

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 4 (39) 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. Емелишин* – д-р техн. наук, проф.  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

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

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

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

*З. Конопка* – д-р техн. наук, проф.  
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

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

*Р.П. Кардосо* – д-р техн. наук, проф.

Федеральный университет Санта-Катарины,  
Бразилия

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

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

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

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

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

### Главный редактор:

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

### Научный редактор:

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

### Технический редактор:

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

*К.И. Рудь*

### Дизайнер:

*Е.О. Харченко*

## © ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 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 24.12.2021. Заказ 299. Тираж 500 экз.

Цена свободная.

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

---

**No. 4 (39) 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*E.V. Ageev* – D.Sc., Professor, Southwest State University

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

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

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

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

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

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

### **Scientific Editor:**

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

### **Technical Editor:**

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

*K.I. Rud*

### **Designer:**

*E.O. Harchenko*

## **© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 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: TTPeOMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

### **Printing office:**

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

### **Editorial office:**

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

Publication date 24.12.2021. Order 299. Circulation: 500.  
Open price.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>4</b>
Бигеев В.А., Потапова М.В., Макарова И.В., Юдин Д.В.	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ ЧЕРНОВОГО ФЕРРОНИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВЫХ РУД .....</b>	<b>4</b>
Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С.	
<b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ .....</b>	<b>9</b>
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>13</b>
Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Явтушенко П.М.	
<b>МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПОВЕДЕНИИ ЖИДКОПОДВИЖНОЙ САМОТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОСТЕННОГО СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ.....</b>	<b>13</b>
Ширяева Е.Н., Полякова М.А.	
<b>ОСОБЕННОСТИ ТРЕБОВАНИЙ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К СВОЙСТВАМ ГОРЯЧЕКАТАНОГО СТАЛЬНОГО ПРОКАТА ....</b>	<b>19</b>
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>26</b>
Булитко Е.В., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Чернов В.П., Зарицкий Б.Б.	
<b>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ НА ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ «ОТЛИВКА-ФОРМА».....</b>	<b>26</b>

## CONTENTS

<b>METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS .....</b>	<b>4</b>
Bigeev V.A., Potapova M.V., Makarova I.V., Yudin D.V.	
<b>EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE REFINING PROCESS PARAMETERS FOR ROUGH FERRONICKEL OBTAINED BY SELECTIVE REDUCTION OF POOR IRONCHROMONICKEL ORE .....</b>	<b>4</b>
Aikashv A.V., Panishev N.V., Makhotkina E.S.	
<b>EFFICIENCY OF PROCESSING METALLURGICAL SLAGS.....</b>	<b>9</b>
<b>FOUNDRY .....</b>	<b>13</b>
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Yavtushenko P.M.	
<b>MODEL CONCEPT OF THE BEHAVIOR OF A LIQUID-MOVING SELF-CURING MIXTURE IN THE PRODUCTION OF THIN-WALLED STEEL CASTING.....</b>	<b>17</b>
Shiriaeva E.N., Polyakova M.A.	
<b>FEATURES OF THE REQUIREMENTS INTERNAL AND EXTERNAL CONSUMERS TO PROPERTIES HOT ROLLED STEEL PRODUCTS .....</b>	<b>19</b>
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....</b>	<b>26</b>
Bulitko E.V., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Chernov V.P., Zaritsky B.B.	
<b>EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE EXOTHERMAL INSERT ON THE HEAT FIELD OF THE "CAST-FORM" SYSTEM .....</b>	<b>26</b>

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.243.881

Бигеев В.А., Потапова М.В., Макарова И.В., Юдин Д.В.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ ЧЕРНОВОГО ФЕРРОНИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВЫХ РУД

**Аннотация.** Для развития никелевого производства в России предлагается вовлечь в переработку комплексные природно-легированные железохромоникелевые руды Халиловского месторождения, которые в настоящее время не используются ввиду их бедности как по железу, так и по никелю. Полученный селективным карботермическим восстановлением в лабораторных условиях черновой ферроникель нуждается в дефосфорации (содержание фосфора в металле может достигать 0,7 %). В работе экспериментально были получены зависимости коэффициента распределения фосфора от основности шлака и температуры металла. Также были определены интервалы плавления известково-железистых шлаков. На основании полученных результатов были сформулированы критерии выбора шлакового режима при дефосфорации чернового ферроникеля: необходимо иметь шлак, содержащий не менее 40% CaO и 20% FeO с основностью 3,0–3,5; температуру шлаковой ванны следует поддерживать на уровне 1550–1600 °С, образующиеся шлаки при данной температуре обладают невысокой вязкостью; важно обеспечить более полное перемешивание металла и шлака, что позволит увеличить дефосфорирующую способность последнего (продувкой инертным газом или водяным паром).

**Ключевые слова:** железохромоникелевая руда, селективное восстановление, черновой ферроникель, дефосфорация, известково-железистый шлак.

### Введение

Известно, что ферроникель является одним из наиболее дорогостоящих ферросплавов в черной металлургии. В переработку традиционно поступают руды с содержанием никеля не менее 0,8–1,2% [1–4].

Содержание никеля в рудах Халиловского месторождения в 2–4 раза ниже традиционного. Руда имеет следующий химический состав: Fe = 30–40%, Ni = 0,4–0,5%, Cr = 1–2%, S = 0,10–0,15%, P = 0,15–0,25%. По технологии селективного бескоксового восстановления, разработанной на кафедре металлургии и химических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, возможно получение чернового ферроникеля с таким же содержанием Ni, как в черновом ферроникеле, полученном из богатых руд (Ni~10–20%). Но этот черновой ферроникель отличается очень высоким содержанием фосфора [5, 6].

Дефосфорация чернового ферроникеля представляет наиболее ответственный этап разрабатываемой технологии, так как необходимо снизить содержание фосфора как минимум в 30–50 раз. Дефосфорация расплава с помощью известково-железистого шлака является самой дешевой и экологически менее безопасной. Технология имеет две существенные особенности по сравнению с дефосфорацией чугуна.

Во-первых, в черновом ферроникеле единственной примесью, участвующей в формировании шлака является фосфор. Поэтому основная доля массы шлака должна быть обеспечена шлакообразующей сме-

сью. Все необходимое количество шлака наводится с использованием извести, твердого окислителя и окислением железа.

Во-вторых, в чугуне содержание углерода обычно составляет 4–4,5%, при окислении которого образуются газы CO и CO<sub>2</sub> в количестве, вполне достаточном для перемешивания ванны, а также выделяется тепло, необходимое для нагрева ванны. В черновом ферроникеле содержание углерода составляет менее 0,05%, его окисление не обеспечит ни требуемого перемешивания, ни нагрева ванны. Поэтому перемешивание ванны необходимо обеспечить продувкой ее нейтральным газом, а нагрев должен быть обеспечен окислением металлической части железа. Следовательно, дутье, используемое при дефосфорации, должно состоять из инертного газа и кислорода.

В данной работе рассматривается вопрос экспериментального определения основных параметров процесса рафинирования чернового ферроникеля и разработки (формулировки) критериев выбора шлакового режима.

### Методы и результаты

Целью данной серии экспериментов являлось определение коэффициента распределения фосфора между металлом и шлаком и влияние на него различных параметров, а также определение интервалов температур плавления известково-железистых шлаков.

В качестве шихтовых материалов в опытных плавках использовались:

- ферроникель предыдущих плавков;
- известь;

- шамотный бой;
- металлизированные окатыши.

Ферроникель предыдущих плавков (620 грамм) загрузили в тигель и расплавили. Химические составы полученного металла и неметаллических материалов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав полученного ферроникеля, %

Ni	C	Si	S	P
15,56	0,07	0,10	0,09	0,42

Таблица 2

Химический состав неметаллических материалов, %

	Известь	Окатыши металлизированные	Шамотный бой
CaO	85,0	3,5	1,0
SiO <sub>2</sub>	2,0	5,0	60,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	86,0	2,0
FeO	-	1,3	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	2,0	37,0
MgO	2,0	1,0	-
MnO	-	0,1	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	0,05	-
S	0,1	0,05	-
CO <sub>2</sub>	9,0	-	-
H <sub>2</sub> O	1,0	1,0	-

Принимали, что основной флюс – известь обеспечивает все необходимое количество CaO, а дополнительные флюсы – окатыши – FeO, шамотный бой – SiO<sub>2</sub>.

Приближенный расход извести, окатышей и шамотного боя определялся по следующим формулам [7, 8]:

$$g_{изв} = \frac{g_{шл} \cdot (CaO)_{шл}}{(CaO)_{изв}}, \quad (1)$$

- где  $g_{изв}$  – расход извести, кг;
- $(CaO)_{шл}$  – содержание CaO в шлаке, %;
- $g_{шл}$  – расход шлака, кг;
- $(CaO)_{изв}$  – содержание CaO в извести, %;

Химический состав и количество рафинированного ферроникеля

Расход шлака, г/100 г металла	Номер опыта	Массовая доля химических элементов, %						Масса металла, г	Температура ванны, °C
		Ni	C	Si	Mn	S	P		
10	1	15,78	0,03	0,4	Сл.	0,06	0,01	81	1580
	2	15,66	0,03	0,5	Сл.	0,01	0,03	91	1565
	3	16,01	0,04	0,11	Сл.	0,03	0,02	80	1580
15	4	15,59	0,08	0,14	Сл.	0,02	0,01	88	1610
	5	15,95	0,04	0,09	Сл.	0,03	0,01	95	1620
	6	15,88	0,05	0,15	Сл.	0,01	0,01	92	1560

Таблица 4

$$g_{окат} = \frac{g_{шл} \cdot (FeO)_{шл}}{(FeO)_{окат}}, \quad (2)$$

- где  $g_{окат}$  – расход окатышей, кг;
- $(FeO)_{шл}$  – содержание FeO в шлаке, %;
- $(FeO)_{окат}$  – содержание FeO в окатышах, %;

$$g_{ш.б.} = \frac{g_{шл} \cdot (SiO_2)_{шл}}{(SiO_2)_{ш.б.}}, \quad (3)$$

- где  $g_{ш.б.}$  – расход шамотного боя, кг;
- $(SiO_2)_{шл}$  – содержание SiO<sub>2</sub> в шлаке, %;
- $(SiO_2)_{ш.б.}$  – содержание SiO<sub>2</sub> в шамотном бое, %.

Приняли возможные пределы изменения химического состава начального шлака: CaO = 40–50%; SiO<sub>2</sub> = 12–18%; ΣFeO = 20–30%; остальные оксиды (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO и др.) = 10–15%. Выбрали начальный состав шлака: CaO = 40%; SiO<sub>2</sub> = 12%; ΣFeO = 20%; остальные оксиды = 20%.

Расчетный расход материалов в зависимости от изменения количества шлака приведен в табл. 3.

Таблица 3

Расходы неметаллических материалов, г

Расход шлака, % от массы металла	Материал		
	Известь	Окатыши	Шамот
10	4,5	2,3	2,0
15	5,3	3,5	3,0

Сделали шесть навесок ферроникеля по 100 г. Было проведено 6 плавков по 3 плавки с каждым количеством шлака. Взвешенная шихта подавалась к установке. На дно тигля помещался ферроникель, зажигалась дуга между днищем тигля и верхним электродом. По расплавлению металла в тигель подавались сыпучие материалы. Количество извести, окатышей и шамота варьировалось в зависимости от требуемого расхода шлака (см. табл. 3). Средняя продолжительность плавки составляла 30 мин. Температуру жидкой ванны измеряли с помощью термопары. Затем полученные шлак и металл выливались, металл отделялся от шлака. Состав и количество металла и шлака по плавкам представлены в табл. 4 и 5.

Химический состав и количество полученного шлака

Расход шлака, г/100 г металла	Номер опыта	Массовая доля химических элементов, %							Масса шлака, г	Основность шлака
		SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
10	1	14,91	0,02	22,28	0,13	5,33	49,95	8,68	21	67
	2	11,09	Сл.	21,29	0,11	6,24	48,1	8,75	11	73
	3	13,39	Сл.	19,44	0,13	4,67	49,53	7,12	17	69
15	4	15,27	Сл.	23,06	0,16	3,55	51,01	7,99	29	52
	5	17,05	0,01	21,72	0,16	4,16	51,43	8,73	25	50
	6	12,67	Сл.	22,30	0,19	3,11	53,26	8,45	19	77

Зависимость коэффициента распределения фосфора от основности шлака представлена на рис. 1.

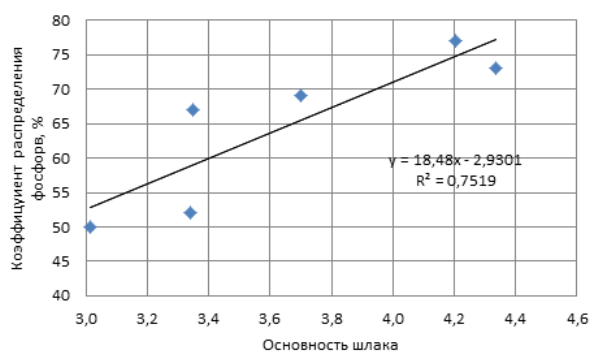


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения фосфора от основности шлака

Из рисунка видно, что при увеличении основности коэффициент распределения фосфора увеличивается. Полученная зависимость является достоверной с доверительной вероятностью 0,87.

