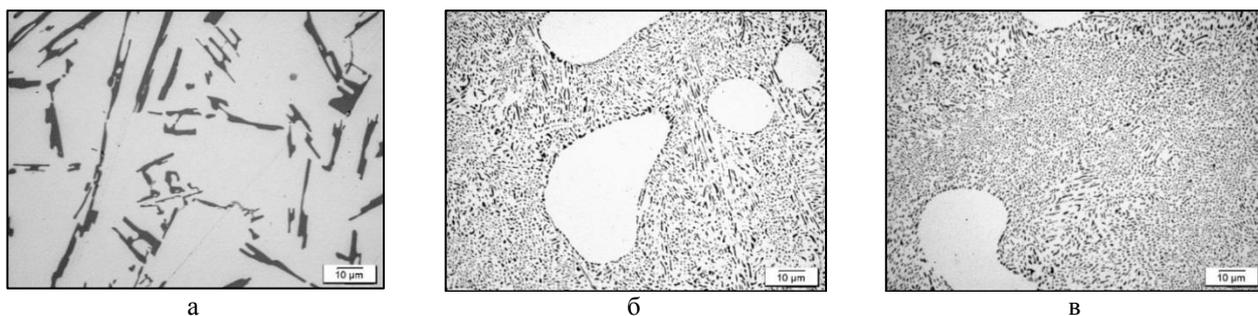


Рис. 1. Макроструктура сплава АК12 в зависимости от обработки:  
а – без обработки; б – стандартный флюс; в – комплексный флюс

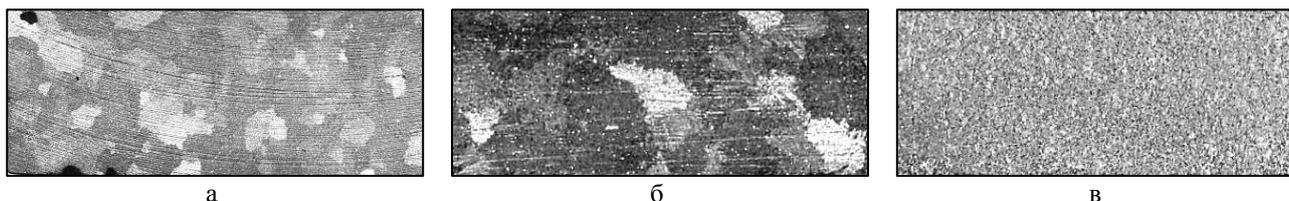


Рис. 2. Макроструктура сплава АК12 в зависимости от обработки:  
а – без обработки; б – стандартный флюс; в – комплексный флюс

Основными структурными составляющими в доэвтектических силуминах являются дендриты  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии и алюминиево-кремниевая эвтектика (рис. 3, а, б).

Модифицирование комплексным флюсом оказывает существенное влияние на все структурные составляющие доэвтектических силуминов (рис. 3, в, е). В сравнении со сплавом, обработанным стандартным флюсом (рис. 3, б, д, 4, б, д), комплексный флюс измельчает дендриты  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии, что наиболее заметно на сплаве АК9ч (см. рис. 3, е), и измельчает макрозерно сплавов (рис. 4, в, е). Такое влияние на структуру оказывает титан, перешедший из диоксида в расплав и содержащийся в модифицированных сплавах АК7ч и АК9ч в количестве 0,119 и 0,118% соответственно. Также комплексный флюс сильнее измельчает эвтектический кремний, нежели натрийсодержащий флюс. Влияние на эвтектику в комплексном флюсе оказывают сразу два поверхностно-активных элемента – барий и калий [7].

Сплав АК5М имеет более широкий интервал кристаллизации по сравнению с ранее рассмотренными силуминами и обладает сравнительно высокой прочностью – более 300 МПа (см. таблицу). Однако в исследуемом сплаве наблюдаются низкие значения относительного удлинения – 0,65%. Обработка сплава АК5М комплексным модифицирующим флюсом на основе диоксида титана позволяет повысить относительное удлинение сплава в 2,9 раз, прочность – на 17%. Полученные значения механических свойств опытного сплава также выше, чем при обработке стандартным флюсом: относительное удлинение – на 53,6%, прочность – на 17%.

Значительное повышение свойств сплава при модифицировании опытным флюсом объясняется его комплексным влиянием на структуру медистого си-

лумина. В структуре сплава основными структурными составляющими являются дендриты алюминия и алюминиево-кремниевая эвтектика (рис. 5, а). На рис. 5 представлена структура сплава, термообработанного по режиму Т5. Результатом термообработки является не только полное растворение меди и магния в алюминии, но и частичное измельчение и сфероидизация эвтектического кремния [14].

Полное измельчение и сфероидизация эвтектического кремния достигается за счет модифицирования. При обработке стандартным флюсом эвтектика модифицируется натрием (рис. 5, б), при модифицировании опытным флюсом – барием, который успешно перешел в расплав в количестве 0,019%, и калием, содержание которого около 0,002%. Однако разработанный модификатор, в отличие от стандартного флюса, измельчает еще и дендриты алюминия (рис. 5, в), объемная доля которых в сплаве превышает 70% [14], измельчается макрозерно (рис. 6, в). Такое влияние на структуру оказывает титан, перешедший из диоксида в сплав и содержащийся в количестве 0,186% от массы сплава.

Сплав АК18 относится к поршневым сплавам и отличается высокой твердостью, в том числе при повышенных температурах. Однако из-за высокой объемной доли избыточных фаз его пластичность очень мала. За счет модифицирования можно повысить механические свойства сплава. Проведенные исследования влияния разработанного модификатора на механические свойства сплава АК18 показали, что обработка сплава комплексным флюсом позволяет увеличить прочность сплава в 1,2 раза (182 МПа), относительное удлинение сплава – примерно в 2 раза (0,74%).

На рис. 7, а представлена структура сплава АК18. В литой структуре сплава выделяются первичные кристаллы кремниевой фазы, имеющие форму многогран-

ников. Аллюминиево-кремниевая эвтектика имеет грубое строение. Модифицирование комплексным флюсом на основе диоксида титана уменьшает размер первичного кремния в 2 раза до 46 мкм, способствует из-

мельчению эвтектики (рис. 7, б), измельчает макроструктуру (рис. 8, б). В то же время стандартный флюс не оказывает влияние на свойства и структуру сплава АК18.

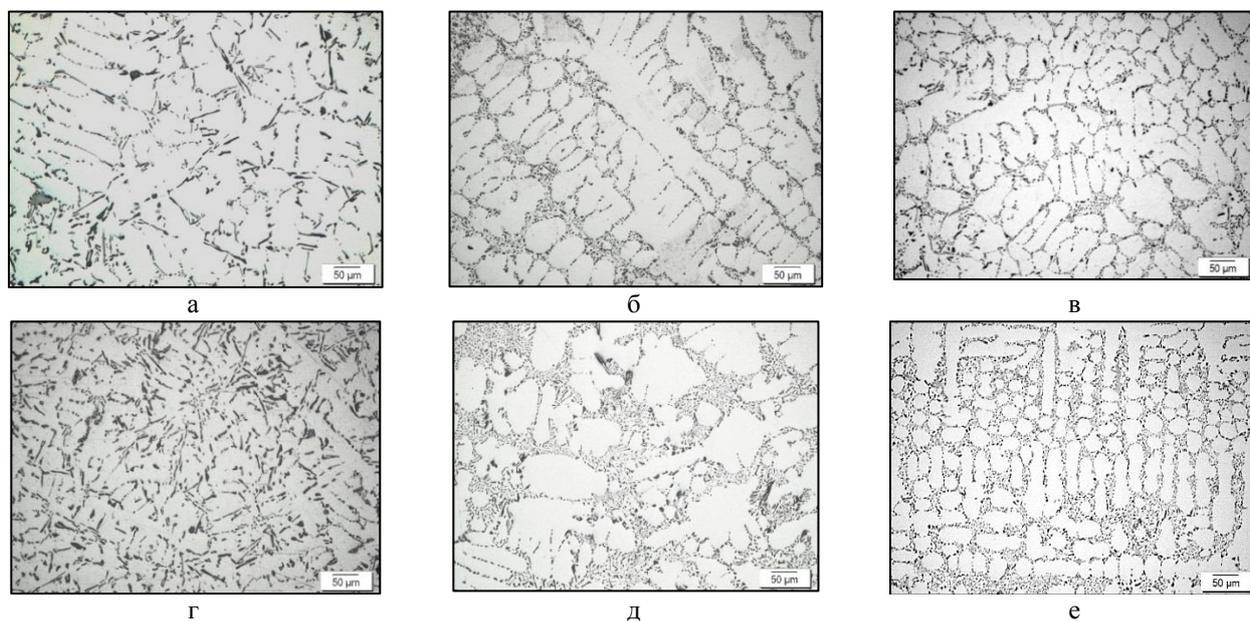


Рис. 3. Микроструктура доэвтектических сплавов:  
а – АК7ч без обработки; б – АК7ч стандартный флюс; в – АК7ч комплексный флюс;  
г – АК9ч без обработки; д – АК9ч стандартный флюс; е – АК9ч комплексный флюс

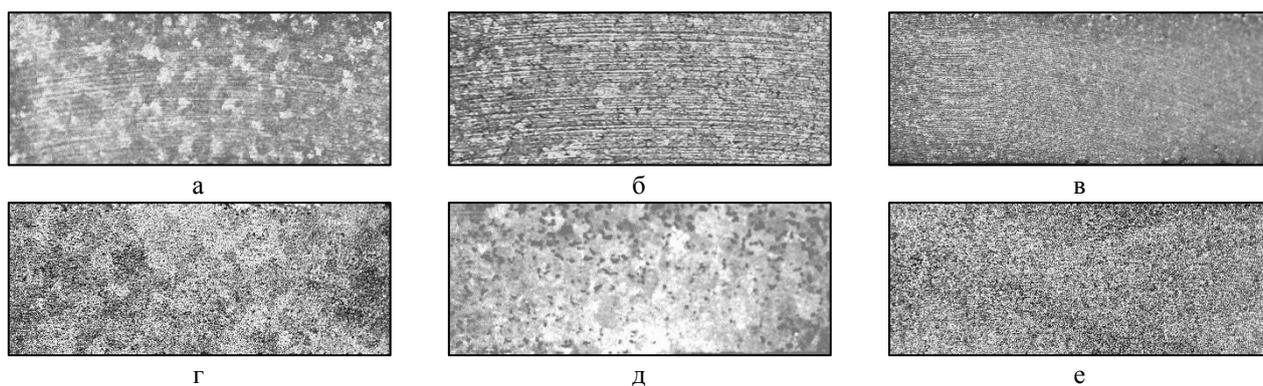


Рис. 4. Макроструктура доэвтектических сплавов:  
а – АК7ч без обработки; б – АК7ч стандартный флюс; в – АК7ч комплексный флюс;  
г – АК9ч без обработки; д – АК9ч стандартный флюс; е – АК9ч комплексный флюс

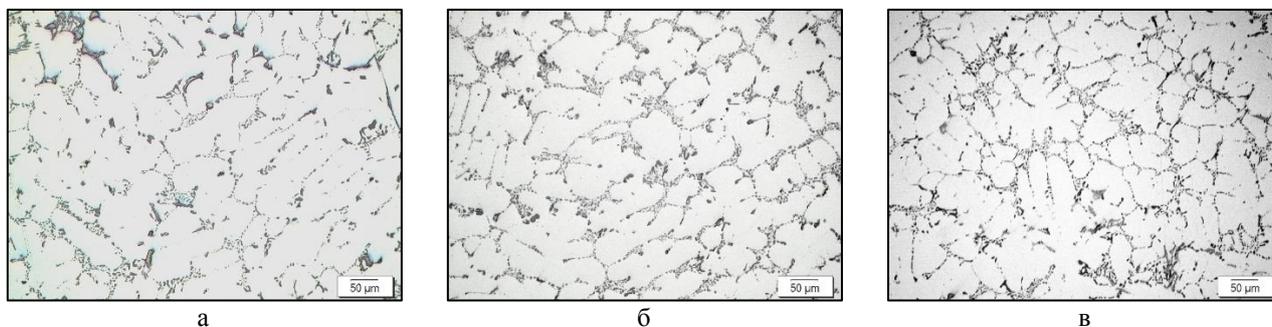


Рис. 5. Микроструктура сплава АК5М:  
а – без обработки; б – стандартный флюс; в – комплексный флюс

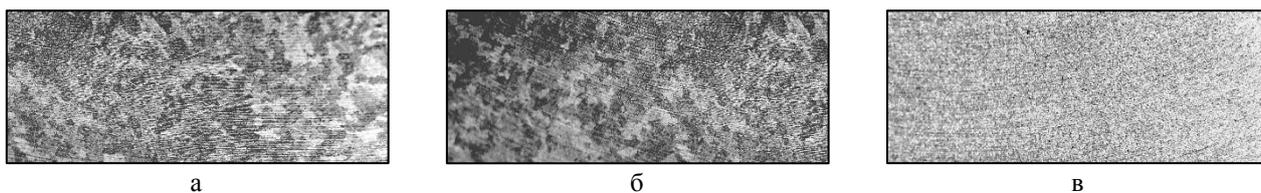


Рис. 6. Макроструктура сплава АК5М:  
а – без обработки; б – стандартный флюс; в – комплексный флюс

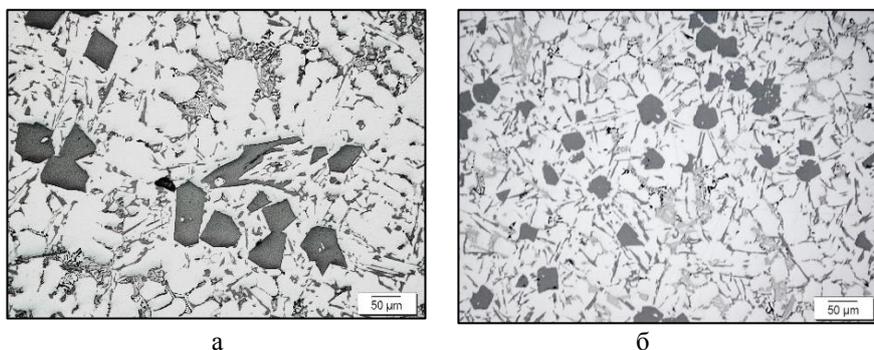


Рис. 7. Микроструктура сплава АК18: а – без обработки; б – комплексный флюс

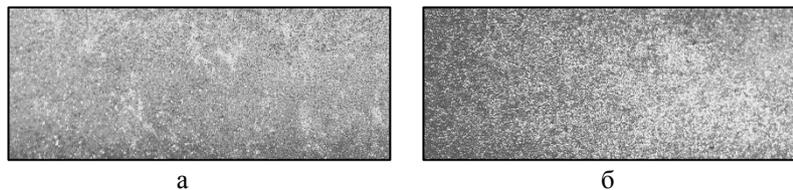


Рис. 8. Макроструктура сплава АК18: а – без обработки; б – комплексный флюс

### Заключение

Разработанный комплексный флюс состоит из недефицитных веществ, широко выпускаемых промышленностью и при этом оказывает существенное влияние на механические свойства и структуру алюминиево-кремниевых сплавов. В сравнении с широко используемым в промышленности модификатором, модифицирование комплексным флюсом обеспечивает повышение прочности доэвтектических и эвтектического силуминов на 17–32%, увеличение пластичности на 3–54% (в зависимости от сплава). Также разработанный флюс уменьшает размер первичного кремния, в результате наблюдается повышение свойств заэвтектического силумина АК18.

Повышение механических свойств сплавов является следствием комплексного влияния компонентов флюса на микроструктуру. Микроструктурным анализом установлено, что в сплавах, модифицированных комплексным флюсом, измельчаются все основные структурные составляющие силуминов, а именно дендриты  $\alpha$ -твердого раствора, алюминиево-кремниевая эвтектика и первичный кремний.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что применение модификатора на основе диоксида титана, оказывающего комплексное воздействие на структуру, является перспектив-

ным направлением улучшения структуры литейных алюминиевых сплавов и повышения их механических свойств.

### Список литературы

1. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. №7. С. 5-19.
2. Разработка комплексного модифицирующего флюса для литейных алюминиевых сплавов / А.Д. Шляпцева, И.А. Петров, А.П. Ряховский, В.С. Моисеев // *Литейщик России*. 2020. №4. С. 13-17.
3. Никитин К.В. Модифицирование и комплексная обработка силуминов: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 92 с.
4. Перспективы использования углеродосодержащего материала для обработки силуминов / И.А. Петров, А.П. Ряховский, В.С. Моисеев, Б.Л. Бобрышев, А.Д. Шляпцева // *Литейщик России*. 2016. №1. С. 28-32.
5. Волочко А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития // *Литье и металлургия*. 2015. №4 (81). С. 38-44.
6. Заявка на изобретение № 2020124313 от 22.07.2020.

7. Петров И.А., Ряховский А.П., Шляпцева А.Д. Исследование длительности сохранения модифицирующей способности некоторых щелочных металлов в расплаве силумина // Технология легких сплавов. 2018. №3. С. 54-61.
8. Напалков В.И., Махов С.В., Поздняков А.В. Модифицирование алюминиевых сплавов: монография. М.: Изд. Дом МИСиС, 2017. 348 с.
9. Напалков В.И., Махов С.В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. М.: МИСиС, 2002. 376 с.
10. Махов С.В., Козловский Г.А., Москвитин В.И. Основы процесса алуминотермического получения лигатуры Al – Ti из TiO<sub>2</sub>, растворенного в хлоридно-фторидном расплаве // Цветные металлы. 2015. №11. С. 34-38.
11. Алюмотермия / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко, С.И. Лаппо. М.: Metallurgia, 1978. 424 с.
12. Посыпайко В.И. и др. Диаграммы плавкости солевых систем. В двух частях. М.: Metallurgia, 1977. 416 с.
13. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. III-2. Технология заготовительных производств / Акаро И.Л., Андриевский Р.А., Белянин П.Н. и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. М.: Машиностроение, 1996. 736 с.
14. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография. М.: Изд. Дом МИСиС, 2010, 511с.

