

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 3 (58) 2026

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

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

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

Члены ред. совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Научный редактор:

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

Технический редактор:

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

К.И. Рудь

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2026

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: TTaPEoMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Адрес типографии:

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

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,

пр. К. Маркса, 45/2,

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Выход в свет 30.09.2026. Заказ 312. Тираж 500 экз.

Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 3 (58) 2026

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. Ostrovski – 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,
Jabalpur, 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”, 2026

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

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

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

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.
E-mail: TTAPEoMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Printing office:

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

Editorial office:

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

Publication date 30.09.2026. Order 312. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ

И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....4

Харченко А.С., Сибэгатуллин С.К., Бигеев В.А., Паймушкин П.Г., Лаговская Е.В., Багомедова У.М.
**ДЕЙСТВИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИЗ АССОЦИАЦИЙ МИНЕРАЛОВ
СПЛОШНЫХ РУД ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НА ИХ СОДЕРЖАНИЕ В ПРОДУКЦИИ.....4**

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....10

Феоктистов Н.А., Савинов А.С.
**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАФИТА
НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ10**

Волков С.Ю., Колокольцев В.М., Потапов М.Г., Чернов В.П.
**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ
НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА (СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ
СПЛАВОВ): УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ «СОСТАВ — СТРУКТУРА — СВОЙСТВО» (часть 1)
.....15**

Ровин С.Л., Лежнев С.Н.
**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ
ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ
ДЛЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....22**

Абашенков И.И., Уртаев Д.А.
**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
LVMflow 6.65 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ
ДАВЛЕНИЕМ В ФГУП «НАМИ».....29**

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И.,
Субботин А.Ю., Шиляев А.А.
**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ АВТОШИН В КАЧЕСТВЕ
КАРБИУРИЗАТОРА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА 35**

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А.
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГД-УСТРОЙСТВА
В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ АГРЕГАТА ЛПА-АК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ СЛИТКА ИЗ
СПЛАВА АЛЮМИНИЯ А5Е.....41**

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....47

Шитов М.В., Соловьев А.Г., Румянцев М.И.
**УНИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ
В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ ПСГП
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОКОВОГО ОБЖАТИЯ СЛЯБОВ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ
ВАЛКАМИ.....47**

ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ

К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ.....56

Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Абдулгазина Н.М., Крюкова Е.Д., Топоркова А.Е., Сапрыкина П.И., Муллина Д.Д.
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО
ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ
ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ.....56**

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS

Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Bigeev V.A.,
Paimushkin P.G., Lagovskaya E.V., Bagomedova U.M.
**EFFECT OF SELECTIVE EXTRACTION
OF COMPONENTS FROM ASSOCIATIONS
OF MINERALS IN CONTINUOUS ORE
OF THE TALNAKH DEPOSIT ON THEIR
CONTENT IN THE PRODUCT**

FOUNDRY

Feoktistov N.A., Savinov A.S.

Volkov S.Yu., Kolokoltsev V.M., Potapov M.G.,
Chernov V.P.
**EFFECT OF ALLOYING ON THE WEAR
RESISTANCE OF BINARY IRON-BASED ALLOYS**

**(CASTING ALLOYS SYNTHESIS):
ESTABLISHMENT OF "COMPOSITION —
STRUCTURE — PROPERTY" REGULARITIES
(part 1)**

Rovin S.L., Lezhnev S.N.

**INVESTIGATION AND OPTIMIZATION
OF THE COMPOSITION OF SELF-REDUCING
IRON-BEARING BRIQUETTES
FOR FERROALLOY PRODUCTION**

Abashchenkov I.I., Urtaev D.A.

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Ryabova L.I.,
Subbotin A.Yu., Shilyaev A.A.

**THERMODYNAMIC PREREQUISITES
FOR USING WASTE TYRES
AS A CARBURIZER IN THE MELTING
OF SYNTHETIC IRON**

Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A.
**USE OF AN MHD DEVICE IN A ROTARY
CASTER OF AN LPA-AK UNIT TO IMPROVE
THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM
ALLOY A5E**

PROCESSING OF METALS BY PRESSURE

Shitov M.V., Solov'ev A.G., Rumyantsev M.I.
**UNIFICATION OF DEFORMATION
MODES IN THE HSM ROUGHING GROUP
TO INCREASE EFFICIENCY
OF SLABS WIDTH REDUCTION
BY VERTICAL ROLLS**

**PREPARATION OF RAW MATERIALS
FOR METALLURGICAL PRODUCTION**

Mishurina O.A., Mullina E.R., Abdulgazina N.M.,
Kryukova E.D., Toporkova A.E., Saprykina P.I.,
Mullina D.D.

**TECHNOLOGICAL ASPECTS
OF THE HYDROMETALLURGICAL PROCESS
FOR THE SELECTIVE RECOVERY OF METALS
FROM SULFURIC ACID SOLUTIONS**

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.046:338

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-4-9)

Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Бигеев В.А., Паймушкин П.Г., Лаговская Е.В., Багомедова У.М.

ДЕЙСТВИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИЗ АССОЦИАЦИЙ МИНЕРАЛОВ СПЛОШНЫХ РУД ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ИХ СОДЕРЖАНИЕ В ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Медно-никелевые руды Талнахского месторождения совместно содержат Cu, Ni, Fe, S, ряд других элементов и вмещающую породу. Селективное выделение концентратов с различными рудными ассоциациями особенно важно при расширении использования вкрапленных руд.

Ключевые слова: никель, медь, железо, сера, штейн, файнштейн, рудная ассоциация, концентрат, шлак

Введение

Селективное извлечение элементов из комплексных руд относится к важным направлениям развития экономики России [1-4]. Медно-никелевые руды Талнахского месторождения совместно содержат Cu, Ni, Fe, S, ряд других элементов и вмещающую породу [5, 6]. Индивидуальность области их применения обуславливает необходимость селективного извлечения [7]. Это повышает рентабельность процесса переработки руд как за счёт комплексности, так и за счёт использования некоторых материалов в осуществлении технологии производства медной и никелевой продукции [8-10]. Проводится ряд исследований в этом направлении.

Выявлены минералого-геохимические особенности Талнахского интрузива [11, 12]. Показаны добыча и обогащение руд [10], изменение в широких пределах содержания элементов в выплавляемых штейнах, обусловленных содержанием их в концентратах [13]. Возрастание содержания целевого компонента в медном и никелевом штейнах с обеспечением процесса теплом при оптимальном температурном режиме достигается предварительным обжигом концентратов, окислением сульфидной серы и железа кислородом, переводя их в газовую фазу и шлак и превращая их последующим конвертированием в фальштейны [13-17].

Изложены основные теоретические положения пирометаллургических и гидрометаллургических процессов, реализуемых при производстве цветных металлов. Приведены основные зависимости и расчетные формулы, позволяющие проводить анализ термодинамической вероятности протекания процессов, а также определять их кинетические характеристики [7, 8]. Рассмотрены различные подходы к выбору критериев оценки при разработке тех или иных конструкций головных агрегатов в

ретроспективе и в настоящее время. Приведены примеры использования нового, современного инструмента – SWOT-анализа для выбора технологии плавки сульфидного медного-никелевого сырья с учетом постоянно действующих и изменчивых критериев [9]. В качестве одного из возможных способов восполнения ресурсной базы рассмотрено вовлечение в эксплуатацию техногенных отходов и приведены примеры рециклинга отвальных продуктов металлургического и обогащательного переделов, уже используемые в Заполярном филиале ГМК «Норильский никель» [14]. Выполнено численное моделирование аэродинамических характеристик печи взвешенной плавки с использованием CFD-методов и проведены модельные расчеты двух вариантов конструкции элемента распылителя шихты – распылительного кольца, а также четырех режимов работы горелок [15]. Проанализирована переработка низкоавтогенного сырья, приводящая к существенному изменению теплового режима плавки во взвешенном состоянии и в барботируемом слое [16]. На основе многолетней практики установлено кондиционное содержание серы в смеси концентратов, поступающих на плавку в пределах абс. 25-30%, в зависимости от состава и свойств шихты, используемой при производстве штейна [16-18]. Это послужило основанием для продолжения исследований расчётной оценкой действия селективного извлечения компонентов из ассоциаций минералам (АМ) сплошных руд на их содержание в продукции.

Условия

Талнахское месторождение руд имеет компоненты химического состава, измеряемые в массовых процентах и в г/т [19].

Пример составляющих руды рудника «Октябрьский»:

мас. %:	Ni	Cu	Co	S _{общ}
богатая	1,99	2,99	0,095	22,2
вкрапленная	0,38	0,909	0,0213	4,88
г/т:	Pt	Pd	Rh	Ru
богатая	0,926	5,38	0,259	0,086
вкрапленная	0,42	1,53	0,034	0,009

SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe					
18,1	2,46	3,31	5,79	35,3					
31,1	17,6	10,5	9,15	12,4					
Ir	Os	Au	Ar	Pb	Zn	As			
0,025	0,02	0,212	5,08	16,2	127	<50			
0,036		0,163	3,11						

Рассмотрели четыре вида ассоциаций минералов сплошных руд из выявленных в национальном исследовательском Томском государственном университете (НИ ТГУ) под руководством Зыряновой Л.А. [6; 12]:

а) сплошная халькопиритовая: халькопирит = 60-65%, пентландит = 15-20%, магнетит = 15-20%;

б) сплошная халькопирит-пентландитовая: халькопирит = 45-50%, пентландит = 20-25%, кубанит = 10-15%, пирротин = 10-15%, магнетит = 5-10%;

в) сплошная кубанит-халькопиритовая: кубанит = 40-45%, халькопирит = 35-40%, пентландит = 5-10%, магнетит = 5%;

г) сплошная пирротиновая: пирротин = 55-60%, халькопирит = 15-20%, магнетит = 15-20%, пентландит = 5-10%.

Их среднее содержание и теоретическая кристаллохимическая формула следующие:

а) сплошная халькопиритовая (X): халькопирит $\text{CuFeS}_2=62,5\%$, пентландит $(\text{FeNi})_9\text{S}_8=17,5\%$, магнетит $\text{FeFe}_2\text{O}_4=17,5\%$;

б) сплошная халькопирит-пентландитовая (ХП): халькопирит $\text{CuFeS}_2=47,5\%$, пентландит $(\text{FeNi})_9\text{S}_8=22,5\%$, кубанит $\text{CuFe}_2\text{S}_3=12,5\%$, пирротин $\text{FeS}=12,5\%$, магнетит $\text{FeFe}_2\text{O}_4=7,5\%$;

в) сплошная кубанит-халькопиритовая (КХ): халькопирит $\text{CuFeS}_2=37,5\%$, пентландит $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8=7,5\%$, кубанит $\text{CuFe}_2\text{S}_3=42,5\%$, магнетит $\text{FeFe}_2\text{O}_4=5\%$;

г) сплошная пирротиновая (П): халькопирит $\text{CuFeS}_2=17,5\%$, пентландит $(\text{FeNi})_9\text{S}_8=7,5\%$, пирротин $\text{FeS}=57,5\%$, магнетит $\text{FeFe}_2\text{O}_4=5\%$.

Результаты

Расчётное содержание Fe, Ni, Cu и S в рудах, концентратах и после полного извлечения при содержании рассмотренных ассоциаций минералов (АМ) в них 50, 60, 70, 80, 90 и 100% представлено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание Fe, Ni, Cu и S в продукции, характеризующей различными условиями

Вид элемента и ассоциации минералов		Содержание ассоциации минералов в среде вмещающей породы, %					
		50	60	70	80	90	100
Fe:	X	19,29	23,15	27,00	30,86	34,72	38,58
	XП	20,91	25,09	29,28	33,46	37,64	41,82
	KX	17,76	21,32	24,87	28,42	31,97	35,53
	П	24,24	29,09	33,94	38,78	43,63	48,48
Ni:	X	3,60	4,32	5,04	5,76	6,48	7,20
	XП	4,63	5,55	6,48	7,40	8,33	9,25
	KX	1,54	1,85	2,16	2,47	2,78	3,11
	П	1,54	1,85	2,16	2,47	2,78	3,11
Cu:	X	10,81	12,98	15,14	17,30	19,47	21,63
	XП	9,68	11,62	13,55	15,49	17,42	19,36
	KX	11,46	13,75	16,04	18,33	20,63	22,92

	П	3,03	3,63	4,24	4,84	5,45	6,06
S:	X	12,63	15,16	17,69	20,21	22,74	25,27
	ХП	12,72	15,27	17,81	20,36	22,90	25,45
	KX	14,80	17,76	20,72	23,68	26,63	29,59
	П	17,74	21,29	24,83	28,38	31,93	35,48

Наиболее высокое содержание никеля в продукции обеспечивает халькопирит-пентландитовая ассоциация. Удаление 1% вмещающей породы из руды этого вида в процессе обогащения повышает содержание никеля на 0,92%. Высокая степень обогащения одновременно придаёт автогенность процессу производства штейна в результате роста содержаний серы и железа, окисляющихся при выплавке штейна с выделением тепла, уменьшения затрат тепла на нагрев вмещающей породы.

Селективное извлечение общего железа позволяет осуществить малотоннажную выплавку чугуна и стали для производства расходных материалов и деталей: шаров мельниц обогатительных фабрик, восстановителей (включая чугун) для ликвидации тугоплавкого промежуточного слоя, образующегося в печах барботажного типа [20], зубьев экскаваторов и др.

Наиболее высокому содержанию меди соответствует кубанит-халькопиритовая ассоциация. Удаление 1% вмещающей породы из руды этого вида в процессе обогащения повышает содержание меди на 2,29%. Этой же ассоциации принадлежит максимум содержания серы, что положительно для автогенности процесса. Дополнительно в этом участвует железо в сульфидном состоянии.

Максимальным количествам поступающих железа и серы соответствует пирротиновая ассоциация. Эти элементы участвуют в обеспечении автогенности процесса. Железо, кроме этого, позволяет создавать экономичные металлургические и машиностроительные малые предприятия в заполярном филиале ГМК «Норильский никель» с использованием отходов различного производства, накопленного металлолома, в том числе конверсионного, характеризующиеся быстрой окупаемостью, ориентированной на местные условия, гибкостью в производстве разнообразной малотоннажной продукции с использованием передовых технологий. Такие предприятия снижают ресурсозависимость за счёт использования местного сырья, отходов и лома, одновременно обеспечивая экологический эффект. Одним из вариантов продвижения в этом направлении может являться дооснащение обогатительной фабрики магнитными и флотационными сепараторами, позволяющими извлекать в отдельный поток магнетитовое железо из исходной руды и общее железо из хвостов.

Пример составляющих компонентов в фактическом концентрате основной никелевой флотации [19]:

мас. %: Ni Cu Co $S_{\text{общ}}$ SiO_2 MgO CaO Al_2O_3 Fe

г/т:	3,99	0,64	0,17	26,81	9,73	2,40	2,20	2,99	43,0
	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag	
	2,44	2,01	0,531	0,159	0,05	0,03	0,289	6,38	

Пример составляющих компонентов в хвостах основной никелевой флотации [18]:

мас. %:	Ni	Cu	Co	S _{общ}	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe
	1,01	0,27	0,04	25,09	13,68	3,26	3,30	4,31	41,9
г/т:	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag	
	0,53	2,06	0,387	0,111	0,037	0,017	0,092	1,73	

Расчётное содержание Fe, Ni, Cu и S в продукциях после полного извлечения серы при содержании рассмотренных ассоциаций минералов в них 50, 60, 70, 80, 90 и 100% представлено в табл. 2.

Таблица 2

Содержание Fe, Ni, Cu в продукции, характеризующейся различными условиями

Вид элемента и ассоциации минералов	Содержание ассоциации минералов в среде вмещающей породы, %					
	50	60	70	80	90	100
Fe:						
X	22,08	27,29	32,80	38,68	44,94	51,92
ХП	23,97	29,61	35,62	42,01	48,82	56,10
КХ	20,85	25,92	31,37	37,24	43,57	50,46
П	29,47	36,96	45,16	54,15	64,10	75,14
Ni:						
X	4,12	5,09	6,12	7,22	8,39	9,63
ХП	5,30	6,55	7,88	9,29	10,77	12,41
КХ	1,81	2,25	2,72	3,24	3,79	4,42
П	1,87	2,35	2,87	3,45	4,08	4,77
Cu:						
X	12,37	15,30	18,39	21,68	25,20	28,94
ХП	11,09	13,71	16,49	19,45	22,59	25,97
КХ	13,45	16,72	20,23	24,02	28,12	32,55
П	3,68	4,61	5,64	6,76	8,01	9,39

Извлекаемая сера участвует в обеспечении процесса теплом с достижением необходимых температур за счет окисления её кислородом дутья. Селективное выделение серы затем в отдельный продукт позволяет её использовать в шихте переработки вкрапленных руд, характеризующихся пониженной автогенностью.

Наиболее высокое содержание никеля в бесфлюсовой штейно-шлаковой композиции обеспечивает халькопирит-пентландитовая ассоциация, а меди – кубанит-халькопиритовая.

Удаление железа из продукций, соответствующих табл. 2, даёт тепло в печных агрегатах за счёт окисления его кислородом дутья и одновременно рост концентрации Ni и Cu согласно табл. 3 совместно с оставшейся частью вмещающей породы.

Видно, что основным источником никеля является халькопирит-пентландитовая ассоциация, меди – кубанит-халькопиритовая. При этом применительно к меди халькопиритовая, халькопирит-пентландитовая и кубанит-халькопиритовая обеспечивают близость к взаимозаменяемости (величине АМ=100% соответствует Cu в пределах 59,16-65,70%). Пирротиновая ассоциация, являясь основным

носителем железа и серы, служит источником энергии для проведения процессов плавки штейна и фальштейна в автогенном режиме.

Таким образом, селективное формирование концентратов по разновидностям ассоциаций позволяет формировать шихту плавильных агрегатов по заданным требованиям к энергетическому обеспечению и к свойствам продуктов плавки.

Таблица 3

Содержание Ni и Cu в условно промежуточной продукции

Вид элемента и ассоциации минералов	Содержание ассоциации минералов в среде вмещающей породы, %					
	50	60	70	80	90	100
Ni:						
X	5,29	7,00	9,11	11,77	15,24	20,03
ХП	6,97	9,31	12,24	16,02	21,04	28,27
КХ	2,29	3,04	3,96	5,16	6,72	8,92
П	2,65	3,72	5,23	7,52	11,36	19,19
Cu:						
X	15,88	21,04	27,37	35,36	45,77	60,19
ХП	14,59	19,48	25,61	33,54	44,14	59,16
КХ	16,99	22,57	29,48	38,27	49,83	65,70
П	5,22	7,31	10,28	14,74	22,31	37,77

Полное удаление межассоциационной вмещающей породы даёт продукцию следующего состава в зависимости от вида исходного материала (ВК-внутриассоциационные компоненты), мас. %:

	Ni	Cu	ВК
Халькопиритовая	20,03	60,19	19,78
Халькопирит-пентландитовая	28,27	59,16	12,57
Кубанит-халькопиритовая	8,92	65,70	25,38
Пирротиновая	19,19	37,77	43,04

Включение в шихту печей оборотных металлов увеличивает их содержание в штейнах и фальштейнах. Использование концентратов, содержащих другие ассоциации минералов, меняет содержание меди и никеля.

Селективное извлечение компонентов ВК в отдельные разновидности продукций методами рафинирования даёт следующие концентрации никеля и меди, мас. %:

	Ni	Cu	Соотношение Cu/Ni
Халькопиритовая	24,97	75,03	3,01
Халькопирит-пентландитовая	32,33	67,67	2,09
Кубанит-халькопиритовая	11,96	88,04	7,36
Пирротиновая	33,69	66,31	1,97

Разделение никеля и меди даёт соответствующую товарную продукцию.

Пример химического состава фактического никелевого штейна, произведенного в печи взвешенной плавки [19]:

мас. %:	Ni	Cu	Co	S _{общ}	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe
	33,2	14,3	0,753	29,2	<0,5	<0,02	<0,02	<0,05	21,4
г/т:	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag	
	27,7	125	2,85	0,892	0,413	0,143	3,37	67,1	

Пример химического состава фактического медно-никелевого файнштейна после конвертирования штейна взвешенной плавки [18]:

мас. %:	Ni	Cu	Co	S _{общ}	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe
	50,3	25,8	1,13	23,7	<0,05	<0,01	<0,043	<0,02	3,29
г/т:	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag	
	36,0	187	4,4	1,3	0,53	0,18	4,7	95,0	

Пример химического состава отвального шлака Надеждинского металлургического завода [18]:

мас. %:	Ni	Cu	Co	S _{общ}	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe	Cr ₂ O ₃
	0,089	0,02	0,085	0,97	35,4	3,56	4,08	4,09	37,4	0,05
	4									
г/т:	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag		
	0,52	1,6	0,039	0,02	0,008	<0,02	0,25	3,01		

Содержание железа в нём сопоставимо с месторождениями Малый Куйбас (в составе Магнитогорской группы) [21, 22] и Оленегорское (сырьевая база ПАО «Северсталь») и по своим свойствам соответствует требованиям агломерации [23]. Другие составляющие шлака, включающие в основном SiO₂, MgO, CaO, Al₂O₃, пригодны для изготовления строительных материалов и в качестве компонентов закладочных смесей [24], используемых для заполнения выработанного пространства в массиве месторождений руд. Закладка обеспечивает безопасную и эффективную их эксплуатацию и управление горным давлением [25].

Выводы

1. Селективное выделение концентратов по разновидностям рудных ассоциаций позволяет формировать шихту плавильных агрегатов по заданным требованиям к энергетическому обеспечению и к свойствам продуктов плавки, что особенно важно при расширении использования вкрапленных руд.

2. Селективное выделение железа позволяет создавать экономичные металлургические и машиностроительные малые предприятия в норильском промышленном районе с использованием отходов различного производства, накопленного металлолома, в том числе конверсионного, характеризующиеся быстрой окупаемостью, ориентированной на местные условия, гибкостью в производстве разнообразной малотоннажной продукции с использованием передовых технологий с целью удовлетворения текущих потребностей.

3. Среди рассмотренных видов рудных ассоциаций основным источником никеля является халькопирит-пентландитовая, меди – кубанит-халькопиритовая. Пирротиновая ассоциация, являясь основным носителем железа и серы, служит источником энергии для проведения процессов плавки штейна и фальштейна в автогенном режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZRU-2026-0003).

Список источников

1. Ванюков А.В., Уткин Н.И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: учебник для вузов. Челябинск: Металлургия. Челяб отд-е, 1998. 432 с.
2. Ведерников В.В. Группа никеля и ее роль в становлении цветной металлургии СССР // Цветные металлы. 2022. №7. С. 104-110.
3. Новиков Н.И., Салихов В.А. Основные направления и перспективы развития минерально-сырьевой базы цветных и редких металлов в мире и России // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2015. №2 (30). С. 138–150.
4. Крупнов Л.В., Ванеева И.Б. Экономическая оценка технических решений в металлургии: учебное пособие. Норильск: ФГБОУ ВО «ЗГУ», 2023. 119 с.
5. Заполярный филиал ГМК «Норильский никель»: учебно-наглядное пособие из цикла «Технологическая галерея» / Н.В. Марченко, Н.В. Олейникова, В.С. Чекушин, Л.В. Крупнов. Красноярск: ФГАОУ ВО «СФУ», 2024. 60 с.
6. Астафьев С.В. Минералы элементов платиновой группы в рудах Талнахского месторождения (Норильский рудный район) // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь: ПГНИУ, 2020. С. 108-110.
7. Чекушин В.С., Олейникова Н.В. Основы теории металлургических процессов. Красноярск: ФГАОУ ВО «СФУ», 2024. 300 с.
8. Целесообразность комплексирования минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков / Горбатова Е.А., Ожогина Е.Г., Лебедев А.Н., Емельяненко Е.А., Харченко А.С., Селиванов В.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 4. С. 31-39.
9. Крупнов Л.В., Пархоменко И.Ю., Каверзин А.В. Общие подходы к совершенствованию металлургических агрегатов. Критерии их оценки // Научный вестник Арктики. 2024. №16. С. 12-22.
10. Крупнов Л.В., Мидюков Д.О., Малахов П.В. / Направление поддержания сырьевой базы медно-никелевой подотрасли // Обогащение руд. 2022. №2. С. 37-41.
11. Федоренко М.И. Минералого-геохимические особенности Талнахского интрузива // Азимут геонаук: материалы Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции. Томск: Национальный

- исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 49-52.
12. Астафьев С.В. Минералогическая характеристика природных разновидностей сульфидных медно-никелевых руд Талнахского месторождения (Красноярский край, Россия) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. С. 46-48.
 13. Лежнин Р.А. Совершенствование процессов выплавки штейнов // Сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Пенза: ООО «Наука и Просвещение», 2021. С. 26-34.
 14. Изменение ресурсной базы производства тяжёлых цветных металлов на примере меди и никеля / Л.В. Крупнов, Д.О. Мидюков, М.С. Дациев, В.Б. Ильин // Горный журнал. 2024. № 3. С. 10-16.
 15. Оптимизация аэродинамических характеристик печи взвешенной плавки с использованием CFD-моделирования / Л.В. Крупнов, С.В. Севагин, А.С. Фомичев, В.П. Миличенко // Цветные металлы. 2025. № 6. С. 32-42.
 16. Оценка тепловой работы печей в жидкой ванне и печей взвешенной плавки с точки зрения их конструктивных особенностей / Л.В. Крупнов, Д.В. Румянцев, В.А. Попов, А.В. Каверзин // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 18. № 2. С. 200-207.
 17. Работа автогенных агрегатов в Заполярном филиале компании «Норникель» при переработке сырья с пониженным энергетическим потенциалом / Л.В. Крупнов, Л.Б. Цымбулов, П.В. Малахов, С.С. Озеров // Цветные металлы. 2022. № 2. С. 40-48.
 18. Изучение свойств атипичного продукта – «Промежуточного слоя» печей Ванюкова, при переработке шихты с высоким содержанием техногенных продуктов / Л.В. Крупнов, Р.А. Пахомов, А.В. Каверзин, Я.И. Косов, П.В. Малахов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2025. Т. 31. № 2. С. 5-18.
 19. Атлас минерального сырья, технологических промышленных продуктов и товарной продукции ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» / под ред. Л.Б. Цымбулова. СПб.: Политех-Пресс, 2021. 398 с.
 20. Технические решения по улучшению условий эксплуатации печей Ванюкова при переработке техногенного сырья / Л.В. Крупнов, Д.В. Румянцев, В.А. Попов, П.В. Малахов, А.В. Каверзин // Металлург. 2024. № 4. С. 106-111/
 21. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Макарова И.В. Теория, технология и автоматизация доменного процесса. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 142 с.
 22. Изучение процесса комбинированного водородно-углеродного восстановления железоникелевых руд / Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Лунев У.Д., Потапов И.М., Юдин Д.В. // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 3 (42). С. 4-10.
 23. Анализ показателей агломерации при использовании органических связующих в составе шихты на основе концентрата ССГПО / И.В. Решетова, С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.И. Сысоев, М.А. Свиридова // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств: материалы XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2025. С. 105-109.
 24. Куцкая Е.И., Елесин М.А. Перспективы создания различных закладочных смесей на основе серосодержащих техногенных отходов // Научный вестник Арктики. 2019. №5. С. 50-53.
 25. Скачков М.Н. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых Норильского промышленного района: справочное пособие. Норильск: Норильский индустриальный институт, 2005. 75 с.