Зависимость коэффициента распределения фосфора от температуры ванны жидкого металла представлена на рис. 2.

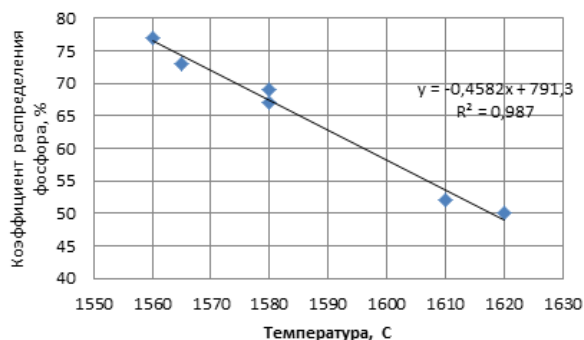


Рис. 2. Зависимость коэффициента распределения фосфора от температуры

Из рисунка видно, что при увеличении температуры коэффициент распределения фосфора уменьшается. Полученная зависимость является достоверной с доверительной вероятностью 0,89.

Определение температур начала и конца плавления полученных шлаков. В этой серии экспериментов определялась температура плавления известково-железистых шлаков. Содержание CaO в шлаке составляет 40–50%, а FeO – 20–22% (см. табл. 5). Температура плавления такого известково-железистого шлака, согласно диаграмме плавкости, составила ~ 1500°C [9].

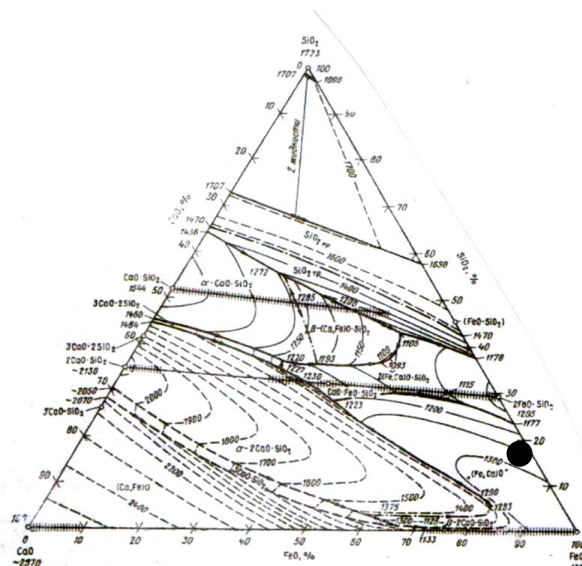


Рис. 3. Политермическое изображение диаграммы состояния CaO-Fe<sub>n</sub>-SiO<sub>2</sub>

Определение температур начала и конца плавления рафинировочных шлаков производилось визуальным методом на микрочастице с нагревательным элементом из платины.

Проба шлака предварительно размельчалась до величины зерна менее 0,05 мм. Навеска наносилась на нагревательный элемент в место расположения термомпары. При проведении опытов за температуру начала плавления принимали температуру, при которой в зоне плавления на нагревательном элементе появлялись капельки жидкого материала. За конец плавления принимали температуру, при которой последние крупинки шлака перешли в расплав.

Температуры начала и конца плавления полученных шлаков представлены в табл. 6.

Таблица 6

Температуры начала и конца плавления шлаков  
опытных плавок

Номер опыта	Температура начала плавления, °С	Температура конца плавления, °С
1	1380	1410
2	1380	1400
3	1360	1390
4	1400	1430
5	1400	1420
6	1400	1430

На основании результатов проведенных опытов по определению коэффициента распределения фосфора  $L_p$  и температуры начала и конца плавления рафинировочных шлаков принято решение наводить известково-железистый шлак принятого ранее химического состава ( $\text{CaO} = 40\text{--}50\%$ ;  $\text{SiO}_2 = 12\text{--}18\%$ ;  $\Sigma\text{FeO} = 20\text{--}30\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и др.  $10\text{--}15\%$ ). Шлак с таким содержанием основных компонентов обладает высокой рафинирующей способностью ( $L_p = 50\text{--}70\%$ ) [10], имеет температуру плавления на уровне  $1400\text{--}1450^\circ\text{C}$  и при перегреве на  $50\text{--}100^\circ\text{C}$  будет иметь достаточную жидкоподвижность.

#### Заключение

Лабораторные исследования свойств полученного металла и конечного шлака позволили сформулировать критерии, определяющие выбор шлакового режима при дефосфорации чернового ферроникеля:

1) необходимо иметь шлак, содержащий не менее  $40\%$   $\text{CaO}$  и  $20\%$   $\text{FeO}$  с основностью  $3,0\text{--}3,5$ . Такой шлак получается путем подачи извести и оксидов железа на стадию рафинирования;

2) температуру шлаковой ванны следует поддерживать на уровне  $1550\text{--}1600^\circ\text{C}$ , образующиеся шлаки при данной температуре обладают невысокой вязкостью;

3) важно обеспечить более полное перемешивание металла и шлака, что позволит увеличить дефосфорирующую способность последнего (продувкой инертным газом или водяным паром).

#### Сведения об авторах

**Бигеев Вахит Абдрашитович** – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

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

**Макарова Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.irina1976@mail.ru

**Юдин Данил Владиславович** – студент кафедры бизнес-информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ydv2002@mail.ru

#### Список литературы

1. Swinbourne D.R. (2014) Understanding ferronickel smelting from laterites through computational thermodynamics modelling, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 123:3, 127-140, DOI: 10.1179/1743285514Y.0000000056.
2. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: a review *Resour. Conserv. Recycl.*, 134 (2018), pp. 10-24.
3. Yu D., Liu F., Zhang J. et al. Thermal Upgrading of Nickeliferous Pyrrhotite Tailings for the Recovery of Nickel in the Form of Ferronickel Alloy. *Metall Mater Trans B* 50, 2186–2196 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01646-5>.
4. Bhaskar K.L., Bhoi B. Iron and Nickel Enrichment in Low Grade Chromite Overburden to Produce Ferronickel Alloys. *Trans Indian Inst Met* (2021). <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02176-4>.
5. Воропаев В.А. Производство стали из фосфористого чугуна в сталеплавильных агрегатах. М.: Металлургия, 1982. 120 с.
6. Воропаев В.А. Передел фосфористого чугуна. Киев: Техника, 1971. 80 с.
7. Бигеев А.М., Колесников Ю.А. Основы математического описания и расчеты кислородно-конвертерных процессов. М.: Металлургия, 1970. 232 с.
8. Бигеев А.М., Потапова М.В. Определение расхода шлака на дефосфорацию чернового ферроникеля, полученного частичным восстановлением железохромоникелевой руды Халиловского месторождения // Теория и технология металлургического производства. 2003. № 3. С. 79-84.
9. Жмойдин Г.И., Куликов И.С. Атлас шлаков. М.: Металлургия, 1985. 208 с.
10. Современные процессы ковшевой десульфурации чугуна / Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 2. С. 17-23.

**EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE REFINING PROCESS PARAMETERS FOR ROUGH FERRONICKEL OBTAINED BY SELECTIVE REDUCTION OF POOR IRONCHROMONICKEL ORE**

**Bigeev Vakhit A.** – Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

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

**Makarova Irina V.** – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.irina1976@mail.ru

**Yudin Danil V.** – Student of Business Informatics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ydv2002@mail.ru

**Abstract.** For the development of nickel production in Russia, it is proposed to involve in processing complex natural-alloyed iron-chromium-nickel ores of the Khalilovskoye deposit, which are currently not used due to their poverty, both in iron and nickel. The rough ferronickel obtained by selective carbothermal reduction under laboratory conditions needs dephosphorization (the phosphorus content in the metal can reach 0.7%). In the frame of this work, the dependences of the phosphorus distribution coefficient on the slag basicity and the temperature of the metal were obtained in the course of experiment. Intervals of melting temperatures for calcareous-ferruginous slags were determined experimentally as well. On the basis of the obtained results, the criteria for the selection of the slag mode during dephosphorization of rough ferronickel were formulated: it is necessary to form a slag containing at least 40% CaO and 20% FeO with a basicity of 3.0 ... 3.5; the slag temperature should remain at the level of 1550 ... 1600°C, the slag at this temperature has a low viscosity; it is important to create a more complete mixing of the metal and slag for improvement of dephosphorization (by blowing metal with an inert gas or steam).

**Key words:** iron-chromium-nickel ore, selective reduction, rough ferronickel, dephosphorization, high-iron limey slag.

---

Ссылка на статью:

Экспериментальное определение основных параметров процесса рафинирования черного ферроникеля, полученного селективным восстановлением железохромоникелевых руд / Бигеев В.А., Потапова М.В., Макарова И.В., Юдин Д.В. // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 4-8.

Bigeev V.A., Potapova M.V., Makarova I.V., Yudin D.V. Experimental estimation of the refining process parameters for rough ferronickel obtained by selective reduction of poor ironchromonickel ore. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 4-8.



УДК 669.054.82

Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы):** в статье описана существующая технология переработки металлургических шлаков в условиях металлургического комбината полного цикла. Представлены характерные особенности технологии. Оценена эффективность переработки металлургических шлаков. **Цель работы:** повышение эффективности переработки металлургических шлаков в условиях интегрированного металлургического комбината. **Используемые методы:** метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков, основанный на данных об объемах полученных магнитных фракций и экономии исходного сырья за счет возврата магнитных фракций в металлургический цикл. **Новизна:** к элементам новизны относится метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков, выраженный в экономии сырья для производства чугуна и стали за счет полученных металлосодержащих фракций из шлака. **Результат:** в анализе представлены данные по экономии сырья в агломерационном, доменном, кислородно-конвертерном и электросталеплавильном производствах за счет возврата металлосодержащих фракций. Предложенный метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков позволил оценить эффект от переработки шлаков без учета изменяющейся стоимости сырья. **Практическая значимость:** получены исходные данные для оценки экономической эффективности и путей её повышения при переработке металлургических шлаков.

**Ключевые слова:** доменный шлак, шлак кислородно-конвертерного производства, электросталеплавильный шлак, грануляция шлака, вторичная переработка, шлаковый отвал, рекультивация.

## Введение

В условиях дефицита местного железорудного сырья, а также решения экологических проблем [1-16], связанных с размещением отходов металлургического производства, весь объем шлаков текущего производства и часть отвальных шлаков подвергаются переработке (табл. 1).

Таблица 1

Вид и объемы перерабатываемых шлаков

Вид шлака	Масса переработанных шлаков, тыс. т	
	2018	2019
Доменный текущий шлак	3267	3531
Конвертерный текущий шлак	1782	1792
Текущий шлак двухвального сталеплавильного агрегата (ДСА)	165	182
Электросталеплавильный (ДСП) текущий шлак	333	293
Отвальный шлак 1-й очереди	1600	1000
Отвальный шлак 2-й очереди (доменный)	3978	4081
Отвальный шлак 3-й очереди (мартеновский)	1800	1114

Эффективность переработки металлургических шлаков можно оценить по объемам переработанных шлаков, указанных в табл. 1. При этом данный метод не позволяет оценить экономическую эффективность процесса переработки шлаков.

В данном случае переработка металлургических шлаков заключается в следующем. Огненно-жидкий

доменный шлак подвергается грануляции, а твердые остатки вместе с отвальными шлаками после дробления перерабатываются в шлаковый щебень различных фракций. Сталеплавильные шлаки вместе с отвальными мартеновскими шлаками после дробления и грохочения подвергаются магнитной сепарации на установках переработки металлургических шлаков фирм ROXON и АМСОМ. Магнитные фракции возвращаются в металлургическое производство. Пустая порода и нереализованный гранулированный шлак и шлаковый щебень отправляются на рекультивацию отработанных карьеров.

Производство товарной продукции из шлаков представлено в табл. 2.

Таблица 2

Выход товарной продукции из шлаков

Вид продукции	Масса, тыс. т		Содержание железа, %	
	2018	2019	2018	2019
Магнитная фракция 0-10 мм	430	358	47,4	46,23
Магнитная фракция 10-50 мм	151	136	67,5	66,4
Магнитная фракция 50-350 мм	161	120	50-60	50-60
Магнитная фракция +350 мм	115	159	50-60	50-60
Гранулированный шлак	1300	1323	-	-
Шлаковый щебень	948	943	-	-

Магнитная фракция размером 0-10 мм направляется в агломерационное производство, где заменяет часть аглоруды. Магнитная фракция 10-50 мм используется в доменном производстве в качестве доменно-

го присада. Магнитную фракцию 50-350 мм применяют в кислородно-конвертерном производстве, а фракцию +350 – в электросталеплавильном производстве. Здесь магнитные фракции заменяют часть металлорома при выплавке стали.

**Оценка эффективности переработки металлургических шлаков**

Процент извлечения железа оценивался как отношение массы железа в полученной фракции к массе железа в исходном сырье.