### Сведения об авторах

**Шляпцева Анастасия Дмитриевна** – ассистент на кафедре «Технологии и САПР металлургических процессов», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Москва, Россия. E-mail: [dimash881@yandex.ru](mailto:dimash881@yandex.ru)

**Петров Игорь Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент на кафедре «Технологии и САПР металлургических процессов», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Москва, Россия. E-mail: [lumen-2007g@mail.ru](mailto:lumen-2007g@mail.ru)

**Ряховский Александр Павлович** – кандидат технических наук, доцент, доцент на кафедре «Технологии и САПР металлургических процессов», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Москва, Россия. E-mail: [fpk-mati@mail.ru](mailto:fpk-mati@mail.ru)

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### COMPLEX MODIFICATION OF INDUSTRIAL SILUMINS

**Shlyaptseva Anastasia D.** – Assistant at the Department of Technologies and CAD of Metallurgical Processes, Moscow aviation Institute (National research University), Moscow, Russia. E-mail: [dimash881@yandex.ru](mailto:dimash881@yandex.ru).

**Petrov Igor A.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technologies and CAD of Metallurgical Processes, Moscow aviation Institute (National research University), Moscow, Russia. E-mail: [lumen-2007g@mail.ru](mailto:lumen-2007g@mail.ru)

**Ryakhovsky Alexander P.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technologies and CAD of Metallurgical Processes, Moscow aviation Institute (National research University), Moscow, Russia. E-mail: [fpk-mati@mail.ru](mailto:fpk-mati@mail.ru)

**Abstract.** The problem of improving the mechanical properties of cast aluminum alloys by means of a complex modification of their structure is discussed. Fluxes widely used in industry are mainly aimed at modifying only one structural component of Al-Si alloys, which does not allow to unify the modification process in production conditions. Therefore, a new modifying flux has been developed that has a complex effect on the structure of silumins. It consists of: TiO<sub>2</sub>-a component containing an  $\alpha$ -solid solution modifier; BaF<sub>2</sub>-a component containing a modifier of eutectic silicon; KF-a component that promotes the transition of titanium and barium to the melt. The effect of a complex modifier based on titanium dioxide on the macro-, microstructure and mechanical properties of cast aluminum-silicon alloys is studied for aluminum-silicon alloys: AK12, Ak9h, Ak7h, AK5M, AK18. It was found that the ultimate strength ( $\sigma_b$ ) of silumins higher than similar characteristics for alloys modified with standard sodium-containing flux up to 32%, and the relative elongation ( $\delta$ ) increases to 54 %. It is shown that the increase in the mechanical properties of alloys is a consequence of the complex effect of the flux components on the macro- and microstructure, which consists in simultaneous grain grinding, grinding and more uniform distribution of the release of an  $\alpha$ -solid solution of silicon in aluminum due

to titanium, grinding and refining of silicon in eutectic using barium and potassium, and grinding of primary silicon. The authenticity of the research is confirmed by the use of modern test equipments, a significant amount of experimental data, and the repeatability of the results on a large number of samples in an identical initial state.

**Keywords:** aluminum casting alloys, silumins, complex modification, titanium, barium, titanium dioxide, mechanical properties, microstructure, macrostructure, melt.

---

Ссылка на статью:

Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П. Комплексное модифицирование промышленных силуминов // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1 (36). С. 4-10.  
Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovsky A.P. Complex modification of industrial silumins. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, Vol. 36, No. 1, pp. 4-10.

УДК 669.187.26

Кунакбаева А.Т., Столяров А.М., Потапова М.В.

## УСВОЕНИЕ СЕРЫ ПРИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКЕ АВТОМАТНОЙ СТАЛИ

**Аннотация.** Автоматная сталь марки А12 в электросталеплавильном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» производится в двухванном сталеплавильном агрегате вместимостью 180×180 т и обрабатывается на агрегате «ковш-печь» (АКП). На АКП в металл вводится требуемое для автоматной стали количество серы порошковой проволокой. В работе рассматривается усвоение серы в процессе ковшевой обработки на АКП автоматной стали марки А12. Для этого исследован массив производственных данных из 38 плавов стали данной марки. В работе установлены зависимости коэффициента распределения серы от основности шлака на АКП, содержания в шлаке оксида марганца и суммарного содержания оксидов железа и марганца. Выявлены зависимости усвоения серы от содержания кремния в металле, отношения содержания марганца к содержанию кремния и отношения содержания кальция к содержанию алюминия. Для повышения эффективности усвоения технически чистой серы, вводимой в металл внутри порошковой проволоки диаметром 14–16 мм при ковшевой обработке автоматной стали марки А12 на агрегате «ковш-печь», рекомендуется иметь основность шлака не более 1,5, содержание оксида марганца в шлаке выше 2,5%, а сумму оксидов железа и марганца более 4,5%; содержание кремния в металле 0,20–0,35%; отношение  $[Mn]/[Si]$  не более 4,0; отношение  $[Ca]/[Al]$  0,2–0,3 (при разливке открытой струей) и 0,4–0,5 (при разливке закрытой струей).

**Ключевые слова:** автоматная сталь, ковшевая обработка, порошковая проволока, сера, усвоение.

Автоматная сталь марки А12 предназначена для массового производства на быстроходных станках-автоматах метизных изделий: болтов, винтов, гаек, шпилек, мелких деталей швейных, текстильных и других машин с наименьшей себестоимостью. Для этого такая сталь должна обладать наилучшей обрабатываемостью резанием и обладать следующими свойствами [1]:

- легким надломом стружки для быстрого ее удаления;
- низкой шероховатостью получаемой поверхности;
- вызывать наименьший износ режущего инструмента;
- возможностью резания деталей на повышенных скоростях для увеличения производительности обработки.

Для обеспечения таких свойств автоматная сталь марки А12 имеет повышенное содержание серы и фосфора. В соответствии с требованиями ГОСТ 1414-75 содержание химических элементов (% по массе) в этой стали должно быть следующим:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N
0,08-0,10	0,15-0,35	0,70-0,90	0,08-0,12	0,08-0,15	$\leq 0,10$	$\leq 0,12$	$\leq 0,15$	$\leq 0,012$

Разливка стали: открытой струей	Al	Ca/Al
	$\leq 0,006$ ;	0,05-0,30;
закрытой струей	Al	Ca/Al
	$\leq 0,010$ ;	$\geq 0,10$ .

Сера вводится в сталь в процессе ее ковшевой обработки кусковыми материалами или порошковой проволокой [2, 3].

В электросталеплавильном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» сталь марки

А12 производится в двухванном сталеплавильном агрегате вместимостью 180×180 т, раскисляется при выпуске в ковше силикомарганцем, ферросилицием, в металл вводится феррофосфор и ковш поступает на агрегат «ковш-печь» (АКП) [4]. На этом агрегате в металл вводится требуемое для автоматной стали количество серы. В работе рассматривается усвоение серы в процессе ковшевой обработки на АКП автоматной стали марки А12.

Для этого исследован массив производственных данных из 38 плавов стали данной марки. На АКП производится коррекция химического состава металла и его температуры, перемешивание металла в результате продувки аргоном, получение шлака требуемого состава. Состав металла изменяется путем введения как кусковых материалов, так и порошковой проволоки диаметром 14–16 мм. Изменение среднего содержания серы в металле исследованных плавов показано на рис. 1.

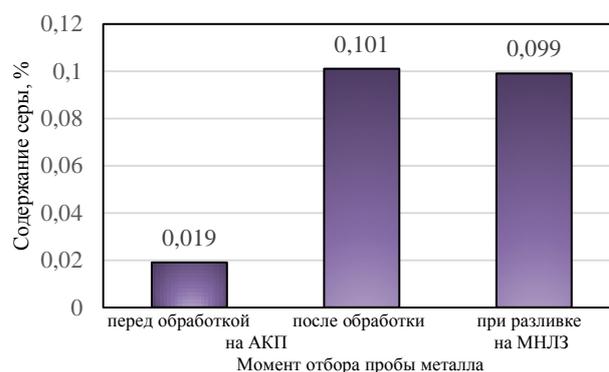


Рис. 1. Изменение среднего содержания серы в стали

Из рис. 1 видно, что в процессе обработки металла на АКП содержание серы увеличилось в среднем с 0,019 до 0,101% (на 0,082%), а в литом металле до 0,099% (на 0,080%). Это стало возможным благодаря введению в металл с помощью трайб-аппаратов по-

рошковой проволоки, содержащей технически чистую серу. При производстве автоматной стали на АКП решается задача не традиционного удаления серы из металла в шлак [5, 6], а сохранения вводимой в металл серы. Следовательно, необходимо, чтобы коэффициент распределения серы между шлаком и металлом принимал возможно меньшие значения. Для исследованного массива плавок коэффициент распределения серы принимал значения в диапазоне 0,2–6,3 и в среднем равнялся 2,7. Эти значения немного ниже уровня величин коэффициента распределения серы между шлаком и металлом при выплавке стали в двухванной печи.

Корреляционно-регрессионный анализ показал, что этот коэффициент  $L_S$  зависит от основности шлака  $B$  и содержания в шлаке оксидов железа  $FeO$ , % и марганца  $MnO$ , %, согласно следующим уравнениям:

$$L_S = 3,768 \cdot \ln B + 1,076, \quad \eta = 0,778; \quad (1)$$

$$L_S = 2,967 - 1,406 \cdot \ln (MnO), \quad \eta = 0,771; \quad (2)$$

$$L_S = 6,862 \cdot [(FeO) + (MnO)]^{-1,135}, \quad \eta = 0,744. \quad (3)$$

Графический вид зависимостей (1) и (2) приведен на рис. 2 и 3.

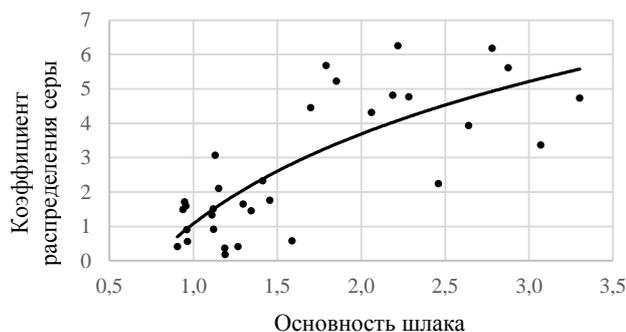


Рис. 2. Зависимость коэффициента распределения серы от основности шлака на АКП

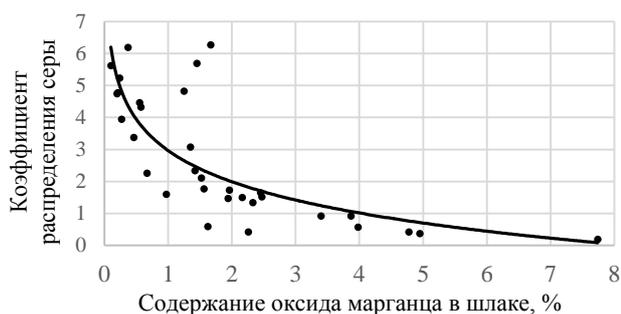


Рис. 3. Зависимость коэффициента распределения серы от содержания оксида марганца в шлаке на АКП

При ковшевой обработке автоматной стали на АКП основность шлака рекомендуется иметь не более 1,5 (см. рис. 2), содержание оксида марганца в шлаке – выше 2,5%, а сумму оксидов железа и марганца – более 4,5%.

С целью снижения основности шлака в ковш вводится около 900 кг сухого кварцевого песка.

Анализ влияния различных параметров на усвоение вводимой в металл серы показал, что сера, поступившая в металл из порошковой проволоки, используется более эффективно при высокой степени раскисленности металла. Для достижения этого в условиях низкого содержания алюминия, требуемого стандартом для успешной разливки металла, на первый план выходит другой элемент-раскислитель – кремний. На рис. 4 представлена возрастающая зависимость усвоения серы ( $U_S$ , %) от содержания кремния в металле ( $[Si]$ , %), характеризуемая уравнением

$$U_S = 236,78 \cdot [Si] + 25,52, \quad r = 0,461, \quad r_{0,01} = 0,413. \quad (4)$$

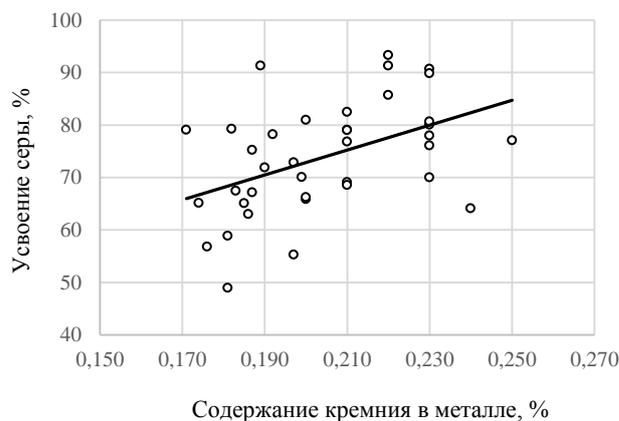


Рис. 4. Зависимость усвоения серы от содержания кремния в автоматной стали

Эта линейная зависимость статистически значима с вероятностью 99%.

С еще более высокой вероятностью – 99,9% существует зависимость усвоения серы ( $U_S$ , %) от отношения содержания марганца к содержанию кремния в металле  $[Mn]/[Si]$  (рис. 5):

$$U_S = 120,2 - 12,03 \cdot [Mn]/[Si], \quad r = -0,513, \quad r_{0,001} = 0,513. \quad (5)$$

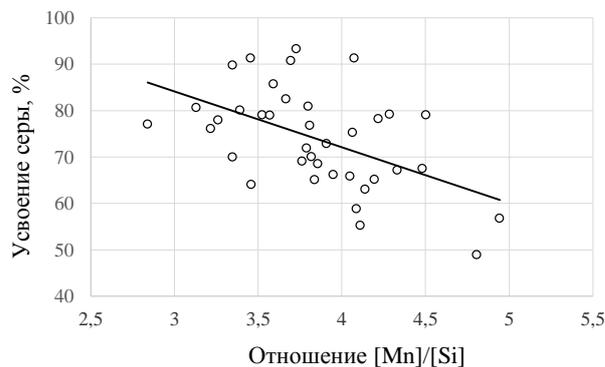


Рис. 5. Зависимость усвоения серы от отношения содержания марганца в металле к содержанию кремния

С ростом содержания кремния в металле отношение  $[Mn]/[Si]$  уменьшается, а усвоение серы увеличивается.

Кальций вводится в автоматную сталь для модифицирования образующихся комплексных неметаллических включений. При увеличении отношения содержания кальция к содержанию алюминия усвоение серы растет по зависимости, приведенной на рис. 6, согласно уравнению

$$U_S = 27,031 \cdot [Ca]/[Al] + 62,10, r = 0,377, r_{0,05} = 0,321. \quad (6)$$

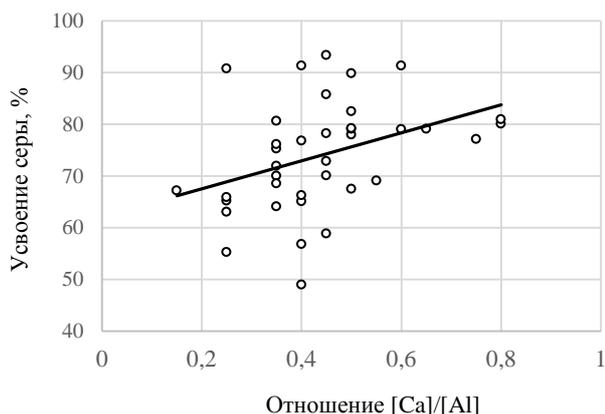


Рис. 6. Влияние отношения содержания кальция в металле к содержанию алюминия на усвоение серы

Из рис. 4–6 следует, что величина усвоения серы при ковшевой обработке автоматной стали марки А12 изменялась в очень широком интервале – от 49,0 до 93,3% и в среднем равнялась 74,0%.

Для повышения эффективности и усвоения технически чистой серы, вводимой в металл внутри порошковой проволоки диаметром 14–16 мм при ков-

шевой обработке автоматной стали марки А12 не агрегате «ковш-печь», рекомендуется иметь основность шлака не более 1,5, содержание оксида марганца в шлаке – выше 2,5%, а сумму оксидов железа и марганца – более 4,5%; содержание кремния в металле 0,20–0,35%; отношение  $[Mn]/[Si]$  не более 4,0; отношение  $[Ca]/[Al]$  0,2–0,3 (при разливке открытой струей) и 0,4–0,5 (при разливке закрытой струей).

#### Список литературы

1. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. М.: Металлургия, 1984. 360 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. *Современная технология производства стали*. М.: Теплотехник, 2007. 528 с.
3. Оптимизация технологии производства стали с нормируемым содержанием серы на Белорусском металлургическом заводе / В.В. Кисиленко, В.П. Онищук, Д.А. Дюдкин и др. // *Сталь*. 2004. №12. С. 49-50.
4. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. *Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 308 с.
5. Ушаков С.Н. Десульфурация стали на агрегате «ковш-печь» // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. №2 (33). С. 4–10.
6. Ковшевая обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунов // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. №2 (19). С. 26–29.