Сведения об авторах

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru ORCID 0000-0002-0454-6399

Сибгатуллин Салават Камилович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru ORCID 0009-0004-0220-0126

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

Паймушкин Павел Геннадьевич – аспирант, Заполярный государственный университет им. Н.М.

Федоровского, Норильск, Россия; главный металлург – начальник Металлургического управления, Заполярный филиал ПАО «ГМК "Норильский никель"», Норильск, Россия.

Лаговская Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, машин и оборудования, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, Норильск, Россия. E-mail: lagovskaya.elena@yandex.ru

Багомедова Уздият Магомедсаидовна – аспирант, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, Норильск, Россия. E-mail: bagomedovaum@norvuz.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECT OF SELECTIVE EXTRACTION OF COMPONENTS FROM ASSOCIATIONS OF MINERALS IN CONTINUOUS ORE OF THE TALNAKH DEPOSIT ON THEIR CONTENT IN THE PRODUCT

Kharchenko Aleksandr S. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru ORCID 0000-0002-0454-6399

Sibagatullin Salavat K. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor in the Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 10tks@mail.ru ORCID 0009-0004-0220-0126

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

Paimushkin Pavel G. – postgraduate student N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia; Chief Metallurgist – Head of the Metallurgical Department Polar Branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, Norilsk, Russia.

Lagovskaya Elena V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metallurgy, Machinery and Equipment, N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Norilsk, Russia. E-mail: lagovskaya.elena@yandex.ru

Bagomedova Uzdiyot M. – postgraduate student N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia. E-mail: bagomedovaum@norvuz.ru

Abstract. Copper-nickel ores of the Talnakh deposit jointly contain Cu, Ni, Fe, S, a number of other elements and the host rock. Selective allocation of concentrates with different ore associations is especially important when expanding the use of disseminated ores.

Keywords: nickel, copper, iron, sulfur, matte, fine-grained ore, ore association, concentrate, slag.

Ссылка на статью:

Действие селективного извлечения компонентов из ассоциаций минералов сплошных руд Талнахского месторождения на их содержание в продукции / Харченко А.С., Сибэгатуллин С.К., Бигеев В.А., Паймушкин П.Г., Лаговская Е.В., Багомедова У.М. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-4-9)

Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Bigeev V.A., Paimushkin P.G., Lagovskaya E.V., Bagomedova U.M. Effect of selective extraction of components from associations of minerals in continuous ore of the Talnakh deposit on their content in the product. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-4-9)

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.78.08

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-10-14](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-10-14)

Феоктистов Н.А., Савинов А.С.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАФИТА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния изотермической выдержки индифинитного чугуна, применяемого для изготовления рабочего слоя двухслойных прокатных валков. Показано, что изотермическая выдержка при высоких температурах, которая возникает в процессе изготовления прокатного валка, а именно при заливке металла сердцевины, влияет на абразивную износостойкость сплава. Также изучено влияние окончательной термической обработки – отпуска на изменение значения коэффициента абразивной износостойкости исследуемых сплавов. В качестве исследования выбран половинчатый хромо-никелевый чугун, дополнительно легированный ванадием, в том числе и азотированным, в концентрации до 0,5%.

Ключевые слова: валок, рабочий слой, графитизация, отпуск, абразивная износостойкость

Введение

Важным технологическим этапом в производстве индифинитных прокатных валков является процесс графитизации рабочего слоя, который происходит в момент заливки сердцевины из высокопрочного чугуна. Причиной графитизации легированного чугуна является достаточно длительное его пребывание в изотермических условиях при высоких температурах после заливки сердцевинной части валка. Графит является обязательной структурной составляющей половинчатого чугуна, так как именно он обеспечивает антифрикционные свойства валка в системе трения металл-металл и повышенный срок службы изделия.

Решающее влияние на структуру чугуна рабочего слоя оказывает химический состав сплава. Помимо обязательных химических элементов, для этого класса чугуна (никель, хром) на практике применяется дополнительное легирование. Одним из перспективных легирующих элементов является ванадий, в том числе и азотированный. Введение в расплав этого карбидообразующего элемента приводит к перераспределению углерода между металлической основой и карбидной фазой, а также изменению устойчивости эвтектических карбидов к графитизации. Помимо этого, наличие в сплаве ванадия должно оказывать влияние на структурообразование в твердом состоянии: при термической обработке литого сплава – отпуске [1-17].

Целью настоящей работы является исследование влияния легирования индифинитного чугуна ванадием и азотом на абразивную износостойкость после графитизации и термической обработки.

Материалы и методика исследования

Выплавку опытных сплавов производили в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «Магнитогорский

государственный технический университет им. Г.И. Носова» в индукционной печи с основной футеровкой ёмкостью 2 кг.

Износостойкость сплавов изучали согласно ГОСТ 23.208-79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы».

С целью имитации условий, близких к производственным, образцы экспериментальных сплавов рабочего слоя с различным содержанием ванадия помещали в печь, разогретую до 1100°C. После чего печь контролируемо охлаждалась в течение нескольких суток, имитируя условия формирования графитизированной литой структуры рабочего слоя прокатного валка.

Окончательную термическую обработку проводили при температуре 470°C. Нагрев и охлаждение образцов осуществлялся со скоростью 5–15 °C/ч, время изотермической выдержки при отпуске – 25 ч.

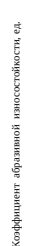
Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлено влияние концентрации ванадия на коэффициент абразивной износостойкости валкового чугуна в литом состоянии, неграфитизированном (рис. 1, а) и прошедшем графитизацию (рис. 1, б). На каждом графике представлены по две зависимости, соответствующие введению ванадия в сплав азотированным и неазотированным ферросплавом.

Проведя испытания опытных сплавов в литом состоянии, установили, что при увеличении количества ванадия в валковом чугуне до 0,3% происходит снижение коэффициента абразивной износостойкости не зависимо от того, какую легатуру применяли – обычную или азотированную (см. рис. 1, а).

Прежде всего, это обусловлено обеднением расплава углеродом за счёт возможного выделения

специальных карбидов, а также частичной заменой
эвтектических карбидов на комплексно-легированные
вторичные.



———— – неазотированный; — — — – азотированный

Согласно графику на рис. 1, б, можно констатировать, что характер изменения значений коэффициента износостойкости при комплексном легировании валкового чугуна ванадием и азотом не меняется по сравнению с неграфитизированным сплавом. Однако происходит увеличение значений коэффициента износостойкости относительно неграфитизированного валкового чугуна при одинаковых концентрациях ванадия в среднем на 3–9%. Сохранение характера изменения значений коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна после графитизации обусловлено, вероятнее всего, наличием комплексных карбонитридов ванадия, которые являются структурной составляющей, препятствующей процессам

На рис. 3 представлен график изменения значений коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна, прошедшего предварительную графитизацию с последующей термической обработкой, а также легированного различным количеством только ванадия и в комплексе с азотом.

Очевидно, что в случае легирования валкового

чугуна только ванадием значение коэффициента абразивной износостойкости увеличивается по мере увеличения концентрации ванадия в нем.

Максимальное значение исследуемого коэффициента достигается при концентрации ванадия в сплаве от 0,4 до 0,5 %.

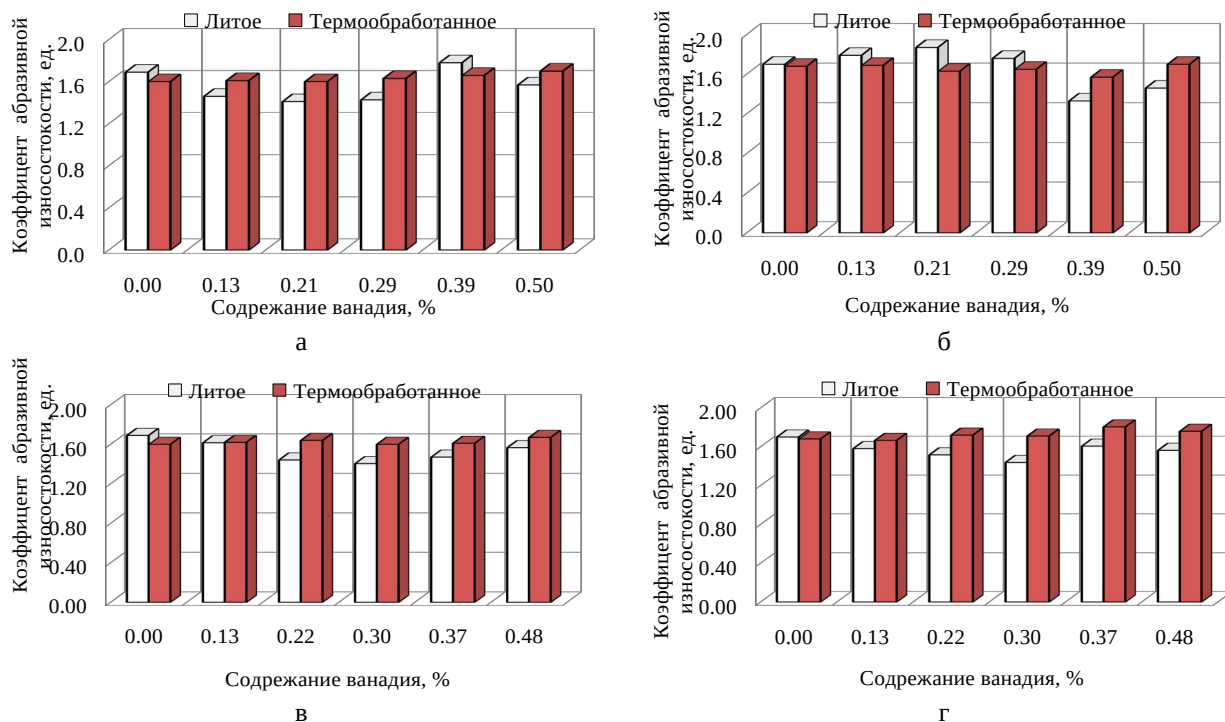


Рис. 2. Изменение коэффициента абразивной износостойкости неграфитизированного (а, в) и графитизированного (б, г) чугуна после термической обработки при различной концентрации ванадия в сплаве: а, б – неазотированный ванадий; в, г – азотированный ванадий

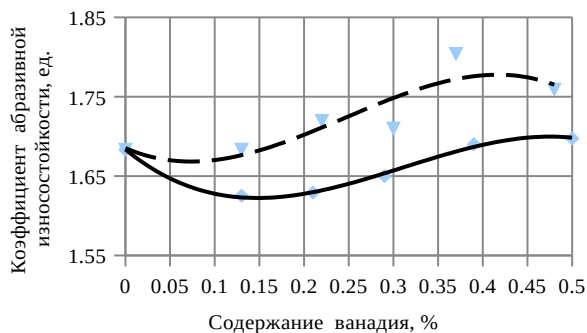


Рис. 3. Зависимость коэффициента абразивной износостойкости графитизированного и термообработанного валкового чугуна от концентрации ванадия в нем: — — — — — - неазотированный; — — — — — - азотированный

Высокое значение коэффициента абразивной износостойкости базового сплава, в котором отсутствует ванадий, вероятнее всего обусловлено большим количеством графита, выделившимся в процессе графитизации. Интенсивному выделению графита способствовало отсутствие ванадия в химическом составе экспериментальных сплавов, являющегося сильным карбидообразующим элементом. Таким образом, углерод, не связанный в карбиды, выделяется в процессе изотермической выдержки (графитизации) в виде включений графита и является своеобразной «смазкой» в процессе

изнашивания.

Однако в реальных условиях эксплуатации валков наличие только графита в микроструктуре изделия является недостаточным условием для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств изделий. Он может выкрашиваться в процессе прокатки, что приведёт к обеднению смазки в системе «металл-металл» и понижению эксплуатационных свойств. Для предотвращения этого в микроструктуре сплава должна быть фаза, которая имеет высокую твёрдость и препятствует истиранию металлической основы. Это фазой являются карбиды различных легирующих

элементов.

В случае легирования валкового чугуна ванадием в комплексе с азотом значение коэффициента абразивной износостойкости выше на 3–7%, чем при легировании только ванадием. В первую очередь это обусловлено тем, что в структуре чугуна помимо карбидов присутствуют нитриды, которые в процессе высокотемпературной изотермической выдержки не распадаются. В комплексе это приводит к обеспечению более высокого уровня эксплуатационных свойств валкового чугуна.

Выводы

1. Графитизация валкового чугуна оказывает существенное влияние на уровень эксплуатационных свойств валкового чугуна, легированного только ванадием. При легировании сплава ванадием совместно с азотом влияние графитизации существенно снижается.

2. Легирование валкового чугуна азотированным феррованадием способствует повышению коэффициента абразивной износостойкости на 3–7% по сравнению с чугуном, легированным только ванадием.

3. Максимальное значение коэффициент абразивной износостойкости валкового чугуна, легированного ванадием в комплексе с азотом, наблюдается при остаточных концентрациях ванадия в пределах 0,1 до 0,2%, а при легировании только ванадием – в пределах 0,4–0,5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2026-0003)

Список источников

- Structure and properties of cast iron designated for working layer of rolls / Vdovin K.N., Zavalishchin A.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. // Journal of Materials Science Research. 2016. Т. 5. № 1. С. 77-88.
- Карбидные превращения при отпуске комплексно-легированного белого чугуна / Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3 (717). С. 3-7.
- Влияние отпуска на свойства карбидной фазы в белом комплексно-легированном чугуне / Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н., Савинов А.С., Сеницкий Е.В. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 10-2 (29). С. 14-16.
- Влияние режима отпуска на соотношение структурных составляющих в белом комплексно-легированном чугуне // Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Завалищин А.Н. // Технология металлов. 2013. № 8. С. 13-16.
- Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Zavalishchin A.N. Structure changes of chromium-nickel indefinite cast irons in heating // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 9-11.
- Завалищин А.Н., Горленко Д.А., Вдовин К.Н. Влияние температуры отпуска на структурные составляющие в индифинитном чугуне // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 1. № 71. С. 298-301.
- Воздвиженский Б. М., Кононов В. А. Исследование структуры и свойств хромо-ванадиевого чугуна // Тр. Ин-та / Яросл. политехн. Ин-т. Ярославль, 1979. С. 59 - 62.
- Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Машиностроение, 1976. 287 с.
- Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
- Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 279 с.
- Гималетдинов Р.Х. Производство прокатных валков из высококачественных чугунов. М.: Полтекс, 2000. 330 с.
- Будагьянц Н.А., Карский В.Е. Литые прокатные валки. М.: Машиностроение, 1983. 175 с.
- Отливки из специальных чугунов: учеб. пособие / Колокольцев В.М., Соловев В.П., Молочков П.А., Потапов М.Г.; под. ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 139 с.
- Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов И.С. Износостойкие отливки из комплекснолегированных чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
- Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 2005. 428 с.
- Влияние легирующих элементов на свойства чугунных валков для горячей прокатки / В.М. Колокольцев, А.В. Науменко, В.А. Куц и др. // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск, 2001. Вып. 2. С. 210–219.
- Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Производство отливок из чугуна: учеб. пособие. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 245 с.

Сведения об авторах

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

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Механика», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF THE EFFECT OF GRAPHITE ON THE WEAR RESISTANCE OF ROLLING MILL ROLLS

Feoktistov Nikolay A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of department «Foundry Processes and Material Science», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

Savinov Alexander S. – Doctor of Technical Sciences, head of department «Mechanics», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Abstract. The article presents the results of a study on the effect of isothermal holding of indefinite chill cast iron used for the working layer of double-layer rolling mill rolls. It is shown that isothermal holding at high temperatures, which occurs during the manufacture of a rolling mill roll, particularly during the pouring of the core metal, affects the abrasive wear resistance of the alloy. The effect of the final heat treatment—tempering—on the abrasive wear resistance coefficient of the investigated alloys was also studied. Mottled chromium-nickel cast iron additionally alloyed with vanadium, including nitrided vanadium, at concentrations of up to 0.5% was selected as the material for the study.

Keywords: rolling mill roll, working layer, graphitization, tempering, abrasive wear resistance.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FZRU-2026-0003).

Ссылка на статью:

Феоктистов Н.А., Савинов А.С. Изучение влияния графита на износостойкость прокатных валков // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 10-14. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-10-14](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-10-14)
Feoktistov N.A., Savinov A.S. Study of the effect of graphite on the wear resistance of rolling mill rolls. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 10-14. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-10-14](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-10-14)

Волков С.Ю., Колокольцев В.М., Потапов М.Г., Чернов В.П.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА (СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ): УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ «СОСТАВ — СТРУКТУРА — СВОЙСТВО» (часть 1)

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния легирования на абразивную износостойкость двойных сплавов на основе железа с элементами C, Si, Mn, Cr, Nb, В. Установлены закономерности изменения износостойкости в зависимости от химического состава и структурного состояния сплавов. Построены ряды легирующих элементов по их влиянию на износостойкость железа для низко-, средне- и высоколегированных сплавов. Показано, что в области твердых растворов износостойкость увеличивается с ростом концентрации легирующего элемента до предела растворимости, а в гетерофазных структурах является аддитивной величиной, определяемой типом матрицы и свойствами структурных составляющих.

Ключевые слова: двойные сплавы железа, абразивная износостойкость, диаграммы состояния, твердые растворы, интерметаллиды, прочность, твердость

Введение

Основная задача современного литейного металловедения – создание сплавов с заданными свойствами. Теоретической основой выбора таких сплавов продолжают оставаться экспериментально построенные диаграммы состояния и диаграммы состав-свойство [1, 2]. Диаграмма состояния в наиболее общей и надежной форме отражает характер взаимодействия компонентов, фазовый состав и структуру сплавов в равновесных и квазиравновесных условиях [2].

Оборудование современной техники зачастую работает в необычных условиях: высокие и низкие температуры и давления, ударные нагрузки, абразивное изнашивание. Этими условиями и определяется сложный комплекс требований к свойствам новых сплавов, зачастую взаимоисключающих [3].

Разработка новых сплавов на заданные свойства связана со знанием характера влияния добавок на свойства основы и базируется на связи состава сплава с его положением на диаграмме состояния [4]. Если для основных механических и литейных свойств известны зависимости типа «состав – свойство», то для ряда важных специальных свойств, в частности абразивной износостойкости, данных недостаточно [3,5].

Цель работы – установление закономерностей влияния легирования на износостойкость двойных сплавов на основе железа и разработка методов прогнозирования их свойств на основе диаграмм состояния.

Методика исследований

Исследовали износостойкость бинарных сплавов на основе железа с C, Si, Mn, Cr, Nb, В. Экспериментальные сплавы для изучения

износостойкости, структуры и свойств двухкомпонентных систем на основе железа получали в индукционной ИСТ-002 в алундовых тиглях методом сплавления технически чистых металлов в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Для этого использовали:

- карбонильное рафинированное железо марки Р20 по ГОСТ 13610-79;
- кремний технический марки Кр0 по ГОСТ 2169-2014;
- марганец электролитический марки МР0 по ГОСТ 6008-90;
- ниобий металлический марки НБШО по ГОСТ 16100-2014;
- бор кристаллический фирмы «Borax Francais» (Франция).

Науглероживание сплавов проводили электродным графитом марки ЭГ-0.

Сплавы заливали в сухие песчано-глинистые формы (ПГФ) при температуре на 50°C выше температуры ликвидус. Теоретическую температуру ликвидус и солидус рассчитывали, используя теорию аддитивности [6, 7]. Содержание вторых компонентов в сплаве выбирали таким образом, чтобы охватить наиболее важные структурные области диаграммы состояния, а также с учетом их концентраций в реальных сплавах [6].

Испытания металлов и сплавов на износостойкость проводили по ГОСТ Р 23.208-2016 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закреплённые абразивные частицы».

Определение показателей механических свойств проводили также с использованием стандартных методик: испытание на растяжение – по ГОСТ 1497-2014, на ударный изгиб – по ГОСТ 9454-2014, твёрдость по Бринеллю – по ГОСТ 9012-2014 на

приборе 21009ТБ, твёрдость по Роквеллу – по ГОСТ 9013-2014 на приборе ТР5006.

Предел прочности определяли по ГОСТ 1497-84. Образцы испытывали на универсальной испытательной машине «ИР-5082-10» с программным комплексом «МАХТест», записью диаграммы «нагрузка-удлинение».

Комплекс металлографических исследований был выполнен в ЦКП НИИ Нано-сталей при ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова». Для микроанализа из образца по стандартной методике на линии пробоподготовки фирмы Buechler были приготовлены микрошлифы с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Для выявления качественных и количественных характеристик структуры использовался оптический микроскоп Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений «ТЕХОМЕТ Pro E 1245-03». Микроструктура при увеличениях более 1000 раз исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах.

Неметаллические включения изучали по ГОСТ 1778-2014 метод Л.

Границы зерен выявляли травлением в растворах соляной и азотной кислот, соляной и пикриновой кислот в воде, электролитическим травлением в 50%-м растворе азотной кислоты. Применяли также реактивы, предусмотренные ГОСТ 5639-2014.

Размер зерна определяли методом сравнения с

эталонными шкалами, приведёнными в приложении к ГОСТ 5639-2014 [15, 16].

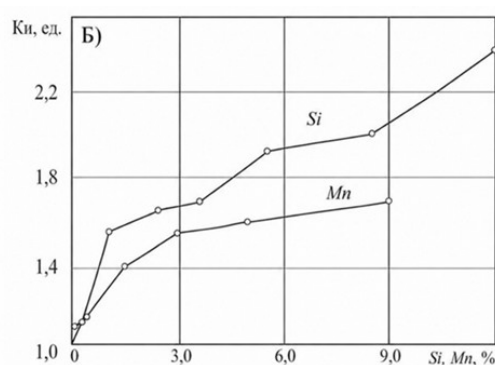
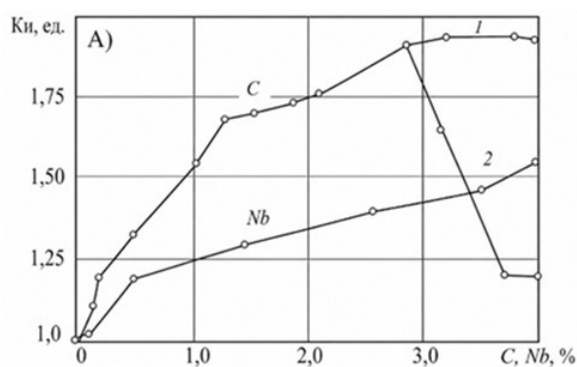
Микротвёрдость определяли на твердомере BuchlerMikromet в соответствии с ГОСТ 9450-60 методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке 1 кг и длительности нагружения 15 с.

Количественный анализ проводили методами, изложенными в работах [15, 16].

Результаты исследований. Влияние легирования на износостойкость двойных сплавов железа представлено на рис. 1 и в табл. 1.

Сплавы железо-углерод. Изучали сплавы с содержанием углерода до 4,2%. Резкое повышение износостойкости наблюдается в интервале содержания углерода 0,13–2,82%. Это связано с увеличением доли карбидов железа. Раздвоение кривой износостойкости после увеличения содержания углерода свыше 2,82% на восходящую (1) и нисходящую (2) ветви (рис. 1, а) объясняется тем, что в первом случае весь углерод связан в карбиды (структура белого чугуна), во втором – выделяется свободный графит (см. табл. 1). Изменение структуры при увеличении содержания углерода происходит следующим образом: до 0,8% С – ферритно-перлитная и перлитная; 0,8-2,1% С – перлитно-цементитная; 2,06-2,82-4,2% С – кривая 1 – перлито-ледебуритная, кривая 2 – перлито-ледебурито-графитовая.

Сопоставляя значения $K_{и}$, HRA, σ_b можно отметить, что в сплавах системы Fe-C износостойкость тем выше, чем выше прочностные характеристики. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее известным влиянием углерода на износостойкость чугунов и сталей [3, 20].