Эффективность извлечения Fe в магнитные фракции оценивалась по формуле Ханкокка—Луйксна [1]:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \gamma_k}{100 - \alpha} 100, \tag{1}$$

где  $\varepsilon$  – процент извлечения Fe из исходного сырья;  
 $\gamma_k$  – доля полученной фракции из исходного сырья;  
 $\alpha$  – содержание Fe в исходном сырье.

Эффективность извлечения железа, рассчитанная по формуле и усредненная по всем фракциям, невысока и составила 19,4 %.

Для оценки эффективности переработки металлургических шлаков необходимо знать объемы произведенных магнитных фракций из шлаков и процент содержания железа в них (табл. 2), а также процент содержания железа в исходном сырье для агломерационного, доменного, кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств соответственно. Это необходимо для того, чтобы по балансу железа оценить экономию исходного сырья за счет возврата металлосодержащих фракций в эти производства.

Используя среднее содержание железа (64%) в концентрате, который используется в агломерационном производстве, и данные по фракции 0–10 мм, которая возвращается в это же производство, по балансу железа производится расчет экономии типичного железорудного концентрата за счет магнитной фракции 0–10 мм. Так, например, в 2018 году утилизация магнитной фракции 0-10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку концентрата на  $430 \cdot 0,474 / 0,64 = 318,5$  тыс. т. Аналогичным образом оценивается экономия окатышей (содержание железа 63%) для доменного производства за счет фракции 10-50 мм и экономия металлорома для кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств (принимая содержание железа в металлороме 95%) за счет фракций 50–350 и +350 мм соответственно.

Таким образом, извлечение магнитной фракции из металлургических шлаков и возврат ее в производство чугуна и стали в 2018 году оценивается следующим образом. Утилизация магнитной фракции 0–10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку железорудного концентрата на 318,5 тыс. т, а использование магнитной фракции 10–50 мм

в доменной шихте снизило потребление окатышей на 162 тыс. т. Использование магнитных фракций 50–350 мм в металлосихте кислородно-конвертерного производства позволило снизить расход металлорома на 93,2 тыс. т, а фракции +350 мм в электросталеплавильном производстве – на 66,6 тыс. т. В 2019 году утилизация магнитной фракции 0–10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку железорудного концентрата на 258,4 тыс. т, а использование магнитной фракции 10–50 мм в доменной шихте снизило потребление окатышей на 143,3 тыс. т. Использование магнитных фракций 50–350 мм в металлосихте кислородно-конвертерного производства позволило снизить расход металлорома на 69,5 тыс. т, а фракции +350 мм в электросталеплавильном производстве – на 92 тыс. т.

**Возможное повышение эффективности переработки шлаков**

Качественными показателями работы установок по переработке металлургических шлаков является содержание железа в металлосодержащих фракциях 0-10 и 10–50 мм. Причем общее содержание железа складывается из содержания как его металлической фазы (корольки, дисперсное железо и т. д.), так и оксидной (шлаковые включения). Фактическая доля шлаковых включений в металлосодержащих фракциях 0–10 мм и 10–50 мм высока и составляет 30–50%.

Среднее содержание общего железа в данных фракциях за 2018 и 2019 годы представлено соответственно в табл. 3.

Таблица 3

Среднее содержание железа в металлосодержащих фракциях

Размер фракции, мм	Содержание Fe в фракциях по установкам, %	
	2018	2019
0-10	47,2	46,8
10-50	67,5	67,1

Содержание железа в фракциях 0–10 и 10–50 мм в 2018 и 2019 годах соответствовали плановым значениям, что подтверждает эффективность работы установок по переработке металлургических шлаков по данным показателям.

Однако, в немагнитных фракциях 0–10 и 10–50 мм остаётся значительное количество железа – 21–24% (в основном в оксидной форме). Из-за этого извлечение железа в магнитную фракцию не превышает 25%, поэтому целесообразным является дополнительная обработка немагнитных фракций с целью доизвлечения железа.

Следует отметить, что магнитная фракция 50–350 мм перерабатывается в сталеплавильном производстве с серьезными проблемами. В конвертерном производстве замена лома на этот материал серьезно

и труднопредсказуемо изменяет тепловой продукт плавки, а при заливке чугуна бывают выбросы из конвертера. В дуговой сталеплавильной печи применение такого сильнозашлакованного материала затрудняет поддержание устойчивых электрических дуг и регулирование электрического режима. Ввиду этого возникает предложение по дополнительному дроблению, переводу этого материала во фракцию 10–50 мм и использованию его в доменном производстве.

### Заключение

1. Результаты расчетов эффективности переработки металлургических шлаков на металлургическом комбинате полного цикла позволили:

– оценить объемы сэкономленного железосодержащего сырья для агломерационного, доменного, кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств;

– сделать оценку экономической эффективности от реализации готовой продукции в виде гранулированного шлака и шлакового щебня, полученных при переработке металлургических шлаков.

2. С целью повышения извлечения железа при переработке шлаков предложено увеличить производство магнитной фракции 10–50 мм, содержащей не менее 64% Fe, исключив выход фракции 50–350 мм.

3. Выявлено, что общее извлечение железа по действующей технологии в среднем не достигает 20%. При этом в немагнитных фракциях 10–50 и 0–10 мм высокое содержание железа – 21–24%, поэтому необходимо подвергнуть эти материалы повторной магнитной сепарации.

### Список литературы

1. Утилизация отходов металлургического производства: монография / Н.В. Панишев, В.А. Бигеев, М.В. Потапова, И.В. Макарова, Т.О. Гаврилова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 69 с.
2. Калабин Г.В. Исследование техногенного воздействия железорудных карьеров европейской части России на окружающую среду // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 12. С. 8–13.
3. Цыганков Д.А. Экологические проблемы утилизации отходов разработки и обогащения железной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 5. С. 160–164.
4. Analysis of the accumulation and influence of metallurgical slag to the environment / V. Bondarenko, O. Filonenko, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine PJSC «Ilyich Iron and Steel Works» Coll.res.pap.nat.min.univ. 2020, 1:78. 93 p.
5. Славиковская Ю.О. Техногенные пустоты недр как источник негативного воздействия на окружающую среду предприятий горнопромышленного комплекса // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: труды VIII Международной конференции. Екатеринбург, 2020. С. 275–279.
6. Систематизация методов переработки отходов горно-металлургического комплекса / С.И. Иванков, Л.Я. Шубов, К.Д. Скобелев // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 6. С. 2–93.
7. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Химическая переработка отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9. № 2. С. 71–73.
8. Разработка технологии переработки хвостов Кусинских титаномагнетитовых руд с извлечением титана и ванадия / В.А. Бигеев, И.А. Гришин, М.В. Потапова, Е.В. Соколова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 93.
9. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, Ecological And Resource-Efficient Aspects Of Vanadium Production And Use Of Technogenic Vanadium Sources // SolidStatePhenomena. 2017. Т. 265. С. 994–998.
10. Возможность получения силикомарганца из уральских марганцевых руд / В.А. Бигеев, М.В. Потапова, А.А. Фахрисламов, У.Д. Лунев // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции (19–20 ноября 2020 г., г. Магнитогорск). Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. С. 16–19.
11. Исследование технологии переработки титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения / М.В. Потапова, В.А. Бигеев, А.С. Харченко, М.Г. Потапов, Е.В. Соколова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3–4. С. 225–230.
12. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Рециклинг ванадийсодержащих отходов // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 (19). С. 71–74.
13. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из рудного и техногенного сырья Кусинского месторождения титаномагнетитов // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 3 (22). С. 22–25.
14. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Экологические и ресурсосберегающие аспекты использования техногенного ванадийсодержащего сырья // Черная металлургия. 2018. №3 (1419). С. 81–86.
15. Сравнительный анализ результатов химического извлечения ванадия из хвостов и концентрата титаномагнетитовых руд Урала / М.В. Шубина, Е.С. Махоткина // Черная металлургия. Бюлле-

ть научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 5. С. 496-502.

16. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Nekrasov I.V., Egizaryan D.K., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Issues of utilization of refining slags of

steelmaking production: A monograph. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Eltsin, Nizhny Tagil Institute of Technology (branch), 2017. 208 p.

#### Сведения об авторах

**Айкашев Алексей Вячеславович** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: alekseyaikashev@mail.ru

**Панишев Николай Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Махоткина Елена Станиславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: lena.makhotkina@yandex.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### EFFICIENCY OF PROCESSING METALLURGICAL SLAGS

**Aikashev Alexey V.** – Postgraduate Student of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alekseyaikashev@mail.ru

**Panishev Nikolay V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

**Makhotkina Elena S.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lena.makhotkina@yandex.ru

**Annotation. Problem statement (relevance of the work):** the article describes the existing technology of processing metallurgical slags in the production conditions. The characteristic features of the technology are presented. The efficiency of metallurgical slag processing is evaluated. **The purpose of the work:** to evaluate the efficiency of processing metallurgical slags in 2018 and 2019. **Methods used:** a method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing through the volumes of obtained magnetic fractions at metallurgical slag processing plants and saving raw materials for the production to the return of magnetic fractions to the metallurgical cycle. **Novelty:** the novelty elements include a method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing, expressed in saving raw materials for the production of cast iron and steel to the metal-containing fractions obtained from slag. **Result:** the article provides an assessment of the efficiency of metallurgical slag processing in 2018 and 2019. The analysis presents the savings of raw materials for agglomeration, blast furnace, oxygen converter and electric steelmaking productions to the return of metal-containing fractions obtained from slag to these productions. The proposed method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing allowed us to evaluate the effect of slag processing without taking into account the changing cost of raw materials. **Practical significance:** initial data have been obtained to assess the economic efficiency of metallurgical slag processing.

**Keywords:** blast furnace slag, oxygen converter production slag, electric steelmaking slag, slag granulation, recycling, slag dump, reclamation.

---

Ссылка на статью:

Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С. Эффективность переработки металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 9-12.

Aikashev A.V., Panishev N.V., Makhotkina E.S. Efficiency of processing metallurgical slags. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 9-12.

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.742

Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Явтушенко П.М.

## МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПОВЕДЕНИИ ЖИДКОПОДВИЖНОЙ САМОТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОСТЕННОГО СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ

**Аннотация.** В центре внимания авторов производство качественных тонкостенных стальных отливок, получаемых специальными способами точного литья. Одной из основных причин низкого качества стальных тонкостенных отливок и, как следствие, образования таких дефектов, как пригар, грубая поверхность, шероховатость, ужимина и недолив, является несовершенство литейной формы. Помимо этого, специфические проблемы тонкостенного стального литья связаны с недостаточным уровнем жидкотекучести сплава в области рабочих температур заливки, а также возникающим противодействием сплаву, заполняющему узкие участки формы, соответствующие тонким стенкам будущей отливки, обусловленным ограниченной газопроницаемостью литейной формы. Жидкоподвижная самотвердеющая смесь вполне подходит на роль материала формы благодаря своей высокой газопроницаемости, податливости, низкой влажности и текучести. В этой связи в качестве цели работы авторами выбиралось построение модельного представления о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья. По результатам проведенного анализа открытых источников информации построена и детально проанализирована кривая течения смеси. На кривой выделены пять характерных этапов, каждому из которых в соответствие поставлены типы неньютоновских жидкостей согласно известной классификации. Представленная версия модельного представления не только способствует более глубокому пониманию физического и физико-химического взаимодействия компонентов смеси, но и дает теоретическую основу для разработки смесей новых составов, обладающих повышенной технологичностью, что, в свою очередь, создает предпосылки для обеспечения стабильно высокого качества тонкостенного стального литья, получаемого с их применением.

**Ключевые слова:** тонкостенное стальное литье, жидкоподвижная самотвердеющая смесь, неньютоновская жидкость, кривая течения, технологичность, газопроницаемость, текучесть, податливость.

### Введение

Получение качественных тонкостенных стальных отливок по-прежнему остается одной из актуальных проблем российского литейного производства. Не в последнюю очередь это связано с имеющей место зависимостью отечественных предприятий от импорта оборудования и материалов, а также хроническим отставанием технологий производства стального литья, реализуемых в действующем производстве, от трендов общемировых технических новаций. Дело осложняется тем, что на протяжении последних десятилетий на государственном уровне проблеме уделялось недостаточно внимания и в условиях санкционного давления на Россию стран Запада возможности использовать готовые зарубежные решения свелись к минимуму. При этом потребность в тонкостенных стальных литых заготовках высокого качества со стороны предприятий машиностроения, металлургии, оборонного комплекса постоянно растет [1-3], поэтому проблема только обостряется.

В сложившейся ситуации учеными и аспирантами кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева было принято решение сфокусировать на ней свое внимание.

Проведенный авторами статьи информационно-аналитический обзор результатов исследований,

опубликованных в открытой печати, показал, что в отечественной практике для производства тонкостенных отливок применяют специальные способы точного литья, основанные на формировании сложной геометрии рабочей полости термоудалемыми моделями – литье по газифицируемому, выжигаемому и аддитивным выжигаемым моделям [4-8].