#### Сведения об авторах

**Кунакбаева Альбина Талгатовна** – магистрант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mcm@magtu.ru

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

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

## DESULFURIZATION OF FREE-CUTTING STEELS IN LADLE-FURNACE

**Kunakbaeva Albina T.** – student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

**Stolyarov Alexander M.** – D.Sc. (Eng), Professor of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

**Potapova Marina V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: marina\_potapova8@mail.ru

**Abstract.** *Free-cutting steel (grade A12) is produced in a two-vaned steel-making unit (capacity of 180×180 tons) and processed on a ladle-furnace unit (LFU) in the electric steel-making shop of PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". The sulfur required for free-cutting steel is added into the metal with a flux-cored wire. The assimilation of sulfur in the process of ladle treatment of A12 free-cutting steel is considered in the paper. The production data array from 38 heats was analyzed. The dependences of the sulfur distribution coefficient on the basicity of the slag, the content of manganese oxide in the slag and the total content of iron and manganese oxides are established in the work. Dependences of sulfur assimilation on the silicon content in the metal, the ratio of the manganese content to the silicon content and the ratio of the calcium content to the aluminum content were revealed. For increase the efficiency of sulfur assimilation a flux-cored wire with a diameter of 14-16 mm is added to the metal during ladle treatment. It is recommended to provide a slag basicity of no more than 1.5, oxide content manganese in the slag is more than 2.5%, and the amount of iron and manganese oxides are more than 4.5%; the silicon content in the metal is 0.20-0.35%; the ratio [Mn] / [Si] is not more than 4.0; the ratio [Ca] / [Al] is equaled to 0.2-0.3 during casting with an open jet and 0.4-0.5 during casting with a closed jet.*

**Keywords:** *free-cutting steel, ladle-furnace processing, flux-cored wire, sulfur, assimilation.*

---

Ссылка на статью:

Кунакбаева А.Т., Столяров А.М., Потапова М.В. Усвоение серы при ковшевой обработке автоматной стали // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 11-14.

Kunakbaeva A.T., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Desulfurization of free-cutting steels in ladle-furnace. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 11-14.

УДК 621.746.5.047

Парпиев О.Р., Пайзуллаханов М.С., Нодирматов Э.З.

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ НА БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

**Аннотация.** Исследованы техногенные отходы АО «Алматынский горно-металлургический комбинат», содержащие в своем составе цветные металлы – золото, серебро, а также железо и медь. Концентрированный поток солнечного излучения на Большой Солнечной Печи с тепловой мощностью 1 МВт использован для нагрева техногенного отхода с добавкой кокса (5 мас.%) и оксида кальция (10 мас.%) в тигле из графита. Под воздействием концентрированного солнечного излучения плотностью потока 70-100 Вт/см<sup>2</sup> материал расплавился и расплав стекал в воду. В жидком состоянии в присутствии углерода протекал процесс восстановления металлов из оксидных состояний. Процесс кристаллизации при охлаждении расплава в воде имел характер ликвации, т.е. раздельная кристаллизация металлов и керамики. В результате этого в воде накапливались отдельные гранулы металла и керамики различного размера и формы. Количественный анализ показал, что переработка техногенных отходов в потоке концентрированного солнечного излучения высокой плотности позволяет извлечь из них металлы (25 мас.%), которые могут быть использованы в металлургии. А оставшаяся керамическая часть (75 мас.%) представляет собой силикат кальция, что может быть направлено на использование для создания футеровочных плит.

**Ключевые слова:** техногенные отходы, карботермическое восстановление, солнечная печь, металлы, металлы, керамика.

### Введение

Современные темпы роста численности населения, особенно в городах с развитой промышленностью, несомненно, вызывает увеличение потребления энергетических и минеральных ресурсов. Следовательно, встает вопрос о необходимости разработки новых методов добычи полезных ископаемых, переработки накапливающихся из года в год техногенных отходов (ТО).

Известно, что металлургическая промышленность является одним из крупнейших источников выбросов CO<sub>2</sub> [1]. Как отмечено в [2], в 2000 году на долю черной металлургии приходится около 4,1% мирового объема выбросов CO<sub>2</sub>. Согласно [3] в производстве чугуна 19,6% выбросов CO<sub>2</sub> приходится на агломерацию и 62% – на доменную печь. Удельное потребление электроэнергии в электродуговой печи составляет 310–640 кВт·ч/т стали [4]. При этом в качестве восстановителя используется кокс. Количество выбросов CO<sub>2</sub> при этом составляет 1630–1960 кг/т стали.

С другой стороны, металлургическая промышленность не является безотходной. Как показывает анализ, в настоящее время общее количество ТО оценивается миллиардами тонн, содержащих в своем составе драгоценные металлы: золото, серебро, медь. Попутное извлечение металлов и других компонентов, присутствующих в ТО, позволило бы повысить комплексность использования сырьевых источников и сделать переработку экономически оправданной [5].

Основные направления утилизации отходов ориентированы на их сжигание или вывоз на свалки и хвостохранилища, требующих отвода больших зе-

мельных участков. На содержание отвальных хозяйств ежегодно расходуются большие средства. Большой объем шлаков определяет актуальность проблемы их рационального использования. Хранение таких отходов требует огромных площадей и неблагоприятным образом сказывается на экологии. Их использование в строительной промышленности приводит не только к безвозвратной потере ценных компонентов, но и затруднено в связи с наличием в них оксидов тяжелых металлов [6].

Следовательно, существующие на сегодняшний день разработки по переработке ТО не рентабельны и не являются экологически чистыми. Поэтому таковые пока не вышли за рамки поисковых лабораторных исследований.

Однако количество выбросов CO<sub>2</sub> в металлургии может быть снижено при использовании потока концентрированной солнечной энергии вместо горения кокса. Концентрированная солнечная энергия обладает огромным потенциалом для применения в условиях высоких температур [7]. Эти приложения включают: обработку материалов (сварка и облицовка, обработка поверхности, покрытия и поверхностное упрочнение и порошковая металлургия), синтез и обработку неметаллических материалов (керамика, фуллерены, углеродные нанотрубки, алюминатные цементы кальция [8] и производство извести) и металлургические процессы (производство кремния и алюминия, пары ZnO/Zn). Концентрированное солнечное тепло до сих пор не нашло широкого применения в сталеплавильном производстве. В [9] изучен процесс окисления железа при воздействии солнечной энергии на сталь и получили Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> без примесей для использования в производстве высококачественных сталей и алюмотермической сварки железнодорожных рельсов. Другое исследование было проведено для изучения влия-

ния концентрированной солнечной энергии в оксидах железа – разложение магнетита при температуре выше температуры плавления этой фазы в воздухе и аргоне [10]. В [11] изучали восстановление оксида железа (III) графитом в солнечной печи при высоких температурах (1300–2390 К) с выходом Fe 78%. В [12] исследовано совместное производство железа и синтез-газа путем восстановления магнетита в  $\text{CH}_4$ . Карботермическое восстановление оксида железа (III) и оксида марганца (IV) исследовано в [13].

Таким образом, солнечные печи могут быть источниками нагрева при переработке ТО, не загрязняя как сам продукт, так и окружающую среду углекислым газом.

Единственная в Центральной Азии Большая Солнечная Печь была сдана в эксплуатацию в 1987 году. В мире существует две такие солнечные печи, первая из которых находится во Франции (Odeo).

Большая Солнечная Печь представляет собой сложную оптико-механическую систему с автоматическим управлением и состоит из таких компонентов, как зона гелиостатов, концентратор и технологическая башня. Отражающая поверхность 62 гелиостатов составляет  $3022,5 \text{ м}^2$ , концентратор параболического типа состоит из 10700 facets с общей отражающей поверхностью  $2166,75 \text{ м}^2$ .

Большая Солнечная Печь способна концентрировать солнечный поток в фокальной плоскости до плотности  $600 \text{ Вт/см}^2$ . Отличительным параметром Большой Солнечной Печи, как технологического инструмента, является высокая скорость нагрева материала ( $1500 \text{ град/мин}$ ) до температуры  $2000\text{--}2700^\circ\text{C}$ , в отличие от традиционных нагревательных приборов (электрических, лазерных, плазменных, электрической дуги). Плавление материалов под воздействием концентрированного солнечного излучения высокой плотности основано на процессах светопоглощения материалов. С целью получения материалов с заданными свойствами расплавы могут быть охлаждены с различными скоростями – закалкой на металлическом листе, закалкой в воде, закалкой в струе воды или инертных газов [14].

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты химического анализа состава ТО АГМК приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, ТО АГМК представлены в основном железосиликатами, в них содержатся также минералы пироксенового типа, золото, серебро и медь.

Таблица 1

Химический состав ТО АГМК

Элемент	Au	Ag	CuO	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$	Fe-FeO- $\text{Fe}_2\text{O}_3$
Количество	0,52	1,72	0,52	34	5-7	5-6	45
	г/т	г/т	вес. %	вес. %	вес. %	вес. %	вес. %

Для плавления ТО АГМК на БСП изготавливали шихту следующего состава: 5 кг ТО + 0,5 кг CaO + 0,35 кг кокса. Шихту перемешивали в шаровой мельнице в течение 2 часов, сушили в сушильном шкафу при  $450^\circ\text{C}$  в течение 10 часов. Шихту помещали в графитовый тигель цилиндрической формы  $\text{Ø}200 \text{ мм}$ , высотой 200 мм с отверстием  $\text{Ø}12 \text{ мм}$  в нижней части. Тигель устанавливался в фокальную плоскость БСП. На мишень – тигель направлялся поток концентрированного солнечного излучения плотностью 70 и  $100 \text{ Вт/см}^2$ . За процессом плавки материала наблюдали через телевизионную систему зрения.

После выдержки тигля с материалом под воздействием потока концентрированного солнечного излучения наблюдалось стекание жидкости со дна тигля – сливание капель жидкости в воду. Под воздействием концентрированного солнечного излучения плотностью потока  $100 \text{ Вт/см}^2$  материал расплавлялся и расплав стекал в воду. В жидком состоянии в присутствии углерода протекал процесс восстановления металлов из оксидных состояний. Процесс кристаллизации при охлаждении расплава имел характер ликвации, то есть раздельная кристаллизация металлов и керамики. В результате этого в воде накапливались отдельные гранулы металла и керамики различного размера и формы.

Количественный анализ показал, что переработка техногенных отходов в потоке концентрированного солнечного излучения высокой плотности позволяет извлечь из них металлы (25 мас. %), которые могут быть использованы в металлургии, а оставшаяся керамическая часть (75 мас. %) представляет собой силикат кальция, что может быть направлено для использования создания футеровочных плит.

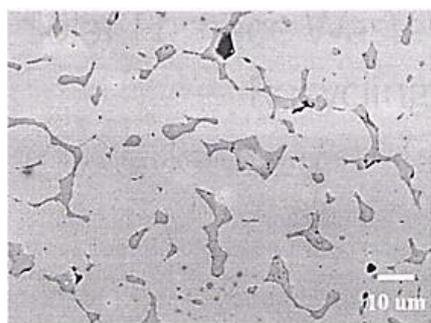
#### Характеристика металлических и керамических отходов

Анализ металлических отходов проводился для определения элементного состава и микроструктуры. Этот анализ поможет определить ценность отходов и присутствующих перерабатываемых элементов. Кроме того, пути утилизации также обсуждаются.

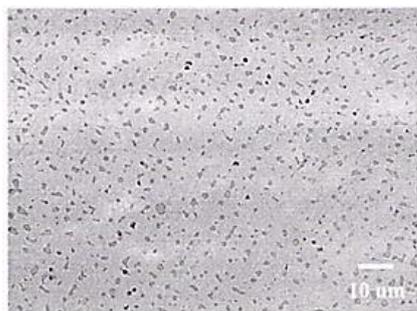
#### Характеристика металлических отходов

На рис. 1 приведены изображения сканирующей электронной микроскопии.

На рис. 2 показан СЭМ-анализ металлических отходов. Анализ выявил бинарную фазированную микроструктуру. В частицах отходов наблюдали два типа микроструктур. Микроструктуры двух типов обозначаются как микроструктура типа 1 и типа 2.



Type 1 microstructure



Type 2 microstructure

Рис. 1. СЭМ-изображение микроструктуры материалов

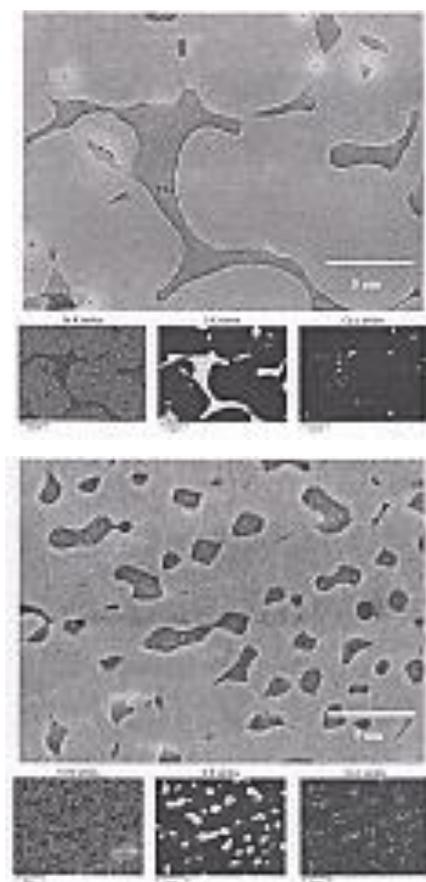


Рис. 2. Элементный анализ двух типов микроструктур [(красный) Fe, (желтый) S, (пурпурный) Cu]

Большая часть частиц отходов состояла из микроструктуры типа 1. В этой микроструктуре вторичная темная фаза имела случайную морфологию и грубый размер. Однако в микроструктуре типа 2 вторичная фаза была значительно более тонкой. Фазовая доля вторичной фазы составляла около 11–13% в обоих типах микроструктур. Анализ фазового состава проводился с использованием элементного анализа.

На рис. 3 показано элементное отображение микроструктуры двух типов. В двух фазах присутствовали три ключевых компонента, а именно Fe, Cu и S. Яркой фазой в обеих микроструктурах было в основном Fe с небольшим количеством Cu, в то время как темная интерметаллическая фаза состояла из Fe, Cu и S. Точный состав обеих фаз, который содержит другие второстепенные элементы, приведен в табл. 2.

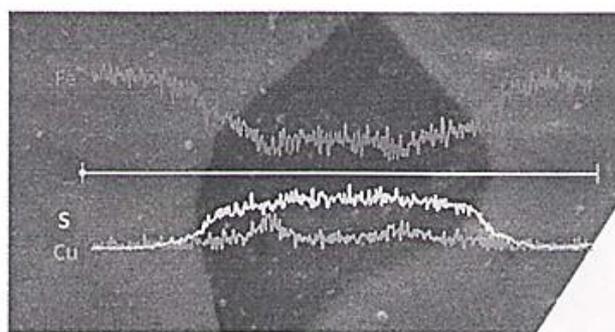


Рис. 3. Линейный анализ распределения двухфазных элементов [(красный) Fe, (желтый) S, (пурпурный) Cu]

Таблица 2

Элементный состав двухфазной фазы внутри микроструктуры

Яркая фаза		Темная фаза	
Элемент	Количество, %	Элемент	Количество, %
C	5,01	C	5,41
S	0,76	S	21,57
P	0,31	P	0,42
Fe	91,41	Fe	64,84
Cu	2,51	Cu	7,74
Total	100,00	Total	100,00

Согласно количественному анализу медь присутствует в большем количестве в интерметаллической фазе по сравнению с матрицей. Однако они могут отличаться от точных значений.

Приведенная на рис. 3 линейная карта двух фаз четко различает изменение состава между двумя фазами. В матричной фазе основным элементом является Fe с небольшим количеством Cu и очень низким S, тогда как во второй фазе содержание Fe существенно уменьшается с резким увеличением содержания S и Cu.

XRD-профиль металлических отходов приведен на рис. 4.

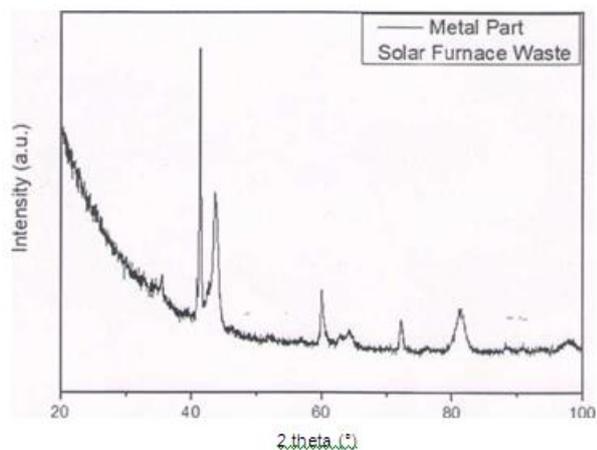


Рис. 4. Рентгеноструктурный анализ образца отходов

После сравнения полученного шаблона с доступными картами XRD было обнаружено, что он не очень хорошо согласуется с какими-либо фазами, присутствующими в системе Fe-Cu-S. Это может быть связано с метастабильной природой образца. Гомогенизация образца может привести к более четкому профилю XRD.

**Характеристика керамических отходов**

На рис. 5 показана полированная поверхность керамических отходов.

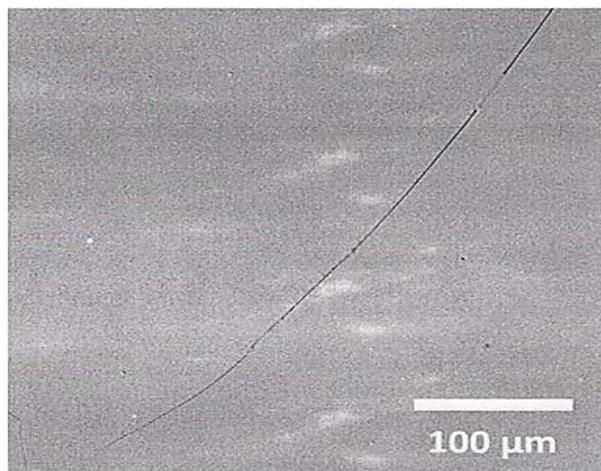


Рис. 5. СЭМ-изображение микроструктуры отходов

Обратно рассеянное изображение образца показало, что образец однофазный, так как вторичной фазы не было видно. Чтобы подтвердить это, было проведено линейное отображение поверхности.

Линейное отображение подтверждает предыдущую гипотезу о том, что образец является однофазным. Распределение элементов по образцу было значительно равномерным. Однако состав керамики был довольно сложным. Элементный анализ приведен в табл. 3.

Элементный состав показывает, что керамическая часть, представляющая силикат кальция SiCaMgO, содержит большое количество Si и Fe, а также Ca, тогда как присутствует некоторое количество Al и Mg (рис. 6).