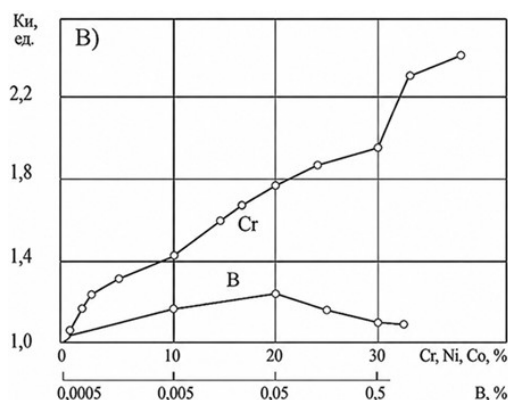


Рис. 1. Влияние легирования на свойства исследованных сплавов

Таблица 1

Свойства двойных сплавов железо-элемент

№ п/п	Сплав	Содержание элемента, %	Kи, ед.	HRA, ед.	HB, ед.	σв, МПа
Сплавы железо-углерод						
1	Fe-C	0,13	1,12	40	128	340
2	Fe-C	0,49	1,33	56	179	540
3	Fe-C	1,02	1,55	65	285	620
4	Fe-C	1,54	1,71	70	363	660
5	Fe-C	2,06	1,77	72	415	700
6	Fe-C	2,82	1,92	74	477	—
7	Fe-C	3,15	1,64	68	330	—
8	Fe-C	4,21	1,21	56	183	250
Сплавы железо-ниобий						
9	Fe-Nb	0,5	1,20	43	131	320
10	Fe-Nb	1,5	1,30	49	149	345
11	Fe-Nb	2,6	1,38	57	192	—
12	Fe-Nb	4,0	1,56	64	255	410
Сплавы железо-кремний						
13	Fe-Si	0,48	1,20	42	130	360
14	Fe-Si	2,43	1,65	58	197	440
15	Fe-Si	5,57	1,90	68	321	400
16	Fe-Si	8,4	2,01	72	400	—
17	Fe-Si	12,53	2,45	77	410	—
Сплавы железо-марганец						
18	Fe-Mn	1,59	1,25	43	140	345
19	Fe-Mn	4,49	1,61	60	217	400
20	Fe-Mn	9,28	1,70	63	255	480
21	Fe-Mn	12,75	1,92	70	352	545
22	Fe-Mn	15,32	1,93	68	321	500
Сплавы железо-хром						
23	Fe-Cr	5,12	1,41	42	131	400
24	Fe-Cr	13,50	1,60	45	137	425
25	Fe-Cr	24,90	1,70	50	149	440
26	Fe-Cr	38,70	2,40	60	229	495
Сплавы железо-бор						
27	Fe-B	0,0005	1,03	39	120	300
28	Fe-B	0,005	1,18	42	126	325
29	Fe-B	0,05	1,24	45	136	350
30	Fe-B	0,5	1,14	45	136	300
31	Fe-B	0,6	1,12	46	136	290

Сплавы железо-ниобий. Ниобий образует с α-Fe ограниченные твердые растворы. Критерий

растворимости ниобия в α-Fe составляет 1,6 ат. % или 2,63 мас. % [7]. При содержании ниобия до 2,6% повышение Kи связано с увеличением легированности твердого раствора. При более высоких концентрациях наблюдаются включения ε-фазы (Fe₂Nb), что также способствует повышению Kи (см. рис. 1, а, табл. 1). Таким образом, положительное влияние ниобия на износостойкость двойных сплавов Fe-Nb в изученном интервале концентраций связано как с увеличением легирования твердого раствора, так и с образованием интерметаллида Fe₂Nb [8,9].

Сплавы железо-кремний. Кремний во всем изученном интервале концентраций (0,48–12,3%) существенно повышает износостойкость. Это связано с увеличением твердости сплавов за счет резкого искажения решетки α-Fe. Микротвердость феррита повышается с 1669 до 4178 МПа (см. рис. 1, б, табл. 1). Структура всех сплавов ферритная. В области концентраций кремния от 5,0 до 12,3% в сплавах присутствуют включения второй фазы Fe₃Si в виде темных выделений по границам зерен [9]. Увеличение ее количества вызывает хрупкость железа и снижает прочность. Однако износостойкость не снижается, что определяется высокой твердостью образцов.

Сплавы железо-марганец. Марганец имеет ГКЦ-решетку, расширяет область существования γ-Fe. Легирование железа марганцем до 12,75% повышает износостойкость, твердость и прочность, что объясняется изменениями в структуре: от ферритной через неоднородную с видманштеттовым ферритом и аустенитом до мартенситно-аустенитной с некоторым количеством ε-фазы (рис. 2, 3, табл. 1) [13, 14].

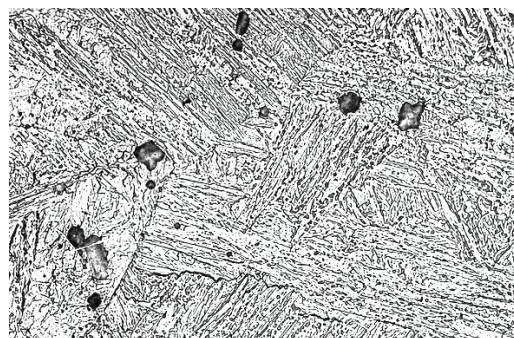
В сплавах с содержанием марганца до 10,5% наблюдается протекание частичного мартенситного превращения. При этом мартенсит имеет неоднородное строение. На границах зерен и близлежащих к ним участках он имеет форму игл, линз и пластин. В центре зерен - мартенсит в виде пластин. В целом микроструктура состоит из марганцовистого мартенсита и аустенита. Дальнейшее легирование железа марганцем до 15,32% повышает устойчивость аустенита по отношению к образованию α-фазы и ее количество

уменьшается. Соответственно этому снижаются прочность и твердость, а износостойкость остается на

прежнем уровне [13, 14].



а

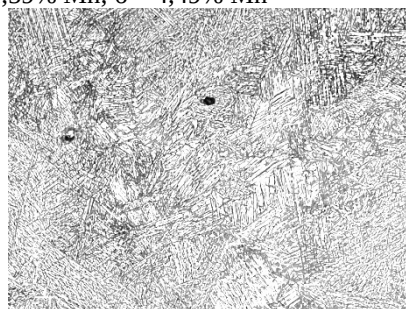


б

Рис. 2. Микроструктура Fe-Mn, $\times 500$: а – 1,59% Mn; б – 4,49% Mn



а



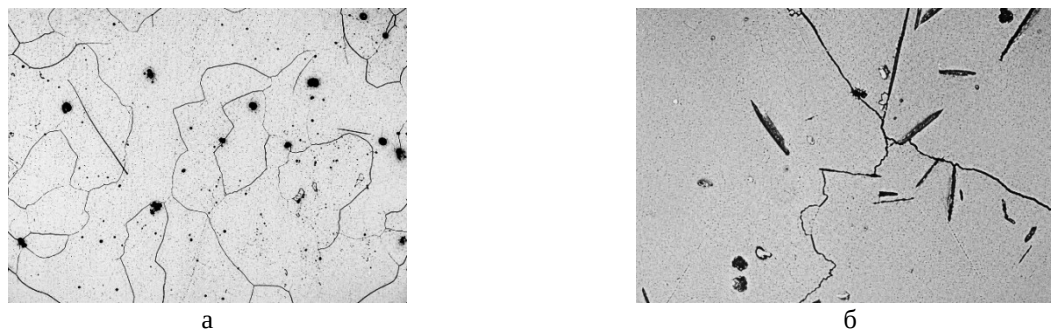
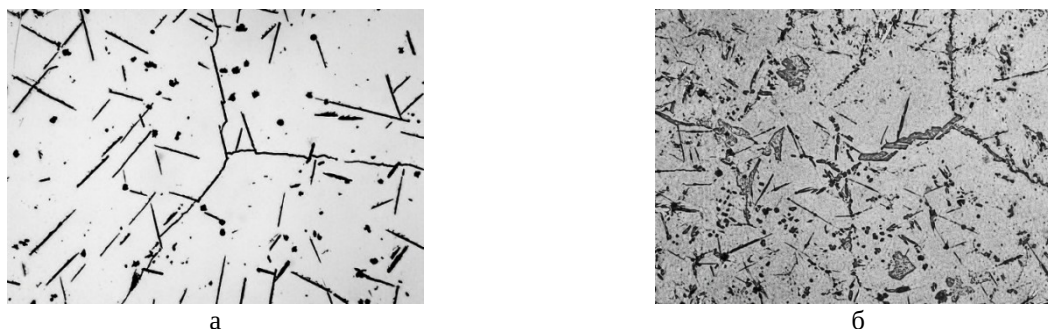
б

Рис. 3. Микроструктура Fe-Mn, $\times 500$: а – 9,28% Mn; б – 12,75% Mn

Сплавы железо-хром. Хром образует с α -Fe неограниченные твердые растворы, замыкает γ -область. Износостойкость непрерывно возрастает во всем интервале концентраций хрома до 38,7%. При содержании Cr $\geq 14,3\%$ начинает выделяться σ -фаза, а при Cr $\geq 25\%$ износостойкость резко возрастает (рис. 4, 5, табл. 1) [9]. Микроструктура сплавов представлена ферритом и кристаллами σ -фазы. Исключение составляют сплавы с содержанием Cr $< 14,3\%$. При дальнейшем увеличении концентраций хрома начинает выделяться σ -фаза. В сплавах с хромом в пределах 14,3–27,9% количество ее невелико, распределение неравномерное, форма – в виде пластин и длинных полос. Такая морфология σ -фазы связана, по-видимому, с локальным обогащением микрообъемов сплава хромом. Повышение износостойкости этих сплавов незначительное. При дальнейшем увеличении содержания хрома количество σ -фазы растёт. Она более равномерно распределяется в ферритной матрице. Выделение σ -фазы происходит в виде крупных пластин неправильной формы, длинных

полос и округлых частиц. При этом у сплавов с содержанием хрома $> 25\%$ износостойкость резко возрастает.

Изучали сплавы железа с содержанием бора от 0,0005 до 0,5%. Считается, что влияние бора на свойства железа подобно влиянию углерода, но в несколько раз более сильное [8]. Однако для износостойкости этого не наблюдается, хотя при увеличении содержания бора сопротивление изнашиванию возрастает, но менее существенно, чем при добавках углерода [12]. Микроструктура всех сплавов представляет собой феррит, в котором при содержании бора свыше 0,005% выделяются бориды железа Fe_2B . Это способствует увеличению общей твердости, микротвердости, прочности и износостойкости (до 0,05% В). При дальнейшем повышении содержания бора все свойства снижаются, что связано с охрупчивающим влиянием на ферритную матрицу выделяющихся в большом количестве боридов. Данные результаты относятся к объёмно-легированным сплавам, а не к диффузионно-насыщенным.

Рис. 4. Микроструктура Fe-Cr, $\times 500$: а – 0,5% Cr; б – 13,5% CrРис. 5. Микроструктура Fe-Cr, $\times 500$: а – 24,9% Cr; б – 38,4% Cr

Сравнительное исследование двойных сплавов позволило построить следующие ряды износостойкости (по возрастанию) в группах сплавов:

- низколегированные сплавы (1,0% элемента): Mn (1,21) $\rightarrow$ Cr (1,22) $\rightarrow$ Nb (1,25) $\rightarrow$ Si (1,52) $\rightarrow$ C (1,56);
- среднелегированные сплавы (5,0% элемента): Cr (1,52) $\rightarrow$ Mn (1,60) $\rightarrow$ Si (1,83);
- высоколегированные сплавы (10% элемента): Cr (1,55) $\rightarrow$ Mn (1,80) $\rightarrow$ Si (2,18).

Обсуждение результатов исследования

Полученные данные демонстрируют принципиально разные механизмы повышения износостойкости в областях твёрдых растворов и гетерофазных структур. В области твёрдых растворов (Fe-Nb до 2,6%, Fe-Cr до ~14%, Fe-Si до ~5%) износостойкость растёт монотонно с увеличением концентрации легирующего элемента до предела его растворимости в α -Fe. Это объясняется классическим механизмом твёрдого раствора: искажение кристаллической решётки железа атомами легирующего элемента повышает сопротивление дислокационному скольжению, что проявляется в росте твёрдости, прочности и, как следствие, износостойкости [8, 9].

В гетерофазных структурах износостойкость приобретает аддитивный характер. Например, в сплавах Fe-C при содержании углерода $>0,8\%$ образование карбидов (цементита) создаёт жёсткий скелет, препятствующий выкрашиванию матрицы при абразивном воздействии [17]. При этом важную роль играет морфология второй фазы: в белом чугуна (см. рис. 1, кривая 1) карбиды образуют непрерывную ледебуритную сетку, обеспечивая высокую

износостойкость

($K_{\text{и}} = 1,92$ при 2,82% C), тогда как в сером чугуне (кривая 2) выделение свободного графита в виде пластин разрушает целостность матрицы и снижает $K_{\text{и}}$ до 1,64 при 3,15% C [20].

Аналогичная картина наблюдается в системе Fe-Cr: при $\text{Cr} \geq 25\%$ резкий рост износостойкости ($K_{\text{и}} = 2,40$ при 38,7% Cr) связан не просто с количеством σ -фазы, а с её морфологией – переходом от редких пластин к равномерно распределённым в ферритной матрице крупным частицам неправильной формы [9]. Это подтверждает, что для абразивной износостойкости критична не только твёрдость структурных составляющих, но и их способность удерживаться в матрице при сдвиговых деформациях [12, 18].

Построенные ряды износостойкости выявляют интересную закономерность: эффективность легирования зависит от уровня легирования. В низколегированной области наибольший эффект дают углерод и кремний, тогда как в высоколегированной – кремний и марганец. Хром, демонстрирующий умеренное влияние в низко- и среднелегированных сплавах, становится высокоэффективным при концентрациях $>25\%$ за счёт образования интерметаллидной σ -фазы.

Особого внимания заслуживает система Fe-B. Несмотря на распространённое мнение о «сверхвысокой» эффективности бора (аналогично углероду, но в десятки раз сильнее по влиянию на твёрдость), для абразивной износостойкости этот эффект не реализуется. Максимальное значение $K_{\text{и}} = 1,24$ при 0,05% B значительно уступает показателям Fe-C ($K_{\text{и}} = 1,92$ при 2,82% C). Это объясняется

ферритной природой матрицы в сплавах Fe-B и охрупчивающим действием избыточных боридов Fe₂B, которые, в отличие от карбидов в Fe-C, не образуют прочного скелета, а играют роль концентраторов напряжений [12].

Сплавы Fe-Mn представляют особый интерес благодаря протеканию мартенситного превращения. Повышение износостойкости до 12,75% Mn ($K_n = 1,92$) связано с формированием неоднородного мартенсита: игольчатого и пластинчатого на границах зерен, пластинчатого в центрах [13, 14]. Такая неоднородность структуры, сочетающая высокотвёрдый мартенсит с пластичным аустенитом, создаёт оптимальные условия для сопротивления абразивному изнашиванию. Однако при 15,32% Mn стабилизация аустенита приводит к уменьшению доли мартенсита, что снижает прочность и твёрдость, хотя износостойкость остаётся на уровне ($K_n = 1,93$). Это указывает на существование «плато» износостойкости в аустенитно-мартенситных структурах, где доминирующую роль играет не прочность, а способность материала к упрочнению при деформации [14].

Заключение

1. Влияние легирования на износостойкость имеет сложный характер, определяемый структурным состоянием сплава. В области твердых растворов износостойкость (K_n) возрастает с увеличением концентрации легирующего элемента до предела его растворимости (подтверждено для систем Fe-Nb, Fe-Si, Fe-Mn), тогда как в гетерофазных структурах она является аддитивной величиной, зависящей от типа матрицы и свойств структурных составляющих (Fe-C, Fe-Cr, Fe-B).

2. Установлены ряды эффективности легирующих элементов по возрастанию износостойкости железа, различающиеся для низко-, средне- и высоколегированных сплавов. Наиболее эффективным элементом в низколегированной области является углерод ($K_n = 1,56$ при 1,0% C), а в высоколегированной — кремний ($K_n = 2,18$ при 10% Si), что обусловлено различными механизмами упрочнения.

3. Выявлены критические концентрации, при которых происходит качественное изменение механизма изнашивания: для Fe-C — раздвоение кривой износостойкости при 2,82% C (образование свободного графита); для Fe-Cr — резкий рост K_n при Cr > 25% (массированное выделение σ -фазы); для Fe-B — максимум износостойкости при 0,05% B с последующим снижением из-за охрупчивания ферритной матрицы боридами.

Представленные в статье результаты создают теоретическую основу для целенаправленного синтеза многофазных износостойких литейных сплавов на основе железа с заданным комплексом свойств.

P.S. Во второй части будут представлены результаты исследований бинарных сплавов железо-

элемент (Ni, Mo, V, Ti, Cu, Co, Al, W), а также полученные регрессионные зависимости.

Список источников

1. Гуляев Б.Б. Физико-химические основы синтеза сплавов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 192 с.
2. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов. М.: Металлургия, 1985. 160 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
4. Колокольцев В.М. Выбор легирующих элементов и комплексов для разработки составов литейных износостойких сталей // Совершенствование технологии и автоматизации сталеплавильных процессов: межвуз. сб. Магнитогорск: МГМИ им. Г.И. Носова, 1992. С. 27–36.
5. Сорокин Г.М. Вопросы методологии при исследовании изнашивания абразивом // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 5. С. 779–786.
6. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. изд. / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисов и др. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
7. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1962. 1488 с.
8. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
9. Колокольцев В.М. Исследование износостойкости бинарных сплавов железа // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 4. С. 719–726.
10. Колокольцев В.М. Износостойкость двойных сплавов на основе железа // Литейное производство. 1996. № 4. С. 5–7.
11. Войнов Б.А. Сравнительное исследование литых износостойких сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 10. С. 96–98.
12. Износостойкие сплавы для отливок дробильно-размольного оборудования / С.П. Дорошенко, В.А. Лютый, В.Я. Жук и др. М.: ЦНИИЭСТРОЙМАШ, 1978. 41 с.
13. Вольнова Т.Ф. Высокомарганцовистые стали и сплавы. М.: Металлургия, 1988. 343 с.
14. Малинов Л.С., Харланова Е.Я. Литые малоуглеродистые железомарганцевые стали с метастабильным аустенитом // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 10. С. 98–101.
15. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 876 с.
16. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. Стереология металлических материалов. М.: Металлургия, 1976. 271 с.
17. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
18. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 251 с.
19. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 270 с.

20. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.

Сведения об авторах

Волков Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, ректор Кыргызско-Российского Славянского университета имени первого президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина (КРСУ), г. Бишкек, Республика Киргизия; доцент кафедры «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Колокольцев Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kwm@magtu.ru

Потапов Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: potapovmg@mail.ru

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

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECT OF ALLOYING ON THE WEAR RESISTANCE OF BINARY IRON-BASED ALLOYS (CASTING ALLOYS SYNTHESIS): ESTABLISHMENT OF "COMPOSITION — STRUCTURE — PROPERTY" REGULARITIES (PART 1)

Volkov Sergey Yu. – Ph.D., Rector of the Kyrgyz-Russian Slavic University named after the First President of the Russian Federation B.N. Yeltsin (KRSU), Kyrgyz Republic, Bishkek; Associate Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Kolokoltsev Valery M. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the Rectorate, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kwm@magtu.ru.

Potapov Mikhail G. – Ph.D., Associate Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: potapovmg@mail.ru.

Chernov Viktor P. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@mail.ru.

Abstract. The results of study on the effect of alloying on the abrasive wear resistance of binary iron-based alloys containing C, Si, Mn, Cr, Nb, and B are presented. The regularities of wear resistance variation depending on the chemical composition and structural state of the alloys have been established. Series of alloying elements have been constructed according to their influence on the wear resistance of iron for low-, medium-, and high-alloyed alloys. It has been shown that in the region of solid solutions, wear resistance increases with increasing alloying element concentration up to the solubility limit, whereas in heterophase structures it is an additive quantity determined by the matrix type and the properties of the structural constituents.

Keywords: binary iron alloys, abrasive wear resistance, phase diagrams, solid solutions, intermetallics, strength, hardness.

References

1. Gulyaev B.B. Physical and Chemical Foundations of Alloy Synthesis. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1980. 192 p.
2. Gulyaev B.B. Synthesis of Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1985. 160 p.
3. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. Wear Resistance of Steels and Alloys. Moscow: Nedra, 1994. 417 p.

4. Kolokoltsev V.M. Selection of Alloying Elements and Complexes for Developing Compositions of Cast Wear-Resistant Steels // Improvement of Technology and Automation of Steelmaking Processes: Interuniversity Collection. Magnitogorsk: MGMI Publishing House, 1992. P. 27–36.
5. Sorokin G.M. Methodological Issues in the Study of Abrasive Wear // *Trenie i Iznos*. 1988. Vol. 9, No. 5. P. 779–786.
6. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisov S.P. et al. Phase Diagrams of Binary and Multicomponent Iron-Based Systems: Reference Edition. Moscow: Metallurgiya, 1986. 440 p.
7. Saunders N., Miodownik A.P. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide. Oxford: Pergamon, 1998. 479 p.
8. Goldshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. Metal Physics of High-Strength Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1986. 312 p.
9. Bhadeshia H.K.D.H., Honeycombe R.W.K. Steels: Microstructure and Properties. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 504 p.
10. Kolokoltsev V.M. Investigation of Wear Resistance of Binary Iron Alloys // *Trenie i Iznos*. 1995. Vol. 16, No. 4. P. 719–726.
11. Kolokoltsev V.M. Wear Resistance of Binary Iron-Based Alloys // *Liteynoye Proizvodstvo*. 1996. No. 4. P. 5–7.
12. Zum Gahr K.-H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.
13. Volynova T.F. High-Manganese Steels and Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1988. 343 p.
14. Grassel O., Kruger L., Frommeyer G., Meyer L.W. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application // *International Journal of Plasticity*. 2000. Vol. 16, Iss. 10–11. P. 1391–1409.
15. Saltykov S.A. Stereometric Metallography. Moscow: Metallurgiya, 1970. 376 p.
16. Russ J.C. The Image Processing Handbook. 6th ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 873 p.
17. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. Abrasive Wear. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 224 p.
18. Berns H., Fischer A. Martensitic stainless steels for abrasive and adhesive wear resistance // *Wear*. 1987. Vol. 114, Iss. 3. P. 337–351.
19. Tenenbaum M.M. Resistance to Abrasive Wear. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 270 p.
20. Tsypin I.I. White Wear-Resistant Cast Irons: Structure and Properties. Moscow: Metallurgiya, 1988. 256 p.

Ссылка на статью:

Влияние легирования на износостойкость двойных сплавов на основе железа (синтез литейных сплавов): установление закономерностей «состав – структура – свойство» (часть 1) / Волков С.Ю., Колокольцев В.М., Потапов М.Г., Чернов В.П. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 15-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-15-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-15-21)
Volkov S.Yu., Kolokoltsev V.M., Potapov M.G., Chernov V.P. Effect of alloying on the wear resistance of binary iron-based alloys (casting alloys synthesis): establishment of "composition – structure – property" regularities (part 1). *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 15-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(587\)-15-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(587)-15-21)

Ровин С.Л., Лежнев С.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ ДЛЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, направленных на создание самовосстанавливающихся брикетов из техногенных отходов, предназначенных для замены стальной стружки при выплавке ферросплавов в руднотермических дуговых печах. Использование таких брикетов позволяет снизить себестоимость выплавки ферросплавов и в определенной мере решить задачу рециклинга техногенных отходов, образующихся при производстве стального проката. В ходе выполнения работы были разработаны состав и технология изготовления брикетов, при этом исследовалось влияние различных связующих материалов на прочностные характеристики брикетов, оптимизировалось соотношение железосодержащих компонентов (прокатной окалины и аспирационной пыли дуговых сталеплавильных печей), входящих в состав брикетировочной массы, опробовались различные варианты формирования и уплотнения брикетов (с применением вибропрессования, валкового пресса и кольцевого экструдера). Кроме того, в ходе работы были проведены лабораторные исследования процесса твердофазного восстановления полученных брикетов и определены оптимальные условия и режимы этого процесса. Работы проводились с использованием отходов, образующихся в сталеплавильном и прокатном производстве АО «Узметкомбинат». Апробация результатов работы – проведение опытно-промышленных плавов ферросилиция ФС45 с использованием разработанных самовосстанавливающихся брикетов, осуществлялась на руднотермической печи РВП-25,5 МВА ферросплавного производства АО «Узметкомбинат». Ожидаемый годовой экономический эффект, связанный с сокращением затрат на закупку стальной стружки для ферросплавного производства комбината по предварительной оценке составит около 300 тыс. долл. США.

Ключевые слова: ферросплавное производство, рециклинг, железосодержащие отходы, аспирационная пыль, окалина, брикетирование, самовосстанавливающиеся брикеты

Введение

Актуальной задачей любого производства, в том числе металлургического, является ресурсосбережение и сокращение себестоимости продукции. Одно из важнейших направлений в области ресурсосбережения – переработка и рациональное использование образующихся техногенных отходов, в том числе путем рециклинга – возвращения их в собственное производство [1-3]. Окалина и аспирационная пыль плавильных агрегатов составляют значительную долю отходов любого предприятия черной металлургии. И если на комбинатах полного цикла (таких, например, как АО «Qarmet» в Казахстане) задача рециклинга этих отходов в какой-то степени решается путем их использования в качестве добавок к рудному сырью в агломерационном производстве, то на электрометаллургических заводах этот вопрос остается открытым.