При этом одной из основных причин низкого качества стальных тонкостенных отливок и, как следствие, образования таких дефектов, как пригар, грубая поверхность, шероховатость, ужимина и недолив, является несовершенство литейной формы. Помимо этого, специфические проблемы тонкостенного стального литья связаны с недостаточным уровнем жидкотекучести сплава в области рабочих температур заливки, а также возникающим противодействием сплаву, заполняющему узкие участки формы, соответствующие тонким стенкам будущей отливки, обусловленным ограниченной газопроницаемостью литейной формы [1-3].

По данным [1-3], такие традиционные технологические приемы, как перегрев расплава и/или увеличение металлостатического напора в литниково-питающей системе, чаще всего не дают эффекта, поскольку чреваты повышением рисков получения усачных дефектов и снижением технологического выхода годного из-за увеличения массовой доли литниково-питающей системы относительно самой отливки. Нанесение покрытий на поверхность рабочей по-

лости формы либо оказывается невозможным, либо не обеспечивает желаемого результата.

Как следствие, на первый план выходит увеличение газопроницаемости материала литейной формы в сочетании с внешним воздействием на систему «форма – стальной расплав», например, вакуумированием. В этой связи внимание авторов данной статьи привлекла жидкоподвижная самотвердеющая смесь (ЖСС), которая вполне подходит на роль материала формы благодаря своей высокой газопроницаемости, достигающей уровня 400 единиц после затвердевания. Выбор ЖСС, в некоторых источниках называемой наливной, был вызван еще и тем, что она не требует механического уплотнения при формовке, а просто заполняет рабочую полость оснастки благодаря своей текучести. Наряду с высокой газопроницаемостью ЖСС податлива при низкой влажности (не более 5-6%) и приемлемой прочности на сжатие [9, 10], что, в свою очередь, может быть гарантией хорошего заполнения стальным расплавом тонких частей рабочей полости формы и минимума дефектов в отливке (в первую очередь речь идет о недоливе и неслитинах).

Проведенный многими исследователями, в том числе и авторами данной статьи, предварительный сравнительный анализ вариантов технической схемы получения тонкостенного стального литья убедительно доказывает ведущую роль формы и формовочной смеси в обеспечении качества отливок. В этой связи в качестве цели работы выбиралось построение модельного представления о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья.

### Исходная информация

Жидкоподвижные самотвердеющие смеси, или наливные смеси, – это формовочные смеси, сочетающие в себе свойства жидкости, позволяющие получать стержни и формы свободной заливкой и затвердевать на воздухе в заданное время. Получение этих смесей с общей низкой влажностью, основанное на их переходе в подвижное состояние при введении пенообразующих поверхностно-активных веществ (ПАВ) и последующем затвердевании смеси от введенных отвердителей [9, 11], было разработано в первой половине 1960-х в ЦНИИТМаш и получило широкое распространение в литейном производстве СССР [12]. Позднее ЖСС нашли применение при изготовлении гипсовых и объемных керамических форм.

### Результаты работы и их обсуждение

Использование ЖСС имеет свою специфику. ЖСС помимо наполнителя содержит в своем составе три основных компонента – связующее (как правило, жидкое стекло), пенообразующее ПАВ и отвердитель. Смесь характеризуется текучестью (подвижностью), а потому не требует приложения внешних усилий для заполнения рабочей полости оснастки и заполняет ее что называется «самотеком» под воздействием лишь

гравитационного поля (лишь в случае производственной необходимости дополнительно используется вибрационное воздействие на оснастку). Кроме того, ЖСС схватывается и затвердевает без использования внешнего тепла. Еще одной особенностью ЖСС является наличие в ее составе пенообразователя для формирования после затвердевания смеси сообщающихся пор, обеспечивающих высокую газопроницаемость литейной формы.

Все это вместе с результатами работ, проведенных в ЦНИИТМаш Борсуком П.А. и Жуковским С.С., позволяет отнести ЖСС к числу так называемых структурированных жидкостей, или жидкостей, обладающих пространственной структурой, не подчиняющихся законам Ньютона (неньютоновские), для которых напряжение сдвига  $\tau$  прямо пропорционально скорости деформации (сдвига)  $\gamma$ , причем в качестве коэффициента пропорциональности выступает кажущаяся вязкость  $\mu$ :

$$\tau = \mu \gamma. \quad (1)$$

График зависимости между напряжением и скоростью сдвига – так называемая «кривая течения» – для ньютоновской жидкости представляет собой прямую линию (рис. 1), проходящую через начало отсчета с тангенсом угла наклона  $\mu$ , причем эта единственная постоянная полностью характеризует жидкость [13].

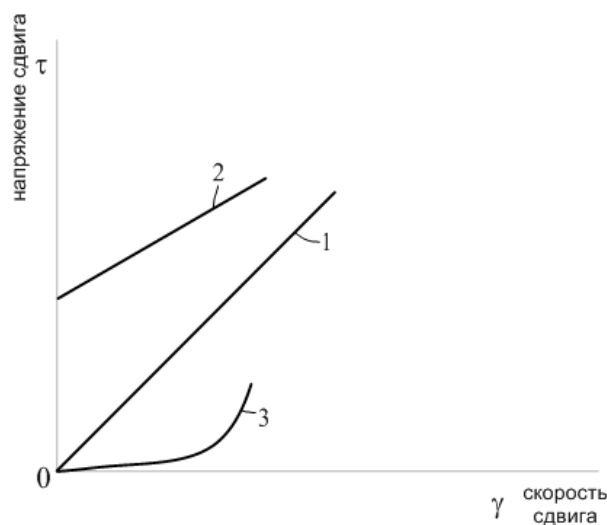


Рис. 1. Кривые течения идеальных жидкостей: 1 – ньютоновская; 2 – бингамовская; 3 – дилатантная

Кривые течения у идеальных неньютоновских жидкостей (бингамовская или дилатантная) ведут себя иначе.

У бингамовской жидкости это прямая, пересекающая ось ординат на некотором расстоянии от начала отсчета. Это расстояние соответствует напряжению текучести, превышение которого ведет к возникновению вязкого течения. Объяснение такого поведения, согласно гипотезе Ф.Н. Шведова, основывается на предположении о наличии у покоящейся жидкости некоторой пространственной структуры, способной

сопротивляться напряжению сдвига, не превышающему предел текучести. Если предел текучести все же превышен, жидкость ведет себя практически как ньютоновская, при этом угловой коэффициент ее прямой течения зависит от меняющейся вязкости, но линейный характер зависимости в целом сохраняется.

У дилатантной жидкости отсутствует предел текучести, поэтому кривая течения идет из начала отсчета, однако кажущаяся вязкость жидкости повышается с возрастанием скорости сдвига нелинейно (визуально – по степенному закону с показателем, большим единицы).

Реальные жидкости имеют нелинейную кривую течения, что может быть обусловлено не только характером зависимости их поведения от напряжения сдвига, но и от времени проявления напряжения, предыстории и особой реологии жидкости.

В этой связи нет ничего необычного в том, что кривая течения ЖСС, экспериментально полученная П.А. Борсуком и С.С. Жуковским (рис. 2), носит явно нелинейный характер.

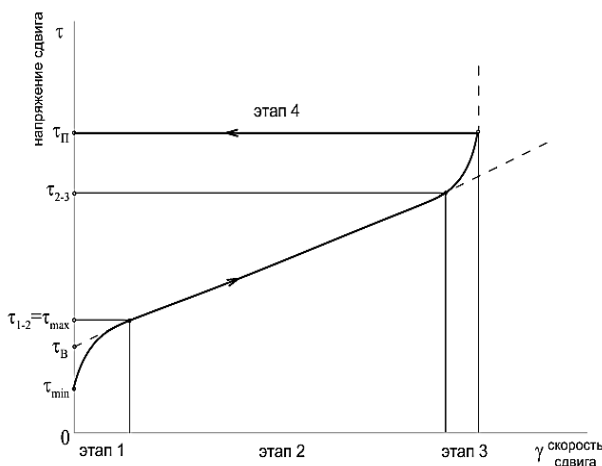


Рис. 2. Кривая течения ЖСС (по данным П.А. Борсука и С.С. Жуковского):

- этап 1 – бингамовская пластичная жидкость (бингамовский пластик);
- этап 2 – псевдопластичная жидкость с тиксотропными свойствами;
- этап 3 – дилатантная жидкость с реопектическими свойствами;
- этап 4 – идеально затвердевающее реологическое тело Прагера

Из рис. 2 видно, что разрушение структуры ЖСС как неньютоновской аномальной жидкости происходит не спонтанно, а постепенно. На кривой можно выделить пять характерных напряжений сдвига:

- $\tau_{\min}$  – минимальное, соответствующее началу разрушения пространственной структуры;
- $\tau_B$  – предел текучести по Бингаму;
- $\tau_{\max}$  – максимальный предел текучести, соответствующий полному разрушению структуры жидкости;
- $\tau_{2,3}$  – напряжение сдвига, соответствующее началу вторичного структурообразования;

–  $\tau_P$  – предел текучести по Прагеру, соответствующий полной остановке течения, а на кривой течения – соответственно четыре участка или этапа.

На первом этапе, включающем участок от начала движения до достижения  $\tau_{\max}$ , ЖСС в соответствии с классификацией неньютоновских жидкостей, предложенной У.Л. Уилкинсоном [13], характеризуется как бингамовская пластичная жидкость (бингамовский пластик). Кривая течения для таких материалов представляет собой гладкую кривую, соответствующую степенной зависимости с показателем, меньшим единицы, которая пересекает ось напряжения сдвига  $\tau$  на некотором расстоянии  $\tau_{\min}$  от ее начала. Поведение бингамовских пластиков объясняется предположением о том, что у покоящейся жидкости имеется пространственная структура, достаточно жесткая, чтобы сопротивляться любому напряжению, не превосходящему по величине  $\tau_{\min}$ . Если же напряжение сдвига превышает  $\tau_{\min}$ , то на протяжении интервала от  $\tau_{\min}$  до  $\tau_{\max}$ , включающего характерное значение  $\tau_B$ , структура полностью или частично разрушается и далее система ведет себя как ньютоновская жидкость или близко к этому.

На втором этапе, включающем собственно фрагмент графика степенной зависимости (визуально – линейной) от  $\tau_{\max}$  до  $\tau_{2,3}$ , ЖСС – псевдопластичная жидкость, обладающая тиксотропными свойствами, такими как разрушение структуры при сдвиге, когда консистенция материала зависит не только от величины скорости  $\gamma$ , но и от продолжительности сдвига. Псевдопластичные жидкости не обнаруживают предела текучести, а по кривой течения таких жидкостей видно, что отношение напряжения к скорости сдвига, т.е. кажущаяся вязкость, постепенно снижается с ростом скорости сдвига. Соответствующая графическая зависимость близка к степенной, причем с показателем, по-прежнему меньшим единицы. Физическое толкование псевдопластичности заключается в том, что с возрастанием скорости сдвига асимметричные частицы ЖСС ориентируются вдоль направления потока и кажущаяся вязкость с ростом скорости сдвига убывает до тех пор, пока сохраняется возможность такой ориентации, после чего кривая течения стабилизируется и приобретает линейный характер. На участке оси ординат между  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$  находится значение  $\tau_B$ , соответствующее виртуальной точке пересечения этой оси с продолжением графика второго этапа.

На третьем этапе, соответствующем фрагменту кривой между  $\tau_{2,3}$  и  $\tau_P$ , ЖСС соответствует дилатантной жидкости с реопектическими свойствами (структурообразование при нарастании сдвига), вязкость которой возрастает с увеличением скорости сдвига  $\gamma$ , т.е. фактически имеет место переход от жидкости к твердому телу (затвердевание). При этом степенная зависимость сохраняется, но ее показатель уже существенно превышает единицу. Дилатантные жидкости сходны с псевдопластичными тем, что для них также не выражен предел текучести, но кажущаяся вязкость с

ростом скорости сдвига у них возрастает. По версии Рейнольдса, впервые обнаружившего дилатантный тип течения в суспензиях при высоком содержании твердой фазы, эти суспензии в состоянии покоя имеют минимальный объем прослоек между твердыми частицами, а жидкости хватает исключительно для заполнения этих прослоек. Когда такие материалы подвергаются сдвигу с небольшой скоростью деформации, жидкость служит смазкой, уменьшающей трение твердых частиц друг о друга, и напряжения не слишком велики. При больших сдвигах плотная упаковка частиц нарушается, размеры жидких прослоек возрастают, материал «разбухает», жидкости становится недостаточно для смазки трущихся частиц, напряжения возрастают и наблюдается формирование структуры.

По ходу индукционного периода отверждения вплоть до прекращения течения ЖСС переходит в категорию сложных реологических тел [14-17]. Однако если принять допущение о том, что отверждение ЖСС и переход в состояние с нулевой газопроницаемостью происходит не параллельно с ее течением, а мгновенно, сразу после прекращения течения смеси, то ее поведение *на четвертом этапе* будет соответствовать так называемому идеально затвердевающему реологическому телу Прагера [16]. Это означает, что формирование структуры ЖСС наступает немедленно после остановки потока, заполняющего оснастку, а в дальнейшем при объемной деформации форма из ЖСС ведет себя как жесткое несжимаемое тело, несмотря на наличие в нем системы сообщающихся пор по причине пенообразования ПАВ. Это подтверждается экспериментально [18] тем, что сразу после приготовления жидкие смеси практически не имеют газопроницаемости, которая восстанавливается в процессе твердения в результате самопроизвольного разрушения пузырьков пены.