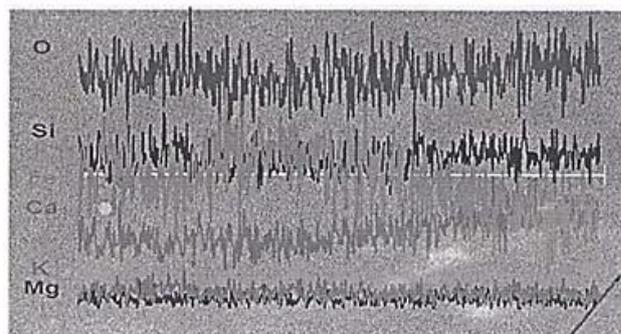


Рис. 6. СЭМ-изображение микроструктуры отходов

На рис. 7 приведена рентгенограмма керамической части плавленого материала на Большой Солнечной Печи. Анализ показал, что такая картина соответствует соединению Si<sub>2</sub>CaMgO<sub>6</sub>.

Таким образом, плавка шихты в графитовом тигле в фокальной плоскости БСП при плотности потока 100 Вт/см<sup>2</sup> и сливом расплава в воду способствовала к раздельной кристаллизации металлосплавов 25 мас.% (FeCu) и 75 мас.% керамики (SiCaMgO).

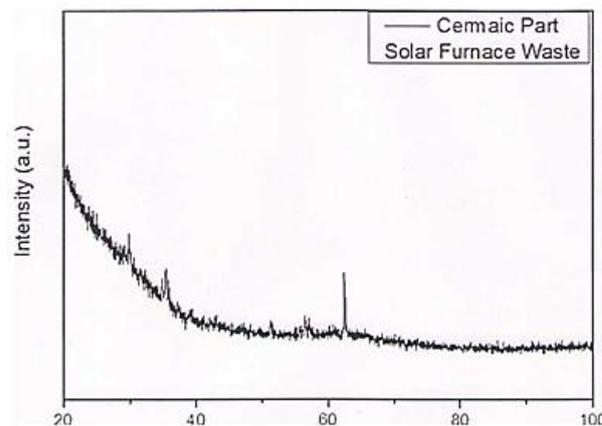


Рис. 7. Рентгеноструктурный анализ керамических отходов

Таблица 3

Элементный состав двух фаз, присутствующих внутри керамики

Элемент	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Total
Содержание, %	10,08	42,27	2,43	2,84	12,58	0,33	1,09	10,54	0,20	17,64	100,00

### Выводы

Следовательно, концентрированный поток солнечного излучения на Большой Солнечной Печи с тепловой мощностью 1 МВт может быть использован для переработки техногенных отходов (ТО) Алмалыкского горно-металлургического комбината. Путем плавления смеси «ТО + 5 мас.% кокса + 10 мас.% оксида кальция» в тигле из графита под воздействием концентрированного солнечного излучения плотностью потока 70–100 Вт/см<sup>2</sup> с последующим сливом расплава в воду могут быть получены отдельно восстановленные металлы и керамика. Количественный анализ показал, что переработка техногенных отходов в потоке концентрированного солнечного излучения высокой плотности позволяет извлечь из них металлы (25 мас.%), которые могут быть использованы в металлургии. А оставшаяся керамическая часть (75 мас.%) представляет собой силикат кальция, что может быть направлено на использование для создания футеровочных плит.

Как показывает анализ, удельный расход кокса в металлургии составляет порядка 0,5–0,6 т/т. С другой стороны, тепловая мощность БСП (1 МВт) соответствует сжиганию 113 кг угля. А при горении такого количества угля образуется 192 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, загрязняющего окружающую среду.

Концентрированная солнечная энергия может стать альтернативой в металлургических процессах. Несмотря на то, что были получены интересные результаты по восстановлению железа из его оксида, для рассмотрения солнечной металлургии как альтернативы хорошо изученным традиционным процессам необходимы дальнейшие исследования.

### Список литературы

1. Pardo N., Moya J.A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the European iron & steel industry. *Energy* 2013, 54, 113–128.
2. Wang K., Wang C., Lu X., Chen J. Scenario analysis on CO<sub>2</sub> emissions reduction potential in China's iron and steel industry. *Energy Policy* 2007, 35, 2320–2335.
3. Ariyama T., Sato M. Optimization of ironmaking process for reducing CO<sub>2</sub> emissions in the integrated steel works. *ISIJ Int.* 2006, 46, 1736–1744.
4. Kirschena M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc

furnace in steel industry. *Energy* 2011, 36, 6146–6155.

5. Потапов К.О., Рошин В.Е. Селективное восстановление и пирометаллургическое извлечение железа из шламов медеплавильного производства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2014. Т. 14. №3.
6. Переработка шлаков медеплавильного производства / Е.М. Харченко, Г.А. Ульева, Т.Г. Егорова, С.С. Рахимбеков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 7. С. 30–33.
7. Fernández-González D., Ruiz-Bustanza I., González-Gasca C., Piñuela-Noval J., Mochón-Castaños J., Sancho-Gorostiaga J., Verdeja L.F. Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy. *Sol. Energy* 2018, 170, 520–540.
8. Fernández-González D., Prazuch J., Ruiz-Bustanza I., González-Gasca C., Piñuela-Noval J., Verdeja, L.F. Solar synthesis of calcium aluminates. *Sol. Energy* 2018, 171, 658–666.
9. Ruiz-Bustanza I., Cañadas I., Rodríguez J., Mochón J., Verdeja L.F., García-Carcedo F., Vázquez A. Magnetite Production from Steel Wastes with Concentrated Solar Energy. *Steel Res. Int.* 2013, 84, 207–217.
10. Sibieude F., Ducarroir M., Tofighi A., Ambriz J. High temperature experiments with a solar furnace: The decomposition of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CdO. *I. J. Hydrogen Energy* 1982, 7, 79–88.
11. Steinfeld A., Fletcher E.A. Theoretical and experimental investigation of the carbothermic reduction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using solar energy. *Energy* 1991, 16, 1011–1019.
12. Steinfeld A., Kuhn P., Karni J. High-temperature solar thermochemistry: Production of iron and synthesis gas by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-reduction with methane. *Energy* 1993, 18, 239–249.
13. Mochón J., Ruiz-Bustanza I., Vázquez A., Fernández D., Ayala J.M., Barbés M.F., Verdeja L.F. Transformations in the Iron-Manganese-Oxygen-Carbon System Resulted from Treatment of Solar Energy with High Concentration. *Steel Res. Int.* 2014, 85, 1469–1476
14. Akbarov R.Y., Paizullakhanov M.S. Characteristic features of the energy modes of a large solar furnace with a capacity of 1000 kW // *Applied Solar Energy* 2017. 54 (2), 99–109

### Сведения об авторах

**Парпиев Одилхужа Раимхужаевич** – кандидат физико-математических наук, директор института материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

**Пайзуллаханов Мухаммад-Султанхан** – доктор технических наук, заведующий лабораторией института материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан. E-mail: fayz@bk.ru.

**Нодирматов Эркин Зокирматович** – младший научный сотрудник института материалообразования НПО “Физика-Солнце” АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**FEATURES OF METALLURGICAL WASTE PROCESSING IN A LARGE SOLAR FURNACE**

**Parpiev Odilkhuzha R.** – PhD, Director of the Institute of Material Science SPA "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

**Paizullakhanov Muhammad-Sultanhan** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Institute of Material Science SPA "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan. E-mail: [fayz@bk.ru](mailto:fayz@bk.ru).

**Nodirmatov Erkin Z.** – Junior Researcher, Institute of Materials Science, NPO Physics-Solntse, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

**Abstract.** *The technogenic wastes of Metallurgical Plant, containing non-ferrous metals - gold, silver, as well as iron and copper, were investigated. The concentrated solar radiation flux at the Big Solar Furnace with a thermal power of 1 MW was used to heat industrial waste with the addition of coke (5 wt.%) And calcium oxide (10 wt.%) In a graphite crucible. Under the influence of concentrated solar radiation with a flux density of 70-100 W / cm<sup>2</sup>, the material melted and the melt drained into water. In the liquid state in the presence of carbon, the process of metal reduction from oxide states proceeded. The crystallization process upon cooling of the melt in water had the character of segregation, i.e. Separate crystallization of metals and ceramics. As a result of this, individual granules of metal and ceramics of various sizes and shapes accumulated in water. Quantitative analysis showed that the processing of industrial waste in a stream of concentrated solar radiation of high density allows you to extract metals (25 wt.%) From them that can be used in metallurgy. And the remaining ceramic part (75 wt.%) Is calcium silicate, which can be used to create lining plates.*

**Key words:** *industrial waste, carbothermal recovery, solar furnace, metal alloys, ceramics*

---

Ссылка на статью:

Парпиев О.Р., Пайзуллаханов М.С., Нодирматов Э.З. Особенности переработки металлургических отходов на большой солнечной печи // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 15-20.  
Parpiev O.R., Paizullakhanov M.-S., Nodirmatov E.Z. Features of metallurgical waste processing in a large solar furnace. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 15-20.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77.04

Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА COLD STRETCHING ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ КЛАССА 500 В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

**Аннотация.** Рассмотрен современный процесс производства ненапрягаемой арматурной проволоки класса 500, основанный на использовании знакопеременной деформации растяжения-сжатия COLD STRETCHING или «SBR». Описаны теоретические основы изменения механических свойств металла при применении механоциклической обработки. Представлен перечень предприятий, изготавливающих универсальные линии по производству арматуры, с помощью которых может быть реализована данная технология. Для теоретической оценки реализации данной технологии на линии LM-TRA/760-RO фирмы GCR Eurodraw было применено конечно-элементное моделирование с созданием цифрового двойника объекта и последующим анализом степени (интенсивности) деформации, необходимой для определения оптимальной конфигурации изгибающих роликов. Цифровой двойник обрабатываемого проката строился в программном пакете DEFORM 3D. В качестве точек контроля принималась точка после узла заправки и после панели окалиноматера, т.е. в местах наибольшего деформационного воздействия. Для построения модели использовался образец арматурного проката диаметром 12,0 мм из низкоуглеродистой стали. Принципиально определено, что для получения требуемых свойств арматуры значение интенсивности деформации должно быть в пределах 0,07-0,10. На примере арматурного проката диаметром 12,0 мм показано, что действующий состав оборудования может обеспечить проведение процесса COLD STRETCHING. Далее необходимо для каждого типоразмера арматурной проволоки провести теоретические расчеты, определяющие заданный уровень интенсивности деформаций и, соответственно, межосевое расстояние для роликов.

**Ключевые слова:** арматурная проволока, COLD STRETCHING, класс прочности 500, интенсивность деформации, конечно-элементное моделирование, цифровой двойник, конфигурация роликов, вытяжной барабан, закон Кулона-Амантона.

### Введение

Ранее было показано [1], что одним из возможных способов получения арматурного проката класса прочности 500 с заданным уровнем свойств является технология «COLD STRETCHING» или «SBR» (stretching – bending – rebending). Согласно требованиям ГОСТ 34028 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» условный предел текучести арматуры должен быть не менее 500 Н/мм<sup>2</sup>, временное сопротивление разрыву не менее 600 Н/мм<sup>2</sup>, отношение предела прочности к пределу текучести должно составлять не менее 1,05, относительное удлинение не менее 14%, полное относительное удлинение при максимальной нагрузке  $A_{gt}$  не менее 2,5%. Технология «COLD STRETCHING» основана на процессе пластической деформации — равномерного растяжения со знакопеременным изгибом без образования локализации деформации («шейки»). В процессе деформации горячекатаный прокат претерпевает упрочнение до класса 500, при этом пластические свойства металла должны сохраняться либо возможен их небольшой прирост [2]. Немонотонный характер изменения прочности и пластичности материалов при знакопеременной деформации исследуется достаточно давно [3–5], однако определяемые в результате теоретических расчетов и экспериментов зависимости не получают достаточного применения в производственной практике. Препятствием

для этого является многофакторность процессов управления и нестабильность качества готовых металлоизделий, связанная в основном с исходными свойствами заготовки. Процессы механоциклической обработки широко используются только в системах удаления окалины и в системах рихтовок, устанавливаемых перед намоткой готовых изделий (проволока, канаты) с целью устранения внутренних напряжений и придания равновесности виткам. Использование знакопеременной обработки как основного вида холодной деформации при производстве металлоизделий на сегодняшний день имеет крайне ограниченную сферу применения и недостаточно исследовано. Эта технология практически отсутствует на территории России, где в основном применяется традиционный способ изготовления арматуры протяжкой в роликовых волокнах. Уникальность и простота данного способа значительно снижает затраты на производство, т.к. за счет малых степеней деформации происходит снижение затрат на трение, что влечет снижение энергетических затрат, кроме этого снижается нагрев в процессе, что исключает применение сложных и дорогостоящих систем охлаждения. Основным «тормозящим» моментом распространения данной технологии остается отсутствие единых расчетных закономерностей для выбора параметров процесса и низкая стабильность свойств готовой продукции.

В общем смысле под механоциклической обработкой понимается последовательное применение различных видов деформационного воздействия с изменением направления приложения сил, оказываю-

щее влияние на распределение внутренних напряжений в металле [3]. Этот процесс производится в роликовых системах различной конфигурации с применением принудительного вытяжения на тянущий барабан. Такая деформационная обработка не снижает плотность дислокаций в деформированной заготовке, а перераспределяет, изменяя дислокационную структуру. Основной принцип процессов с комбинированным нагружением состоит в разделении в произвольной пропорции общего потока энергии подводимой к деформируемому телу энергии. Исследования по воздействию циклической деформации на свойства металла показывают, что развитие применения таких способов воздействия может быть гораздо более эффективным в способах управления качеством, чем это принято считать на сегодняшний день.

Современные европейские предприятия, специализирующиеся на изготовлении оборудования для производства проволоки, представляют универсальные линии для изготовления арматуры, включающие не только традиционный состав оборудования с роликовыми клетями, но и специальные панели для применения технологии «COLD STRETCHING» в одной технологической линии (Promostar Srl (<https://www.promostar.it/>), SCHNELL spa (<https://www.schnellgroup.com/en/>), DEM (<https://www.demgroup.com/>) и пр.). В качестве накопленного устройства обычно служит окалиноломатель, в котором происходит удаление окалины с поверхности посредством знакопеременного изгиба в двух взаимно перпендикулярных группах роликов. При использовании процесса «COLD STRETCHING» окалиноломатель одновременно выполняет функцию создания обратного натяжения арматурной проволоки между роликами и тянущим барабаном, и изгибающей системы.

Цель настоящей работы состоит в теоретической оценке возможности осуществления процесса «COLD STRETCHING» на линии LM-TRA/760-RO фирмы GCR Eurodraw [<http://gcreurodraw.com/>], предназначенной для производства холоднодеформированной арматуры из низкоуглеродистых марок стали в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». В качестве исходных условий принималась существующая конфигурация роликовых устройств данной линии – узла заправки и механического окалиноломателя, которые обеспечивали реализацию технологии «COLD STRETCHING» по схеме «изгибающие ролики – вытяжной барабан».

### Теория, материалы и методы исследования

Для проведения исследования возможности практического применения технологии «COLD STRETCHING» были проведены следующие физические и компьютерные эксперименты:

- физическое, а затем конечно-элементное моделирование процесса растяжения арматурного проката класса 400 на разрывной машине и определение интенсивности деформации  $\varepsilon_u$ , необходимой для обеспечения требуемого прироста прочностных и пластических свойств без образования зоны локальной деформации;

- конечно-элементное моделирование процесса механоциклической обработки (растяжения со знакопеременным изгибом) на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw при существующей конфигурации роликовых устройств, изменяя только межосевое расстояние между роликами, для получения заданной величины  $\varepsilon_u$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного физического эксперимента процесса растяжения образца арматурного проката класса 400 диаметром 8,0 мм из стали марки 18Г2С на разрывной машине было установлено, что требуемый комплекс физико-механических свойств был достигнут при величине относительного удлинения образца  $\delta_1$ . При компьютерном моделировании процесса растяжения этого же образца в программном пакете DEFORM 3D (лицензия: Machine 38808) при тех же условиях, что и физический эксперимент, были приняты следующие граничные условия для моделирования:

- модель материала пластическая, реология материала образца принята из ранее полученных в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» экспериментов;
- скорость деформации 0,01 м/с;
- перемещение захватов испытательной машины (относительное удлинение) образца, равное величине  $\delta_1$ .

В результате моделирования определили интенсивность деформации образца  $\varepsilon_u$  при описанных выше условиях, значение которой составило  $\varepsilon_u = 0,07$ . Таким образом, интенсивность деформации для реализации технологии «COLD STRETCHING» принимаем равной  $\varepsilon_u = 0,07-0,1$ . Причём заданная величина  $\varepsilon_u$  должна обеспечиваться не только на поверхности, но и в центральных слоях образца.

На следующем этапе организовывался компьютерный эксперимент по созданию цифрового двойника технологии «SBR» применительно к линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw с конфигурацией роликов, показанных на рис. 1. Задачей компьютерного эксперимента было определение такой конфигурации роликов за счёт изменения параметра  $h$ , которое обеспечивало бы получение значения интенсивности деформации  $\varepsilon_u^0$  (на оси проката) равно 0,07. Моделирование было проведено для значений  $h = 192$  мм (исходная конфигурация роликов),  $h = 187$  мм (уменьшение межосевого расстояния на 5 мм);  $h = 182$  мм (уменьшение межосевого расстояния на 10 мм);  $h = 178$  мм (уменьшение межосевого расстояния на 14 мм).

Граничные условия для конечно-элементного моделирования принимались следующие:

- диаметр проката 12,0 мм выбран, для примера, как наиболее «ходовой», модель материала пластическая, реология материала образца принята из ранее полученных в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» экспериментов;

- материал роликов — абсолютно жёсткое тело;
- коэффициент трения принимался равным 0,1 по Кулону-Амонтону.

На рис. 2 показана исходная компьютерная модель (цифровой двойник) объекта.

Интенсивность деформации проката  $\varepsilon_u$  оценивалась после узла заправки PW150 – точка контроля 1 (рис. 3), а также после роликов окалиноломателя RD140 – точка контроля 2 в центральных слоях сечения (положение относительно оси проката «0») и по-

верхностных слоях (положение относительно оси проката «r»).