Так, на АО «Узметкомбинат» ежегодно образуется около 25 тыс. т прокатной окалины и аспирационной электросталеплавильной пыли, а ввод в эксплуатацию нового литейно-прокатного комплекса приведет практически к двукратному увеличению этих отходов. Традиционно большая их часть реализуется на цементные заводы, где они используются в качестве добавки при производстве клинкера, при этом цена окалины колеблется в пределах 40-45 долл. США за тонну, а аспирационной пыли около 7-8 долл. До последнего времени для нужд комбината эти отходы не использовались. Вместе с тем на предприятии есть собственное

производство ферросплавов (ферросилиция и ферросиликомарганца), выплавка которых осуществляется в рудовосстановительных (руднотермических) электродуговых печах, где происходит восстановление кремния и марганца из оксидов, их расплавление и соединение в единый сплав с железом. В качестве источника железа традиционно используется стружка черных металлов, которая подается в печи с другими шихтовыми материалами. Текущая стоимость элементной стружки в Узбекистане составляет около 150 долл. США за тонну. В то же время в руднотермических печах есть все необходимые условия для восстановления не только марганца или кремния, но и оксидов железа. С учетом этого была поставлена задача по созданию самовосстанавливающихся брикетов из оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов собственного производства, каковыми являются прокатная окалина и аспирационная электросталеплавильная пыль. В качестве восстановителя в составе брикетов использовалась углеродсодержащая пыль, которая образуется на предприятии при производстве дирексила – высокоомного кокса, и сегодня тоже является техногенным отходом.

Методика и анализ результатов исследований

В состав брикетов были включены: в качестве источника железа – прокатная окалина (ее содержание в брикете варьировалось в пределах от 55 до 75%) и аспирационная пыль, образующаяся при выплавке углеродистой стали в ДСП-100 (5-15%), в качестве восстановителя – пыль дирексила (15-30%),

в качестве связующего использовались добавки огнеупорной глины (3-10%), жидкого стекла (5-10%), цемента (5-15%) и сульфитно-дрожжевой бражки (5-10%).

Усредненный состав основных компонентов брикетировочной массы был следующим:

– прокатная окалина (мас. %): FeO – 76,2, Fe₂O₃ – 21,4, C – 0,15, Si – 0,22, Mn – 0,43, S – 0,02, P – 0,01, прочие ~ 1,5 %;

– аспирационная пыль (мас. %): Fe₂O₃ – 45,0, CaO – 9,4, SiO₂ – 7,8, MgO – 6,2, Al₂O₃ – 2,4, MnO – 1,6, ZnO – 15,3, CuO – 0,1, CaS – 2,2, C – 0,4, FeS – 1,4, P₂O₅ – 0,2, прочие ~ 8%;

– дирексил (в % от сухой массы): углерод – 85,1, сера – 0,25, зольность – 9,1, летучие – 5,55.

Исследовалось влияние вида и количества связующего, а также соотношения основных железосодержащих компонентов на прочностные свойства брикетов – прочность на сжатие: сырую (сразу после приготовления образца) и сухую (после естественной сушки образца в течение суток), а также осыпаемость сухих образцов – как показатель поверхностной прочности. Образцы изготавливались в форме цилиндров диаметром 50 мм и высотой 50 мм в соответствии с ГОСТ 23409.6-78, прочность на сжатие определялась в соответствии с ГОСТ 23409.7-78, осыпаемость – по ГОСТ 23409.9-78. Смесь готовилась в лабораторном лопастном смесителе. Уплотнялись образцы на лабораторном копре.

Плотность образцов подбиралась в соответствии с плотностью брикетов, изготовленных на валковом прессе, и обеспечивалась необходимым количеством

ударов копра. Для исследованных смесей плотность брикетов колебалась в интервале от 1800 до 2250 кг/м³. Валковый пресс был выбран в качестве основного агрегата для изготовления самовосстанавливающихся брикетов, исходя из соображений минимальных удельных энергозатрат на изготовление (по сравнению с вибропрессованием и экструзией), оптимальных размеров брикетов (эллипсоиды с размерами Ø 50×30 мм), невысокой стоимости и надежности оборудования в сочетании с высокой производительностью (что компенсирует достаточно большой оборотный цикл – до 10-15%) и стабильным качеством получаемых брикетов.

Методика исследований отрабатывалась при выполнении аналогичных работ по рециклингу пылевидных отходов ферросплавного производства [5]. Основные из вариантов составов исследованных брикетировочных смесей представлены в табл. 1.

Выбор состава брикетов и соотношения компонентов осуществлялся исходя из принципа минимально достаточного содержания связующего и влаги для обеспечения требуемой формуемости, сырой прочности сразу после изготовления, сухой объемной и поверхностной прочности (осыпаемости) после отверждения.

На рис. 1-3 представлены гистограммы, отражающие указанные прочностные характеристики образцов, изготовленных из исследованных брикетировочных смесей во влажном и в отвержденном состоянии.

Таблица 1

Составы исследованных брикетировочных смесей

Наименование компонентов смеси	Содержание компонентов смеси, %											
	Номера смесей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Прокатная окалина	60	55	60	63	70	60	55	73	65	60	63	60
Пыль ЭСПП	-	-	-	-	-	-	-	-	5	10	7	-
Дирексил	30	30	30	30	20	30	25	17	20	20	20	20
Жидкое стекло	-	5	5	7	10	7	5	-	-	-	-	-
Цемент	10	10	5	-	-	-	5	10	5	10	10	-
Огнеупорная глина	-	-	-	-	-	3	10	-	5	-	-	10
Сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Вода сверх (100%)	10	-	-	-	10	-	5	10	5	10	10	10

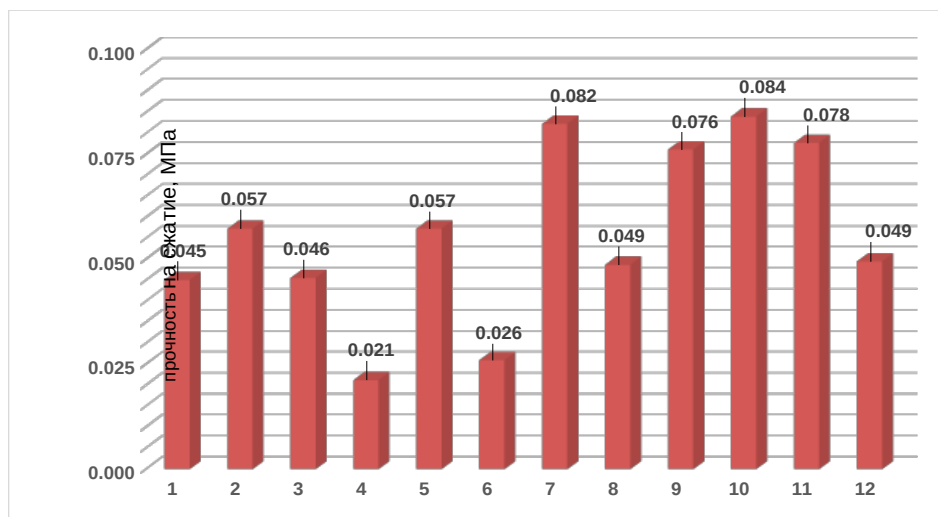


Рис. 1. Прочность образцов на сжатие во влажном состоянии

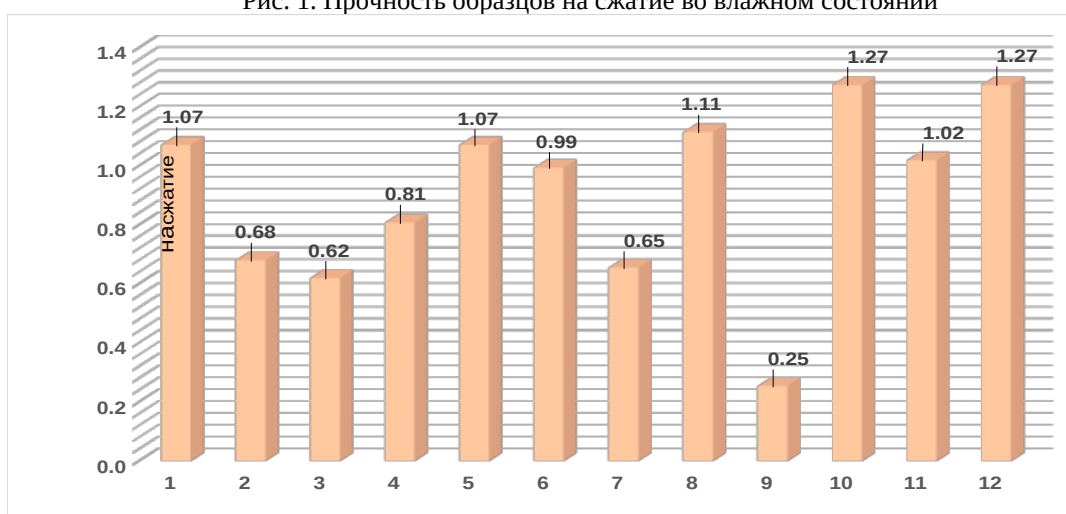


Рис. 2. Прочность образцов на сжатие после отверждения

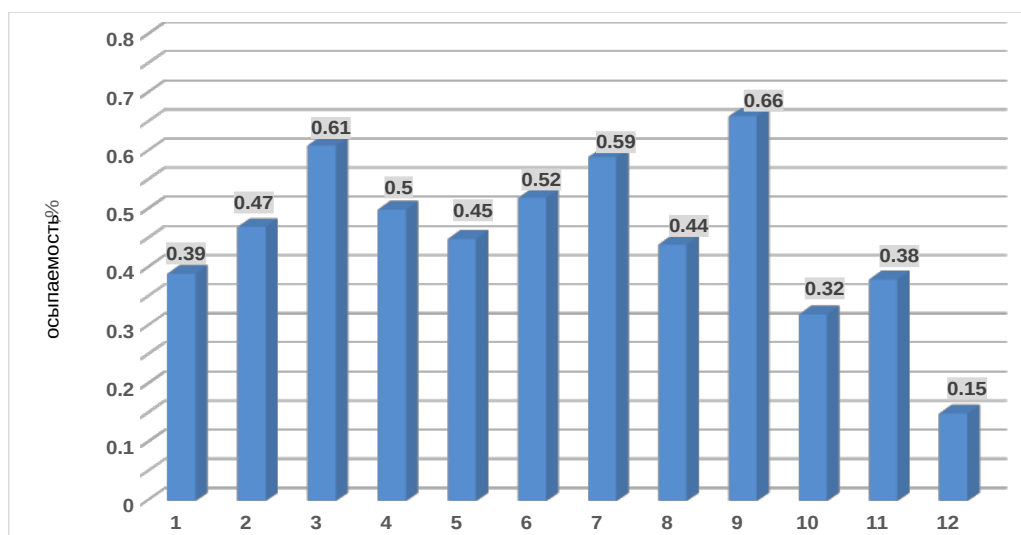


Рис. 3. Осыпаемость образцов после отверждения

Отверждение осуществлялось путем естественной сушки брикетов на воздухе при температуре +15-30°C

(изначально ставилась задача не использовать специальное оборудование для упрочнения брикетов и

обойтись без дополнительных затрат энергоносителей). При этом основным критерием было сохранение целостности брикетов и минимальных потерь на операциях сушки, загрузки и разгрузки в бункера, транспортировки, дозирования и подачи в печь [6-8]. На основании практических данных были определены пороговые значения прочности брикетов: прочность на сжатие в сыром состоянии – не ниже 0,05 МПа, прочность на сжатие после отверждения – не ниже 1,1 МПа, осыпаемость после отверждения – не более 0,4%.

По результатам испытаний в качестве рабочего был принят состав №10: прокатная окалина – 60%, дирексил – 20%, пыль ЭСПП – 10%, цемент – 10 % и вода сверх (100%) – 10%. Этот состав при хорошей формуемости обеспечивает высокую прочность сразу после приготовления и прессования, требуемую прочность после отверждения и достаточно низкую осыпаемость. Плотность сырых брикетов составила ~ 2100 кг/м³, плотность сухих (отвержденных) ~ 1900 кг/м³.

Исследования показали, что аспирационная пыль ДСП не только является источником железа в брикетах, но и повышает сырую прочность: наибольшую прочность в сыром состоянии показали образцы №7 и 10, в составе которых было 10 % глины и 10 % аспирационной пыли соответственно. Было выявлено также, что уменьшение размеров частиц окалины и повышение их однородности также способствует повышению прочности брикетов. Эти наблюдения соответствуют данным, которые приводят в своих работах и другие исследователи [9]. Образцы с глиной в качестве основного связующего ожидаемо демонстрировали неплохую сырую прочность, но после сушки значительно уступали смесям на цементном связующем. Высокую прочность и минимальную осыпаемость после отверждения показали образцы с добавкой сульфитно-дрожжевой бражки. Однако они существенно уступали брикетам на цементе в сырой прочности. Кроме того, деструкция сульфитно-дрожжевой бражки в печи приводит к значительным газовыделениям в печи, ухудшая экологические параметры плавки.

На следующем этапе работ исследовались условия и режимы твердофазного восстановления железа в брикетах. Анализ проводился на составе №10, отобранном на первом этапе исследований. В процессе исследования определялась скорость восстановления при разных температурах (от 1000 до 1300°C, при меньших температурах восстановление шло с ничтожной скоростью) и степень восстановления в зависимости от времени выдержки при заданной температуре через 20, 40 и 60 мин. При температуре 1200°C дополнительно оценивалась степень металлизации через 90 мин выдержки, а при

температурах процесса выше 1200°C взвешивание проводилось также через 5 и 10 мин.

Перед восстановлением смесь окалины, пыли ДСП и пыли дирексила в пропорциях, соответствующих составу №10 (цемент в тигли не добавлялся), просушивалась до постоянного веса при температуре $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Навески исследуемой смеси массой 50-65 г засыпались в алундовые тигли емкостью 75 мл и помещались в предварительно разогретую до заданной температуры муфельную лабораторную печь. Процесс восстановления контролировался по убыли массы, взвешивание образцов осуществлялось на аналитических весах с точностью ± 1 мг. Результаты определялись по двум параллельным образцам. Если потери массы в них отличались более чем на 5%, эксперимент повторялся еще на двух образцах [10]. При оценке восстановления железа учитывались потери массы на газификацию дирексила и восстановление оксидов, которые могут восстанавливаться раньше или параллельно оксидам железа (например, оксидов меди и цинка, в случае с цинком учитывались также потери, связанные с его испарением после восстановления при температурах, превышающих 906°C). Для снижения потерь на газификацию тигли во время выдержки в печи закрывались асбокартоном.

При определении степени металлизации железа экспериментальные значения потери массы сравнивали с максимально возможной потерей массы, рассчитанной исходя из количества и вида оксидов железа, содержащихся в окалине и аспирационной пыли. Состав и степень металлизации образцов, выдержанных в течение 60 и 20 мин при температуре 1300°C, перепроверялся с помощью рентгенофазового анализа.

Усредненные данные по итогам лабораторных исследований процесса восстановления представлены в сводной табл. 2.

Исследования показали, что железо из брикетировочной смеси начинает заметно восстанавливаться лишь при температурах 1000°C и выше. Скорость и степень восстановления с повышением температуры растут, хотя и не очень быстро: при 1000, 1100 и 1200°C через час металлизация достигает уровня ~ 58, ~ 62 и ~ 68% соответственно. Заметное ускорение процесса наблюдалось при температурах выше 1200°C: при 1250°C через час степень восстановления железа превысила 82%, а при 1300°C уже через 20 мин достигла ~ 86,65% (рис. 4, 5). При таких температурах примеси начинают оплавляться и образец спекается. Однако для условий плавки в дуговой руднотермической печи это не является препятствием, наоборот, укрупнение частиц должно способствовать погружению восстановленного железа в расплав и перемешиванию его с продуктами восстановления марганца и кремния.

Таблица 2

Результаты исследования процесса восстановления железа из брикетировочной смеси при различных температурных и временных режимах

Номер образца	Время выдержки, мин	Температура выдержки, °C	Вес образца до восстановления, г	Потери массы образца, г	Потери массы, связанные с восстановлением железа, г	Степень металлизации, %
1	20	1000	60,445	11,755	5,199	52,57
2	40	1000	61,185	12,440	5,572	55,66
3	60	1000	60,510	12,700	5,737	57,95
4	20	1100	50,235	10,475	4,724	57,48
5	40	1100	50,515	10,955	4,991	60,39
6	60	1100	50,605	11,180	5,117	61,80
7	10	1200	60,300	12,800	5,800	58,79
8	20	1200	60,330	13,650	6,285	63,67
9	40	1200	60,815	14,185	6,578	66,11
10	60	1200	60,425	14,415	6,719	67,96
11	90	1200	60,350	14,860	6,976	70,65
12	20	1200	66,700	14,050	6,521	66,39
13	40	1200	65,090	14,690	6,923	73,79
14	60	1200	65,250	15,150	7,182	74,75
15	20	1250	63,000	14,800	6,875	66,70
16	40	1250	63,000	16,520	7,858	76,23
17	60	1250	62,000	17,350	8,357	82,38
18	5	1300	60,550	16,750	8,051	81,27
19	10	1300	60,250	17,500	8,487	86,09
20	20	1300	61,300	17,950	8,667	86,65

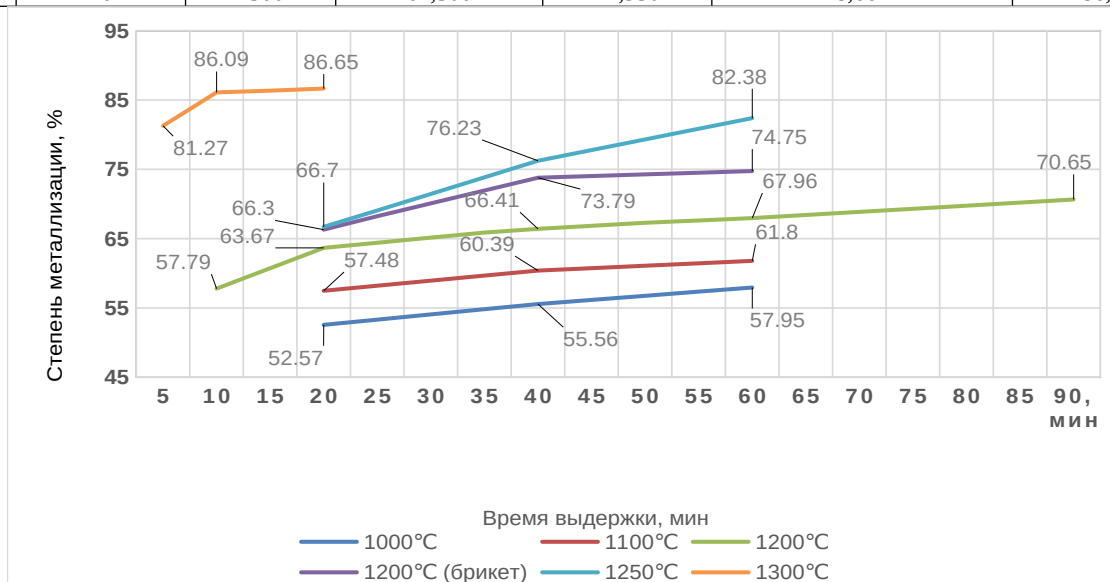


Рис. 4. Степень металлизации в зависимости от времени выдержки при разных температурах

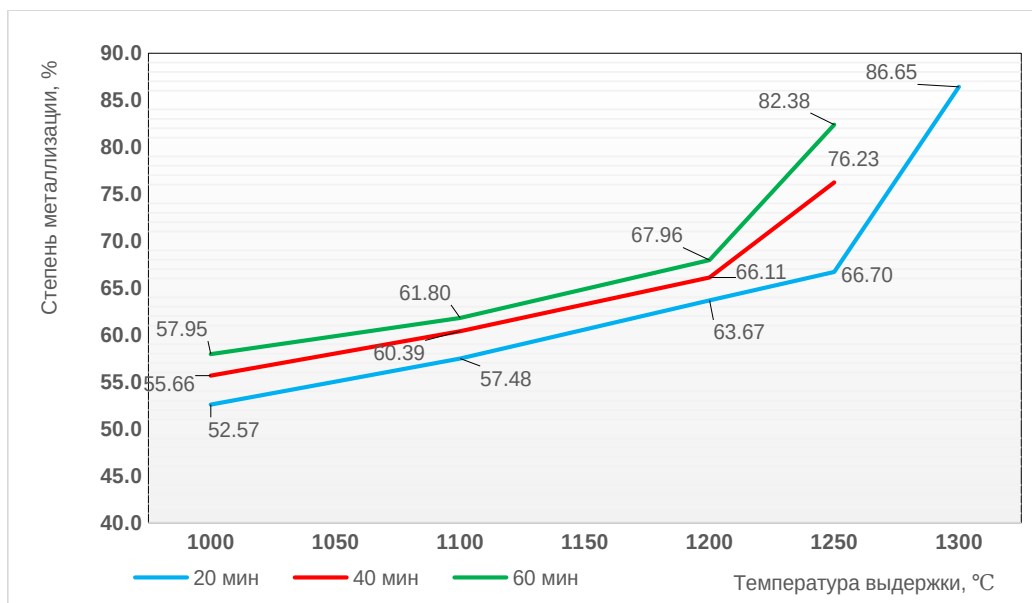


Рис. 5. Степень металлизации железа в зависимости от температуры и времени выдержки

С увеличением продолжительности процесса степень металлизации возрастает. Но, в соответствии с принципом протекания концентрационных процессов (химических и диффузионных), чем меньше остается в материале невосстановленного железа, тем медленнее идет процесс восстановления, что становится особенно заметно, когда степень металлизации достигает 75-80% и более. Так, на рис. 4 видно, что при температуре 1300°C в первые 5 мин скорость восстановления составляет в среднем 16% в минуту, в следующие 5 мин – не более 1 % / мин, а в следующие 10 – около 0,1 % / мин.

Лабораторные исследования показали также, что добавление цемента в состав не замедляет процесс восстановления. Более того, брикеты восстанавливались даже быстрее, чем навеска в тигле (образцы №12, 13, 14 в табл. 2), что, возможно, связано с более тесным контактом частиц и более равномерным прогревом брикета по сравнению со слоем материала в тигле.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать и оптимизировать состав и технологию изготовления самовосстанавливающихся брикетов из техногенных металлургических отходов, образующихся на Узметкомбинате, которые могут быть использованы в качестве замены стальной стружки при выплавке ферросилиция и ферромарганца в руднотермических дуговых печах.

Совместное использование в составе окалины и аспирационной пыли позволяет улучшить механические свойства брикетов.

Разработанные самовосстанавливающиеся брикеты обладают необходимым комплексом физико-механических и технологических свойств, обеспечивающих минимальные потери при их

транспортировке, хранении, дозировании и подаче в печи, и эффективное восстановление в условиях, соответствующих шлаковой ванне руднотермических дуговых печей.

Внедрение полученных результатов позволит заменить около 5000 т стальной стружки в год, что составляет около 50% от текущих потребностей комбината при производстве ферросилиция и ферросиликомарганца, утилизировав при этом около 7200 т прокатной окалины, ~ 1200 т аспирационной пыли электродуговой плавки стали и ~ 2400 т пыли, образующейся при производстве дирексила. Ожидаемое сокращение затрат на закупку стальной стружки составит при этом около 300 тыс. долл. США в год.

Список источников

1. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия. М.: Высшая школа, 1998. 447 с.
2. Пути повышения качества отливок и эффективности использования вторичных ресурсов / Калинин А.С., Рудницкий Ф.И., Николайчик Ю.А., Слуцкий А.Г., Шейнерт В.А., Ровин С.Л. // Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения: сб. науч. ст. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 95-114.
3. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. № 5 (63). С. 335 - 343.

4. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа*. М.: Metallurgy, 2007. 320 с.
5. Рециклинг аспирационной пыли электродуговой плавки ферросиликомарганца / Ровин С.Л., Гараев Р.С., Каримов А.М., Фозилов Б.Р. // *Теория и технология металлургического производства*. 2024. № 4 (51). С.13-17.
6. Котенев В.И. Брикетты из мелкодисперсных отходов металлургического и коксохимического производств – экономически выгодная замена традиционной шихты металлургических переделов // *Металлург*. 2002. № 10. С. 19-22.
7. Новицкий Н.А. Разработка технологических рекомендаций производства брикетированного шихтового материала из техногенного сырья и исследование физико-механических свойств окалиноуглеродных брикеттов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 28 с.
8. Бижанов А.М., Загайнов С.А. *Технологии брикетирования в черной металлургии: монография*. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 256 с.
9. Метод прогнозирования прочностных характеристик брикеттов, полученных из сухих мелкофракционных материалов / Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Баюл К.В., Семенов Ю.С. // *Черные металлы*. 2021. №6. С. 59-64.
10. Ровин С.Л., Каримов А.М. Разработка самовосстанавливающихся брикеттов из прокатной окалины и аспирационной пыли ДСП для производства ферросплавов // *Литейное производство и металлургия: сб. тр. 33-й Международной науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2025. С.93-98.*

Сведения об авторах

Ровин Сергей Леонидович - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлургия черных, цветных и редких металлов» Алмалыкского филиала НИТУ «МИСиС», Республика Узбекистан, Ташкентская область, г. Алмалык. E-mail: rovinisl@mail.ru

Лежнев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургия и горное дело», Республика Казахстан, Костанайская область, г. Рудный. E-mail: sergeylegnev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF SELF-REDUCING IRON-BEARING BRIQUETTES FOR FERROALLOY PRODUCTION

Rovin Sergey L. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals» at the Almalyk Branch of NUST MISIS, Republic of Uzbekistan, Tashkent Region, Almalyk. E-mail: rovinisl@mail.ru

Lezhnev Sergey N. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metallurgy and Mining», Republic of Kazakhstan, Kostanay Region, Rudny. E-mail: sergeylegnev@mail.ru

Abstracts. The article presents the results of research aimed at developing self-reducing briquettes from industrial waste intended to replace steel chips in ferroalloy smelting in submerged arc furnaces. The use of such briquettes makes it possible to reduce the production cost of ferroalloys and, to a certain extent, solve the problem of recycling industrial waste generated during steel production. During the study, the composition and manufacturing technology of the briquettes were developed. The influence of various binding materials on the strength characteristics of the briquettes was investigated, and the ratio of iron-containing components (rolling mill scale and aspiration dust from electric arc steelmaking furnaces) included in the briquetting mixture was optimized. Various methods of briquette forming and compaction were tested, including hydraulic pressing, roller pressing, and ring extrusion. In addition, laboratory studies of the solid-phase reduction process of the obtained briquettes were carried out, and the optimal conditions and operating parameters of this process were determined. The research was conducted using waste generated in the steelmaking and rolling production processes of JSC “Uzmetkombinat.” Pilot-industrial smelting tests of FS45 ferrosilicon using the developed self-reducing briquettes were performed in the RVP-25.5 MVA submerged arc furnace at the ferroalloy production facility of JSC “Uzmetkombinat.” The expected economic effect associated with reducing the cost of purchasing steel chips for the plant’s ferroalloy production is estimated at approximately USD 300 thousand per year.