Однако повышенная газопроницаемость не только создает предпосылки для обеспечения хорошей податливости материала ЖСС в условиях высокотемпературного прогрева, что очень важно для производства тонкостенного литья, но и ведет к снижению поверхностной прочности формы и увеличению рисков механического пригара и шероховатости отливок и вынуждает принимать меры по улучшению качества поверхности рабочей полости формы, такие как нанесение покрытия (окрашивание) или использование керамики в рабочем слое.

По мнению авторов данной статьи, все это еще раз доказывает приоритетность правильности выбора ПАВ и отвердителя в составе ЖСС, поскольку именно они в наибольшей степени определяют технологичность смеси (газопроницаемость, текучесть, живучесть, податливость, выбиваемость).

При выборе ПАВ для приготовления ЖСС В.А. Васильев [17] рекомендует низшие, средние гомологи ПАВ или их смеси с ориентировочной длиной углеводородного радикала в пределах 6-16, но не более 20

атомов углерода. Тот же автор считает наиболее подходящими для обеспечения высокой пенообразующей способности и заданной устойчивости пены анионоактивные ПАВ, к которым относит прежде всего алкиларилсульфонаты, а также алкилсульфаты и алкилсульфонаты. Такие ПАВ диссоциируют в воде на отрицательно заряженный анионоактивный комплекс и неактивный отрицательно заряженный ион металла (например,  $\text{Na}^+$ ). Анионоактивные комплексы ПАВ адсорбируются на поверхности зерен наполнителя смеси, гидрофилизуя их, образуя слой «жесткой» воды. При этом снижается поверхностное натяжение на границе раздела фаз, существенно уменьшаются силы трения между твердыми частицами наполнителя смеси, разделенными прослойками и пленками воды, нивелируя влияние шероховатости поверхности зерен наполнителя, облегчая их перемещение друг относительно друга, уменьшая агрегатирование и коагуляцию и обеспечивая течение ЖСС.

Что касается выбора отвердителя ЖСС на основе жидкого стекла, делая его, необходимо учитывать, что механизм отверждения в этом случае основывается на разложении силикатов калия или натрия (в зависимости от вида жидкого стекла) под воздействием растворимых в воде органических или неорганических кислот либо гидроксидов щелочноземельных металлов (силикатов кальция и алюминия, часто входящих в состав шлаков металлургического производства) и образовании гелеобразных продуктов реакций.

### Заключение

Модельное представление о поведении ЖСС при производстве тонкостенного стального литья, предложенное авторами данной статьи по результатам проведенного анализа открытых источников информации, не только способствует более глубокому пониманию физического и физико-химического взаимодействия компонентов смеси, но и дает теоретическую основу для разработки ЖСС новых составов, обладающих повышенной технологичностью, что, в свою очередь, создает предпосылки для обеспечения стабильно высокого качества тонкостенного стального литья, получаемого с их применением.

### Список литературы

1. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.
2. Производство отливок ответственного назначения: монография / М.И. Карпенко, В.А. Алов, А.П. Мельников, В.М. Карпенко. Ярославль: Наука, 2012. 256 с.
3. Десницкий В.В., Матвеев И.А., Десницкая Л.В. Деформационные процессы при формировании ответственных стальных отливок // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №11. С. 12-15.



4. Инновации в литье по выплавляемым моделям: монография / К.В. Никитин, А.В. Соколов, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 144 с.
5. Калюжный П.Б., Кротюк С.О., Левчук М.Т. Технологические процессы получения стальных литых изделий для запорной трубопроводной арматуры по газифицируемым моделям // Литье и металлургия. 2018. №1(90). С. 21-23.
6. Литье в песчано-гипсовые формы тонкостенных отливок из Al-сплавов с выплавляемой моделью из PLA-пластика / В.А. Изотов, А.А. Акутин, Ю.С. Федулова, А.С. Равочкин, В.М. Федулов, А.А. Вишталюк // Литейное производство. 2015. №5. С. 15-18.
7. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: Профессионал, 2007. 408 с.
8. Яковьшин О.А. Ресурсосберегающая технология изготовления газифицируемых моделей для литейного производства // Экология и промышленность. 2019. №2(59). С. 24-33.
9. Борсук П.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
10. Илларионов И.Е., Васин Ю.П. Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во Чуваш. унта, 1995. Ч. 2. 288 с.
11. Иванов В.Н., Зарецкая Г.М. Литье в керамические формы по постоянным моделям. М.: Машиностроение, 1975. 136 с.
12. Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
13. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.
14. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
15. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.
16. Матвеев И.В. Основы реологии формовочной смеси. М.: МГИУ, 2003. 80 с.
17. Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 336 с.
18. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. Литейные формовочные материалы: формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.

#### Сведения об авторах

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

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

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

**Явтушенко Павел Михайлович** – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### MODEL CONCEPT OF THE BEHAVIOR OF A LIQUID-MOVING SELF-CURING MIXTURE IN THE PRODUCTION OF THIN-WALLED STEEL CASTING

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

**Grachev A.N.** – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhniy Novgorod. E-mail: mto@nntu.ru.

**Leushina L.I.** – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhniy Novgorod. E-mail: mto@nntu.ru.

**Yavtushenko P.M.** – postgraduate Student, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhniy Novgorod.

**Abstracts.** The focus of the authors is on the production of high-quality thin-walled steel castings obtained by special methods of precision casting. One of the main reasons for the poor quality of steel thin-walled castings and, as a result, the formation of such defects as burn-in, rough surface, roughness, finesse and underfilling, is the imperfection of the casting mold. In addition, the specific problems of thin-walled steel casting are associated with an insufficient level of fluidity of the alloy in the range of working temperatures of casting, as well as the emerging back pressure of the alloy filling narrow sections of the mold corresponding to the thin walls of the future casting, due to the limited gas permeability of the casting mold. A liquid self-hardening mixture is quite suitable for the role of a mold material due to its high gas permeability, flexibility, low moisture content and fluidity. Based on the results of the analysis of open sources of information, the mixture flow curve was constructed and analyzed in detail. The curve shows five characteristic stages, each of which is assigned the types of non-Newtonian fluids according to the well-known classification. The presented version of the model representation not only contributes to a deeper understanding of the physical and physicochemical interaction of the components of the mixture, but also provides a theoretical basis for the development of mixtures of new compositions with increased manufacturability, which, in turn, creates the prerequisites for ensuring a consistently high quality of thin-walled steel casting obtained with their use.

**Keywords:** thin-walled steel casting, liquid self-hardening mixture, non-Newtonian liquid, flow curve, manufacturability, gas permeability, fluidity, pliability.

---

Ссылка на статью:

Модельное представление о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья / И.О. Леушин, А.Н. Грачев, Л.И. Леушина, П.М. Явтушенко // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 13-18.  
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Yavtushenko P.M. Model concept of the behavior of a liquid-moving self-curing mixture in the production of thin-walled steel casting. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 13-18.

УДК 621

Ширяева Е.Н., Полякова М.А.

## ОСОБЕННОСТИ ТРЕБОВАНИЙ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К СВОЙСТВАМ ГОРЯЧЕКАТАНОГО СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

*Аннотация.* В статье представлены основные потоки готовой продукции листопрокатного цеха в структуре металлургического предприятия полного цикла. На примере технологии производства стальных полос горячей прокаткой показана зависимость заданных механических свойств заказу внешнего и внутреннего потребителей согласно требованиям стандартов. Отмечается важность идентификации потребностей как внешних, так и внутренних потребителей. Рассмотрены особенности использования определенных марок стали под нужды конкретных отраслей и их функциональные свойства для металлоизделий различного назначения. Приведены характеристики заданных механических свойств согласно требованиям стандартов. Показана зависимость комплекса свойств от реальных потребностей внешнего и внутренних потребителей для дальнейшего проектирования технологического процесса. Это приобретает особую актуальность для производства металлопродукции, имеющей глубокую степень переработки, а также относящейся к финишным переделам отрасли.

*Ключевые слова:* горячая прокатка, технологическая система, внешние потребители, внутренние потребители, механические свойства.

### Введение

Современное состояние и тенденции развития моделирования процессов многостадийной обработки с точки зрения феноменологической вероятностной модели влекут за собой масштабные исследования влияния различных факторов на свойства материала. Оценка изменения параметров состояния механических свойств в ходе технологического процесса изготовления изделий, определение закономерностей и влияние их на формирование свойств готовой продукции необходимы для формализации механизмов развития вероятностного процесса и совершенствования технологии получения изделий с заданным уровнем механических свойств.

Производство горячекатаного проката состоит из процессов, которые выполняла работа организации, всегда берут входы (т.е. материалы, энергию, информацию) и преобразовывают их соответственно в выходы (т.е. в готовую товарную продукцию). Основные процессы должны быть взаимосвязаны, выход из одного становится входом в другой. При этом связи между ними обычно рассматриваются как внутреннее потребление. И к требованиям этих внутренних потребителей предприятия относится так же отзывчиво, как и в отношении к внешним [1-4]. Поскольку внутренние потребители столь же важны для гарантированного обеспечения качества, насколько и внешние потребители, приобретающие готовую металлопродукцию.

Объектом исследования в данной работе выбрана технология производства стальных полос горячей прокаткой. Листопрокатный цех в структуре металлургического предприятия полного цикла приведен на рис. 1.

Внешние потребители, требования к готовой продукции которых будут удовлетворены на выходе, находятся вне организации, но используют выходные потоки процесса изготовления горячекатаного стального проката. Металлопродукция, выпускаемая цехом

горячей прокатки должна соответствовать так называемым устойчивым требованиям внутренних потребителей [5]. Предполагается баланс между экономическими интересами предприятия и потребностями потребителя [6].

По видам производства прокат делится на рулонный и листовой. В цеха холодной прокатки стального листа, цех производства металла с покрытием и цех холодной прокатки стальной ленты продукция поступает в рулонах. Воздействуя на конечный продукт металлургического предприятия, данные цеха являются внутренними потребителями. Являясь функциональными подразделениями предприятия, им требуется продукция с заданным уровнем качества, которое регламентируют различные нормативные документы. Традиционно под внутренними потребителями понимаются потребители внутри организации по отношению к владельцу процесса. Под процессом здесь понимается совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности [7].

Механические свойства материала характеризуют его поведение под действием внешней нагрузки, деформации, сопротивление материала разрушению и особенность его поведения в процессе жизненного цикла изделия. Поскольку выпускаемая цехом горячей прокатки продукция обладает чрезвычайно широкой областью применения, а следовательно, и условиями эксплуатации, то рассматриваемые свойства будут состоять из большой группы показателей [8-11]. Эта группа свойств может включать в себя такие показатели, как прочность, упругость, пластичность, твердость и вязкость. В основную группу этих показателей входят определенные характеристики механических свойств, полученные в лабораторных условиях на образцах, установленных в различных стандартах размеров. Показатели механических свойств, которые получили при таких испытаниях, оцениваются поведением материалов под внешней нагрузкой без учета условий эксплуатации и конструкции. Также дополнительно к этому они определяют показатели

конструкционной прочности, находящиеся в наибольшей корреляции с эксплуатационными свойствами получаемого изделия и оценивают работоспособность материала в условиях функционирования на протяжении всего жизненного цикла [12].

В работе рассмотрены одни из основных характеристик прочности: предел текучести ( $\sigma_T$ ), временное сопротивление ( $\sigma_B$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ). Под пределом текучести понимается напряжение, при котором образец получает остаточное (пластическое) удлинение. Временное сопротивление (предел прочности) – это напряжение, которое соответствует наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца. Для оценки пластичности металла служит относительное удлинение образца при растяжении. Данные характеристики можно рассмотреть примени-

тельно к направлению движения металлопродукции. На рис. 2 приведен пример соответствия требований нормативной документации внешнего потока горячекатаного металла.

Для внешнего потребителя важны эксплуатационные свойства. Для электроэнергетической отрасли в первую очередь важна термостойкость и коррозионная стойкость материала. В энергетике коррозия является одним из основных видов разрушения металлов. Также требуемый стандартом уровень свойств для энергооборудования обосновывается соответствием таким технологическим свойствам, как деформируемость, жидкотекучесть и свариваемость. Теплопроводность, например, играет определяющую роль для элементов теплообменников. Чем выше теплопроводность у этих элементов, тем выше их КПД.