Сводные результаты компьютерного эксперимента приведены в таблице.

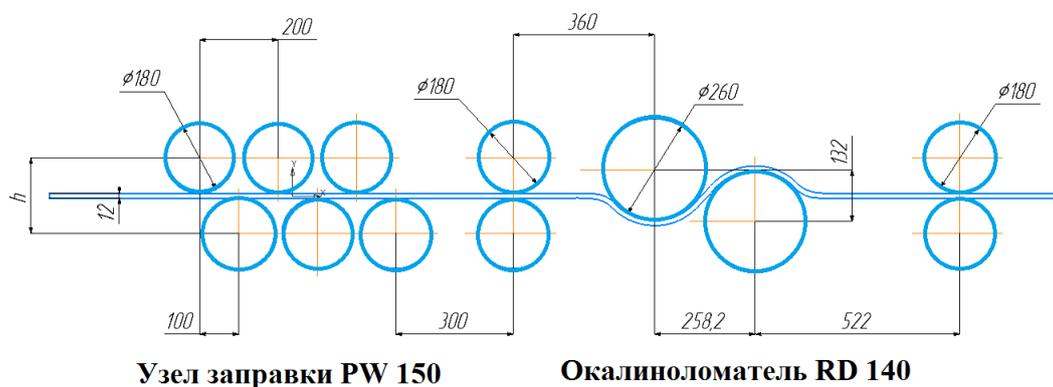


Рис. 1. Конфигурация роликов линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw (узел заправки и окалиноломатель)

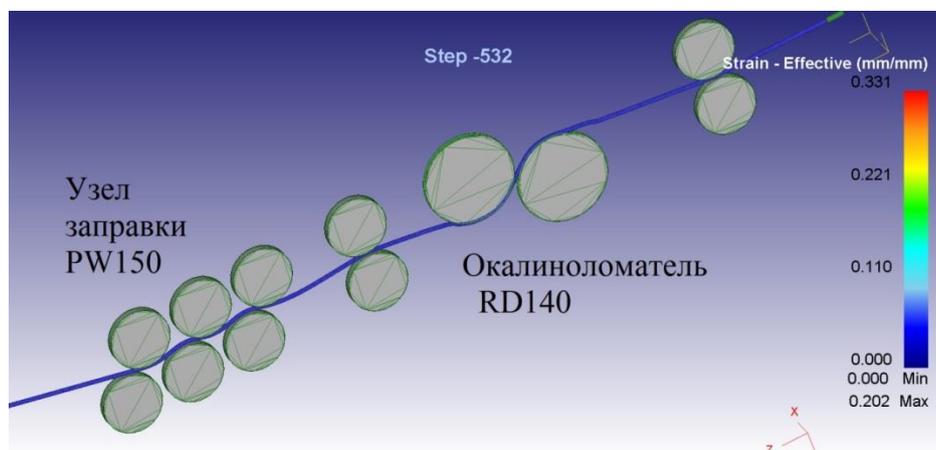


Рис. 2. Цифровой двойник обрабатываемого проката в программном пакете DEFORM 3D

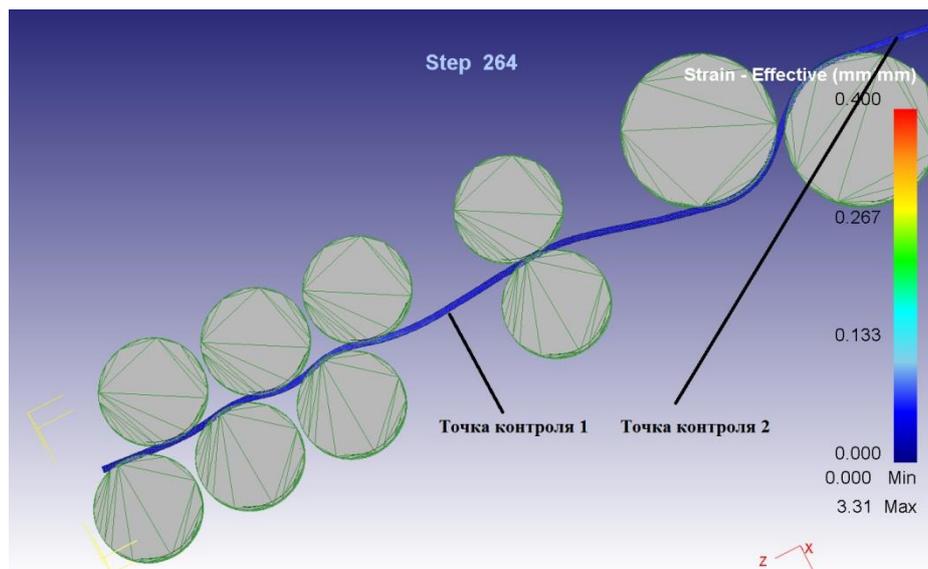


Рис. 3. Точки контроля показателя интенсивности деформации

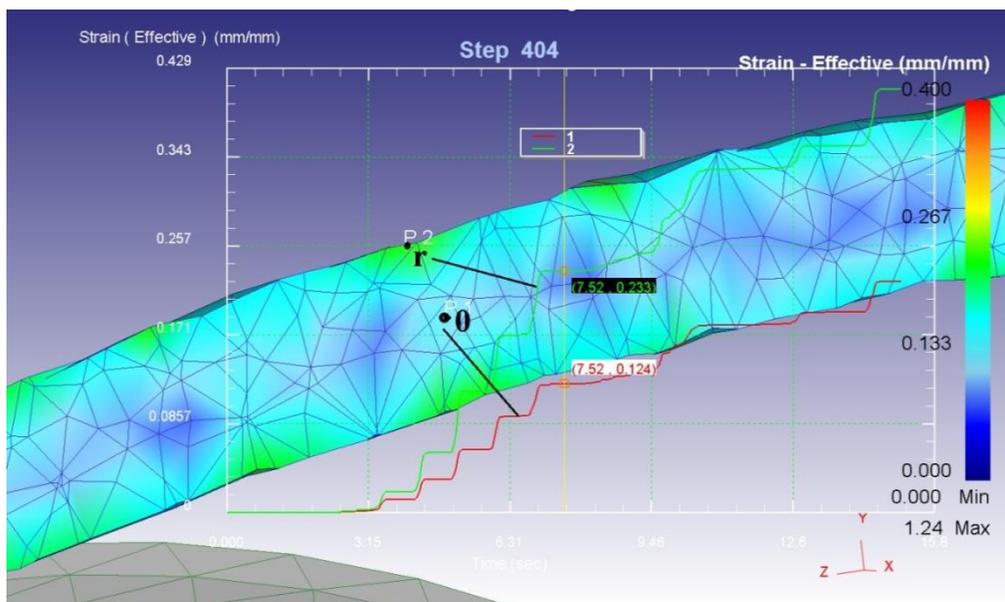


Рис. 4. Интенсивность деформации  $\epsilon_u$  на центральной оси сечения (положение «0») и в поверхностных слоях (положение «r») для межосевого расстояния между роликами  $h = 182$  мм в точке контроля 1 ( $\epsilon_u^r = 0,23$ ;  $\epsilon_u^0 = 0,12$ )

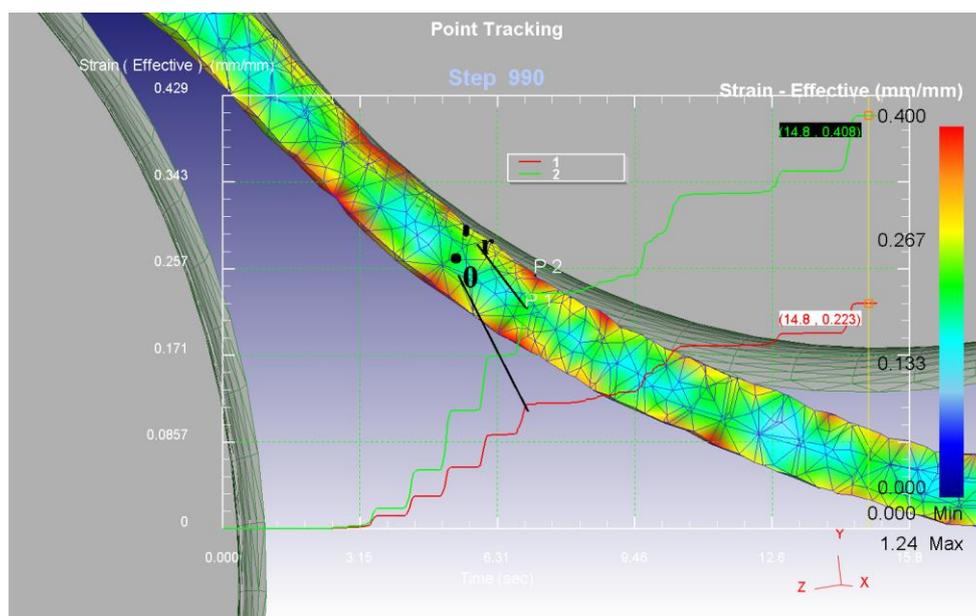


Рис 5. Интенсивность деформации  $\epsilon_u$  на центральной оси сечения (положение «0») и в поверхностных слоях (положение «r») для изменения межосевого расстояния между роликами  $h = 182$  мм в точке контроля 2 ( $\epsilon_u^r = 0,40$ ;  $\epsilon_u^0 = 0,23$ )

Результаты компьютерного моделирования технологии COLD STRETCHING при изготовлении арматурного проката на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw

Точки контроля	Межосевое расстояние между роликами, мм							
	$h=192$		$h = 187$		$h = 182$		$h = 178$	
	Положение относительно оси проката							
	0	r	0	r	0	r	0	r
Показатель интенсивности деформации $\epsilon_u$								
	$\epsilon_u^0$	$\epsilon_u^r$	$\epsilon_u^0$	$\epsilon_u^r$	$\epsilon_u^0$	$\epsilon_u^r$	$\epsilon_u^0$	$\epsilon_u^r$
1	0,002	0,01	0,10	0,18	0,12	0,23	0,14	0,30
2	0,09	0,26	0,21	0,34	0,23	0,40	0,21	0,46

### Заключение

В результате конечно-элементного моделирования технологии COLD STRETCHING при изготовлении арматурного проката на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw установлено:

1. На примере арматурного проката диаметром 12,0 мм показано, что технология COLD STRETCHING на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw концептуально может быть реализована при существующей схеме прохождения проката (узел заправки PW150 – окалиноломатель RD140 – вытяжное устройство).

2. Для получения требуемого комплекса механических свойств проката диаметром 12,0 мм при существующей на линии конфигурации расположения роликовых устройств после узла правки PW150 необходимо установить межосевое расстояние между роликами узла правки PW150 187 мм, поскольку этого достаточно, чтобы на оси проката обеспечивалась интенсивность деформации  $\varepsilon_u^0 = 0,07$ .

3. Дальнейшие работы должны быть направлены на определение требуемого межосевого расстояния узла правки PW150 для других диаметров арматурного проката с целью обеспечения интенсивности деформации  $\varepsilon_u^0 = 0,07$ .

### Сведения об авторах

**Столяров Алексей Юрьевич** – кандидат технических наук, главный специалист по технологии, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru.

**Зайцева Мария Владимировна** – кандидат технических наук, главный специалист по исследовательской работе, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaitseva.mv@mmk-metiz.ru.

**Столяров Федор Алексеевич** – студент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyrov.f.a@yandex.ru.

### Список литературы

1. Стратегия развития металлургического производства арматурного проката классов прочности 500 и 600 Н/мм<sup>2</sup> в соответствии с техническими требованиями ГОСТ 34028-2016 на основе использования качественных сталей и совершенствования технологии производства. Предложения АО «НИЦ «Строительство». Москва, 2017.
2. Патент 2608927 РФ. Арматурный прокат для изготовления металлических сеток и каркасов / В.А. Харитонов, А.И. Звездов, С.В. Снимщиков, И.Н. Суриков, И.П. Саврасов, А.В. Харитонов. Оpubл. 26.01.2017. Бюл. №3.
3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. М.: МГУ, 1965. 266 с.
4. Грачев С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. М.: Металлургия, 1976. 152 с.
5. Черняк Н.И., Гаврилов Д.А. Сопротивление деформированию металлов при повторном статическом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1971. 135 с.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### FINITE-ELEMENT MODELING OF THE COLD STRETCHING PROCESS TO ASSESS THE POSSIBILITY OF MANUFACTURING METIZ COLD-DEFORMED REINFORCING BARS OF CLASS 500 IN THE CONDITIONS OF JSC«MMK-METIZ»

**Stolyarov Aleksey Yu.** – candidate of engineering sciences, chief technologist at JSC«MMK-METIZ», Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

**Zaitseva Maria V.** – candidate of engineering sciences, chief research officer at JSC«MMK-METIZ», Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaitseva.mv@mmk-metiz.ru

**Stolyarov Fedor A.** – student of materials treatment technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyrov.f.a@yandex.ru.

**Annotation.** The modern process of production of non-tensioned reinforcing wire of class 500 based on the use of alternating tensile-compression deformation COLD STRETCHING or "SBR" is considered. The theoretical foundations of the change in the mechanical properties of metal when using mechanocyclic processing are described. A list of enterprises that manufacture universal lines for the production of valves is presented, with the help of which this technology can be implemented. To theoretically evaluate the implementation of this technology on the LM-TRA / 760-RO

line of GCR Eurodraw, finite element modeling was applied with the creation of a digital twin of the object and subsequent analysis of the degree (intensity) of deformation required to determine the optimal configuration of the bending rollers. The digital twin of the rolled steel being processed was built in the DEFORM 3D software package. The point after the filling unit and after the scalebreaker panel, i.e., in the places of the most deformation effect, were taken as control points. To build the model, a sample of reinforcing bars with a diameter of 12.0 mm from low-carbon steel was used. It is fundamentally determined that in order to obtain the required properties of the reinforcement, the value of the deformation intensity should be in the range of 0.07-0.10. Using the example of reinforcing bars with a diameter of 12.0 mm, it is shown that the existing composition of the equipment can provide the COLD STRETCHING process. Further, it is necessary for each standard size of reinforcing wire to carry out theoretical calculations that determine the specified level of deformation intensity, and, accordingly, the center distance for the rollers.

**Keywords:** reinforcement wire, COLD STRETCHING, strength class 500, strain rate, Finite-element modeling, digital twin, roller configuration, drawing drum, Coulomb-Amontons' law.

---

Ссылка на статью:

Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. Конечно-элементное моделирование процесса COLD STRETCHING для оценки возможности изготовления холоднодеформированной арматуры класса 500 в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ»// Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 21-26.

Stolyarov A.Yu., Zaitseva M.V., Stolyarov F.A. Finite-element modeling of the COLD STRETCHING process to assess the possibility of manufacturing metiz cold-deformed reinforcing bars of class 500 in the conditions of JSC«ММК-МЕТИЗ». *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 21-26.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.047:669.054.2

Анцупов В.П., Ячиков М.И., Ячиков И.М., Савинов А.С.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕПЛАВА ЭЛЕКТРОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ДИСКОВЫХ НОЖЕЙ, В УСТАНОВКЕ ЭШП

**Аннотация.** В прокатном производстве разновидностью легированного лома являются отходы, образующиеся из отработанных ножей для резки металла, причем значительную долю составляют вышедшие из строя дисковые ножи. Предлагается изготавливать переплавляемые электроды для ЭШП из отработанных ножей одного типоразмера. Для получения цилиндрического электрода для лучшего теплового и электрического контакта диски прижимают друг к другу под давлением не менее 1 МПа и приваривают их между собой с помощью дуговой аргоновой или плазменной сварки. Изготовленный подобным образом из отработанных дисковых ножей электрод обладает анизотропией свойств. Показан алгоритм определения эффективного коэффициента теплопроводности и удельного электрического сопротивления в осевом направлении электрода с учетом передачи тепла и электрического тока через зону контакта двух металлических дисков. Предложена методика расчета нестационарного распределения температуры по длине электрода до момента начала его плавления. Для стационарного режима переплава приведены зависимости для оценки массовой и линейной скоростей плавления электрода при заданной его геометрии и известных теплофизических свойствах. Показано, что для электродов с одинаковым внешним диаметром составной электрод, полученный из отработанных дисковых ножей, имеет более высокую массовую и линейную скорость плавления, чем литой электрод.

**Ключевые слова:** дисковые ножи по металлу, электрошлаковый переплав, легированная сталь, переплавляемый электрод, анизотропия свойств, линейная скорость плавления электрода.

### Введение

В прокатном производстве дисковые ножи применяют на дисковых ножницах при продольной резке и обрезке кромки листов и рулонной полосы металла на определенную ширину. Дисковым ножом называется нож круглой формы, выполненный из материала высокой прочности с отверстием в центре под крепление и имеющий по периметру режущую кромку. Отверстие в центре дискового ножа предназначено для посадки на ось вращения. Оно может быть выполнено как с пазами, так и с выступами, а ширина его кромки может варьироваться. Дисковые ножи крепятся также при помощи вспомогательных отверстий и могут состоять из нескольких секторов. Дисковые ножи могут изготавливаться из инструментальной, штамповочной, быстрорежущей и легированной сталей. Наибольшее распространение получили легированные инструментальные стали 9ХС, 9ХФ, ХВСГ, 6ХВ2С и др. [1].

На металлургических предприятиях существует проблема переработки и использования вторичного стального лома. В прокатном производстве разновидностью легированного лома являются отходы, образующиеся из отработанных ножей для резки металла, причем значительную долю составляют вышедшие из строя дисковые ножи.

Используемые в настоящее время дисковые ножи для резки металла имеют 40 типоразмеров с наружным диаметром  $D = 125\text{--}370$  мм, с посадочным отверстием  $d = 40\text{--}240$  мм и высотой  $B = 6\text{--}30$  мм по ТУ 14-1-1146-74 из легированных сталей твердостью

50–61 HRC (по Роквеллу) (рис. 1). Основные размеры стандартных дисковых ножей с внешним диаметром до 400 мм сведены в табл. 1.