Keywords: ferroalloy production, recycling, iron-bearing wastes, steelmaking dust, mill scale, briquetting, self-reducing briquettes

References

1. Lisin V.S., Yusfin Yu.S. Resource and environmental problems of the 21st century and metallurgy. Moscow: Vysshaya Shkola, 1998. 447 p.
2. Kalinichenko A.S., Rudnitsky F.I., Nikolaichik Yu.A., Slutsky A.G., Sheinert V.A., Rovin S.L. Ways to improve casting quality and the efficiency of secondary resource utilization // Metallurgy in mechanical engineering of Belarus: results and prospects of scientific support: collected scientific papers. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2016. Pp. 95-114.
3. Anikin A.E., Galevsky G.V., Rudneva V.V. Investigation of technological parameters for efficient metallization of iron oxide-containing metallurgical wastes // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. № 5 (63). Pp. 335–343.
4. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. Iron Metallurgy. Moscow: Metallurgiya. 2007. 320 p.
5. Rovin S.L., Garaev, R.S., Karimov, A.M., Fozilov, B.R. Recycling of electric arc ferrosilicomanganese smelting aspiration dust // Teoriya i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2024. №4 (51). Pp. 13-17.
6. Kotenev V.I. Briquettes made from fine-dispersed waste of metallurgical and coke-chemical production as a cost-effective substitute for traditional charge materials in metallurgical processing // Metallurg [Metallurgist]. 2002, No. 10, pp. 19–22.
7. Novitsky N.A. Development of technological recommendations for the production of briquetted charge materials from technogenic raw materials and investigation of the physical and mechanical properties of mill scale–carbon briquettes: extended abstract of the Ph.D. (Engineering) Dissertation. Moscow, 2017. 28 p.
8. Bizhanov A.M., Zagainov S.A. Briquetting technologies in ferrous metallurgy: monograph. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020. 256 p.
9. Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Bayul K.V., Semenov Yu.S. A method for predicting the strength characteristics of briquettes produced from dry fine-grained materials. Chernye Metally [Ferrous Metals]. 2021. № 6. Pp. 59-64.
10. Rovin S.L., Karimov A.M. Development of self-reducing briquettes from rolling mill scale and electric arc furnace aspiration dust for ferroalloy production // Foundry production and metallurgy, 2025. Belarus.: Proceedings of the 33rd International scientific and technical conference. Minsk: BNTU, 2025. Pp. 93-98.

Ссылка на статью:

Ровин С.Л., Лежнев С.Н. Исследование и оптимизация состава самовосстанавливающихся железосодержащих брикетов для ферросплавного производства // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 22-28. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-22-28)

Rovin S.L., Lezhnev S.N. Investigation and optimization of the composition of self-reducing iron-bearing briquettes for ferroalloy production. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 22-28. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-22-28)

Абащенко И.И., Уртаев Д.А.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ LVMflow 6.65 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ФГУП «НАМИ»

Аннотация. Современные программные решения в области моделирования литейных процессов позволяют значительно снизить себестоимость продукции путём проведения виртуальных симуляций важнейших литейных процессов, таких как: заполнение формы сплавом, процессы кристаллизации и охлаждения, что позволяет уменьшить время на разработку технологии, проверить технические решения для каждой конкретной отливки, оптимизировать расход материалов, увеличить выход годного и т. д. Однако иногда результаты моделирования литейных процессов имеют большие отклонения от практических испытаний. Таким образом, повышение результатов сходимости моделирования литейных процессов и практических испытаний является актуальной задачей. Цель работы: раскрыть возможности программного продукта LVMflow и повысить результаты сходимости математического моделирования и практических испытаний. В работе использованы методы компьютерного моделирования, компьютерной томографии и результаты натурных испытаний. В статье представлены сравнительные результаты компьютерного моделирования литейных процессов на примере литой заготовки «кронштейн» из алюминиевого сплава АК8Л с использованием программного пакета моделирования литейных процессов LVMflow 4.5 и 6.65 в различных результирующих полях. Установлены зависимости результатов моделирования в различных результирующих полях и мест возникновения дефектов. Показаны процесс оптимизации технологии методом литья под низким давлением, основанный на результатах моделирования, и результаты практического применения.

Ключевые слова: моделирование литейных процессов, параметры, сплав, кристаллизация, результирующее поле, дефекты, оптимизация

Объектом исследования является литая заготовка «кронштейн» из алюминиевого сплава АК 8Л ГОСТ 1583-93, получаемая в песчано-полимерной форме, изготовленная на 3D-принтере (далее ППФ) методом литья под низким давлением. ППФ представляет собой стержневой пакет, изготовленный по фуран-процессу. Согласно техническим требованиям чертежа, к отливке предъявляются довольно высокие требования, 3-я группа по ОСТ 37.002.0927-90. Также отливки проходят 100%-й рентген-контроль. Средняя толщина стенки отливки 5 мм. Отливка имеет развитую сеть рёбер рис. 1.

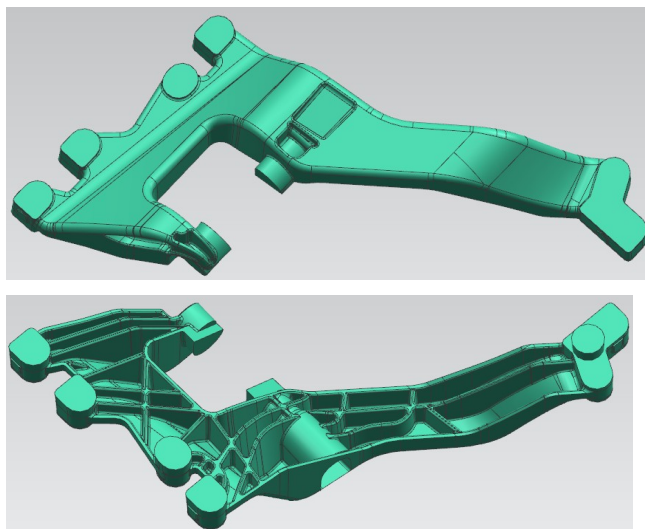


Рис. 1. Общий вид отливки «кронштейн»

Для изготовления отливки решили использовать технологию литья под низким давлением. Метод литья под низким давлением основан на заполнении формы расплавленным металлом под действием избыточного (выше атмосферного) давления газа (обычно осушенный воздух), подаваемого в герметичную полость печи. Технологический процесс разрабатывался под установку KURTZ 1215 с одним металлопроводом. Установка позволяет корректировать давление на разных этапах заливки с помощью высокоскоростного регулятора давления, управляемого автоматикой литейной установки. Управление скоростью заполнения формы позволяет получать качественные тонкостенные отливки (толщина стенки до 3 мм) сложной формы с высокими требованиями. После полного заполнения формы металл дополнительно подпрессовывается избыточным давлением, что дополнительно позволяет предотвратить образование усадочных раковин и других дефектов.

Перед запуском производства пробной партии отливок проводили моделирование в LVMflow 4.5, которые показали, что дефектов в отливке нет. Однако на этапе контроля на наличие внутренних дефектов посредством компьютерной томографии были выявлены дефекты (рис. 2).

После проведённого анализа изображений компьютерной томографии было принято решение выполнить моделирование литейных процессов на более современной версии программы LVMflow – версии 6.65, имеющей дополнительные функции для более полного анализа причин возникновения дефектов.

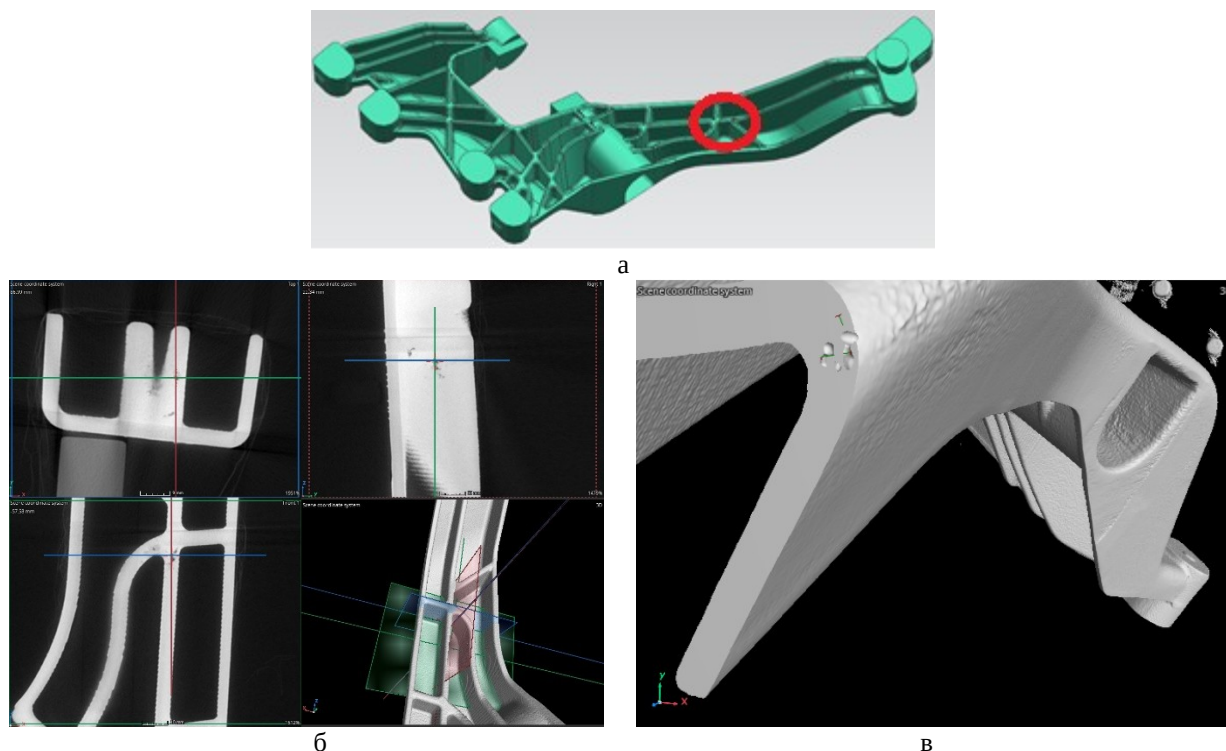


Рис.2. Расположение дефектов в отливке:
а – в зоне пересечения рёбер; б – дефекты усадочного характера;
в – газовые дефекты неясного происхождения

В модуле «3D-конвертер» преобразовали STL модель из CAD-системы в модель формата CVG для дальнейшей работы в модуле «Начальные установки».

Для запуска процесса моделирования использовали следующие параметры литейной конфигурации:

- Высота отливки 400 мм.
- Высота ЛПС 160 мм. 2 отливки в форме.
- Вес отливок с ЛПС 26 кг.
- Температура заливки 710 °С.

Режим заливки формы показан в табл. 1.

Таблица 1

Режим заливки литейной формы

Время, с	Давление, мБар (Па)
0	115 (11500)
5	160 (16000)
11	275 (27500)
15	275 (27500)
25	380 (38000)

В модуле «Начальные установки» установили размер сетки 3 мм, так как меньший размер ячейки значительно увеличит время моделирования и объём занимаемой памяти, при этом никак не улучшит качество моделирования. Задали толщину формы 50 мм, граничные условия по всем плоскостям – излучение, материалы для моделирования. Проверили сетку на наличие плотного контакта между телом отливки и бокса (формы) при помощи инструмента

«Редактировать модель». Задали максимальный приведенный размер тел зазора в ячейке 1% и проверили сетку. В результате проверки были выявлены ячейки с зазором. Закрыли зазор. Моделирование проводили без учёта конвекции, с учётом газа при заполнении и с учётом «пузырей», но без учёта ликвации. Установили давление подпрессовки 380 мБар (38000 Па). Установили граничные условия для литника как нормальные с температурой 710 °С, для выпора как излучение с температурой 20 °С.

В модуле «Полная задача» установили критерии автостопа по объёму жидкой фазы 0%. Также установили необходимые поля для записи. Моделирование проводили с нерегулярной сеткой.

После моделирования процессов заполнения и кристаллизации сплава в модуле «Полная задача» получили результаты. Проведем анализ основных результирующих полей:

1. Поле «Жидкая фаза» (рис. 3). Анализ количества жидкой фазы в объёме отливки позволяет увидеть направление фронта кристаллизации и разрывы жидкой фазы вокруг теплового узла. Образование разрыва жидкой фазы свидетельствует о возможном образовании усадочных дефектов в этих местах. Из анализа изображений можно сказать, что в целом фронт имеет правильное направление сверху вниз и от отливки к ЛПС, но также имеется 6 мест с разрывом фронта, что свидетельствует о возможном появлении в этих местах усадочных дефектов.

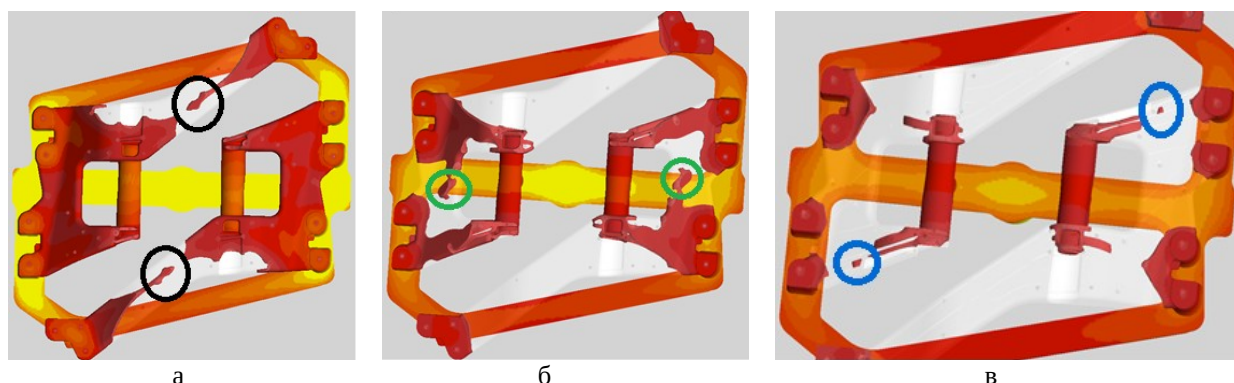


Рис. 3. Результаты моделирования в поле «Жидкая фаза»

2. Поле «Усадка» (рис. 4). Отрегулировали шкалу для поля усадка таким образом, чтобы получить более контрастное отображение усадочных дефектов. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования линейной шкалы. Минимальный уровень 0,1%, максимальный 10%. Усадочные дефекты порядка 3% выявлены в следующих местах.

Места расположения усадочных дефектов практически полностью соответствуют изолированным областям с разрывом фронта кристаллизации вокруг теплового узла (см. поле «Жидкая фаза»), а также местам расположения дефектов в отливках из пробной партии (рис. 2, б и 4, а), кроме 4-х мест (рис. 3, б, в и 4, б). Отсутствие усадочных дефектов в этих местах возникает из-за не совсем правильно подобранного соотношения порогов текучести/протекания и продавливания

сплава, то есть фильтрации сплава через дендритный каркас.

3. Поля «Захват воздуха» (рис. 5) и «Пузыри» (рис. 6) показывают наличие воздуха, который при определенных условиях заливки может захватываться металлом, заполняющим форму. Поле «Захват воздуха» показывает наличие крупных воздушных пузырей внутри расплава, которые могут являться причиной непроливов и других дефектов. Поле «Пузыри» отображает наличие газовых пузырей меньше размера сетки. Отрегулировали шкалу для поля «Пузыри» таким образом, чтобы получилось более контрастное отображение. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования линейной шкалы. Минимальный уровень 0%, максимальный 10%.

На моделях мы не обнаружили мест, где воздух не выходит и остаётся в полости формы.

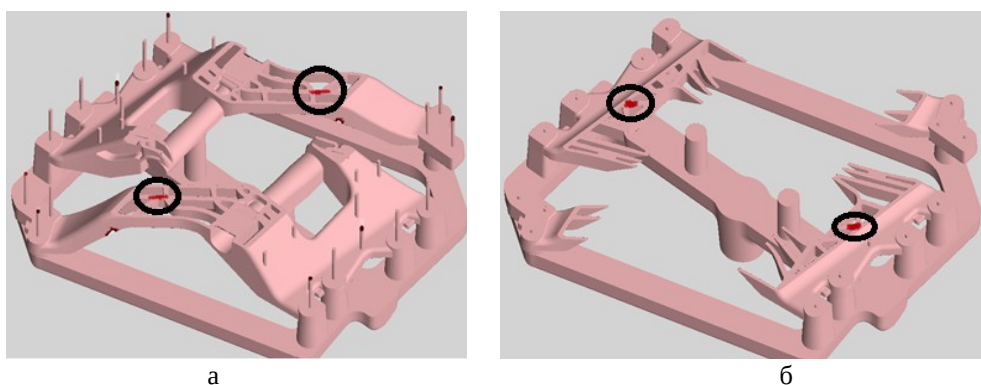


Рис. 4. Результаты моделирования в поле «Усадка»

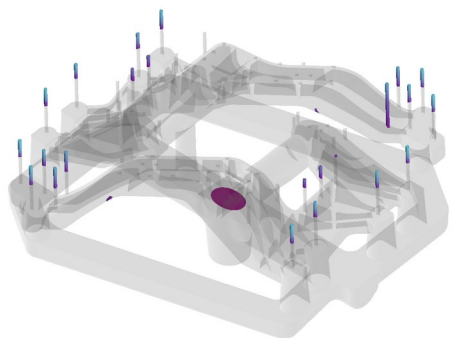


Рис. 5. Результаты моделирования в поле «Захват воздуха»

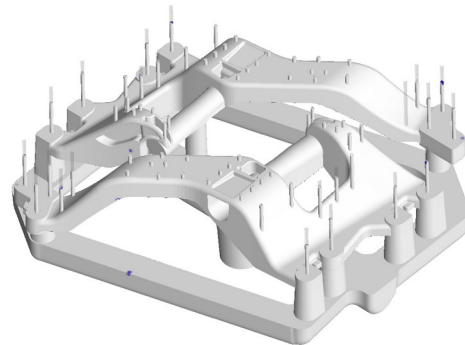


Рис. 6. Результаты моделирования в поле «Пузыри»
подтверждается в отливках пробной партии (см. рис. 2, в). В местах, обозначенных зелёным (см. рис. 7), вероятность возникновения такого рода дефектов можно считать довольно низкой вследствие движения металла только в направлении от полости формы к стенкам формы и высокой толщины стенок.

4. Поле «Время контакта с воздухом» (рис. 7). Анализ данного результирующего поля позволяет оценить вероятность возникновения дефектов, связанных с окислением сплава кислородом воздуха, находящегося в полости формы. По мере продвижения зеркала металла через полость формы он активно окисляется, «замешивая» оксиды и оксидные плёнки в металл. Чем длиннее путь и площадь контакта, тем больше плёнок и оксидов будет образовываться. Из геометрии отливки и ЛПС можно увидеть, что в отливке есть место, в котором сойдутся два потока металла, довольно длительное время находящихся в контакте с воздухом. В этом месте можно прогнозировать появление не только неслитин, но и неметаллических включений, пористости и других дефектов. Отрегулируем шкалу для результирующего поля таким образом, чтобы получить более контрастное отображение. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования нелинейной шкалы. Минимальный уровень 0 с, максимальный 1 с. Анализ изображений показал, где возможно появление неслитин и других дефектов, связанных с окислением металла.

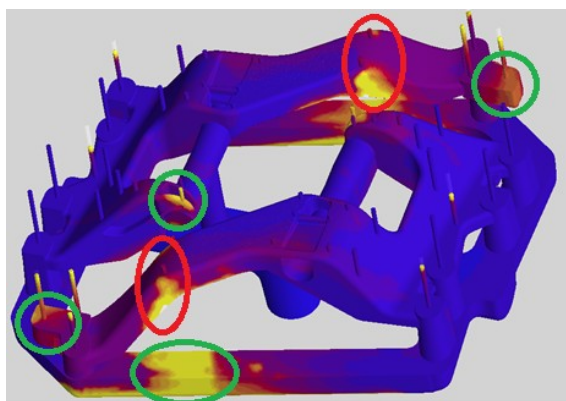


Рис. 7. Результаты моделирования в поле «Время контакта с воздухом»

В местах, обозначенных красным (см. рис. 7), видны неслитины в тонких сечениях отливки, а также места с наибольшей концентрацией неметаллических включений. Наличие дефектов в этой зоне

После проведённого анализа результирующих полей наблюдается некоторое противоречие между прогнозируемыми усадочными дефектами (см. рис. 3, б, в и 4, б) и дефектами в отливках опытной партии. Предположили, что это связано с разницей между реальными теплофизическими свойствами ППФ и теплофизическими свойствами формы из банка материалов LVMflow, или со свойствами сплава, или другими свойствами, поскольку регулируемых параметров очень много. Для устранения этого противоречия была выполнена корректировка теплофизических свойств материала формы в модуле «Тест» из программного пакета LVMflow 6.65. Существенных изменений в результате моделирования это не принесло. Далее были выполнены корректировки значений порогов текучести, протекания и продавливания для сплава. Эти корректировки оказали более существенное влияние на точность результата. Моделирование с конвекцией позволило приблизить результаты моделирования к результатам, полученным на пробной партии отливок, но расчёт с конвекцией занял большое количество времени, около 16 ч против 4 ч без конвекции. По результатам моделирования с корректными данными для пороговых значений были выполнены мероприятия по ликвидации дефектов в обозначенных местах.

Для ликвидации усадки (см. рис. 4, а) и уменьшения времени контакта сплава с воздухом (см. рис. 7) организовали подвод металла в эту область.

Для ликвидации усадки (см. рис. 3), в возможно организовать направленное затвердевание для этой зоны, для этого установим в эту область стальной холодильник. Далее провели моделирование заполнения и кристаллизации с необходимыми изменениями для проверки выбранных технических решений. В результате выполненных корректировок были ликвидированы усадочные дефекты и неслитины (рис. 8, 9).