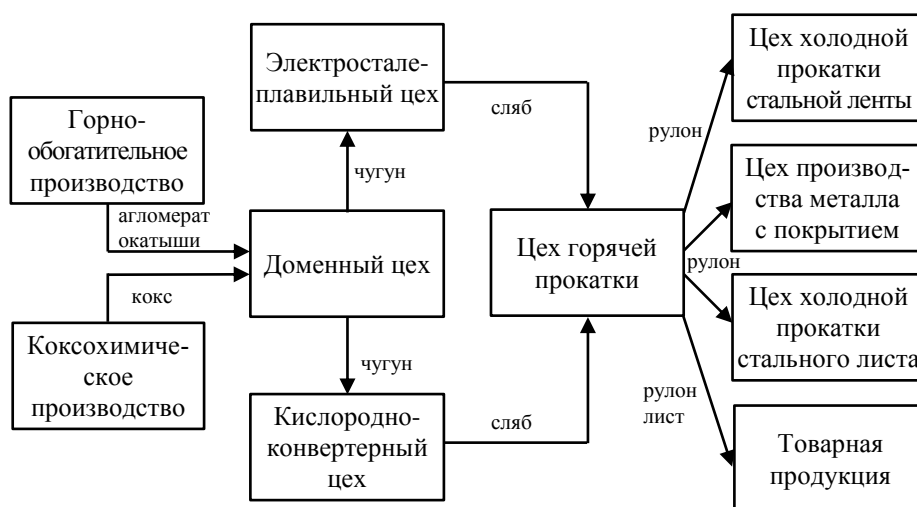


Рис. 1. Листопрокатный цех в структуре металлургического предприятия полного цикла



Рис. 2. Схема соответствия заданных механических свойств заказу внешнего потребителя согласно требованиям стандартов

На примере нефтегазовой отрасли можно найти объяснение жестким требованиям к качеству и соответствию заданного уровня свойств выпускаемой металлопродукции на внешний рынок. В настоящее время во всем мире одной из важнейших задач является транспортировка газа и нефти на значительные расстояния. Трубопроводный транспорт является безусловным лидером среди возможных способов доставки. От надежности труб и качества материалов, из которых их изготавливают, зависит работоспособность газонефтепроводных магистралей. Уровень свойств и качество основного металла труб существенно влияют на протяженность и количество разрушений трубопроводов. Во время эксплуатации газонефтепроводные трубы работают в условиях, существенно отличающихся от работы других металлических конструкций [13]. Это обосновывается тем, что их эксплуатация происходит в районах с суровыми природно-климатическими условиями, при воздействии постоянных или циклических нагрузок, а также со скоплением большого количества упругой энергии сжатого газа. Запас внутренней упругой энергии магистрального газопровода возрастает с увеличением диаметра трубы и рабочего давления транспортируемого газа. Ввиду постоянно растущей длины трубопровода и рабочего давления разработка высокопрочных сталей вносит значительный вклад в снижение стоимости проекта трубопровода. Существует необходимость тесного сотрудничества между всеми вовлеченными сторонами для оптимизации трубопроводных проектов с точки зрения качества и стоимости [14].

Высокие требования к трубным сталям в отношении механических свойств и структуры, формирующей эти свойства, предъявляют с целью предупреждения разрушений трубопроводов. Эти требования сводятся к тому, что материал должен обладать хорошей вязкостью, иметь высокую прочность и спо-

собность сопротивляться хрупкому разрушению при температурах эксплуатации, иметь хорошую свариваемость и пластичность.

Сталь марки СтЗсп характеризуется уникальной свариваемостью (рис. 3), что обеспечивает большой диапазон технических характеристик, которые можно улучшить при помощи легирующих добавок. Свойства стали дают возможность применять дуговую сварку – автоматическую и ручную, сварку по контактно-точечной и электрошлаковой технологии. Важно для проведения всех сварочных работ, что сталь данной марки легко сваривается без подготовительных мероприятий – специальной подготовки, и изделия не требуют обработки после сварки.

Сталь данного типа является одной из самых востребованных в строительстве и промышленности. Малое количество в сплаве кислорода и однородная структура – это факторы, повышающие стойкость к образованию коррозии в агрессивных средах. Эти качества, а также большая пластичность делают данную сталь незаменимой при производстве конструкций, элементов, к которым предъявляются большие требования по жесткости. Это – прокат листовой и фасонный (швеллеры, двутавры и тавры, уголки), заготовки для арматуры, элементы трубопроводов (в частности, квадратные трубы) и пр. Характеристики стали дают возможность возводить из неё опорные несущие конструкции, каркасы, эксплуатация которых ведётся в сложных условиях. Из стали СтЗсп изготавливают элементы и детали без термообработки, что даёт возможность сохранить все характеристики сплава.

Таким образом, для внешнего потребителя наибольшее значение имеют эксплуатационные свойства материалов.

Не менее важной задачей для цеха по производству горячекатаного проката является удовлетворение требований внутреннего потребителя (рис. 4).



Рис. 3. Функциональные свойства стали СтЗсп для металлоизделий различного назначения

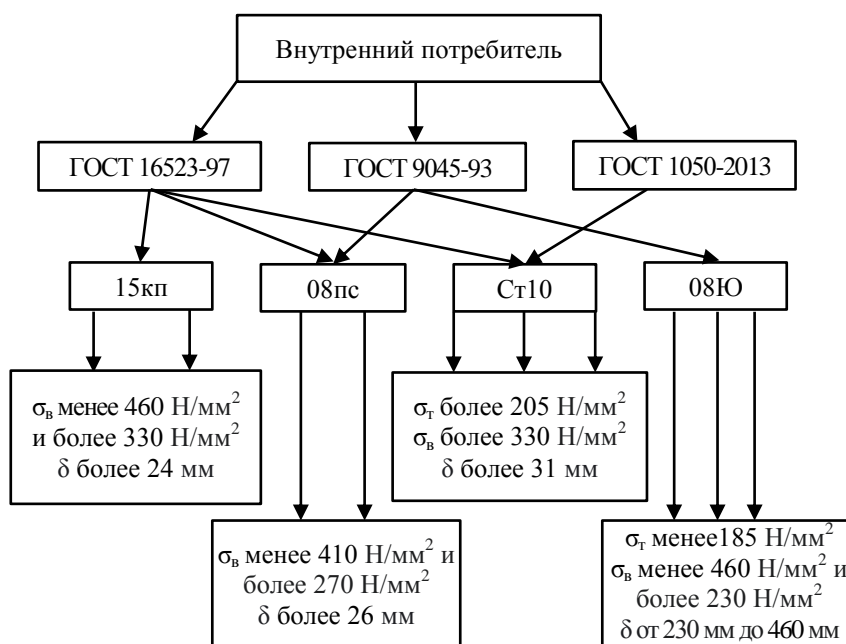


Рис. 4. Схема соответствия заданных механических свойств заказу внутреннего потребителя согласно требованиям стандартов

Для внутреннего потребителя на передний план выходит перерабатываемость горячекатаного проката на последующих пределах. Внутренние потребители – это цеха холодной прокатки, где происходит травление, прокатка, смотка полос в рулоны. Механические свойства должны обеспечить такой уровень механических свойств, который позволяет перерабатывать прокат с меньшим количеством брака.

Например, из стали ст10 изготавливаются детали, работающие при температуре до +450°С. К ним предъявляют требования высокой пластичности, после химико-термической обработки данной стали –

требования высокой поверхностной твердости при невысокой прочности сердцевины. Изготавливают из такой стали штамповки, поковки, трубопроводы котлов высокого давления и другие детали с довольно длительным сроком службы при высоких температурах, что обуславливает уровень требуемых свойств (рис. 5).

Из углеродистой качественной стали 15кп изготавливают, как правило, крепежные элементы, в которых требуется высокая твердость поверхности, а также детали, работающие в интервале температур от -40 до +425°С, обладающие высокой пластичностью (рис. 6).

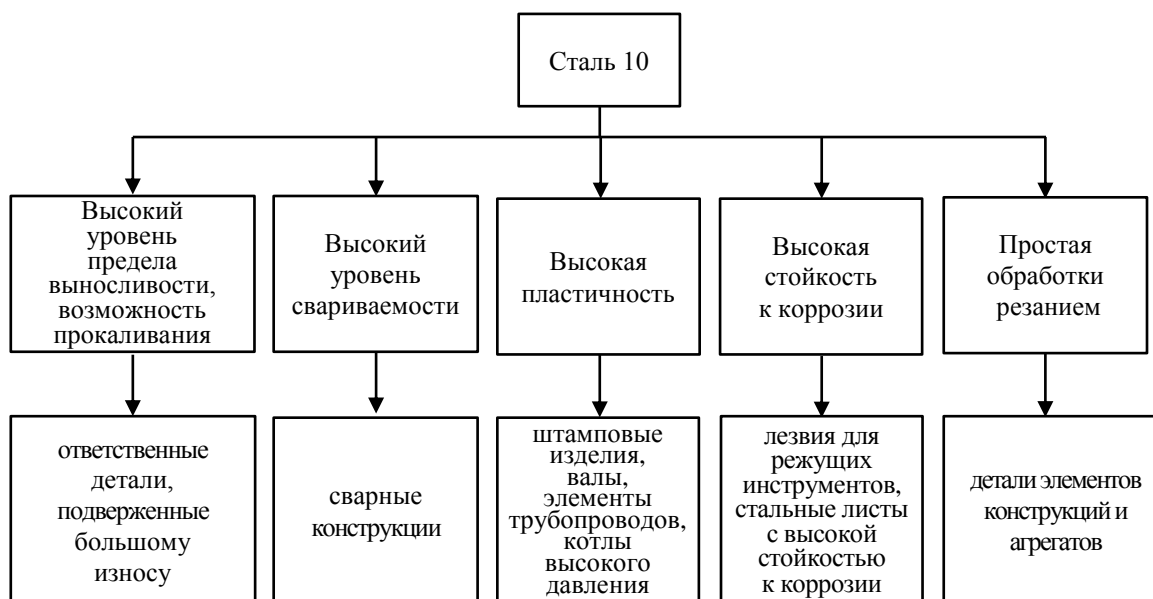


Рис. 5. Функциональные свойства стали 10 для металлоизделий различного назначения

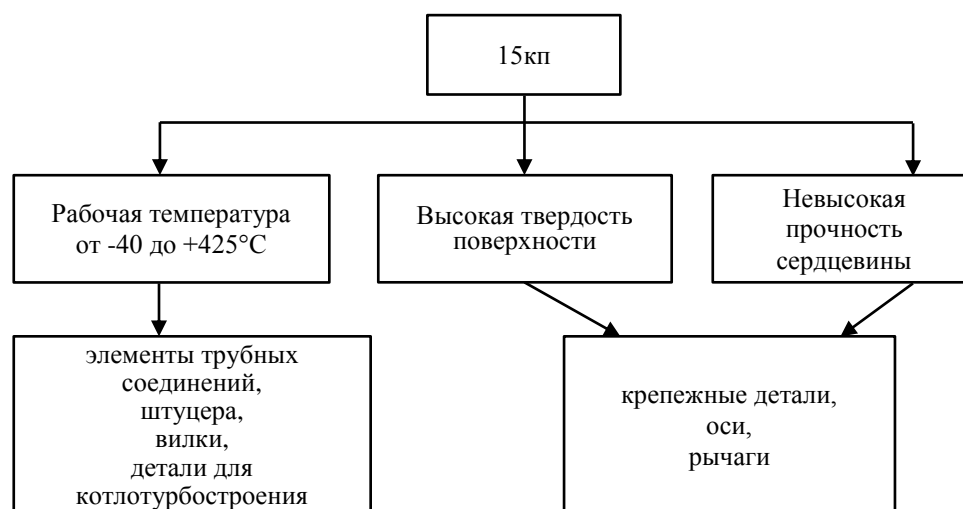


Рис. 6. Функциональные свойства стали 15кп для металлоизделий различного назначения

Марка стали 08пс обладает повышенной прочностью, отсутствует риск хрупкости при отпуске. Не имеет ограничений при проведении процесса сварки деталей, не требующего подогрева и дальнейшей температурной обработки. Перечисленные свойства имеют большое значение при эксплуатации изделий, изготовленных из нее, поскольку для создания данной продукции предусматривается обработка при высоких температурах и химически активными элементами. Поскольку эту марку используют для создания деталей высокой прочности при помощи холодной штамповки, она должна обладать хорошими вытяжными свойствами. Сталь 08пс представляет собой довольно прочный, твердый и надежный металл, способный выдержать достаточно большие нагрузки.

Для штамповки деталей со сложной или особо сложной вытяжкой используют сталь марки 08Ю. ГОСТ 9045-80, предъявляющий требования к механическим свойствам тонколистового холоднокатаного проката из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки, устанавливает уровень свойств и глубину сферической лунки при испытании на выдавливание. Сплав 08Ю содержит в своем составе алюминий, который, соединяясь с кислородом, уменьшает его негативное влияние, увеличивая прочность сплава.

Благодаря своим свойствам, сталь 08Ю имеет довольно широкую сферу применения. Из нее изготавливают детали электросварных труб и конструкций в машиностроительной сфере, детали для паяных свертных двухслойных труб, используемых в трубопроводах гидравлических систем сельскохозяйственной техники и автомобилей, холоднокатаную ленту для штамповки и гибки различных по назначению деталей, порошковой проволоки, для подшипников, труб и прочих элементов. Именно через передел холодного цеха данный сплав из цеха горячей прокатки попадает в дальнейший передел для вырубки и штамповки заготовки, вытяжки формы и ее конфигурирования для дальнейшего эмалирования. Для таких из-

делий сталь должна иметь высокую пластичность и теплопроводность, которые тем выше, чем меньше примесей в материале заготовки. Именно эти требования и определяют пригодность для последующих переделов.