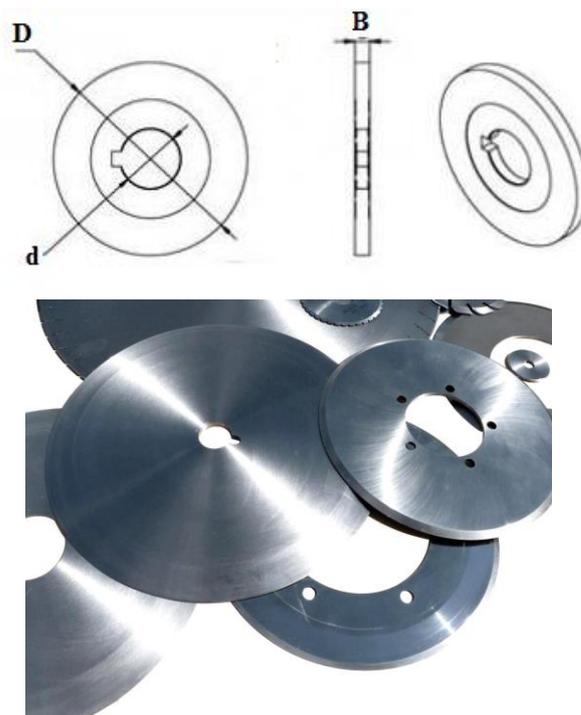


Рис. 1. Основные размеры дисковых ножей по металлу

Таблица 1

Типоразмеры стандартных дисковых ножей, мм

<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>
260	120	20	350	240	20
260	150	20	360	150	20
260	150	30	360	150	30
270	150	20	360	220	30
275	125	20	370	210	20
300	150	20	370	240	20
300	175	16	370	240	30
350	200	30			

В настоящее время производство и переработка отработанных ножей чаще всего протекает по следующей маршрутной карте [2]:

- плавка стали в электродуговых или индукционных печах;
- разливка в формы электродов ЭШП;
- переплав ЭШП;
- ковка заготовок дисковых ножей;
- предварительная термическая обработка (отжиг);
- механическая обработка;
- окончательная термическая обработка (закалка с высоким отпуском).

Из рассмотренной технологической схемы видно, что имеется двойной переплав получаемой заготовки. Возникает вопрос о возможности получения требуемой заготовки в установке ЭШП в одну стадию. Поставленная задача наталкивается, прежде всего, на проблему изготовления переплавного электрода.

В настоящее время наиболее распространенным способом получения расходуемых электродов ЭШП является процесс прессования металлической шихты, имеющий ряд недостатков. Неоднократно предпринимались попытки усовершенствования технологии прессования, конструкций прессовых установок и инструментальной наладки. Однако основными недостатками существующей схемы, связанной с прессованием, остаются наличие дорогого прессовального оборудования, недостаточная прочность получаемых электродов, возможность возникновения трещин [3].

В данной работе предлагается получение переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей. Они практически полностью сохраняют типоразмеры стандартных дисковых ножей с тем отличием, что за счет износа внешний диаметр ножей уменьшается на  $\Delta_{изн} = 3-5$  мм.

При наличии большого количества отработанных ножей предлагается переплавляемые электроды для ЭШП изготавливать из ножей одного типоразмера. Для получения цилиндрического электрода для лучшего теплового и электрического контакта диски прижимают друг к другу под давлением не менее 1 МПа и приваривают с помощью аргоновой или плазменной сварки. В зависимости от размера обрабо-

танных дисковых ножей делают 3–5 сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода (рис. 2, а) либо проводят точечную сварку в 3–5 точках по внешней окружности контакта дисковых ножей (рис. 2, б).

Сварку производят при обычном атмосферном давлении, при этом плотность энергии в дуге (тепловой поток) примерно такая же, как при обычной дуговой сварке. При этом сварочную ванну защищают от действия кислорода воздуха аргоном, используя вольфрамовый электрод, который практически не расходуется. Плазменную сварку выполняют с помощью плазмотрона, в котором дуга горит в атмосфере аргона повышенного давления. При этом в аргоновой струе достигают температуры до 12 тысяч градусов Цельсия в узком столбе плазмы. В отличие от свободной дуги плазменная струя имеет практически цилиндрическую форму, создает давление на металл в 5–8 раз больше, при этом тепловая энергия вся сосредоточена в тонкой струе плазмы и нагрев металла происходит только в области сварки.

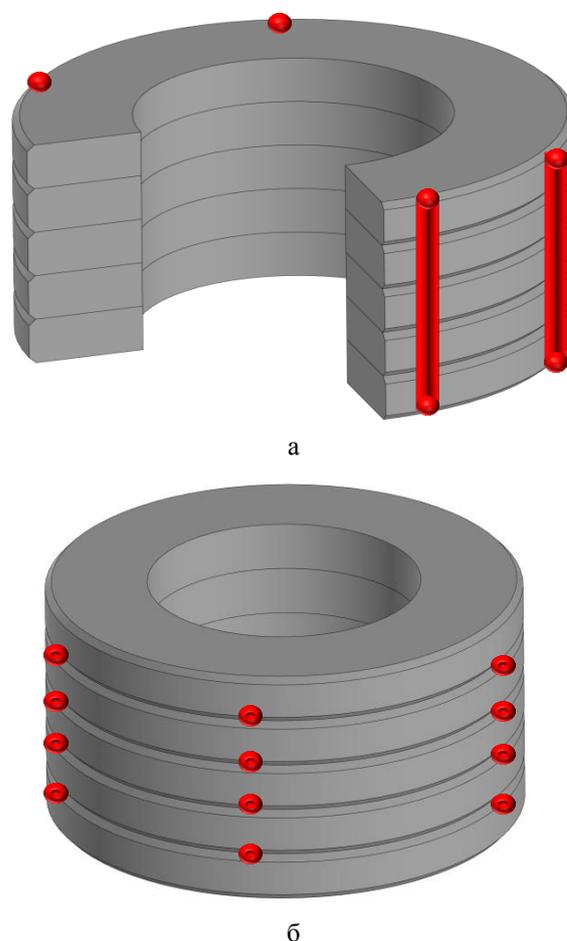


Рис. 2. Изготовление переплавляемого электрода: а – путем нанесения сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода; б – путем точечной сварки по внешней окружности контакта дисковых ножей

### Расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода, полученного из отработанных дисковых ножей

Рассмотрим расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей и его переплав в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором – дорном, предназначенным для формирования полости в выплавляемой заготовке.

Исходными данными являются размеры получаемой заготовки – ее внешний, внутренний диаметры и высота:  $D_3 = 350\text{--}500$  мм;  $d_3 = 150\text{--}240$  мм;  $H_3 = 720$  мм. Определим суммарную длину  $h$  переплавляемого электрода при переплаве отработанных ножей заданного диаметра  $D$ . По уравнению непрерывности

$$\gamma_{\text{тр}} \pi \left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right) \frac{h}{4} = \gamma_{\text{тр}} \pi \left( D_3^2 - d_3^2 \right) \frac{H_3}{4} \quad \text{получим}$$

$$h = H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}.$$

При ЭШП имеют место потери на угар металла электрода, составляющие примерно 1%, с учетом этого необходимая минимальная длина переплавляемого электрода

$$h_3 = 1,01h = 1,01 \cdot H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}. \quad (1)$$

Для примера возьмем следующие исходные данные: размеры получаемой заготовки  $D_3 = 384$  мм,  $d_3 = 220$  мм,  $H_3 = 720$  мм; размеры переплавляемых ножей  $D = 370$  мм,  $d = 240$  мм,  $\Delta_{\text{изн}} = 5$  мм. Поперечный размер переплавляемого электрода составляет 370 мм и равен внешнему диаметру ножей, определим минимальную длину  $h_3$  переплавляемого электрода. По уравнению непрерывности (1) получим  $h_3 \approx 953$  мм.

На ПАО «ММК» для изготовления ножей используют сталь 6ХВ2С. Ее теплофизические свойства при комнатной температуре: плотность  $\gamma_{\text{тр}} = 7800$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость  $c_{\text{т}} = 460$  Дж/(кг·К); изотропная теплопроводность  $\lambda_{\text{тр}} = 40$  Вт/(м·К).

Электрод, изготовленный из отработанных дисковых ножей, обладает анизотропией свойств. Определим эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  в осевом направлении с учетом передачи тепла через зону контакта двух металлических дисков. Тепловой поток  $q$ , передающийся вдоль оси цилиндра, встречает термическое сопротивление самого металла и термическое сопротивление  $R_k$ , возникающее при неплотном контакте двух металлических пластин.

Полное термическое сопротивление  $R = R_k + B/\lambda_{\text{тр}}$ , где  $B$  – толщина диска. Тепловой поток при перепаде температур  $\Delta t$

$$q = \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_{\text{эф}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \lambda_{\text{эф}} \frac{\Delta t}{B + \delta_1}.$$

Учитывая, что при плотном прижатии двух металлических дисков величина микрозора  $\delta_1 \ll B$ , получим выражение для эффективного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{B}{R} = \frac{B}{R_k + \frac{B}{\lambda_{\text{тр}}}}. \quad (2)$$

Для определения термического сопротивления контакта  $R_k$  используем выражение для параллельного действия трех термических сопротивлений:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_l}, \quad (3)$$

где  $R_m$  – термическое сопротивление фактического контакта (тепло передается теплопроводностью через металл);  $R_b$  – термическое сопротивление межконтактной среды (тепло передается теплопроводностью через микрозоры, в которых находится воздух);  $R_l$  – термическое сопротивление лучистого теплообмена.

Обычно излучение учитывают, если разница температур между контактирующими поверхностями  $\Delta t = t_1 - t_2 > 700^\circ\text{C}$  и используют материалы, имеющие низкую теплопроводность. В нашем случае, при контакте двух металлов этой величиной можно пренебречь ( $R_l = 0$ ), получим

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_b}. \quad (4)$$

При рассмотрении процесса передачи тепла через зону контакта двух твердых тел обычно принимаю ряд допущений [4]:

- пятна фактического контакта равномерно распределены по всей поверхности сопряжения;
- пятна контакта остаются неизменными при приложении нагрузки;
- выступы микронеровностей претерпевают чисто пластическую деформацию;
- тепловое сопротивление окисной пленки на поверхности металла пренебрежимо мало.

Для определения термического сопротивления фактического контакта с учетом этих допущений воспользуемся выражением, рекомендованным в работе [5]:

$$\frac{1}{R_m} = 2,12 \cdot 10^4 \lambda_{\text{тр}} \left( \frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}, \quad (5)$$

где  $p$  – давление в контакте, Н/м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости металла (модуль Юнга), его значение с увеличением температуры уменьшается (табл. 2).

Эмпирическая зависимость (5) выведена путем усреднения данных, полученных при обработке поперечных и продольных профилограмм с поверхностей

с чистой обработкой от 3-го до 10-го класса, для материалов с модулем упругости  $E > 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> и относительных нагрузках на контактные поверхности  $p/E = 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 2

Модуль Юнга в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	100	200	300	400	500	600
$E, \text{ГПа}$	215	212	210	205	200	190	180	170

Коэффициент  $B_n$  характеризует геометрические свойства контактирующих поверхностей и зависит от суммы средних высот выступов микронеровностей контактирующих поверхностей  $h_\Sigma = h_{cp1} + h_{cp2} = 2h_{cp}$ . Графическая зависимость  $B_n(h_\Sigma)$ , приведенная в работе [5], была аппроксимирована в виде следующего уравнения:

$$B_n = 27,106 - 0,5518h_\Sigma + 0,0052h_\Sigma^2, \quad (6)$$

где величина  $h_\Sigma$  задается в мкм.

Средняя высота неровностей  $h_{cp}$  зависит от класса чистоты обработки поверхности согласно ГОСТ 2789-59.

Термическое сопротивление межконтактной среды

$$\frac{1}{R_b} = \frac{\lambda_b}{h_\Sigma(1-m)}. \quad (7)$$

Теплопроводность воздуха между дисками  $\lambda_b$  берем при средней температуре контакта поверхностей. Величина  $m$  является коэффициентом заполнения профиля. Приведенная в работе [5] графическая зависимость  $1-m$  от суммарной величины средних высот микровыступов  $h_\Sigma$  была аппроксимирована следующим уравнением:

$$1-m = 0,4154 + 8,1 \cdot 10^{-3} h_\Sigma - 9 \cdot 10^{-5} h_\Sigma^2. \quad (8)$$

Зависимости теплопроводности воздуха от температуры, Вт/(м·град), с хорошей для практики точностью в диапазоне температур (0–1200°C) были аппроксимированы функцией [6]

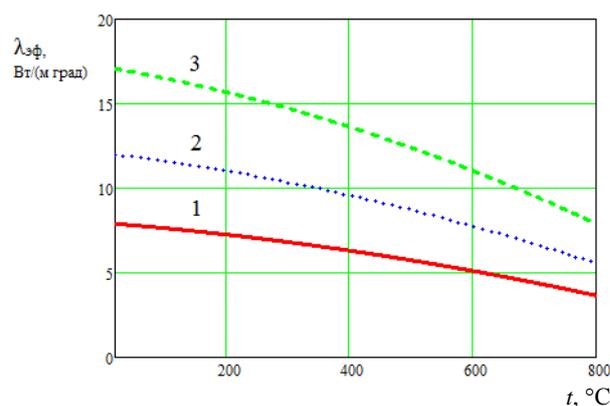
$$\lambda_b(t) = 2,54 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^{-5} t - 1,4 \cdot 10^{-8} t^2. \quad (9)$$

Изотропный коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·град), также является функцией температуры

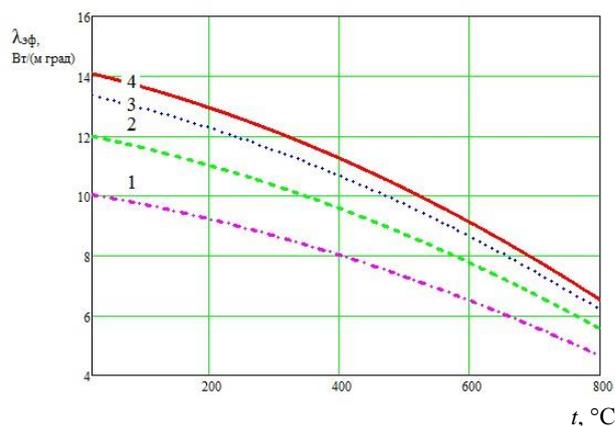
$$\lambda_n(t) = 40,1 - 0,0144 t - 1,583 \cdot 10^{-5} t^2. \quad (10)$$

На основе математической модели (2) – (10) проведено компьютерное моделирование изменения эффективного коэффициента теплопроводности от параметров, влияющих на контактное термическое сопротивление. На рис. 3, а показана зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от тем-

пературы при разных давлениях между дисками. Расчет проведен при толщине диска  $B = 20$  мм и 6-м классе чистоты поверхности ( $h_\Sigma = 20$  мкм). Видно, что эффективная теплопроводность падает с увеличением температуры и растет с увеличением контактного давления. При прочих равных условиях чем выше чистота обработки металла, тем выше эффективный коэффициент теплопроводности (рис. 3, б). Понятно, что это можно объяснить большей площадью микроконтактов при соприкосновении двух поверхностей.



а



б

Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры:  
а – при давлении между дисками:  
1 – 0,5 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 2 МПа;  
б – при разных классах чистоты обработки поверхности ( $p=1$  МПа): 1 – 5-й класс ( $h_\Sigma = 40$  мкм); 2 – 6-й класс ( $h_\Sigma = 20$  мкм); 3 – 7-й класс ( $h_\Sigma = 10$  мкм); 4 – 8-й класс ( $h_\Sigma = 5$  мкм)

Для дальнейших тепловых расчетов определим среднеинтегральные эффективные коэффициенты теплопроводности при  $p = 1$  МПа в диапазоне температур от 0 до 800°C как  $\bar{\lambda}_{эф} = \frac{1}{800} \int_0^{800} \lambda_{эф}(t) dt$ , в результате расчета получим:

при  $h_{\Sigma} = 40$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = 7,8$  Вт/(м·град);  
 при  $h_{\Sigma} = 20$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = 9,33$  Вт/(м·град);  
 при  $h_{\Sigma} = 10$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = 10,4$  Вт/(м·град);  
 при  $h_{\Sigma} = 5$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = 10,96$  Вт/(м·град).

Средняя теплопроводность в этом диапазоне температур литого металла  $\bar{\lambda}_{\text{л}} \approx 30,9$  Вт/(м·град).

При соприкосновении двух металлических дисков возникает дополнительное электрическое сопротивление  $R_{\text{к}}$ , называемое контактным сопротивлением. Оно состоит из двух частей и в первом приближении можно считать, что они не зависят друг от друга  $R_{\text{к}} = R_{\text{пл}} + R_{\text{п}}$ . Первая составляющая  $R_{\text{пл}}$  вызывается поверхностными пленками, образующимися на контактных поверхностях и препятствующих протеканию тока. Вторая составляющая  $R_{\text{п}}$  вызывается наличием неровностей на поверхности металла, в результате соединенные в стык проводники соприкасаются лишь в отдельных точках аналогично процессу передаче тепла через зону теплового контакта.

Если пренебречь  $R_{\text{пл}}$  и считать, что при прижатии двух дисков наблюдается только упругая деформация металла, то переходное сопротивление можно определить по формуле, предложенной в работе [7]:

$$R_{\text{п}} = \frac{0,12 \cdot \rho \cdot E \cdot h_{\text{сп}}}{Q(1-\mu)}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла;  $\mu=0,28-0,33$  – коэффициент Пуассона стали;  $E$  – модуль упругости;  $h_{\text{сп}}$  – средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей;  $Q = p \cdot f$  – усилие контактного нажатия при давлении сжатия  $p$ . Площадь контакта  $f = \pi((D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2)$ .