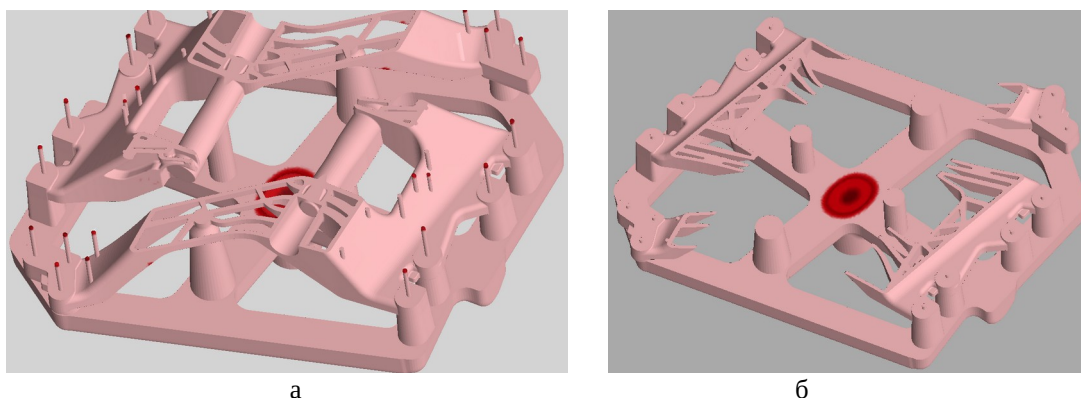


Рис. 8. Результаты моделирования в поле «Усадка» после оптимизации технологии

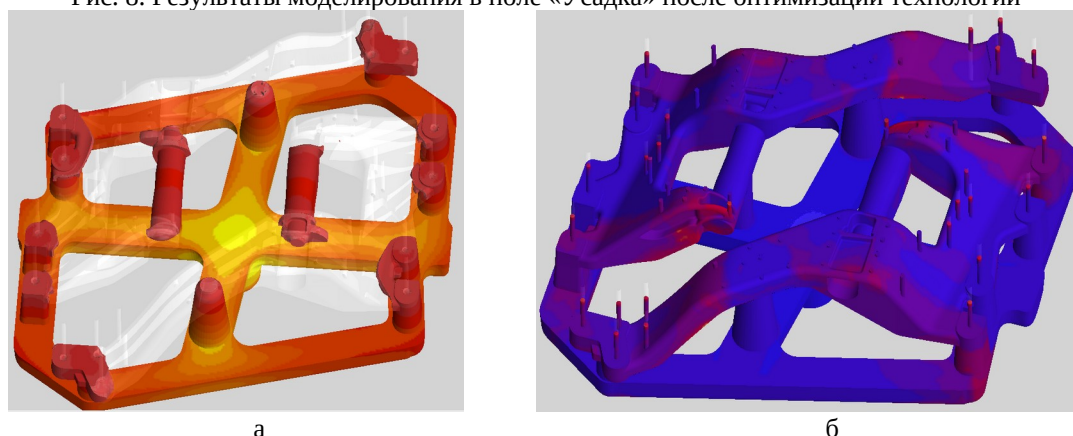
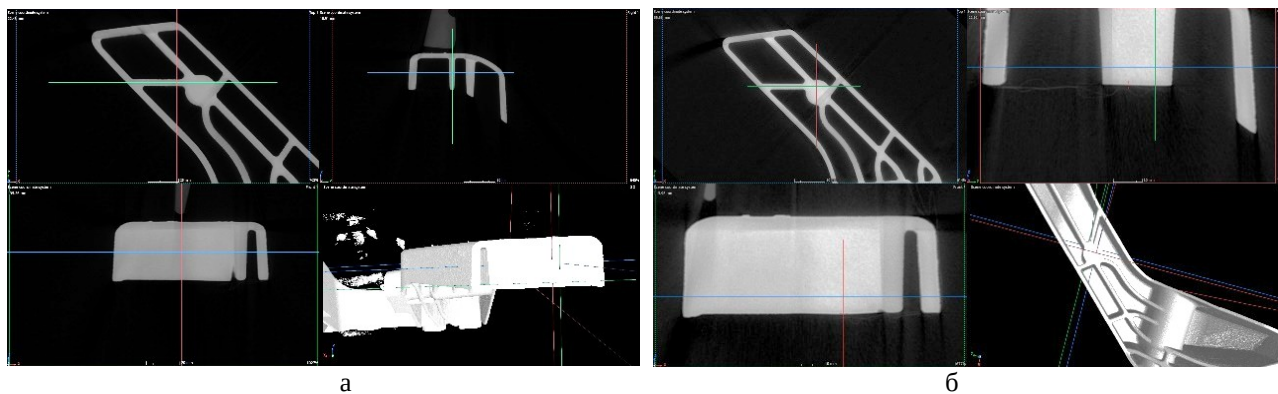


Рис. 9. Результаты моделирования в поле «Жидкая фаза» после оптимизации технологии

По оптимизированной технологии были изготовлены пробные отливки и произведена их компьютерная томография (рис. 10). На фото изображены критические зоны отливки, выявленные в результате анализа, где вероятность возникновения дефектов была очень велика. Как видно из снимков, проведенная по результатам моделирования оптимизация технологии позволила устранить дефекты.

Выводы. На примере литой заготовки «кронштейн» были смоделированы литейные процессы заполнения и кристаллизации,

проанализированы результаты и выполнена оптимизация технологии. На основании полученных результатов можно сказать, что LVMflow является надёжным инструментом для сокращения времени на разработку технологии, проверку технических решений для каждой конкретной отливки. Однако есть важные нюансы. При работе в данном программном пакете настройка параметров программы, параметров материалов и интерпретации результатов может занять довольно продолжительное время, особенно на этапе внедрения данного программного обеспечения.



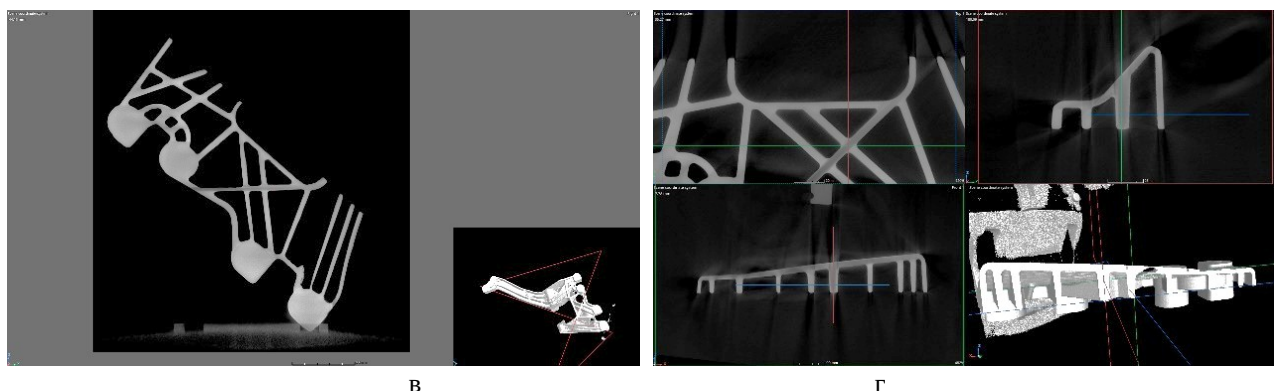


Рис. 10. Результаты компьютерной томографии критических зон отливки

Сведения об авторах

Абашенков Илья Игоревич – ведущий инженер-технолог, отдела главного металлурга, конструкторско-технологическое управление, ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия. E-mail: ilya.abashenkov@nami.ru

Уртаев Денис Алексеевич – кандидат технических наук, главный металлург, конструкторско-технологическое управление, ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия. E-mail: denis.urtaev@nami.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

APPLICATION OF THE LVMFLOW 6.65 CASTING SIMULATION SOFTWARE IN DEVELOPING A LOW-PRESSURE CASTING PROCESS AT FSUE NAMI

Abashchenkov Ilya I. – Leading process engineer, department of the chief metallurgist, Design and Technology Department, FSUE “NAMI”, Moscow, Russia. E-mail: ilya.abashenkov@nami.ru

Urtaev Denis A. – Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist, Design and Technology Department, FSUE “NAMI”, Moscow, Russia. E-mail: denis.urtaev@nami.ru

Abstracts. Modern software solutions in the field of modeling casting processes make it possible to significantly reduce production costs by conducting virtual simulations of key casting processes, such as filling the mold with alloy, crystallization and cooling processes, which helps reduce the time required to develop the technology, test technical solutions for each specific casting, optimize material consumption, increase the yield, etc. However, sometimes the results of modeling casting processes show significant deviations from practical tests. Thus, improving the convergence of modeling casting process results and practical tests is an urgent task. The aim of the work is to reveal the capabilities of the LVMflow software product and to improve the convergence results of mathematical modeling and practical tests. The work uses methods of computer modeling, computed tomography, and the results of field tests. The article presents comparative results of computer modeling of casting processes using the example of a cast workpiece “bracket” made of AK8L aluminum alloy, with the use of the LVMflow 4.5 and 6.65 software package for modeling casting processes in various resulting fields. Dependencies between the modeling results in various resulting fields and the locations where defects occur have been established. The process of optimizing the technology using low-pressure casting, based on the modeling results, and the results of practical application are presented.

Keywords: simulation of casting processes, parameters, alloy, crystallization, resulting field, defects, optimization

Ссылка на статью:

Абашченков И.И., Уртаев Д.А. Опыт применения программного пакета моделирования литейных процессов LVMflow 6.65 при разработке технологического процесса литья под низким давлением в ФГУП «НАМИ» // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-29-34)

Abashchenkov I.I., Urtaev D.A. Application of the LVMflow 6.65 casting simulation software in developing a low-pressure casting process at FSUE NAMI. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-29-34)

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Субботин А.Ю., Шиляев А.А.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ АВТОШИН В КАЧЕСТВЕ КАРБЮРИЗАТОРА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА

Аннотация. В настоящее время в связи с ограниченным доступом и дороговизной первичных шихтовых материалов производители все чаще обращаются к технологии выплавки синтетического чугуна, получаемого из железоуглеродистых материалов, стального лома, возврата собственного производства, листовой обрезки, высечки тонколистовой стали, стружки и других низкосортных дешевых стальных отходов, обедненных углеродом, посредством управляемого науглероживания расплава. В контексте общего тренда экологизации разработок авторами данной статьи ранее был предложен и успешно опробован в условиях действующего производства вариант применения материала отработавших автошин в качестве карбюризатора стального расплава. Целью данной работы стало описание и объяснение поведения выбранного материала при нагреве в широком диапазоне температур и поиск теоретических оснований и предпосылок его применения в качестве карбюризатора стального расплава на синтетический чугун. При этом применялись теоретические методы исследования, не предполагающие непосредственных экспериментов с материалом, а опирающиеся на уже имеющуюся и полученную информацию о нем, – оценка возможности и условий протекания химических реакций и термодинамический расчёт изменения состава материала от температуры по методике профессора А.М. Куткина. В итоге показано, что в условиях проведения индукционной плавки стали создаются температурные условия, достаточные для получения из материала отработавших автошин графитоподобных структур и в конечном итоге углерода для науглероживания металлического расплава, а также для удаления из системы элементов, ухудшающих качество получаемого металла.

Ключевые слова: синтетический чугун, карбюризатор, отработавшие автошины, стальной расплав, науглероживание, низкотемпературный пиролиз, карбонизация, графитизация

Введение

В настоящее время в связи с ограниченным доступом и дороговизной первичных шихтовых материалов производители все чаще обращаются к технологии выплавки синтетического чугуна, получаемого из железоуглеродистых материалов, стального лома, возврата собственного производства, листовой обрезки, высечки тонколистовой стали, стружки и других низкосортных дешевых стальных отходов, обедненных углеродом, посредством управляемого науглероживания расплава [1].

Накоплен уже солидный опыт плавки такого чугуна в электрических индукционных печах и производства из него литых заготовок деталей ответственного и особо ответственного назначения, например, локомотивных и вагонных колодок, фрикционных клиньев, коленчатых валов, блоков цилиндров, головки блока двигателей внутреннего сгорания и др., работающих при высоких силовых нагрузках и повышенных температурах [2-6].

При этом для науглероживания металлического расплава в качестве карбюризаторов крупные предприятия, например автомобильные заводы ГАЗ и КамАЗ, используют бой графитовых электродов дуговых электропечей, природный графит, кокс, термоантрацит или специальные комплексные углеродсодержащие композиции. Некоторые из них, имея вполне удовлетворительный набор технологических свойств (зольность, расход, степень усвоения металлическим расплавом), характеризуются дефицитностью и высокой ценой,

другие доступны и дешевы, но уступают первым в технологичности и содержат в своем составе повышенное количество серы, являющейся для чугуна вредной примесью и препятствующей эффективному модифицированию.

На этом фоне в контексте общего тренда экологизации разработок авторами данной статьи был предложен и успешно опробован в условиях действующего производства вариант применения материала отработавших автошин в качестве карбюризатора стального расплава. Синтетическая резина, являющаяся основным компонентом состава этого материала, по данным ряда информационных источников, более чем на 90% представляет собой высокомолекулярный углеводород, претерпевающий термодеструкцию и выделяющий углерод в интервале рабочих температур плавки [7-9].

Целью данной работы было описание и объяснение поведения выбранного материала при нагреве в широком диапазоне температур и поиск теоретических оснований и предпосылок его применения в качестве карбюризатора стального расплава на синтетический чугун.

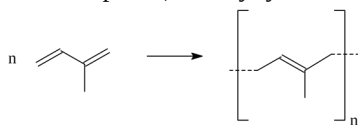
При этом применялись теоретические методы исследования, не предполагающие непосредственных экспериментов с материалом, а опирающиеся на уже имеющуюся и полученную информацию о нем, – оценка возможности и условий протекания химических реакций и термодинамический анализ изменений состава материала в зависимости от температуры.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

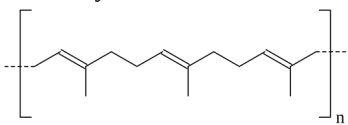
Поскольку, как известно, автошины получают с использованием полимерного материала, то его основа содержит достаточно большое количество углерода, который можно использовать для получения ряда сплавов, востребованных в промышленности, например чугуна. Эта возможность становится особенно привлекательной с учетом большого количества автошин, отработавших свой ресурс, и проблем с их утилизацией.

Однако использование такого углерода сопряжено с необходимостью отделить от основы другие химические элементы, такие как водород, кислород, сера, азот. Эти элементы входят в состав применяемых при производстве резины вулканизирующих веществ, пластификаторов и иных добавок, призванных обеспечить резиновым изделиям необходимые характеристики.

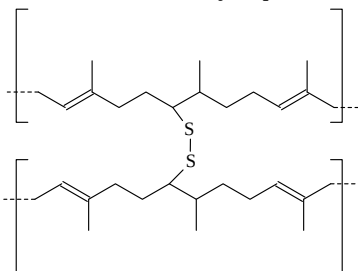
Исходно процесс получения резины можно представить полимеризацией каучука:



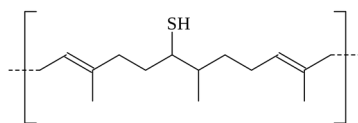
Так получается полимерная цепь, которая имеет структуру, показанную ниже:



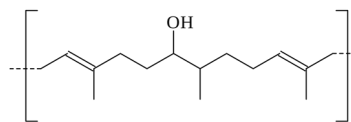
При вулканизации происходит сшивание подобных цепей за счет полисульфидных мостиков:



При повышении температуры в условиях плавки дисульфидная связь, в силу своей относительной непрочности, будет склонна к разрыву одной из первых. При подобном преобразовании на поверхности полимерной цепи появится серосодержащая функциональная группа (в нашем примере мы используем для представления этого тиол):



В качестве функциональной группы кислорода аналогично будем представлять гидроксогруппу:



На основании сказанного выше становится понятным, что рассмотрение термических преобразований резины можно свести к двум аспектам – отщеплению от полимерной цепи функциональных групп и собственно термической деструкции углеводородной цепи, приводящей к образованию структур, имеющих сходство с графитом.

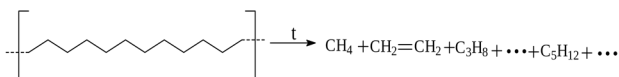
Результаты исследования и их обсуждение

Процессы, протекающие с органическими веществами при использовании отработанных автошин, частично могут напоминать превращения, которые происходят при получении углеродных волокон [10-13]. Из трех классических этапов температурной обработки исходного сырья для производства волокон при плавке синтетического чугуна в печи гарантированно создаются температуры, соответствующие двум этапам – низкотемпературному пиролизу (до 400°C) и карбонизации (400-1500°C) [14].

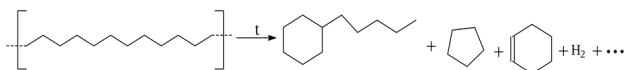
С 90-х годов прошлого века производство синтетического чугуна в России характеризуется отсутствием чугуна и высокой стоимостью литейных чугунов, что делает невозможным их выплавку при температуре до 1450°C. При этом нарастание в металлозавалке доли стального лома требует повышения температуры плавки до 1500-1600°C, а иногда и до 1750°C [15-16], характерных для этапа графитизации (1500-3000°C). С высокой вероятностью соответствующие этому этапу преобразования органических полимеров происходят не в полном объеме, но, так как они не имеют кардинальных отличий от характерных для карбонизации преобразований, общие изменения полимерной основы вполне достаточны для образования графитовой составляющей, необходимой для получения чугуна.

Рассмотрим это поэтапно.

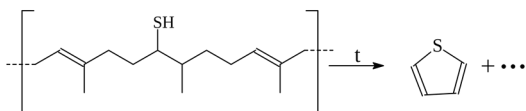
Нагрев полимера до температуры 400°C запускает процессы термического разрушения ковалентных связей. Эти преобразования касаются разрыва связей углерод-углерод, углерод-водород, углерод-сера, углерод-кислород, а также связей углерода с другими гетероатомами. Так как при указанных температурах энергия полимерной молекулы может быть сконцентрирована на любой ковалентной связи, то мы получаем набор продуктов различной длины углеводородной цепи, часть из которых представлена на схеме для создания общего представления:



Само собой разумеется, что помимо представленных на выходе присутствуют и иные продукты термодеструкции. Кроме того, в таких условиях характерно образование циклических структур и выделение водорода, схематически приведенное на схеме:

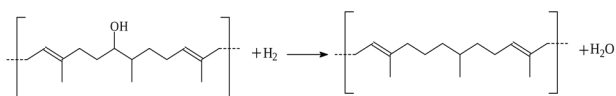
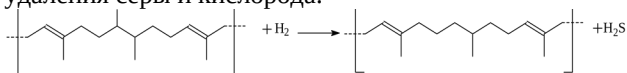


Для содержащих серу участков в таких условиях возможно образование тиофена:



Тиофен достаточно устойчив за счет ароматичности, но у него не очень высокая температура кипения и в условиях проведения процесса он находится в газообразном состоянии.

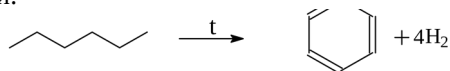
За счет образующегося водорода полимерная цепь может освобождаться от групп различных химических элементов в виде летучих продуктов, приведём примерные схемы этих процессов для удаления серы и кислорода:



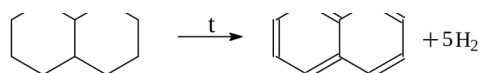
Следует отметить, что освобождение от серы наиболее трудно протекает именно для тиофена, однако его газообразное состояние в условиях процесса и дальнейшее повышение температуры реакционной смеси позволяют сделать предположение о том, что значительных количеств серы в образующейся графитоподобной части за счет тиофена ожидать не приходится.

При повышении температуры до 800°C и выше увеличивается скорость описанных выше процессов и добавляются новые трансформации. Тут можно говорить о реакциях, обычно относимых к процессам риформинга в нефтепереработке.

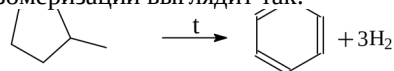
Во-первых, к процессам циклизации углеводородных цепей добавляются процессы дегидроциклизации, подобно приведенной ниже реакции:



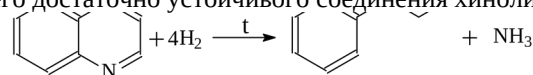
Во-вторых, происходит дегидрирование циклических соединений, приводящее к образованию ароматических систем, как в приводимом ниже примере:



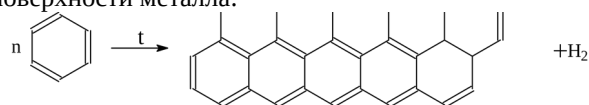
В-третьих, углеводороды, содержащие в своей структуре пятичленные циклы, изомеризуются в структуры с шестичленным циклом. Такая трансформация может происходить без выделения водорода и образования ароматической системы, но в дальнейшем за счет дегидрирования превращаться в ароматическое соединение. Но возможными становятся одновременная изомеризация и отщепление водорода. Пример именно такой дегидроизомеризации выглядит так:



В приведенных выше трех примерах трансформаций намеренно заострено внимание на значительном количестве выделяющегося в них водорода. В таких условиях становится еще более благоприятным отщепление неуглеводородных групп. Для наглядности приведем пример отщепления азота из его достаточно устойчивого соединения хинолина:



Еще одним из процессов, протекающих при повышении температуры, является коксообразование. Этот процесс связан с реакциями уплотнения на поверхности металла:



Нетрудно заметить, что структура образующегося при коксообразовании агломерата полностью совпадает с общепринятыми представлениями о структуре графита, что подтверждает образование этого продукта в рассматриваемых условиях.

Если учесть, что реакции образования ароматических соединений из предельных и циклических соединений идут с поглощением тепла, а реакции гидрокрекинга и гидрирования углеводородов происходят с его выделением, то с ростом температуры образование графитоподобных агломератов становится преобладающим, что используется в производстве углеродных волокон и по аналогии может стать источником углерода в рассматриваемом нами процессе.

Термодинамический расчет изменения состава материала отработавших автошин как системы в зависимости от температуры, выполненный с использованием методики профессора А.М. Кутына* [17], подтверждает сказанное выше. В частности, наблюдающееся при температурах от 400 К образование метана уменьшается с ростом температуры, тогда как водород, образование которого

* В работе принимал участие д-р хим. наук, профессор А.М. Кутын

при тех же 400 К практически отсутствует, после 700 К уже начинает выделяться в заметных количествах вплоть до 1400 К, когда наблюдается максимум на уровне 0,122 мольной доли в равновесной газовой фазе, с последующими снижением до 0,08 при 1500 К и стабилизацией (рис. 1).

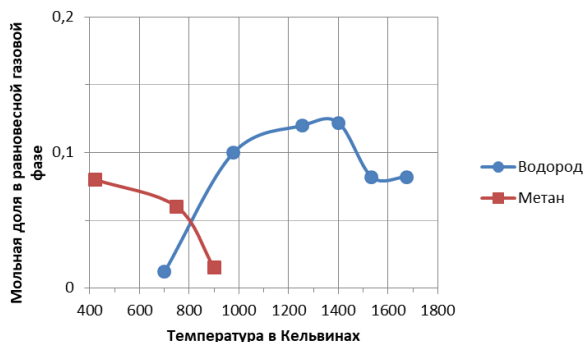


Рис. 1. Изменение количества образующихся водорода и метана в зависимости от температуры

Наряду с этим термодинамический расчет показывает максимальное количество образовавшегося углерода (графита) на уровне 0,07 мольной доли, фиксируется в температурном диапазоне от 950 до 1400 К (рис. 2).

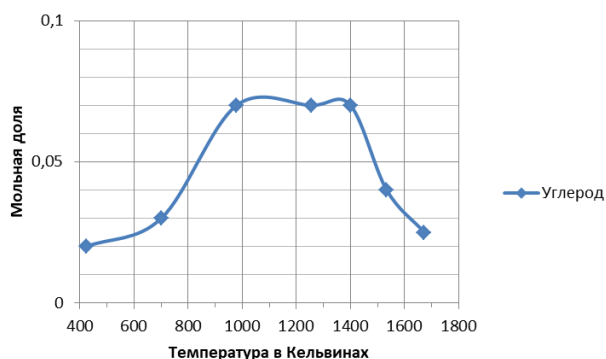


Рис. 2. Зависимость количества образующегося углерода от температуры

Заключение

Резюмируя сказанное выше, можем заключить, что в условиях проведения индукционной плавки стали создаются температурные условия, достаточные для получения из материала отработавших автошин графитоподобных структур и в конечном итоге углерода для науглероживания металлического расплава, а также для удаления из системы элементов, ухудшающих качество получаемого металла. Основным путём их удаления станет образование газообразных продуктов. Однако при этом необходимо учитывать, что ряд этих продуктов обладает неприятным запахом, а также способствует коррозии металлических частей оборудования, хотя это и будет проявляться в максимальной степени при температурах, допускающих конденсацию влаги.

Список источников

1. Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугуны. Киев: Наукова думка, 1971. 159 с.
2. Туракулов М.Р., Турсунов Н.К., Юнусов С.З. Выплавка синтетического чугуна в индукционной тигельной печи с учетом нормы расхода карбюризаторов // *Universum: технические науки*. 2024. №4-4(121). С. 34-41.
3. Дьяконов О.М. Отходы черных металлов, их безопасная и экономичная переработка // *Литье и металлургия*. 2025. №1. С. 58-66.
4. Фарисов Р.Д., Козловский В.Н., Иоффе М.А. Применение концепции бережливости в массовом чугунолитейном производстве // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. №9. С. 386-392.
5. Выплавка синтетического чугуна с использованием материалов, содержащих карбид кремния / Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф., Гребнев Д.Ю., Габельченко А.И. // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2022. №7(266). С. 94-97.
6. Чайкин А.В. Теория и практика модифицирования ответственных железнодорожных отливок из серого чугуна высоких марок // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2024. Т. 80, №5. С. 37-44.
7. Применение материала изношенных автомобильных шин для науглероживания синтетического чугуна индукционной выплавки / Леушин И.О., Рябова Л.И., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Шиляев А.А. // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2025. №7. С. 26-30.
8. Производство синтетического чугуна с использованием материала изношенных автомобильных шин / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Шиляев А.А. // *Литейное производство*. 2026. №4. С. 3-7.
9. Пат. 2853871 Российская Федерация, МПК C21C 1/08, C22C 37/00. Применение карбюризатора для науглероживания синтетического чугуна / Леушин И.О., Шиляев А.А., Рябова Л.И.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». 2025114281; заявл. 27.05.2025; опубл. 26.12.2025.
10. Производство углеродных волокон. История, перспективы / Жарков Г.М., Скивка Е.М., Куликов М.В., Куликова Т.А. // XV международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 64-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос: сборник научных статей (Краснодар, 15–16 апреля 2025 года). Краснодар: Краснодарское

- высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова, 2025. С. 250-255.
11. Клименко И.В. Углеродные волокна на основе пека: состояние производства и модификация свойств // Химическая физика. 2022. Т. 41, №2. С. 70-77.
 12. Нурмухаметова А.Н., Зенитова Л.А. Углеродное волокно. Конъюнктура рынка, структура спроса, перспективные рынки продуктов на его основе, области применения // Бутлеровские сообщения. 2022. Т. 72, №10. С. 102-130.
 13. Жданкова Д.С., Тимофеев П.А., Тимофеев А.Н. Углеродные и карбидокремниевые волокна, используемые для армирования керамоматричных композиционных материалов // Сварочное производство. 2023. №1. С. 5-10.
 14. Углеродные волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html> (дата обращения: 22.05.2026).
 15. Кукарцев В.А. Разработка высокотемпературной технологии производства синтетического чугуна в индукционных тигельных печах промышленной частоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016. 22 с.
 16. Туракулов М.Р., Турсунов Н.К., Юнусов С.З. Инновационный способ выплавки синтетического чугуна // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы международной научно-практической конференции (Гомель, 16-17 ноября 2023 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2023. С. 94-95.
 17. Кутяин А.М., Кацнельсон К.М., Медвежкая В.Ю. Метод расчета равновесных и условно равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем // Применение математических методов для описания и изучения физико-химических равновесий: тезисы докл. VI Всес. школы семинара. Новосибирск, 1989. С. 64-66.