Рассматривая основные потоки процесса производства стальных полос горячей прокаткой, определены наиболее важные для различных потребителей свойства. Комплекс этих свойств определяется функциями, которые выполняет продукт на выходе. С одной стороны, для внешнего потребителя важны будут заданные эксплуатационные свойства, с другой – перерабатываемость материала для внутреннего. Производство металлопродукции можно представить целой сетью взаимодействующих процессов. Определяя их входы и выходы, устанавливая конкретных потребителей каждого процесса, можно идентифицировать потребности внутренних и внешних и установить соответствие функций, выполняемых изделием, требуемому уровню свойств, заданному нормативной документацией.

#### Список литературы

1. Шлеер С., Меллор С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях: пер. с англ. Киев: Диалектика, 1993. 240 с.
2. Полякова М.А., Ширяева Е.Н., Налимова М.В. Системный анализ технологического процесса горячей прокатки стальной полосы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Выпуск 2. С 360–369.
3. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Принцип системности в стандартизации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1. С. 118–123.
4. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем // Современные

- технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4. С. 100–105.
5. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 63–68.
  6. Чукин М.В., Полякова М.А., Ширяева Е.Н. Разработка модели управления процессом горячей прокатки стальной полосы в условиях неопределенности информации // Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 6–9 сентября 2021 г., Москва - Звенигород / под общ. ред. Новикова Д.А.; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Минобрнауки России. Электрон. текстовые дан. (1 файл: 45 Мб). Москва : ИПУ РАН, 2021. 1 CD-R. Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Internet Explorer; Acrobat Reader 4.0 или выше. Загл. с титул. экрана. ISBN 978-5-91450-255-0. Текст : электронный.
  7. Хубка В. Теория технических систем: пер. с нем. М. : Мир, 1987. 208 с.
  8. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Анализ подходов к оценке надежности технических систем // Вестник современных технологий. 2019. № 3(15). С. 9–16.
  9. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Анализ подходов к оценке надежности технических систем. Современные материалы и технологии новых поколений // Сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса [под ред. А.Н. Яковлева]. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. С. 362–363.
  10. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 60–69.
  11. Ширяева Е.Н., Полякова М.А., Голубчик Э.М. Предпосылки выбора метода оценки надежности технологического процесса горячей прокатки // Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний: сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института. Рудный: Рудненский индустриальный институт, 2019. С. 596–604.
  12. Shiriaeva E.N., Polyakova M.A., Golubchik E.M. Prerequisites to Choose the Method for Dependability Assessment of Hot Rolling Process // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Vol. 55, No. 3. P. 681–686.
  13. Анушкин К.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1986.
  14. [https://www.researchgate.net/publication/268395143\\_DEVELOPMENT\\_AND\\_PRODUCTION\\_OF\\_HIGH\\_STRENGTH\\_PIPELINE\\_STEELS](https://www.researchgate.net/publication/268395143_DEVELOPMENT_AND_PRODUCTION_OF_HIGH_STRENGTH_PIPELINE_STEELS)

#### Сведения об авторах

**Ширяева Елена Николаевна** – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [e.shyraeva@mail.ru](mailto:e.shyraeva@mail.ru). ORCID 0000-0002-4505-3873

**Полякова Марина Андреевна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [m.polyakova@magtu.ru](mailto:m.polyakova@magtu.ru). ORCID 0000-0002-1597-8867

---



---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---



---

#### FEATURES OF THE REQUIREMENTS INTERNAL AND EXTERNAL CONSUMERS TO PROPERTIES HOT ROLLED STEEL PRODUCTS

**Shiriaeva Elena N.** – Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [e.shyraeva@mail.ru](mailto:e.shyraeva@mail.ru). ORCID 0000-0002-4505-3873

**Polyakova Marina A.** – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [m.polyakova@magtu.ru](mailto:m.polyakova@magtu.ru). ORCID 0000-0002-1597-8867

**Abstract.** The article presents the main flows of finished products of the sheet rolling shop in the structure of a full-cycle metallurgical enterprise. On the example of the technology of production of steel strips by hot rolling, the dependence of the specified mechanical properties on the order of external and internal consumers according to the requirements of the standards is shown. The importance of identifying the needs of both external and internal consumers is noted. The features of the use of certain steel grades for the needs of specific industries and their functional properties for metal products of various applications are considered. The characteristics of the specified mechanical properties ac-



ording to the requirements of the standards are given. The dependence of the complex of properties on the real needs of external and internal consumers for further design of the technological process is shown. This becomes particularly relevant for the production of metal products that have a deep degree of processing, as well as related to the final processing of the industry.

**Key words:** hot rolling, technological system, external consumers, internal consumers, mechanical properties

---

Ссылка на статью:

Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности требований внутреннего и внешнего потребителей к свойствам горячекатаного стального проката // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 19-25.

Shiriaeva E.N., Polyakova M.A. Features of the requirements internal and external consumers to properties hot rolled steel products. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 19-25.

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.746.464.011

Булитко Е.В., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Чернов В.П., Зарицкий Б.Б.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ НА ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ «ОТЛИВКА-ФОРМА»

**Аннотация.** Одним из важнейших вопросов получения качественного литья является организация эффективного питания отливки. Чтобы исключить возможность появления усадочных дефектов в теле отливки, необходимо грамотно установить прибыли в местах, являющихся местом концентрации усадочных дефектов. В настоящее время актуальной задачей является использование экзотермических вставок с целью уменьшения металлоемкости формы за счет уменьшения прибыли, без потери качественного питания отливки. Такое решение улучшает процесс производства отливок и уменьшает контактную поверхность прибыли с отливкой, устранение которой после извлечения отливки требует затрат денежных средств. В статье рассмотрено влияние теплового состояния экзотермической вставки на тепловое поле системы «отливка-форма». Произведено математическое моделирование по известной методике конечных разностей. Показан алгоритм расчета к применению конкретной модели экзотермической вставки, который позволяет уменьшить проблемы усадки и улучшить качество литых изделий на металлургическом предприятии ООО «МРК». Также разработан математический аппарат, позволяющий рассчитать температурные поля при применении экзотермических вставок. Рассмотрен вопрос о влиянии размеров прибыли на время ее полного затвердевания и возможность питания отливки. Выявлено, что уменьшение размеров диаметра прибыли в 3 раза позволяет качественно питать отливку.

**Ключевые слова:** экзотермическая вставка, тепловое поле, математическое моделирование, система «отливка-форма», метод конечных разностей, оболочка, литье, усадка.

## Введение

Основной задачей любого производства является повышение качества продукции, что невозможно без совершенствования технологии и оборудования, максимальной механизации и автоматизации всех технологических процессов. В условиях рыночной экономики рентабельность литейных предприятий напрямую связана со снижением себестоимости продукции: снижение материалоемкости и трудоемкости изготовления отливок; экономия топливно-энергетических ресурсов; применение малоотходных и безотходных технологий; механизация и автоматизация технологических операций; увеличение технологического выхода годного.

Одним из важнейших вопросов получения качественного литья является организация эффективного питания отливки, а также грамотно подобранная установка прибыли в местах, являющихся местом концентрации усадочных дефектов.

Однако чем больше объем прибыли, тем больше металлоемкость литейной формы и, как следствие увеличение стоимости конечной продукции. В настоящее время актуальной задачей является использование экзотермических вставок с целью уменьшения металлоемкости формы за счет уменьшения прибыли, без потери качественного питания отливки. Такое решение улучшает процесс производства отливок и уменьшает контактную поверхность прибыли с отливкой, устранение которой после извлечения отливки требует затрат денежных средств.

Для повышения эффективности работы литейных прибылей и снижения их массы применяют экзотермические оболочки (вставки), которые в результате горения увеличивают время питания отливки и уменьшают объем питаемой прибыли.

Экзотермические оболочки бывают различных форм [1]:

- закрытые (колпачковые) цилиндрические оболочки;
- открытые цилиндрические серии, овальные и конусообразные;
- компактные точечные оболочки;
- специальные (могут иметь форму шара);
- изоляционные сегментированные маты;
- экзотермические порошки и таблетки.

Наиболее важными характеристиками оболочек являются постоянство термических и изоляционных характеристик, а также стабильность геометрических и прочностных характеристик.

Чтобы понять целесообразность применения экзотермических вставок, необходимо провести математический расчет теплового взаимодействия прибыли с формой.

В настоящее время существуют различные методы расчёта систем взаимодействия «отливка-форма», основанные на численном решении задач теплопроводности, позволяющие с высокой точностью оценить динамику тепловых процессов в различных металлургических системах.

Одним из таких методов является метод конечных разностей (МКР), целесообразность которого подтверждена различными источниками [2-4]. При применении метода МКР возникает вопрос учёта тепла, выделяющегося при сгорании экзотермической вставки.

**Теоретическая часть**

Рассмотрим открытую экзотермическую вставку с толщиной стенки  $\delta$ . Величина её наружного и внутреннего диаметров равны  $D$  и  $d$  соответственно. В соответствии с принципами метода МКР разобьём стенку экзотермической вставки (ЭВ) на ряд слоев  $i=1, \dots, N$ . Величина слоя между границами  $i$  и  $i+1$  равна  $h$ , как показано на рис. 1.

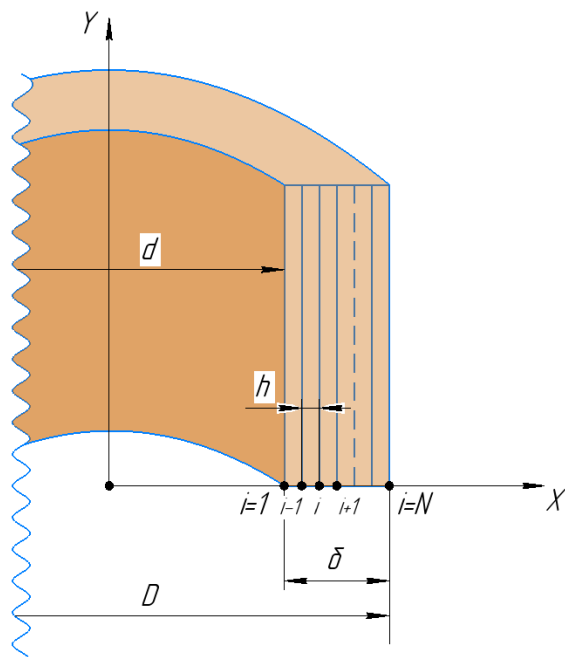


Рис. 1. Открытая экзотермическая вставка

Пусть элементарный слой толщиной  $h$ , расположенный между границами  $i$  и  $i+1$ , при сгорании выделяет тепло, равное  $Q_{сг}$ .

Количество данного тепла можно определить как

$$Q_{сг} = m_{эл} \cdot W_{сг}, \quad (1)$$

где  $m_{эл}$  – масса элементарного слоя, расположенного между границами  $i$  и  $i+1$ , кг;  $W_{сг}$  – удельная теплота сгорания материала экзотермической вставки (ЭВ), Дж/кг.

Приняв в первом приближении, что всё выделившееся тепло уйдет на нагрев элементарного слоя массой  $m_{эл}$ , температуру слоя  $T_{кон}$  количественно можно определить из следующего выражения:

$$Q_{сг} = m_{эл} \cdot c \cdot (T_{кон} - T_{сг}), \quad (2)$$

где  $c$  – теплоемкость экзотермической вставки, Дж/кг·°C;  $T_{сг}$  – температура возгорания материала экзотермической вставки, °C.

Учитывая, что теплота сгорания расходуется на нагрев системы, составим равенство выражений (1) и (2). Получим

$$m_{эл} \cdot W_{сг} = m_{эл} \cdot c \cdot (T_{кон} - T_{сг}), \quad (3)$$

откуда

$$T_{кон} = \frac{W_{сг}}{c} + T_{сг}. \quad (4)$$

Слагаемое выражения (4)  $W_{сг}$  является величиной добавочной температуры, которая может быть прибавлена к текущей температуре экзотермической вставки, определенной методом МКР. То есть

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{W_{сг}}{c}, \quad (5)$$

где  $T_i^{k+1}$ ,  $T_i^k$  – температура  $i$ -й границы экзотермической вставки в предыдущий и текущий момент времени соответственно, °C.

**Практическая часть**

Рассмотрим влияние экзотермической вставки на тепловое поле прибыли отливки «Рамка» (рис. 2), изготовленной на предприятии ПАО «ММК», ООО «МРК».