Полное электрическое сопротивление с учетом контактного сопротивления можно записать как  $R' = \frac{\rho}{f} \left( B + \frac{0,12 \cdot E h_{\text{сп}}}{p(1-\mu)} \right)$ . Эффективное удельное сопротивление

$$\rho_{\text{эф}} = \frac{R' f}{B} = \rho \left( 1 + \frac{0,12 \cdot E h_{\text{сп}}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (12)$$

Отсюда относительное увеличение удельного сопротивления

$$K_{\text{эф}} = \frac{\rho_{\text{эф}}}{\rho} = \left( 1 + \frac{0,12 \cdot E h_{\text{сп}}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (13)$$

При  $E = 10^5$  МПа,  $p = 1$  МПа,  $\mu = 0,3$ ,  $B = 20$  мм получим:

при  $h_{\text{сп}} = 20$  мкм  $K_{\text{эф}} = 18$ ;  
 при  $h_{\text{сп}} = 10$  мкм  $K_{\text{эф}} = 9,6$ ;  
 при  $h_{\text{сп}} = 5$  мкм  $K_{\text{эф}} = 5,3$ ;  
 при  $h_{\text{сп}} = 2,5$  мкм  $K_{\text{эф}} = 3,1$ .

Видно, что из-за наличия контактного сопротивления увеличивается эффективное удельное сопротивление, а значит, и объемное тепловыделение в переплавленном электроде при прохождении по нему тока  $I$ :

$$q_v = \rho \cdot J^2,$$

где  $J = I/f$  – средняя плотность тока через электрод.

При рассмотренных параметрах объемное тепловыделение в переплавленном электроде увеличивается в  $K_{\text{эф}}$  раз. Посмотрим, насколько это скажется на тепловом состоянии составного электрода.

Удельное сопротивление стали с возрастанием температуры растет линейно [8]

$$\rho_t = \rho(1 + \alpha_t(t - 20)), \quad (14)$$

где  $\rho = (0,1-0,13) \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\alpha_t = (1-4) \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup> – температурный коэффициент электрического сопротивления. При  $\rho = 0,11 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\alpha_t = 2 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup> при  $t = 500^\circ\text{C}$  имеем  $\rho_t \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

При максимальном токе печи ЭШП  $I = 20$  кА имеем плотность тока  $J = I/f \approx 8,4$  А/см<sup>2</sup>, где площадь контакта  $f \approx 0,238$  м<sup>2</sup>.

Найдем объемное тепловыделение в литом электроде  $q_v = \rho_t J^2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 8,4 \cdot 10^8 \approx 168$  Вт/м<sup>3</sup> = 0,000168 Вт/см<sup>3</sup> и электроде, полученном из отработанных ножей, при  $K_{\text{эф}} = 20$   $q_v = K_{\text{эф}} \rho_t J^2 \approx 3360$  Вт/м<sup>3</sup> = 0,00336 Вт/см<sup>3</sup>.

Полученные оценки говорят о том, что тепловыделением за счет джоулева тепла в электроде, полученном из отработанных ножей, можно пренебречь.

### Тепловое состояние переплавляемого электрода

Рассмотрим особенности теплового состояния переплавляемого электрода, изготовленного из отработанных дисковых ножей. Прежде всего, важным является установление особенностей нагрева и скорости плавления по сравнению с литым электродом. В работах [9, 10] представлены численные исследования теплового состояния и формы плавящегося электрода при ЭШП. Рассчитывается тепло, необходимое для плавления электрода с плоской формой торца. Показано, что для поддержания постоянной скорости плавления тепло, подводимое к электроду, должно постоянно изменяться. Представлены результаты для разных скоростей движения электрода, соответствующих разным скоростям плавления. Однако предлагаемая авторами модель теплового состояния сложна для практического применения в инженерных расчетах и не предполагает анизотропию теплофизических свойств переплавляемого электрода.

Рассмотрим задачу определения поля температур в переплавляемом электроде длиной  $H_3$ . Считаем, что в начальный момент времени его нижний торец касается расплавленного шлака с температурой  $t_{\text{шл}}$ , при этом температура всего остального электрода и окру-

жающей боковую поверхность среды равна  $T_0$ . Коэффициент теплоотдачи от шлака к электроду  $\alpha_{\text{шл}}$ . Электрод начинает прогреваться, при этом с его боковой стенки происходит теплоотдача в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

С учетом принятых допущений температурное поле по высоте электрода до момента плавления в выбранной системе координат можно описать уравнением (при  $\tau > 0, 0 < x < H_3$ )

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \frac{\alpha}{c_t \cdot \gamma_t \cdot h} (T - T_0), \quad (15)$$

где  $a = \lambda_t / (c_t \cdot \gamma_t)$  - коэффициент температуропроводности материала электрода;  $h$  - отношение площади сечения торца электрода к периметру, для цилиндрического электрода  $h = r_3 / 2 = D / 4$ .

Для решения краевой задачи задавались начальное условие  $T(x, 0) = T_0$  и граничные условия:

$$\text{при } x=H_3, \lambda_t \cdot \partial T / \partial x = \alpha_{\text{шл}} (t_{\text{шл}} - T(H_3, \tau)); \quad (16)$$

$$\text{при } x=0 \partial T / \partial x = 0.$$

Данная задача была решена с использованием аналитической зависимости, полученной Лыковым А.В. [11], и подробно описана в работе по переплаву электрода, изготовленного из брикетов прессованной стружки металла [12].

Как только температура нижнего торца электрода достигает температуры солидуса  $T_s$ , в тепловой задаче на нижнем торце электрода изменяется граничное условие (16). Торцы начинают плавиться и жидкий металл каплями проходит через слой шлака. Можно считать, что с этого момента на торце электрода будет действовать граничное условие первого рода, т.е. температура торца  $t_{\text{шл}}$  остается постоянной и равной температуре, при которой капли металла под действием сил тяжести и поверхностного натяжения отрываются от электрода. Можно предположить, что эта температура зависит от температуры ликвидуса и солидуса металла и в первом приближении ее можно принять как среднее их значение (при  $x=H_3$ )  $T(H_3, \tau) = t_{\text{шл}} = (T_s + T_l) / 2$ .

При стационарном тепловом режиме при граничном условии первого рода плотность теплового потока, падающего на торец электрода со стороны расплавленного шлака, можно определить как  $q_{\text{шл}\alpha} = \alpha_{\text{шл}} (t_{\text{шл}} - T_0)$ , а тепловой поток, отбираемый электродом [11],

$$q_{\text{шл}\infty} = \frac{\lambda_t \cdot (t_{\text{шл}} - T_0)}{h} \sqrt{\text{Bi}_1}, \quad (17)$$

$$\text{где } \text{Bi}_1 = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda_t}.$$

Зная тепловые потоки, из теплового баланса мож-

но оценить массовую скорость плавления электрода при заданной температуре шлака

$$v = \frac{dm}{d\tau} = (q_{\text{шл}\alpha} - q_{\text{шл}\infty}) \cdot \frac{F}{L}, \quad (18)$$

где  $L$  - теплота плавления материала электрода;  $F$  - площадь поверхности контакта электрода со шлаком. Известно, что оптимальной формой оплавливающейся части электрода является конус, причем в квазистационарном режиме переплава форма конуса не изменяется [13].

Для литого электрода при его переплаве  $h = r_3 / 2$ ,

$F = \pi \cdot r_3 \sqrt{r_3^2 + h_3^2}$ , где  $h_3 = r_3 \cdot \text{ctg} \varphi$  - высота конической части электрода;  $\varphi \approx 70^\circ$  - угол оплавливаемого конуса электрода.

Линейная скорость плавления электрода

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{4 \cdot v}{\rho \cdot \pi \cdot D^2}. \quad (19)$$

Для переплавляемого электрода, изготовленного из отработанных дисковых ножей и представляющего из себя полый цилиндр, имеем:  $h = (D - d) / 4$ ,

$$F \approx \pi \cdot d \sqrt{\frac{(D - d)^2}{4} + h_3^2}, \quad h_3 = \frac{(D - d) \cdot \text{ctg} \varphi}{2}.$$

Линейная скорость плавления составного электрода

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{4 \cdot v}{\rho \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}. \quad (20)$$

Проведено компьютерное моделирование теплового состояния переплавляемого электрода из литой инструментальной стали 6XB2C и сварного электрода из отработанных дисковых ножей ( $H_3 = 900$  мм,  $D = 370$  мм,  $d = 240$  мм). Были приняты следующие исходные данные:  $\alpha_{\text{шл}} = 3000$  Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $L = 2,72 \cdot 10^5$  Дж/кг;  $T_0 = 350^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{шл}} = 1550^\circ\text{C}$ ,  $T_l = 1500^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 1450^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 показаны результаты моделирования распределения температуры по длине электрода в разное время от начального момента погружения электрода в шлак. Видно, что за 15 мин от начала нагрева температурное поле проникает максимум на 30% длины электрода, при этом литой электрод прогревается лучше, чем сварной.

На рис. 5 показано как меняется температура от времени в разных точках, близких к нижнему торцу электрода. Видно, что поверхность электрода достигает температуры солидуса для литого электрода через 450 с, а для составного электрода - через 200 с. С этого момента времени в ЭСПП начинается процесс переплава.

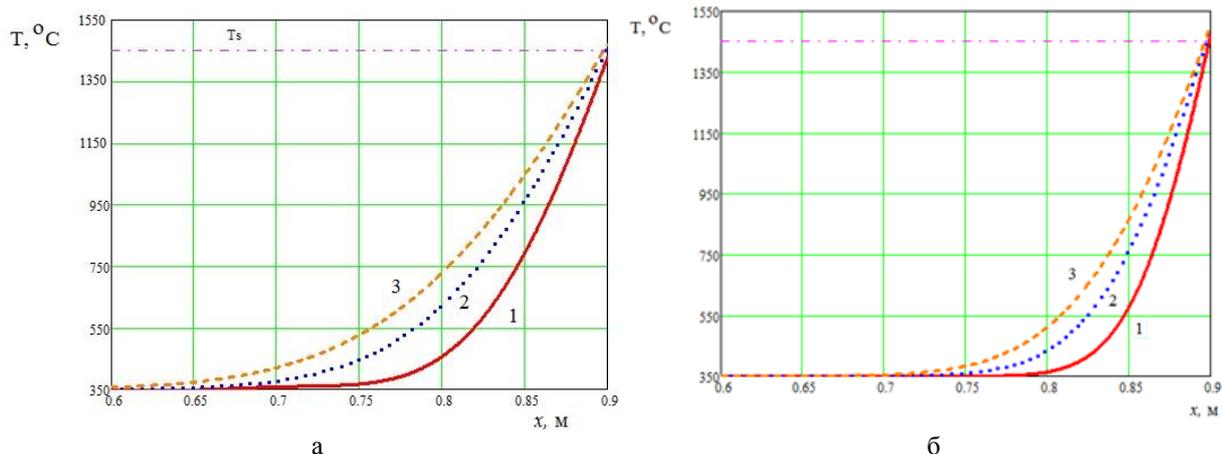


Рис. 4. Распределение температуры по длине для литого (а) и сварного (б) электродов для моментов времени: 1 - 5 мин; 2 - 10 мин; 3 - 15 мин

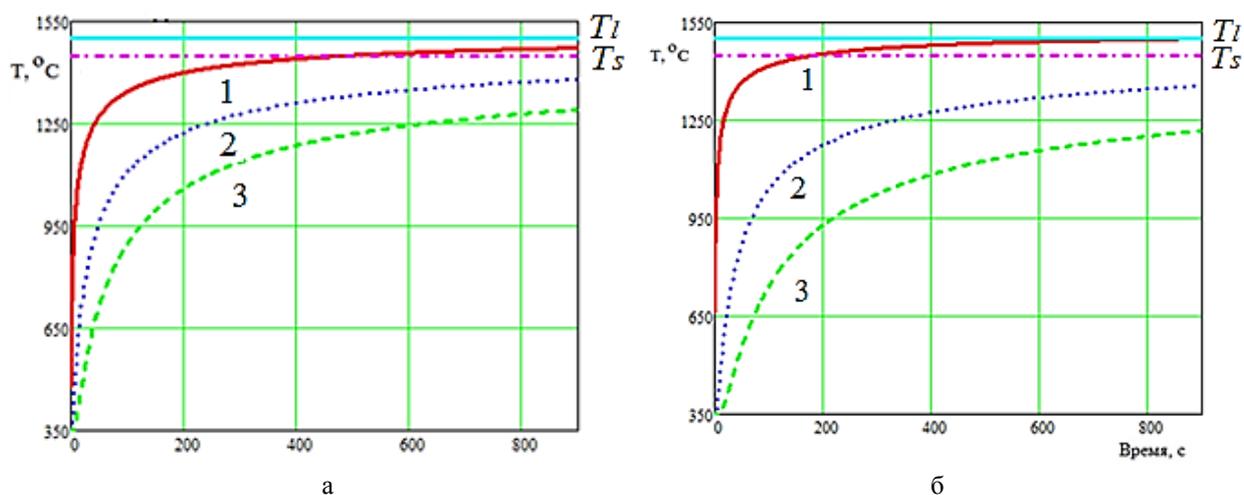


Рис. 5. Зависимость температуры на разных расстояниях  $x$  от нижнего торца для литого (а) и сварного (б) электродов от времени: 1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 10$  мм; 3 –  $x = 20$  мм

Тепловой поток, падающий на торец литого электрода, в начальный момент времени имеет величину  $q_{\text{пл}} = 635 \text{ кВт/м}^2$ , далее он снижается, к моменту начала плавления электрода ( $\tau \approx 7,5$  мин) он составляет  $q_{\text{пл}} = 307 \text{ кВт/м}^2$ . Для стационарного теплового режима скорость плавления литого электрода, определенная по формуле (18), составила  $v \approx 2 \text{ кг/мин}$ , линейная скорость –  $dx/d\tau \approx 2,43 \text{ мм/мин}$ ; для составного электрода соответственно  $v \approx 4,5 \text{ кг/мин}$  и  $dx/d\tau \approx 9,3 \text{ мм/мин}$ . Связано это с более низкой теплопроводностью составного электрода ( $\lambda_{\text{эф}} = 9,33 \text{ Вт/(м·град)}$ ) и меньшей площадью его поперечного сечения.

**Выводы**

1. Предложена схема переработки отработанных дисковых ножей путем получения электрода из ножей одного типоразмера для дальнейшей переработки в установке ЭШП.

2. Установлено существенное изменение теплопроводности и электропроводности в получаемых переплавленных электродах в осевом направлении по сравнению с литыми электродами. Для составного электрода средняя теплопроводность в осевом направлении в зависимости от свойств поверхности дисков снижается в 3–4 раза, а удельное электрическое сопротивление увеличивается примерно в 3 раза. При существующих плотностях тока через электроды тепловыделением джоулева тепла в электроде из отработанных ножей можно пренебречь.

3. Дана методика для расчета нестационарного распределения температуры по длине электрода до момента начала его плавления. Для стационарного режима перепада приведены формулы для оценки массовой и линейной скорости плавления электрода при заданной его геометрии и известных теплофизических свойствах. Показано, что для электродов с одинаковым внешним диаметром составной электрод, полученный из отработанных дисковых ножей, имеет более высокую массу и линейную скорость плавления.

## Список литературы

1. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М: Машиностроение, 1982. 320 с.
2. Переплавы ножевых марок сталей методом ЭШП / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков, А.Н. Юсин, А.Е. Позин, Е.А. Русин // Теория и технология металлургического производства. 2017. №1 (20). С. 23–26.
3. Логинов Ю.Н., Карсаков В.В., Хайкин Б.Е. Сокрытие образования трещин на поверхности расходуемых титановых электродов // Технология легких сплавов. 1984. № 6. С. 62–64.
4. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен. М.: Госэнергоиздат, 1963. 280 с.
5. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
7. Соединители и коммутационные устройства: учеб. пособие / И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин, Н.Ю. Иванова, Д.А. Шилкин. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.
8. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
9. Kharicha A., Ludwig A., Menghuai W.U. On Melting of Electrodes during Electro-Slag Remelting. ISIJ International, vol. 54 (2014), no. 7, pp. 1621–1628.
10. Zhengyi J., Shanjing Li, Jianmin Z., Xiaoping L. and Daoguo Y. Numerical Simulation Study of Consumable Electrode Melting Process in Electro-Slag Remelting Ingots. Advanced Materials Research. February 2011, vol. 189–193, pp. 3895–3898.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
12. Ячиков И.М., Ячиков М.И., Приданников С.С. Моделирование теплового состояния электрода из прессованной металлической стружки при ее переработке в установке ЭШП // Сб. докладов национальной научной школы-конференции. МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2019. С. 142–147.
13. Ключев М.М., Волков С.Е. Электрошлаковый перепад. М.: Металлургия, 1974. 496 с.

## Сведения об авторах

**Анцупов Виктор Петрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [antsupov.vp@gmail.com](mailto:antsupov.vp@gmail.com)

**Ячиков Игорь Михайлович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [jachikov@mail.ru](mailto:jachikov@mail.ru).

**Ячиков Матвей Игоревич** – аспирант кафедры литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [mat-yachikov@yandex.ru](mailto:mat-yachikov@yandex.ru).

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

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## SPECIFIC FEATURES OF PRODUCING AND REMELTING AN ELECTRODE MADE FROM USED DISC KNIVES IN ESR FURNACE

**Ancupov Viktor P.** – D.Sc. (Eng.), Professor, Full Professor of the Chair of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [antsupov.vp@gmail.com](mailto:antsupov.vp@gmail.com)

**Yachikov Igor M.** – D.Sc. (Eng.), Professor, Full Professor of the Chair of computer engineering and programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [jachikov@mail.ru](mailto:jachikov@mail.ru).

**Yachikov Matvey I.** – Postgraduate student of the Department of Foundry and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [mat-yachikov@yandex.ru](mailto:mat-yachikov@yandex.ru).