Сведения об авторах

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

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, проректор по работе с промышленными партнерами, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: mto@nntu.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: kafmto@mail.ru.

Субботин Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология электрохимических производств и химия органических веществ», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: an_s_temp@mail.ru.

Шиляев Александр Алексеевич – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: sashashil46@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THERMODYNAMIC PREREQUISITES FOR USING WASTE TYRES AS A CARBURIZER IN THE MELTING OF SYNTHETIC IRON

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

Vakhidov Umar Sh. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Vice-Rector for Work with Industrial Partners, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

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

Subbotin Andrey Yu. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of technology of electrochemical production and chemistry of organic substances, Nizhny Novgorod State Technical University

named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

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

Abstracts. Currently, due to the limited access and expensive raw materials of beech materials, manufacturers are increasingly turning to the technology of smelting synthetic cast iron obtained from iron ore materials, steel scrap, return of their own production, Sheet cutting, carving of fine steel, shavings and other low-grade low-carbon steel scrap through controlled remelting. In the context of the overall trend of greening the developments by the authors of this article, the use of used tires as a steel melt carburetor was previously proposed and successfully tested under current production conditions. The aim of this work was to describe and explain the behavior of the selected material during heating in a wide temperature range and to find theoretical grounds and prerequisites for its application as a carbonizer for the smelting of steel on synthetic cast iron. Theoretical research methods were applied, not involving direct experiments with the material, but based on existing and obtained information about it, - assessment of the possibility and conditions of chemical reactions and thermodynamic calculation of the change in material composition as a function of temperature using the methodology of professor A.M. Kutin. In the end, it is shown that induction smelting conditions create temperature conditions sufficient to obtain from material of exhaust autoshafts graphite-like structures and eventually carbon for the bonding of a metal melt and to remove from the system elements that impair the quality of the metal obtained.

Keywords: synthetic cast iron, carbonizer, used car tires, steel plating, carbonization, low-temperature pyrolysis, carbonation, graphitization

References

1. Shumikhin V.S., Luzan P.P., Zhelnis M.V. Synthetic Cast Iron. Kyiv: «Naukova Dumka», 1971. 159 p.
2. Turakulov M.R., Tursunov N.K., Yunusov S.Z. Smelting of Synthetic Cast Iron in an Induction Crucible Furnace Taking into Account the Norm of Carburer Consumption // *Universum: Technical Sciences*. 2024, no. 4-4(121), pp. 34-41.
3. Dyakonov O.M. Ferrous Metal Waste, Their Safe and Economical Recycling // *Casting and Metallurgy*. 2025, no. 1, pp. 58-66.
4. Farisov R.D., Kozlovsky V.N., Ioffe M.A. Application of the Lean Concept in Mass Cast Iron Production // *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2022, no. 9, pp. 386-392.
5. Grebnev Y.V., Zharkova V.F., Grebnev D.Y., Gabelchenko A.I. Smelting of Synthetic Cast Iron Using Materials Containing Silicon Carbide // *Bulletin of Volgograd State Technical University*. 2022, no. 7(266), pp. 94-97.
6. Chaikin A.V. Theory and practice of modifying critical railway castings made of high-grade gray cast iron // *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical, and Economic Information*. 2024, vol. 80, no. 5, pp. 37-44.
7. Leushin I.O., Ryabova L.I., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Shilyaev A.A. Use of worn automobile tire material for carburizing synthetic cast iron in induction melting // *Herald of Volgograd State Technical University*. 2025, no. 7, pp. 26-30.
8. Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Ryabova L.I., Shilyaev A.A. Production of synthetic cast iron using worn automobile tire material // *Foundry Production*. 2026, no. 4, pp. 3-7.
9. Pat. 2853871 Russian Federation, IPC C21C 1/08, C22C 37/00. Use of a carburizer for carburizing synthetic cast iron / Leushin I.O., Shilyaev A.A., Ryabova L.I.; patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev». 2025114281; filed 27.05.2025; published 26.12.2025.
10. Zharkov G.M., Skivka E.M., Kulikov M.V., Kulikova T.A. Production of carbon fibers. History, prospects // XV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists dedicated to the 64th anniversary of Y.A. Gagarin's flight into space: collection of scientific articles (Krasnodar, April 15-16, 2025). Krasnodar: Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after A.K. Serov, 2025, pp. 250-255.
11. Klimenko I.V. Carbon fibers based on PEEK: production status and modification of properties // *Chemical Physics*. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 70-77.
12. Nurmukhametova A.N., Zenitova L.A. Carbon fiber. Market conditions, demand structure, promising markets for its products, areas of application // *Butlerov Communications*. 2022, vol. 72, no. 10, pp. 102-130.
13. Zhdankova D.S., Timofeev P.A., Timofeev A.N. Carbon and silicon carbide fibers used for reinforcing ceramic-matrix composite materials // *Welding Production*. 2023, no. 1, pp. 5-10.
14. Carbon fibers [Electronic resource]. Access mode: <https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html> (date of the application 22.05.2026).
15. Kukartsev V.A. Development of high-temperature technology for the production of synthetic cast iron in industrial frequency induction crucible furnaces: abstract of the dissertation ... for the degree of Candidate of Technical Sciences. Krasnoyarsk, 2016. 22 p.
16. Turakulov M.R., Tursunov N.K., Yunusov S.Z. Innovative method of smelting synthetic cast iron //

Innovative development of transport and construction complexes: Materials of the international scientific-practical conference (Gomel, November 16-17, 2023). Gomel: Belarusian State University of Transport, 2023, pp. 94-95.

17. Kutyin A.M., Katsnelson K.M., Medvetskaya V.Yu.
A method for calculating equilibrium and conditional

equilibrium states of multicomponent heterogeneous systems // Abstracts of the report VI Vses. schools of the seminar «Application of mat. methods for the description and study of physico-chemical balances». Novosibirsk, 1989, pp. 64-66.

Ссылка на статью:

Термодинамические предпосылки использования отработанных автошин в качестве карбюризатора при выплавке синтетического чугуна / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Субботин А.Ю., Шильяев А.А. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 35-40. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-35-40)
Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Ryabova L.I., Subbotin A.Yu., Shilyaev A.A. Thermodynamic prerequisites for using waste tyres as a carburizer in the melting of synthetic iron. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 35-40. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-35-40)

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГД-УСТРОЙСТВА В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ АГРЕГАТА ЛПА-АК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ СЛИТКА ИЗ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ А5Е

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос влияния электромагнитного модифицирования на макроструктуру и микроструктуру сплава алюминия марки А5Е. Без модифицирования в процессе кристаллизации в роторной литейной машине структура слитка неоднородная и в процессе прокатки или волочения приводит к появлению трещин и большому браку продукции. Установка электромагнитного модификатора, магнитогидродинамического (МГД) устройства непосредственно на литейную машину позволяет при кристаллизации значительно улучшить макроструктуру слитка и прутка из алюминия А5Е. Структура металла измельчается и становится более однородной. Контроль за эффективностью модифицирования оценивался по изменению размера зерна, формы и однородности структуры сплава путем металлографических исследований. Исследования разработанного устройства проводились на промышленной роторной литейной машине литейно-прокатного агрегата, предназначенного для изготовления алюминиевой катанки с установленным опытным образцом электромагнитного модификатора структуры алюминиевого слитка в рамках НИОКР. В работе использовались образцы от литых заготовок и катанки, полученные при разных параметрах тока и частоты электромагнитного модификатора. Для исследования микроструктуры использовался оптический микроскоп «Neophot 21». Результаты выполнения НИОКР подтвердили возможность измельчения кристаллического строения непрерывнолитой заготовки, отливаемой в роторной литейной машине путем воздействия электромагнитным полем. При сравнении механических свойств различных образцов катанки установлено, что более пластичны изделия, имеющие однородное, мелкозернистое строение. Прогнозируется, что использование данной технологии в промышленности позволит повысить технологичность переработки катанки в проволоку путем волочения, а также обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Ключевые слова: литейное производство, индукционная установка, электромагнитное модифицирование, сплавы, кристаллизация, макроструктуры, микроструктуры, литая заготовка, катанка

Введение

В последние годы широкое применение благодаря уникальному набору свойств нашел сплав алюминия А5Е. Выбор этого сплава оправдан, когда нужна максимальная пластичность, высокая коррозионная стойкость и низкая стоимость. Основная сфера применения алюминия А5Е – это производство электрических проводников различного назначения. Особенно это важно для ЛЭП (линии электропередач) большой протяженности. Алюминиевые провода выигрывают у медных в ЛЭП за счет оптимального сочетания цены, веса и достаточной проводимости [1].

Для изготовления алюминиевых проводов очень часто используется катанка на основе сплава А5Е. Катанка является продуктом совмещенного процесса литья непрерывнолитой заготовки и ее прокатки. Механические свойства катанки зависят от химического состава и кристаллической структуры алюминиевого сплава. При этом кристаллическая структура катанки повторяет структуру непрерывнолитой заготовки, полученной на промышленной роторной литейной машине. При кристаллизации отлитых заготовок они имеют крупнозернистую, столбчатую и неоднородную макроструктуру. Такая макроструктура слитка при прокатке или волочении приводит к появлению трещин и, как следствие, к браку продукции [2, 3].

Для улучшения структуры сплава алюминия используется модифицирование. Модифицирование –

это процесс искусственного изменения структуры сплава, заключающийся в уменьшении размеров зерна, а также изменении формы, размера и распределения структурных составляющих сплава. В результате модифицирования улучшаются эксплуатационные свойства сплава, в частности повышается технологическая пластичность и однородность механических свойств [4].

Для модифицирования сплава А5Е в настоящее время используется легирование расплава путем введения в расплав основного металла прутковой лигатуры Al-Ti-B. Использование этого способа модифицирования улучшает структуру сплава, но приводит к значительному удорожанию продукции. Данная технология модифицирования требует усовершенствования.

Методы исследования

Чтобы уменьшить количество брака продукции и снизить затраты, ОАО «РУСАЛ» была поставлена задача разработать технологическое устройство, позволяющее изменить макроструктуру слитка, сделать ее мелкозернистой. Для реализации поставленной задачи была разработана индукционная установка (электромагнитный модификатор) для воздействия на жидкую фазу в процессе кристаллизации, которая устанавливается непосредственно на роторную литейную машину (рис. 1). При электромагнитном воздействии в расплаве образуются МГД-течения, которые влияют

на динамику процесса кристаллизации и нарушают рост столбчатых кристаллов за счет роста теплопередачи через фронт кристаллизации [5-7]. Ранее этот метод для модифицирования в роторной литейной машине не применялся [8].

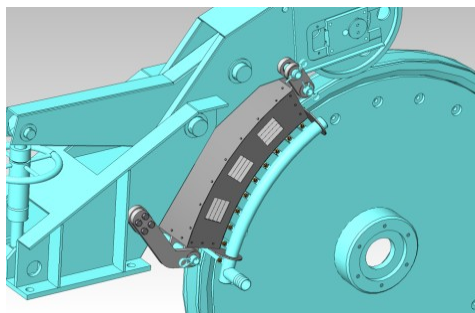


Рис. 1. Проект индуктора электромагнитного модификатора

По данной теме были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определенным технологическим процессам в черной и части цветной металлургии. В настоящее время отсутствуют как аналитические методы оценки зерна в алюминиевой катанке с учетом реального химического состава сплава и применяемого модификатора, так и компьютерные модели процесса модифицирования при изготовлении катанки с учетом конструктивных и технологических параметров литья. Также в металлургической промышленности новые разработки внедряются только после апробации и испытаний. Исходя из этого, в рамках НИОКР был изготовлен опытно-промышленный образец модификатора и проведены его испытания на промышленной роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ,

расположенного в ЛО филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов.

В процессе работы электромагнитного модификатора были отобраны образцы литой заготовки и катанки, полученные при разных значениях тока и частоты: образец №1 – $I = 75 \text{ A}$, $f = 25 \text{ Гц}$; №2 – $I = 52 \text{ A}$, $f = 35 \text{ Гц}$; №3 – $I = 42 \text{ A}$, $f = 40 \text{ Гц}$; №4 – $I = 72 \text{ A}$, $f = 15 \text{ Гц}$; №5 – $I = 60 \text{ A}$, $f = 25 \text{ Гц}$; №6 – без МГД-модификатора.

Были проведены исследования макроструктуры образцов от непрерывнолитых заготовок в поперечном и продольном направлениях после травления в реактиве для выявления зерна. Макроструктура в сечении литой заготовки без электромагнитного воздействия состоит только из столбчатых кристаллов, направленных в разные стороны от центра слитка к стенкам кристаллизатора (рис. 2).

По длине слитка макроструктура имеет более сложное строение. По одну сторону от центра слитка структура столбчатая, а по другую непосредственно от стенки кристаллизатора на глубине 15 мм наблюдаются столбчатые кристаллы, а далее к центру крупные равноосные зерна с перемешивающимися отдельными узорчатыми кристаллами. В данном случае макроструктура слитка неоднородная и условия кристаллизации расплава неодинаковые по разные стороны от центра слитка. Такая структура слитка является неоднородной и в дальнейшем приводит к браку получаемой из нее продукции.

Результаты анализа макроструктуры поперечного и долевого сечения литых заготовок после электромагнитного воздействия на расплав при токе $I = 42 \text{ A}$ и частоте $f = 40 \text{ Гц}$ приведены на рис. 3.

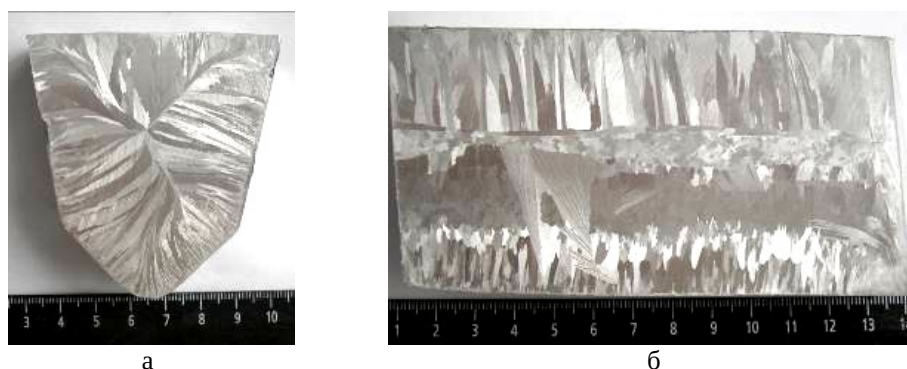


Рис. 2. Макроструктура слитка без электромагнитного воздействия: а – поперечное сечение; б – долевое сечение

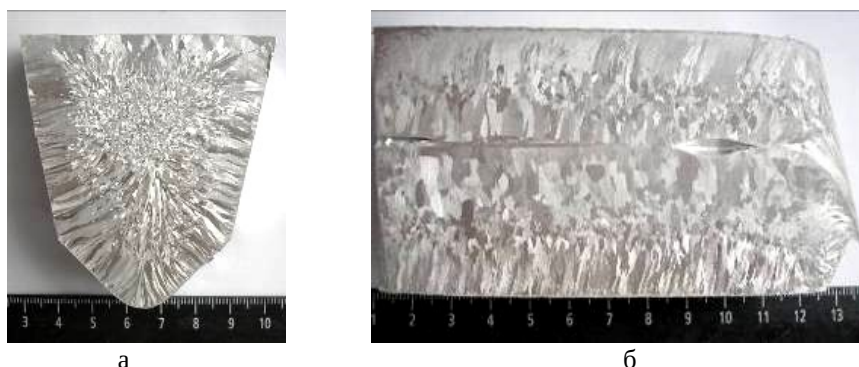


Рис. 3. Макроструктура слитка после электромагнитного воздействия: а – поперечное сечение; б – долевое сечение

Из приведенной макроструктуры видно, что эпицентр воздействия электромагнитных сил находится ближе к центру слитка. В этой зоне наблюдается измельчение макрозерна. По обе стороны от мелкозернистой структуры наблюдаются в основном столбчатые кристаллы. В центральной зоне литой заготовки на границе двух кристаллизующихся потоков металла видны газовые полости длиной 20 мм и диаметром до 4 мм, что связано с усадочными явлениями при кристаллизации металла. Деформированный металл плотнее и однороднее, чем литой. При горячей прокатке, которой в дальнейшем подвергается непрерывнолитая заготовка, усадочные поры должны завариться [9].

Таким образом, получены хорошие результаты от воздействия электромагнитного модификатора.

Также была исследована микроструктура катанки после нанесения анодной пленки для выявления зерна. Съемка образцов при увеличении в 50 крат проводилась в поляризованном свете. Результаты исследования микроструктуры литой заготовки показали, что в зоне с мелким зерном внутреннее строение было более грубым, нежели в зоне столбчатых кристаллов, и параметр дендритной ячейки составляет 32 и 64 мкм соответственно (рис. 4). Этот факт свидетельствует о том, что скорость охлаждения заготовки с более тонкой внутренней микроструктурой была выше, несмотря на то, что заготовка имела крупную столбчатую макроструктуру.

Анализ микроструктур слитков №6 и 3, полученных без и с МГД-воздействием, показал отсутствие оксидных включений. Это объясняется тем, что электромагнитное воздействие, вызывающее интенсивную циркуляцию расплава, происходит в жидкой сердцевине слитка, не имеющей контакта с окружающей средой. Таким образом, исключается возможность разрушения поверхностной оксидной пленки на зеркале расплава с последующим замешиванием ее в расплав.

Проводились исследования структуры катанки, полученной из непрерывнолитых заготовок с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении в 200 крат при разных параметрах работы электромагнитного модификатора.

Структура деформированного полуфабриката формируется в результате двух процессов: постепенного преобразования исходной структуры и создания новых элементов структуры деформационного происхождения. Первый процесс состоит в изменении формы зерен в соответствии со схемой деформации в данной зоне сечения, а второй – в образовании новых границ зерен, где зерно – это область, окруженная высокоугловой границей с углом разориентировки более $10-15^\circ$ и не содержащей таких границ внутри себя [1, 5]. В исходной литой заготовке это дендрит.

Форма зерен в изделии соответствует локальным схемам деформации. Так, в центре круглого прутка волокна имеют круглое сечение, а вблизи периферии – вытянутое по окружности прутка. Текстура и форма зерен тесно связаны, поскольку определяются схемой деформации [10].

Температура деформации влияет на микроструктуру следующим образом. При понижении температуры возрастает вероятность дробления зерен новыми высокоугловыми границами, а при повышении есть вероятность миграции исходных границ. Оба процесса уменьшают соответствие между начальной и конечной структурой [11].

На микрошлифе зерна различаются из-за повышенной травимости их границ и из-за разницы в их ориентировках. Особенно контрастно различаются по-разному ориентированные зерна при наблюдении в поляризованном свете микрошлифа с прозрачной анодной пленкой.

В целом структура поперечного сечения исследуемой катанки соответствует таковой, полученной на литых заготовках в зависимости от МГД-воздействия при токе $I = 42$ А и частоте $f = 40$ Гц (рис. 5).

Испытания на растяжение катанки с определением предела прочности, предела текучести и относительного удлинения проводились в универсальной испытательной машине «WDW-20» усилением 2 тонны.

Результаты испытаний механических свойств катанки (табл. 1) показали, что максимальные значения прочностных характеристик получены на образцах катанки №2 и 4, прокатанных из отливок, имеющих 30% степень модифицирования и отсутствие модифицирования соответственно.

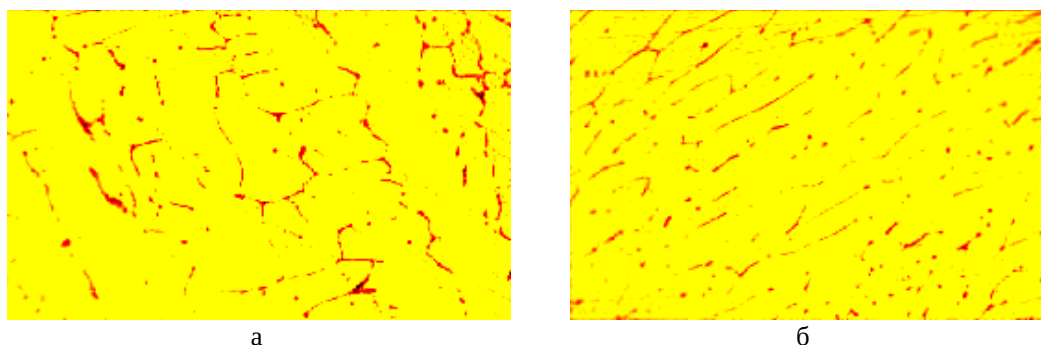


Рис. 4. Микроструктура литой заготовки:
а – в зоне мелкого макрозерна, $\times 200$; б – в зоне столбчатых кристаллов, $\times 200$

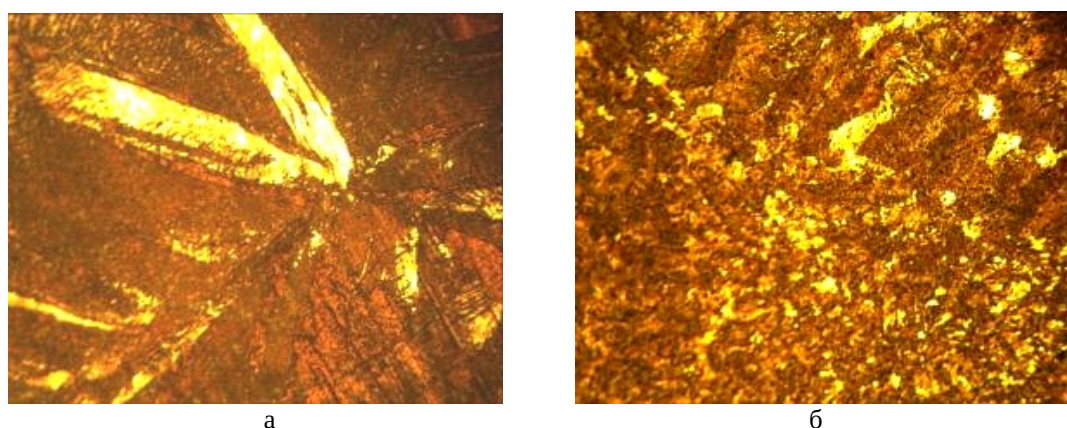


Рис. 5. Структура поперечного сечения катанки:
а – без МГД-воздействия; б – с МГД-воздействием при $I = 42$ А и $f = 40$ Гц

Таблица 1

Механические свойства катанки $\varnothing 9,5$ мм из алюминия А5Е в зависимости от параметров МГД-модификатора при литье заготовок

Номер образца от катанки	Параметры МГД-воздействия, степень модифицирования литых заготовок	Механические свойства катанки			Марка катанки по ГОСТ 13843-78
		Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	
№1	$I = 75$ А, $f = 25$ Гц; модифицирование отсутствует	95 100	75 85	31,4 28,5	ПГ
№2	$I = 52$ А, $f = 35$ Гц; 30%-я степень модифицирования	110 111	92 98	28,4 30,8	ТЗ
№3	$I = 42$ А, $f = 40$ Гц; 40%-я степень модифицирования	106 108	91 86	31,2 30,1	Т2
№4	$I = 72$ А, $f = 15$ Гц; модифицирование отсутствует	116 116	109 108	28,2 23,4	ТЗ
№5	$I = 60$ А, $f = 25$ Гц; модифицирование отсутствует	103 101	88 76	29,3 30,2	Т1
№6	Без МГД-воздействия, модифицирование отсутствует	108 105	92 85	28,2 27,2	Т2

Закключение

Проведено исследование работы опытной МГД-установки для электромагнитного модифицирования структуры алюминиевого слитка на промышленной роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК. Исследованы структуры и физико-механические свойства непрерывнолитых заготовок и катанки,

полученных при электромагнитном воздействии в процессе кристаллизации.

В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученные при разных режимах работы опытной установки. В результате выполнения металлургических

исследований образцов установлено влияние электромагнитного воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминия А5Е. При силе тока в индукторе электромагнитного модификатора $I = 42$ А и частоте $f = 40$ Гц получен наилучший эффект модифицирования структуры: мелкозернистая структура образовалась в 40% объема слитка по сравнению со слитком, отлитым без МГД-воздействия. Образцы катанки диаметром 9,5 мм из сплава А5Е, изготовленные из слитков, отлитых с электромагнитным воздействием при сопоставимых значениях предела прочности и предела текучести (в среднем 107 и 88 МПа соответственно) имеют улучшенные пластические свойства. Получено в среднем на 6,8% большее значение относительного удлинения образцов при испытаниях на разрыв, чем у образцов катанки, отлитых без электромагнитного воздействия (29,6% против 27,7%), что потенциально позволит улучшить технологические свойства катанки при дальнейшей переработке. В частности, в процессе волочения будет обеспечена меньшая обрывность проволоки, что обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Из результатов выполнения НИОКР следует, что технология электромагнитного модифицирования непрерывнолитого слитка в роторной литейной машине работоспособна, технически и технологически реализуема. Степень модифицирования структуры не уступает показателям использования пруткового модификатора Al-Ti-B, но при этом не происходит изменения химического сплава и роста удельного электросопротивления. Также при эксплуатации электромагнитного модификатора требуется только электрическая энергия, что исключает необходимость постоянной поставки прутковой лигатуры Al-Ti-B и, как следствие, удорожания цены алюминиевой катанки.

Сведения об авторах

Боякова Татьяна Алексеевна – доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника», канд. техн. наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: boyakova_ta@mail.ru.

Снитко Ирина Сергеевна – доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника», канд. техн. наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: irant-kin@yandex.ru.