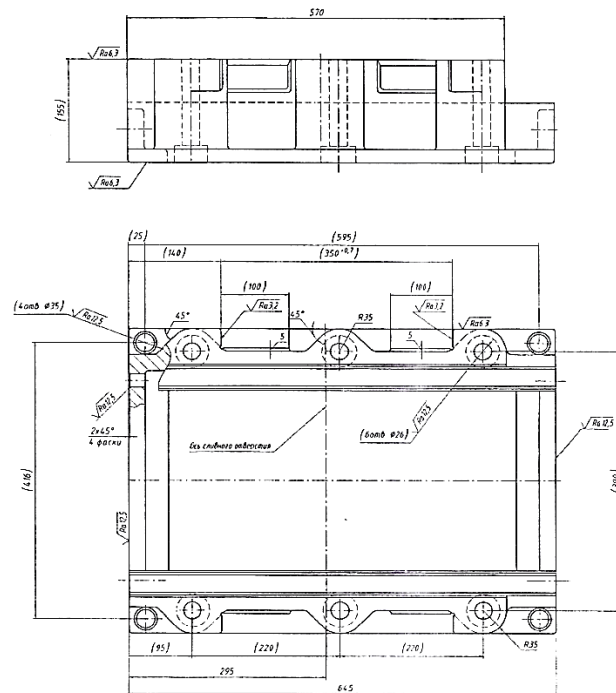


Рис. 2. Чертеж отливки «Рамка»

Материал отливки Ст 35Л ГОСТ 977-88. Масса отливки равна 120 кг. Для ее изготовления на предприятии используют шесть цилиндрических прибылей открытого типа диаметром  $D = 150$  мм. При производстве отливки используют холодно-твердеющую смесь (ХТС). В расчетах теплопроводность отливки принималась равной  $\lambda = 28$  Вт/(м·град), теплоёмкость  $c = 699$  Дж/(кг·град), плотность  $\rho = 7,8$  т/м<sup>3</sup>, температура заливки  $T_{зал} = 1580$ °C, интервал затвердевания 1530–1460°С, теплота кристаллизации  $Q_{кр} = 80000$  Дж/кг. При расчете использовали данные о экзотермической вставке модели FT500-A70/100СХ фирмы ООО «Огнеупор-

Комплект-НТ», г. Нижний Тагил. Толщина стенки экзотермической вставки составляет  $\delta = 21$  мм, теплопроводность равна  $\lambda = 1$  Вт/(м·град), теплоёмкость  $c = 800$  Дж/(кг·град), плотность  $\rho = 0,6$  т/м<sup>3</sup>, температура начала реакции составляет  $T_{\text{возг}} = 900^\circ\text{C}$ , время протекания экзотермической реакции составляет от 50 до 240 с. Схема расчета представлена на рис. 3.

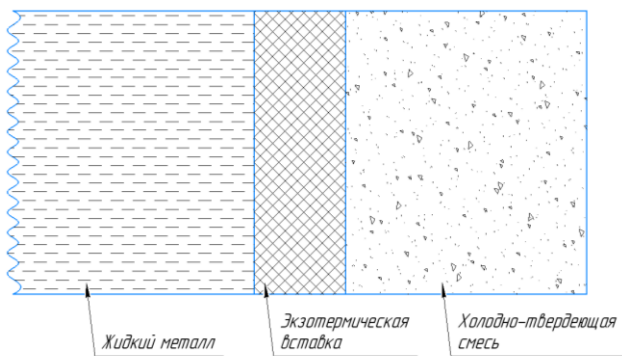


Рис. 3. Схема к расчету экзотермической вставки

Расчёт производили методом МКР, детально описанном в источнике [3]. Теплоту кристаллизации учитывали по методике, описанной в источниках [5, 6]. Как видно из рис. 3 время затвердевания центра отливки составляет 367 с. Исходя из производственных данных, выдержка в течение этого времени полностью обеспечивает питание при затвердевании стенки отливки. Кривая 2 отображает температуру металла на границе «отливка-форма». На рисунке видно, что после первоначального охлаждения периферийных слоёв металла идёт его последующий нагрев. Этим объясняется зубец, полученный на графике (рис. 4).

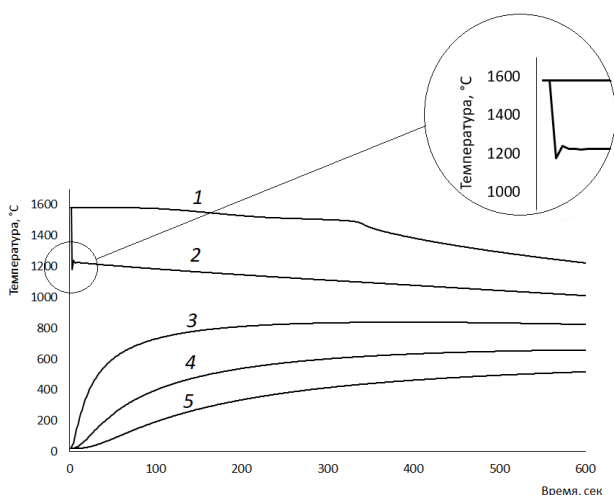


Рис. 4. Тепловое поле системы «отливка-форма»: 1 – температура центра; 2 – температура границы «металл-форма»; 3 – 5 мм от температуры границы; 4 – 10 мм от температуры границы; 5 – 15 мм от температуры границы

Результаты расчета динамики затвердевания, а также теплового поля системы «отливка-форма» без экзотермической вставки представлены на рис. 4.

На рис. 5 отображена динамика охлаждения и затвердевания центра прибыли с учетом теплового воздействия экзотермической вставки и без неё. Как видно из рис. 5, время затвердевания с применением экзотермической вставки возросло с 367 до 1133 с, что, как следствие, позволяет уменьшить объём используемой прибыли.

Рассмотрим изменение кривых затвердевания центра прибыли при изменении её диаметра с 150 до 50 мм (рис. 6).

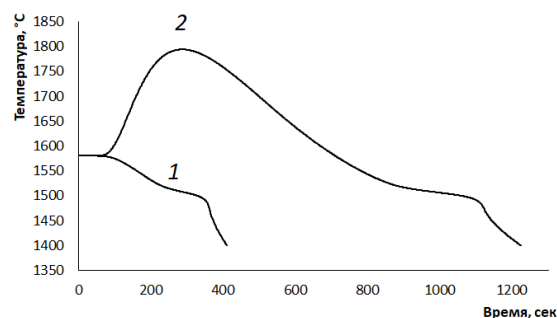


Рис. 5. Кривые затвердевания в системе «отливка-форма»:

1 – температура центра без экзотермической оболочки; 2 – температура центра с экзотермической оболочкой модели FT500-A70/100CX

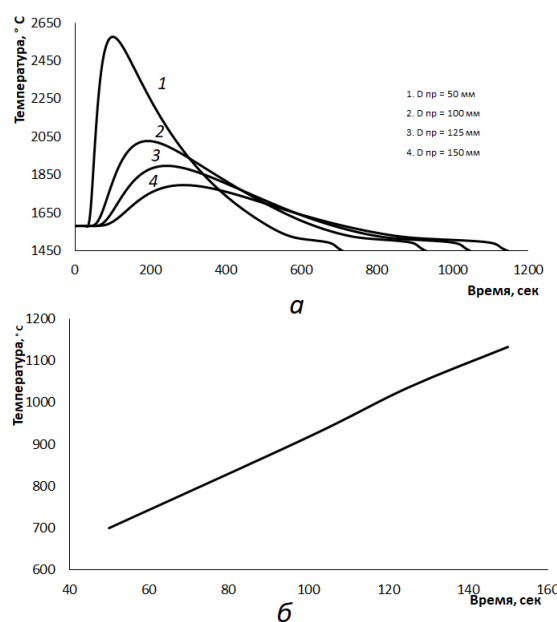


Рис. 6. Влияние размеров прибыли с экзотермической вставкой толщиной 21 мм на динамику охлаждения и время её затвердевания:

а – динамика охлаждения центра прибыли; б – время затвердевания центра прибыли при её охлаждении

На рис. 6, а отображены кривые охлаждения и затвердевания центра прибыли различных диаметров.

Как видно из рисунка, наибольший перегрев имеет прибыль наименьшей металлоемкости. Это объясняется тем, что толщина стенки экзотермической вставки остаётся неизменной. Поэтому количество тепла, отданное в тело прибыли, значительно увеличивает её температуру. Между тем скорость охлаждения прибыли с диаметром 50 мм значительно выше прибылей с другим типоразмером. Как следствие, время затвердевания центра прибыли меньше, что и видно на рис. 6, а.

Исходя из полученных данных (рис. 6.б), время затвердевания даже трёхкратно уменьшенного размера диаметра прибыли больше, чем время затвердевания прибыли без экзотермической вставки, что в первом приближении позволяет говорить о значительном уменьшении металлоемкости прибыли. Экстремальное значение перегрева металла в прибыли, а также зависимость, представленная на рис. 6, б, говорит о том, что толщина стенки экзотермической вставки 21 мм избыточна, и, как следствие, для данных прибылей можно уменьшить толщину стенки экзотермической вставки, а следовательно, уменьшить её стоимость. Основываясь на расчетах прибыли без экзотермической вставки, гарантированное время затвердевания отливки составляет 367 с. Представляет интерес, какова температура металла на границе «прибыль–экзотермическая вставка» в зависимости от размера прибыли (рис. 7).

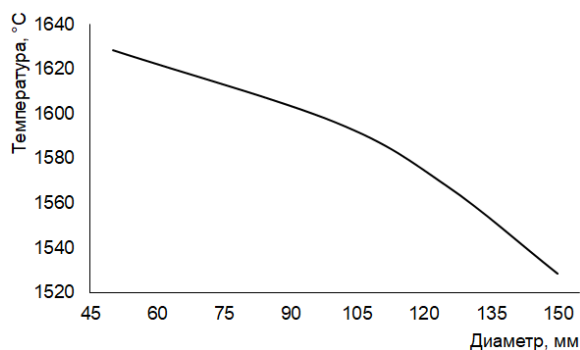


Рис. 7. Влияние размеров прибыли на температуру граничных слоёв металла через 367 с после заливки

Как видно из данного графика, в момент полного затвердевания тепловых узлов отливки её граница находится в жидком состоянии, а следовательно, питание отливки будет обеспечено.

Таким образом, разработан математический аппарат, позволяющий рассчитать температурные поля при применении экзотермических вставок.

Рассмотрен вопрос о влиянии размеров прибыли на время ее полного затвердевания и возможность питания отливки.

Выявлено, что уменьшение размеров диаметра прибыли в 3 раза позволяет качественно питать отливку.

Предложенный математический аппарат не учитывает скорость горения материала, а также качественное распределение тепла, выделяющегося при сгорании экзотермической вставки.

### Список литературы

1. Интернет-ресурс: <https://uralresources.ru/shell>
2. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
4. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.
5. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
6. Температурные поля системы отливка–литейная форма в условиях неравновесной кристаллизации комплекснолегированных сплавов / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Синицкий, А.С. Савинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 28–31.

### Сведения об авторах

**Булитко Елена Викторовна** – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, группа МТа-18-3, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: lena94-ne@mail.ru

**Савинов Александр Сергеевич** – заведующий кафедрой механики, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.savinov@magtu.ru

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

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

**Зарицкий Борис Борисович** – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Zaritskii.Boris.Borisovich@yandex.ru

---

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE EXOTHERMAL INSERT ON THE HEAT FIELD OF THE "CAST-FORM" SYSTEM**

**Bulitko Elena V.** – Post-graduate student of the Department of Foundry Processes and Materials Science, group MTa-18-3, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lena94-ne@mail.ru

**Savinov Alexander S.** – Head of the Department of Mechanics, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.savinov@magtu.ru

**Feoktistov Nikolay A.** – Head of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.feoktistov@vuz.magtu.ru

**Chernov Victor P.** – Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov@magtu.ru

**Zaritsky Boris B.** – Senior Lecturer, Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Zaritskii.Boris.Borisovich@yandex.ru

**Abstract.** One of the most important issues in obtaining high-quality casting is the organization of effective feeding of the casting. To exclude the possibility of the appearance of shrinkage defects in the body of the casting, it is necessary to correctly establish the profits in places that are the place of concentration of shrinkage defects. Currently, an urgent task is the use of exothermic inserts in order to reduce the metal consumption of the mold, by reducing profits, without losing high-quality feeding of the casting. This solution improves the production process of castings and reduces the contact surface of the head with the casting, the elimination of which after the removal of the casting costs money. The article deals with the influence of the thermal state of the exothermic insert on the thermal field of the "casting-mold" system. Mathematical modeling was carried out using the well-known finite difference technique. The calculation algorithm for the application of a specific model of the exothermic insert is shown, which allows to reduce the problems of shrinkage and improve the quality of cast products at the metallurgical enterprise MRK LLC. Also, a mathematical apparatus has been developed that allows you to calculate the temperature fields when using exothermic inserts. The question of the influence of the size of the profit on the time of its complete solidification and the possibility of feeding the casting is considered. It was revealed that a 3-fold reduction in the diameter of the head allows for high-quality feeding of the casting.

**Key words:** Exothermic insert, thermal field, mathematical modeling, casting-mold system, finite difference method, shell, casting, shrinkage.

---

Ссылка на статью:

Оценка влияния экзотермической вставки на тепловое поле системы «отливка-форма» / Булитко Е.В., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Чернов В.П., Зарицкий Б.Б. // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 26-30.

Bulitko E.V., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Chernov V.P., Zaritsky B.B. Evaluation of the influence of the exothermal insert on the heat field of the "cast-form" system. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 26-30.

## 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)