**Savinov Aleksandr S.** – D.Sc. (Eng.), Assistant Professor, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail [savinov\\_nis@mail.ru](mailto:savinov_nis@mail.ru)

**Abstract.** *In the rolling industry, a type of alloyed scrap is waste generated from used knives for cutting metal, with a significant proportion of failed circular knives. It is proposed to manufacture remelted electrodes for ESR from used knives of the same standard size. To obtain a cylindrical electrode for better thermal and electrical contact, the disks are pressed against each other under a pressure of at least 1 MPa and welded together using argon or plasma arc welding. An electrode made in a similar way from used circular knives has anisotropy of properties. An algorithm is shown for determining the effective coefficient of thermal conductivity and specific electrical resistance in the axial direction of the electrode, taking into account the transfer of heat and electric current through the contact zone of two metal discs. A method is proposed for calculating the non-stationary temperature distribution along the length of the electrode until the beginning of its melting. For the stationary mode of remelting, dependences are given for evaluating the mass and linear melting rates of the electrode for a given geometry and known thermophysical properties. It is shown that for electrodes with the same outer diameter, the composite electrode obtained from the spent disk knives has a higher mass and linear melting rate than a cast electrode.*

**Keywords:** *circular knives for metal, electroslag remelting, alloy steel, remeltable electrode, anisotropy of properties, linear electrode melting rate.*

---

Ссылка на статью:

Особенности получения и переплава электрода, изготовленного из отработанных дисковых ножей, в установке ЭШП / Анцупов В.П., Ячиков М.И., Ячиков И.М., Савинов А.С. // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 27-35.

Анцупов В.П., Yachikov I.M., Yachikov M.I., Savinov A.S. Specific features of producing and remelting an electrode made from used disc knives in ESR furnace. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 27-35.

УДК 621.743(744)

Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Марков А.И.

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛИТЕЙНОГО СТЕРЖНЯ ИЗ СМЕСЕЙ СО СВЯЗУЮЩИМ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ**

**Аннотация.** Одной из важнейших задач производства литых заготовок является изготовление стержней, формирующих их внешнюю и внутреннюю геометрию. В последнее время в связи с постоянно повышающимися технологическими требованиями вырос спрос на альтернативные методы изготовления литейных стержней, к которым относятся стержни из смесей на основе неорганических солей (солевые смеси). Литейные стержни из солевых смесей обладают такими характеристиками, как легкая выбиваемость после затвердевания отливки, возможность многократной регенерации, низкая себестоимость. Однако им присущи и недостатки, такие как недостаточная прочность, высокая осыпаемость и ограниченное время хранения. В данной статье в центре внимания авторов находится проблема формирования прочности литейного стержня из солевой смеси как важнейшая для обеспечения гарантированно высокого уровня эксплуатационных свойств стержня, правильного выбора материала, метода внешнего воздействия на смесь еще на стадии технологической подготовки производства, управления технологическим процессом и, как следствие, стабилизации высокого качества литья. В статье рассмотрены механизмы упрочнения литейного стержня из солевой смеси, а также основные виды внешних воздействий на формирование прочности стержня. Как показывает опыт, на практике сделать выбор в пользу какого-либо определенного механизма формирования прочности литейного стержня из солевой смеси и метода внешнего воздействия на него для обеспечения требуемого уровня эксплуатационных свойств стержня не очень просто, поскольку они еще недостаточно изучены. Однако для снижения некоторых описанных недостатков и рисков производства литейных стержней из солевых смесей, по мнению авторов данной статьи, необходимо обращать более пристальное внимание на стержневые смеси, имеющие в составе несколько неорганических солей, поддающиеся в рамках технологического процесса воздействию не одного, а комбинации внешних факторов.

**Ключевые слова:** литейный стержень, неорганическая соль, связующее, эксплуатационные свойства, прочность, механизм формирования.

**Введение**

В литейном производстве для оформления внутренней и внешней геометрии отливок применяют разнообразные стержни, которые различаются друг от друга размерами, массой, методами получения и другими особенностями. В качестве материалов для их изготовления используют стержневые смеси, в состав которых традиционно входят наполнитель, связующее и технологические добавки. С начала 2000-х годов высокого технологического уровня за рубежом достигло производство отливок с применением стержней из смесей, имеющих в своем составе неорганические соли (солевые смеси), получаемых с использованием внешнего воздействия на смесь для придания стержням необходимых геометрии и требуемых эксплуатационных характеристик [1-3]. В последнее десятилетие этим технологиям активно начали уделять внимание и отечественные ученые и производственники [4]. Среди наиболее часто применяемых неорганических солей в составе материалов таких стержней традиционно используют хлорид натрия, сульфат магния, композиции силикатов, боратов и фосфатов. При этом технологии производства таких стержней предусматривают различные методы воздействия на материал формируемого стержня (тепловая сушка, продувка CO<sub>2</sub>, вакуумирование, СВЧ-нагрев), а в некоторых случаях их комбинации.

Повышенный интерес к таким литейным стержням обусловлен прежде всего тем, что они имеют ряд

преимуществ, к которым относят возможность многократной регенерации, низкую себестоимость, отсутствие вредных выбросов.

Тем не менее литейные стержни, полученные из солевых смесей, не свободны от недостатков. Среди них выделяются высокая осыпаемость, ограниченное время хранения стержней.

В этой связи особое значение приобретает понимание механизмов формирования комплекса эксплуатационных свойств и характеристик (и в первую очередь прочностных) литейного стержня, которое позволило бы еще на стадии технологической подготовки производства сделать правильный выбор, принять меры для обеспечения их требуемого уровня, управления технологическим процессом и, как следствие, стабилизации высокого качества литья. Именно это и находилось в центре внимания авторов данной статьи.

Проведенный авторами информационно-аналитический обзор ряда источников [5, 6] позволил условно классифицировать известные версии механизмов упрочнения литейного стержня, разделив их по признакам природы формирования камня (физическая, химическая, смешанная) и внешнего воздействия на материал (однофакторное, многофакторное).

**Механизмы упрочнения литейного стержня из солевой смеси**

В работах [6, 7] исследователи уделяют повышенное внимание физической стороне упрочнения, рассматривая материал стержня – стержневую смесь – как коллоидную систему, состоящую из зерен напол-

нителя и связующего. В основе такого подхода лежат три многократно подтвержденных практикой тезиса:

- прочность зависит от числа контактов между зернами в единице объема  $N_V$  и от прочности контактов;
- прочность контактов зависит от размера и конфигурации связующего «мостика» с учетом характера разрушения и внутренних напряжений;
- на прочность оказывает влияние концентрация контактов, отнесенная к единице площади разрушения  $N_S$ .

Формально прочность смеси должна быть пропорциональна  $N_S$  при растяжении и  $N_V$  – при изгибе и сжатии и более сложных видах нагружения.

Некоторые авторы основываются на упрощенной модели процесса, в которой материал стержня рассматривают как систему сферических частиц одинакового диаметра, связанных «мостиками» связующего (рис. 1). При этом протяженность «мостиков» может быть намного больше их толщины, а сами «мостики» при этом могут иметь сложную разветвленную структуру [7].

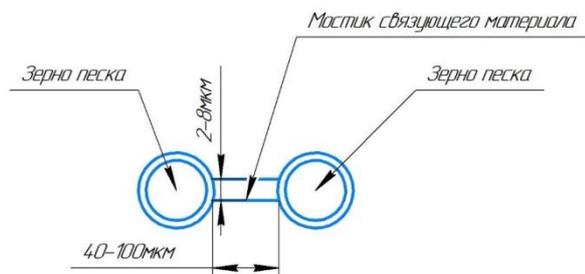


Рис. 1. Физическая модель связывания частиц в стержневой смеси

Прочностные характеристики литейного стержня зависят от когезии и адгезии. Когезией называется сила сцепления наименьших частиц, молекул, атомов веществ, под воздействием сил притяжения. Адгезия – это сцепление разнородных твердых или жидких тел в результате соприкосновения их поверхностей.

В стержневых смесях адгезия между наполнителем и связующим зависит от многих причин. Основными из них являются молекулярные силы, действующие между твердым телом и связующим (силы Ван-дер-Ваальса); адсорбция связующего на поверхности твердого тела; электрическое взаимодействие компонентов смеси.

Адгезионно-когезионное взаимодействие обуславливается тем, что в стержневых смесях на основе неорганических солей, основу которых, как правило, составляет кварцевый песок, происходят действия неуравновешенных электрических сил. Воздействие этих сил создает способность удерживать большое количество молекул воды, проникающих в пространство между зернами; связь между зернами остается достаточно прочной, если в пространство между ними попадает не более трех слоев молекул воды. Зерна смеси подвергаются воздействию межмолекулярных

сил, к которым относят силы Ван-дер-Ваальса (рис. 2), которые складываются из сил притяжения (ориентационных, индукционных и дисперсионных) и обеспечивают до 75–80% от общей прочности. Таким образом, два типа сил, молекулярные и электрические, воздействующие на смесь, обеспечивают связь между связующим и поверхностью зерен песка.

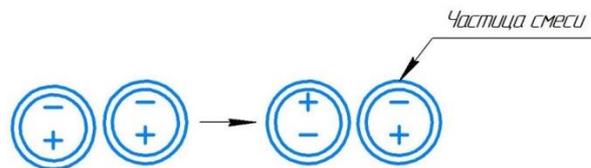


Рис. 2. Физическая модель связывания частиц в стержневой смеси под действием сил Ван-дер-Ваальса

В работах [8, 9] акцент делается на химическом аспекте упрочнения литейного стержня. Авторами этих публикаций формулируются такие механизмы формирования прочности литейного стержня, как отверждение в результате окислительно-восстановительных реакций с образованием кислых соединений и гидратация.

В результате окислительно-восстановительных реакций при взаимодействии оксидов металлов и фосфорной кислоты образуются кристаллогидраты – однозамещенные соли ортофосфорной кислоты, обладающие связующими свойствами. Данный тип отверждения получил свое распространение при использовании металлофосфатных связующих.

Упрочнение стержней гидратацией основано на взаимодействии воды и минералов с образованием кристаллогидратов (рис. 3), которые, срастаясь, создают связи (каркас) между песчинками формовочной смеси.

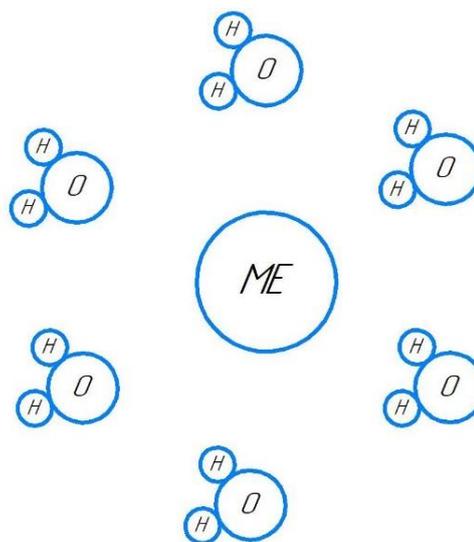


Рис. 3. Физическая модель связывания частиц в результате образования кристаллогидрата

### Виды внешних воздействий на формирование прочности стержня

На формирование прочности литейного стержня, полученного из солевых смесей, могут оказывать влияние такие внешние воздействия, как, например, механические уплотнение и вибрация, тепловая обработка, вакуумирование, продувка газом, наложение электрических и магнитных полей и др. [10, 11].

В процессе тепловой обработки кристаллогидраты достаточно быстро теряют кристаллизационную воду, соответственно, быстро минуют фазу плавления, за период которой не успевают сплавиться между собой и образовать устойчивые контакты с зернами наполнителя. Кристаллогидрат в процессе сушки приобретает прочность за счет испарения воды и плавления с последующей кристаллизацией, тем самым образуя моногидрат, который придает прочность смеси.

Механическое уплотнение, вибрация и вакуумирование создают изменение давления газа в песчаной среде стержня, которое создает изменяемое поле давления на поверхности песчинок, вызывающее ответные силы сжатия – расширения со стороны упругого материала зерен наполнителя. Колебание давления отражается на поверхностных явлениях в песчаной среде. Изменение коэффициента внутреннего трения крупных песчинок вызывает движение мелких частиц, что, в свою очередь, предполагает увеличение адсорбции компонентов смеси, которое влечет увеличение прочности стержня (рис. 4).

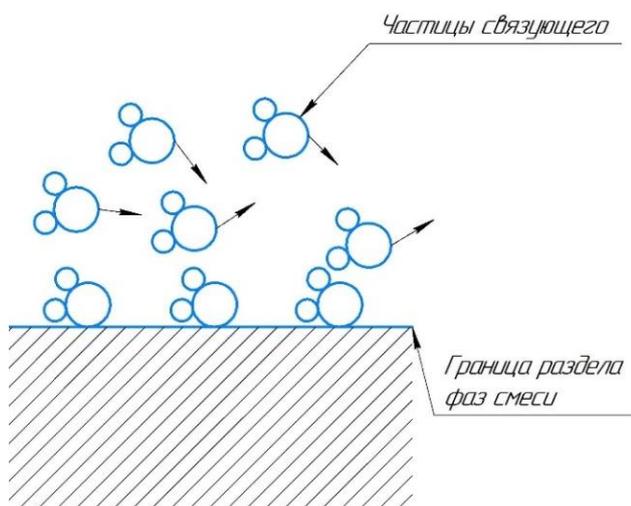


Рис. 4. Физическая модель связывания частиц в результате адсорбции

### Заключение

Как показывает опыт, на практике сделать выбор в пользу какого-либо определенного механизма формирования прочности литейного стержня из солевой смеси и метода внешнего воздействия на него для

обеспечения требуемого уровня эксплуатационных свойств стержня не очень просто, поскольку они еще недостаточно изучены.

Однако для снижения некоторых описанных недостатков и рисков производства литейных стержней из солевых смесей, по мнению авторов данной статьи, необходимо обращать более пристальное внимание на стержневые смеси, имеющие в составе несколько неорганических солей, поддающиеся в рамках технологического процесса воздействию не одного, а комбинации внешних факторов.

В настоящее время рабочей группой кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева проводится комплекс работ по созданию и внедрению в условиях действующего производства инновационного способа изготовления разовых литейных стержней требуемого уровня прочности из солевых смесей наложением на них комбинированного внешнего воздействия.

### Список литературы

1. DE 102006031191 A1, IPC: B22C 1/18. Anm.: Dracowo Forschungs- und Entwicklungs GmbH, 06766 Wolfen, DE. Anorganische Kernsanbinder und Schichten für den Aluminiumguss und ihre weitere Verwendung als Düngemittel. Pub.: 10.01.2008.
2. DE 19632293 A1, IPC: B22C 9/12. Anm.: T. Steinhäuser, 47574 Goch, DE. Verfahren zur Herstellung von Kernformlingen für die Gießereitechnik. Pub.: 19.02.1998.
3. WO2010007180. Anm.: Ceramtec AG, 73207 Plochingen, DE. Kerne auf der Basis von Salz und Verfahren zu ihrer Herstellung. Pub.: 21.01.2010.
4. Исследование свойств смесей со связующими на основе сульфата магния / А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев, А.А. Тарасова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. №2. С. 232-237.
5. Свойства смесей с соевыми связующими / А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев, А.А. Тарасова, Ё. Масаси // Литейное производство. 2011. №5. С. 11–13.
6. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
7. Изучение механизма образования прочности в самотвердеющих смесях с фенольным связующим (обзор) / Т.Д. Клюквина, К.А. Власова, А.А. Леонов, С.А. Яшина // Труды ВИАМ. 2018. №3. С. 18-27.
8. Шаповалова Е.В. Основы химии неорганических вяжущих материалов. Омск: СибАДИ, 2008. 76 с.
9. Экологически чистая технология изготовления холоднотвердеющих фосфатных смесей / Е.Н. Евстифеев, В.Н. Смирнов, В.С. Бессарабов, Л.А.

- Котова, А.В. Журавлев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. №6. С. 41-43.
10. Илларионов И.Е. Применение технологии получения металлофосфатных связующих стержневых и формовочных смесей на их основе // Черные металлы. 2018. №4. С. 13-19.
11. Дорошенко В.С. Газодинамическое уплотнение сухих формовочных наполнителей // Литье и металлургия. 2013. №2. С. 15-21.

#### Сведения об авторах

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

**Грачев Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия. E-mail: alexgra76@mail.ru.

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

**Марков Алексей Игоревич** – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия. E-mail: skixmai@yandex.ru.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### FORMATION OF A FOUNDRY CORE FROM MIXTURES WITH A BINDER BASED ON INORGANIC SALTS

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

**Grachev A.N.** – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: alexgra76@mail.ru.

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

**Markov A.I.**, postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: skixmai@yandex.ru.

**Annotation.** One of the most important tasks in the production of cast blanks is the manufacture of rods that form their external and internal geometry. Recently, due to the constantly increasing technological requirements, there has been a growing demand for alternative methods of manufacturing casting cores, which include cores from mixtures based on inorganic salts (salt mixtures). Casting rods made of salt mixtures have such characteristics as easy knockout after solidification of the casting, the possibility of multiple regeneration, and low cost. However, they also have disadvantages, such as insufficient strength, high crumbling and limited storage time. In this article, the authors focus on the problem of forming the strength of a casting core from a salt mixture as the most important one to ensure a guaranteed high level of operational properties of the core, the correct choice of material, the method of external influence on the mixture even at the stage of technological preparation of production, process control and, as a consequence, stabilizing high quality casting. The formation of the strength properties of casting cores is directly related to the processes occurring during the interaction of the filler with binders. The article discusses the mechanisms of hardening a casting core from a salt mixture, as well as the main types of external influences on the formation of the strength of the core. Experience shows that in practice it is not very easy to make a choice in favor of any specific mechanism for forming the strength of a casting core from a salt mixture and the method of external action on it to ensure the required level of operational properties of the core, since they

have not yet been sufficiently studied. However, in order to reduce some of the described disadvantages and risks of the production of casting cores from salt mixtures, according to the authors of this article, it is necessary to pay more attention to core mixtures containing several inorganic salts, which are amenable to not one but a combination of external factors within the technological process.

**Keywords:** casting core, inorganic salt, binder, performance properties, strength, formation mechanism.

---

Ссылка на статью:

Формирование прочности литейного стержня из смесей со связующим на основе неорганических солей / Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Марков А.И.// Теория и технология металлургического производства. 2021. №1(36). С. 36-40.  
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Markov A.I. Formation of a foundry core from mixtures with a binder based on inorganic salts. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 36-40.

## 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.

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

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

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

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

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

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

## Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

## Пример оформления литературы

## Список литературы

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

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

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

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

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