Авдулов Антон Андреевич – кандидат технических наук, заместитель директора дирекции развития нефтегазохимических производств, канд. техн. наук, АНЦ «Инновационный инжиниринговый центр», Москва, Россия. E-mail: Avdulov@mail.ru.

Список источников

1. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Москва: Машиностроение, 1973. 288 с.
2. Горбунов Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев // Цветные металлы-2012: сб. науч. ст. Красноярск, 2012. С. 828-833.
3. Чалмерс Б. Теория затвердевания / под ред. Приданцева М.В. Москва: Металлургия, 1968. 288 с.
4. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Гриценко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 196 с.
5. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. Москва: Металлургия, 1974. 240 с.
6. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Yu-bo Zuo, Jian-Zhong Cui, Dan Mou, Qing-feng Zhu, Xiang-jie Wang Lei Li. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, no. 2, pp 132-134.
7. Masahiro T. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting. Masahiro Tani, Masafumi Zeze Takehiko Toh, Keiji Tsunenari, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 104, AUGUST 2013.
8. Фетисов Г.П. Литейное производство: учебник для вузов. М. Из-во ЮРАЙТ-Восток, 2026. 59 с.
9. Материаловедение цветных металлов и сплавов / Попов А.А., Филиппов В.Р., Бараз М.А., Гервасьев М.А. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2023. 312 с.
10. Черепяхин А.А. Основы материаловедения. Москва: Академия, 2022. 206 с.
11. Плошкин В.В. Материаловедение. Москва: Изд-во Юрайт, 2024. 434 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

USE OF AN MHD DEVICE IN A ROTARY CASTER OF AN LPA-AK UNIT TO IMPROVE THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM ALLOY A5E

Tatyana A. Boyakova – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering

and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia

Irina S. Snitko – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia

Anton A. Avdulov – PhD (Technical Sciences), Deputy Director of the Directorate of Development of Petrochemical Productions of the ANC "Innovative Engineering Center", Russia.

Abstract. *The article is issued the influence of electromagnetic modification on the macrostructure and microstructure of aluminum alloy grade A5E. The structure of the ingot in a rotary casting machine is non-uniform without modification during the crystallization process, that leads to the appearance of cracks and a large number of defective products. An electromagnetic modifier installation directly on a casting machine allows for significant improvement of the macrostructure of an A5E aluminum ingot and rod. The metal structure is refined and becomes more homogeneous. The effectiveness of modification was assessed by changes in grain size, shape and homogeneity of the alloy structure using metallographic studies. The work used samples from cast blanks and wire rod obtained at different parameters of current and frequency of the electromagnetic modifier. The microstructure were issued with optical microscope "Neophot 21". The results of the R&D work confirmed the possibility of refining the crystalline structure of a continuously cast billet cast in a rotary casting machine by means of exposure to an electromagnetic field. The results of the R&D work confirmed the possibility of grinding the crystalline structure of a continuously cast blank cast in a rotary casting machine by exposure on an electromagnetic field. It is predicted that the use of this technology in industry will improve the technological efficiency of processing wire rod into wire by drawing. This will ensure a reduction in the volume of defective products due to structural defects.*

Keywords: *foundry production, induction industry, electromagnetic modification, alloys, crystallization, macrostructures, microstructures, cast blank, wire rod*

Ссылка на статью:

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А. Использование МГД-устройства в роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК для улучшения структуры слитка из сплава алюминия А5Е // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-41-46)

Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A. Use of an MHD device in a rotary caster of an LPA-AK unit to improve the structure of an aluminum alloy A5E. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 3, pp. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-41-46)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.237

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-47-55](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-47-55)

Шитов М.В., Соловьев А.Г., Румянцев М.И.

УНИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ ШСГП ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОКОВОГО ОБЖАТИЯ СЛЯБОВ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ВАЛКАМИ

Аннотация. Для производства горячекатаных полос на широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) является актуальной задача уменьшения числа типоразмеров литых слабов по ширине. Анализом обжимной способности по толщине и ширине шестиклетевой черновой группы широкополосного стана горячей прокатки третьего поколения выявлен резерв для увеличения обжатия слэба по толщине и ограниченные возможности для обжатия по ширине. Для изучения процесса формоизменения слэба в черновой группе применили конечно-элементное моделирование с помощью программного комплекса Deform. По результатам конечно-элементного моделирования построили регрессионные зависимости ширины и концевой обрезки раскатов от вариантов распределения поперечной и высотной деформации по клетям. Указанные зависимости применили для оптимизации режимов деформации по критерию максимального уменьшения ширины слэба, а также по критерию минимальной концевой обрезки раскатов заданной ширины. В результате поиска оптимальных решений установили, что для увеличения редуцирующей способности черновой группы по ширине слэба целесообразно заменить в первой и второй универсальных клетях вертикальные валки с гладкой бочкой на валки с ящичными калибрами, аналогичные валкам отдельностоящего вертикального окалиномателея, а также перераспределить обжатия по толщине. Предложены унифицированные режимы обжатия слэбов по толщине и ширине в черновой группе, которые позволяют уменьшить количество типоразмеров слэбов, разливаемых на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а также снизить количество концевой обрезки на ШСГП, что способствует повышению энергоэффективности системы «МНЛЗ-ШСГП» в целом.

Ключевые слова: система «МНЛЗ-ШСГП», ширина слэба, черновая группа ШСГП, обжатие по ширине, обжатие по толщине, концевая обрезка раската, унифицированные режимы деформации

Введение

Для широкополосных станов горячей прокатки первого и второго поколения в системе «слябинг – ШСГП» необходимое разнообразие ширины слэбов обеспечивалось на обжимных станах, а задача черновой группы ШСГП состояла в снятии естественного уширения при прокатке и в устранении бочкообразности боковых граней раската. В некоторых случаях в черновой группе решалась и обратная задача – увеличение ширины слэба путём поперечной прокатки в уширительной клет, что было возможно из-за малой длины слэба до 2–3 м [1, 2].

С переходом на непрерывнолитые слэбы проблема обеспечения заданной ширины раскатов обострилась. Большое количество типоразмеров слэбов снижает производительность машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а их малое количество требует мощной черновой группы ШСГП для возможности редуцирования слэба по ширине, а также создает предпосылки для увеличения концевой обрезки раскатов. Вместе с тем возможность производить обжатие слэба по ширине в широких пределах позволяет не только ограничить количество типоразмеров слэбов, но также способствует снижению прерывности прокатки за счет формирования больших монтажных партий. Поэтому поиск решений, направленных на увеличение

обжатий по ширине в черновой группе ШСГП остается актуальной задачей, которая должна решаться в направлении повышения энергоэффективности и снижения потерь металла в обрезь при ограничениях, налагаемых составом и техническими возможностями существующего оборудования [3, 4].

Цели исследования – анализ обжимной способности черновой группы ШСГП третьего поколения и оценка возможности повышения ее редуцирующей способности по ширине за счет унификации режимов обжатия раската.

Методика исследования

Рассматривали черновую группу ШСГП третьего поколения, компоновка которой приведена на рис. 1.

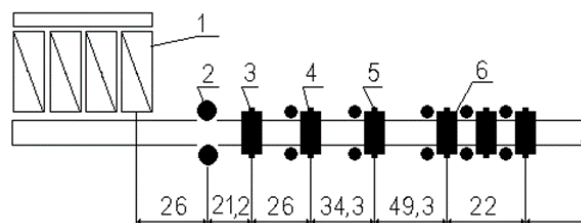


Рис. 1. Черновая группа ШСГП третьего поколения:

1 – нагревательные печи; 2 – отдельностоящая вертикальная клет; 3 – горизонтальная клет дуо; 4 и 5 – отдельно стоящие универсальные клетки

кварто; 6 – непрерывная группа клетей, состоящая из трёх универсальных клетей кварто

Формоизменение раската моделировали с использованием программного продукта Deform 3D V6.1. При этом были приняты следующие допущения: процесс – стационарный, симметричный и изотермический; валки – несжимаемые; материал полосы – однородный и изотропный; деформируемая среда – вязкопластическая. В качестве материала была выбрана сталь марки AISI-1016, что соответствует отечественным маркам сталей 15, 15Г, 15пс, 15кп. Скорость прокатки составляла 0,8–5 м/с.

Рассматривали слябы шириной 1150, 1500, 1850 мм и варианты бокового обжатия как валками с гладкой бочкой, так и валками с ящичными калибрами. Обжатие по ширине вертикальными валками с калибрами варьировали в диапазоне 20–120 мм с шагом 20 мм при толщинах сляба 250, 200 и 150 мм. Обжатие по ширине для вертикальных валков с гладкой бочкой варьировали в диапазоне 20–60 мм с шагом 20 мм при толщинах сляба 250, 200, 150 и 100 мм. Во всех случаях обжатие по толщине задавалось от 0 до 60 мм с шагом 10 мм.

Все компьютерные опыты проводились с замерами геометрических параметров, таких как ширина, высота наплывов, глубины проникновения пластической деформации, стрелы вогнутости переднего и заднего торцов раската, утяжки ширины переднего и заднего концов раската, длины утянутого по ширине переднего и заднего концов раската, что позволило также прогнозировать концевую обрезь.

Из полученных результатов формоизменения раската при последовательном обжатии в вертикальных и горизонтальных валках методом множественного регрессионного анализа с помощью пакета «Анализ данных» Microsoft Excel были получены эмпирические формулы (1)–(4) отдельно при прокатке в калиброванных валках и в валках с гладкой бочкой. Так, конечная ширина и обрезь раската в паре «вертикальные – горизонтальные валки» отображаются следующими

формулами:

$$b_i = \Delta h_i \cdot a_1 + \Delta h_i^2 \cdot a_2 + \Delta b_{ei} / b_{i-1} \cdot a_3 + h_{i-1} / b_{i-1} \cdot a_4 + h_{i-1} \cdot a_5 + b_{i-2} \cdot a_6 + \Delta b_{ei} \cdot a_7; \quad (1)$$

$$q_i = \Delta h_i \cdot a_8 + \Delta h_i^2 \cdot a_9 + \Delta b_{ei} / b_{i-1} \cdot a_{10} + h_{i-1} / b_{i-1} \cdot a_{11} + h_{i-1} \cdot a_{12} + b_{i-2} \cdot a_{13} + \Delta b_{ei} \cdot a_{14}, \quad (2)$$

где b_i – ширина раската, мм; q_i – масса концевой обрезь, кг; Δh_i – обжатие по толщине, мм; Δb_{ei} – обжатие по ширине, мм; b_{i-1} – ширина раската перед прокаткой в горизонтальной клетке, мм; b_{i-2} – ширина раската перед прокаткой в вертикальной клетке, мм; h_{i-1} – толщина раската перед прокаткой в горизонтальной клетке, мм; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}$ – коэффициенты регрессии.

Количество обрезь при последующих проходах определялось по следующим формулам:

$$q_i = k_i \cdot q_{i-1}, \quad (3)$$

$$k_i = \Delta h_{i-1} \cdot a_{15} + \Delta h_i \cdot a_{16} + (\Delta h_{i-1} + \Delta h_i) \cdot a_{17} + \Delta h_{i-1} / \Delta b_{ei-1} \cdot a_{18} + \Delta h_i / \Delta b_{ei} \cdot a_{19} + \Delta b_{ei-1} / \Delta b_{ei} \cdot a_{20} + \Delta b_{ei} \cdot a_{21} + (\Delta b_{ei-1} + \Delta b_{ei}) \cdot a_{22} + h_{i-1} / b_{i-1} \cdot a_{23} + h_i / b_i \cdot a_{24} + h_{i-1} \cdot a_{25} + h_i \cdot a_{25} + b_{i-1} \cdot a_{27} + b_i \cdot a_{28}, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент обрезь; h_i/b_i – отношение толщины и ширины раската перед прокаткой в i -й паре «вертикальные – горизонтальные валки»; $a_{15} \dots a_{28}$ – коэффициенты регрессии, значения которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициентов и оценки надежности уравнений (1), (2), (4)

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
При обжатии в вертикальных калиброванных валках							
a_1	0,0126	a_8	-4,565	a_{15}	0,01072	a_{25}	-0,0036
a_2	0,0024	a_9	0,0218	a_{16}	0	a_{26}	-0,0003
a_3	-543	a_{10}	-11267	a_{17}	-0,0031	a_{27}	0,0051
a_4	171	a_{11}	-390,5	a_{18}	-0,1158	a_{28}	-0,0045
a_5	-0,2008	a_{12}	1,2983	a_{19}	-0,0424	R^2	0,9998
a_6	1,0217	a_{13}	-0,0612	a_{20}	-0,0518	F	2503
a_7	-0,4216	a_{14}	12,47	a_{21}	0,0098	P, %	95
R^{2*}	0,9999	R^2	0,9743	a_{22}	-0,0054		
F^{**}	958366	F	422	a_{23}	-0,7618		

P***, %	95	P, %	95	a_{24}	7,6070		
При обжатии в вертикальных валках с гладкой бочкой							
a_1	0,0337	a_8	-2,750	a_{15}	$-5,135 \cdot 10^{12}$	a_{25}	0,3507
a_2	0,00216	a_9	0,0044	a_{16}	$-5,135 \cdot 10^{12}$	a_{26}	0,2899
a_3	-881	a_{10}	-13291	a_{17}	$-5,135 \cdot 10^{12}$	a_{27}	-0,0077
a_4	137	a_{11}	6624	a_{18}	53,455	a_{28}	-0,0447
a_5	-0,1204	a_{12}	-8,7932	a_{19}	0	R^2	0,9999
a_6	1,0102	a_{13}	0,7749	a_{20}	0	F	1973
a_7	0,0176	a_{14}	13,80	a_{21}	-0,8943	P, %	95
R^2	0,9999	R^2	0,9728	a_{22}	0,1800		
F	211221	F	312	a_{23}	0		
P, %	95	P, %	95	a_{24}	-352,3		

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации, F – рассчитанное число Фишера, P – уровень надёжности.

С использованием уравнений (1)-(4) решалась задача оптимизации: получение раската с минимальной шириной и получение минимальной массы концевой обрезки при заданной конечной ширине раската. Применили метод обобщённого приведённого градиента (ОПГ), реализованный при помощи надстройки «Поиск решения» Microsoft Excel.

Анализ обжимной способности черновой группы

Для стана предусмотрено 15 типоразмеров слябов по ширине, но 97% от общего сортамента слябов имеют ширины, указанные на рис. 2.

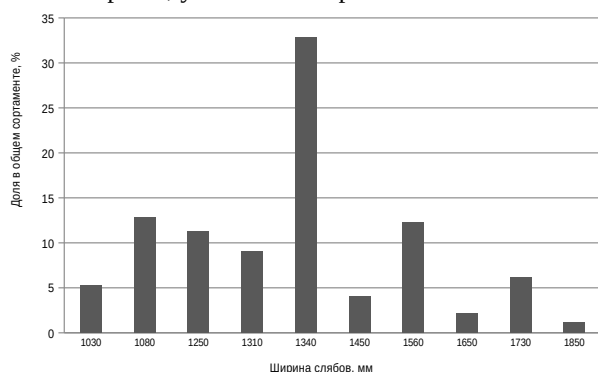


Рис. 2. Доля слябов различной ширины в общем сортаменте

Из данных типоразмеров слябов производят различные ширины полос. При этом одну и ту же полосу могут прокатать из нескольких типоразмеров слябов (например, полосу 1000 мм из слябов 1030 и 1080 мм, полосу 1200 из слябов 1340, 1330, 1310, 1250 и 1290, полосу 1530 из слябов 1560 и 1650 и т.д.). Распределение соответствия ширин полос различным ширинам слябов представлено на рис.3.

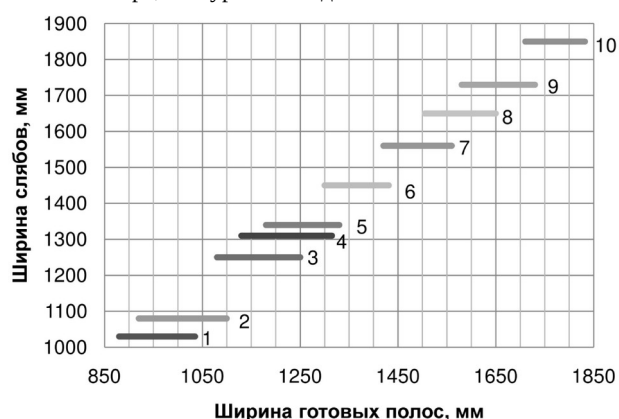


Рис. 3. Распределение соответствия между шириной полос и шириной слябов:

- 1 – сляб 1030; 2 – сляб 1080; 3 – сляб 1250;
4 – сляб 1310; 5 – сляб 1340; 6 – сляб 1450;
7 – сляб 1560; 8 – сляб 1650; 9 – сляб 1730;
10 – сляб 1850

Рассмотрели эффективное изменение ширины $\Delta b_{эф}$, которое можно представить в виде следующей формулы:

$$\Delta b_{эф} = B_{сл} - b_n \quad (5)$$

где $B_{сл}$ – ширина сляба, мм; b_n – конечная ширина полосы, мм.

Обнаружили, что более 25% $\Delta b_{эф}$ приходится на диапазон 41–60 мм (рис. 4), по 15% приходится на три диапазона: 1–20, 61–80, 81–100 мм, остальное на диапазоны 0–20, 101–160 мм. На диаграмме явно выражен убывающий тренд снижения величины редуцирования после 60 мм.

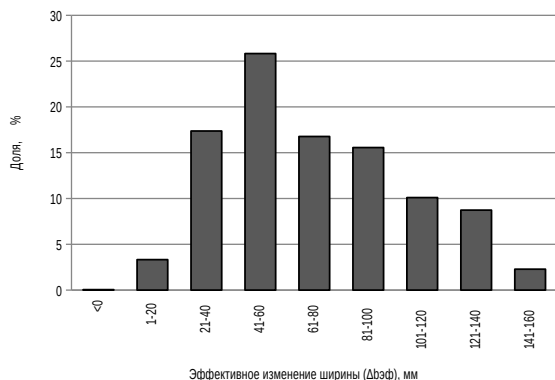
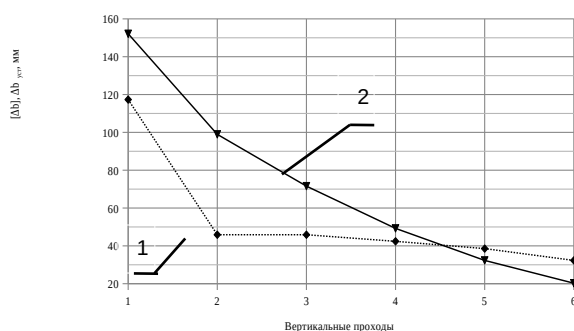
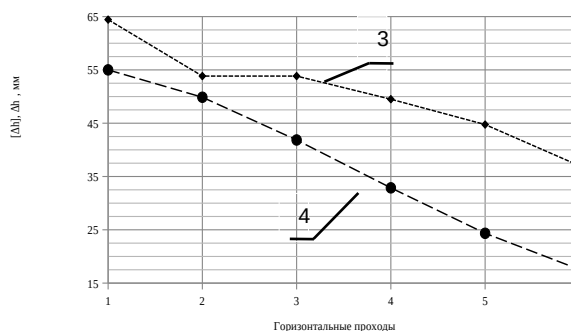


Рис. 4. Распределение эффективного изменения ширины полосы

На рис. 5 представлены максимально возможные обжатия по ширине (а) и по толщине раската (б) в чистовой группе с компоновкой, представленной на рис. 1, в зависимости от номера прохода, которые

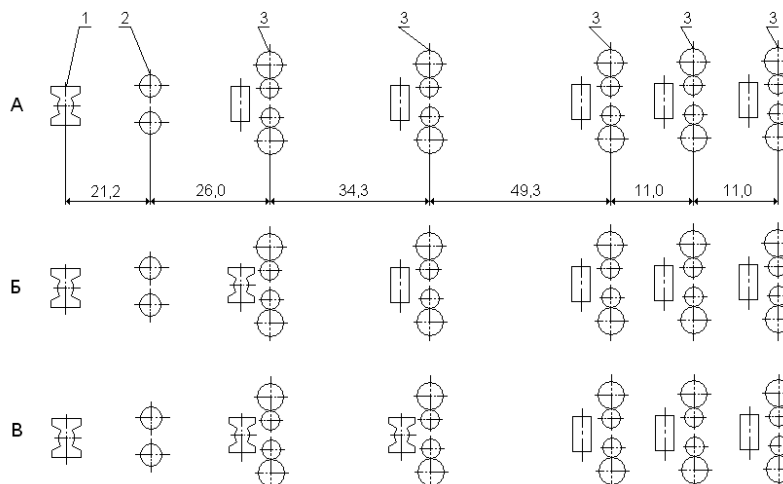


а



б

Рис. 5. Допустимые обжатия по ширине (а) и по толщине (б) раската:
 1 – возможное обжатие ширины по захватывающей способности валков $[\Delta b]$;
 2 – возможное обжатие ширины по условию поперечной устойчивости $\Delta b_{уст}$;
 3 – возможное обжатие толщины по захватывающей способности валков $[\Delta h]$;
 4 – фактическое обжатие по толщине Δh



получены согласно алгоритмам выбора технологических режимов прокати [5, 6].

Из рис. 5 видно, что в черновой группе заложен значительный резерв обжатия по толщине, а также возможность увеличения обжатия по ширине раската в первых четырех проходах за счёт использования поперечной устойчивости раската.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрели три варианта применения вертикальных валков в черновой группе, указанной на рис. 6. Вариант А – все вертикальные валки универсальных клеток имеют гладкую бочку (рис. 6, А). По варианту Б калиброванные валки применяются в первой универсальной клетке (рис. 6, Б), а по варианту В валки с гладкой бочкой заменены на калиброванные валки и в первой, и во второй универсальных клетках (рис. 6, В).

Размеры калибра на валках вертикального окаиноломателя (рис. 7, а) и на валках универсальных клеток (рис. 7, б, в) принимали с учетом известных рекомендаций [1, 4, 7-9, 11]

Рис. 6. Варианты применения вертикальных калиброванных валков:
 А – все вертикальные валки универсальных клетей имеют гладкую бочку;
 Б – установка калиброванного вертикального валка в первую универсальную клеть;
 В – установка калиброванных вертикальных валков в первую и вторую универсальные клетки;
 1 – вертикальный окалиноломатель; 2 – клеть дуо; 3 – универсальные нереверсивные клетки

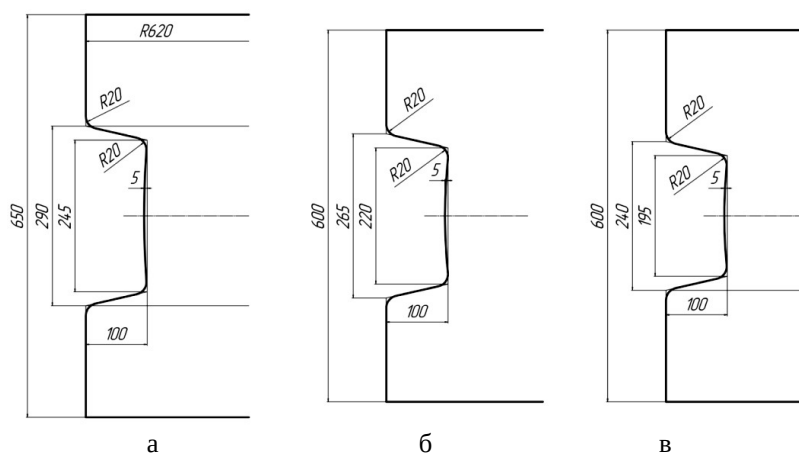


Рис. 7. Калибры вертикальных валков в черновой группе:

а – в первой вертикальной клетей для вариантов А, Б, В; б – во второй вертикальной клетей для вариантов Б и В;
 в – в третьей вертикальной клетей для варианта В

При каждом варианте применения валков для каждого сляба с указанными выше ширинами и толщинами отыскивали режим деформации, обеспечивающий минимальную ширину промежуточного раската (то есть режим максимального редуцирования по ширине) и режим деформации, минимизирующий обрызг при наименьшей ширине промежуточного раската, которая может быть получена при использовании только гладких валков в универсальных клетях.

Результаты прокатки слябов в черновой группе по трём вариантам представлены на рис. 8. На рис. 8, а представлены результаты прокатки, где в черновой группе принята убывающая деформация по горизонтали от первой к последней клетей, которая графически представлена на рис. 5, б. На рис. 8, б уже представлены результаты оптимизации (минимум ширины промежуточного раската) для каждого из трёх вариантов.

На рис. 9 представлено сравнение концевой обрэзи для трёх вариантов компоновок А, Б и В при прокатке с оптимизацией по ширине при выходе на

ширину промежуточного раската для сляба 1150 мм на 1005 мм для всех трёх вариантов, для сляба 1500 мм – 1368 мм, для сляба 1850 мм – 1733 мм. Из рисунка видно, что при прокатке по вариантам Б и В при выходе на ту же ширину промежуточного раската, что при варианте А возможно снизить концевую обрэз. При этом эффект снижения обрэзи более выражен при большей ширине сляба.

На рис. 10 представлено сравнение технологических режимов при прокате сляба 1150 мм (горизонтальных и вертикальных абсолютных обжатий) в зависимости от варианта. Из рисунка видно, что при вариантах Б и В при вертикальных проходах максимальные абсолютные обжатия происходят во второй и третьей вертикальной клетях. В варианте В для горизонтальных проходов в связи с применением калиброванных валков выражена фиксация первых двух абсолютных обжатий по 25 мм, для варианта А преобладает убывающее горизонтальное обжатие по клетям. На рис. 11 и 12 представлены режимы обжатий для слябов 1500 и 1850 мм.

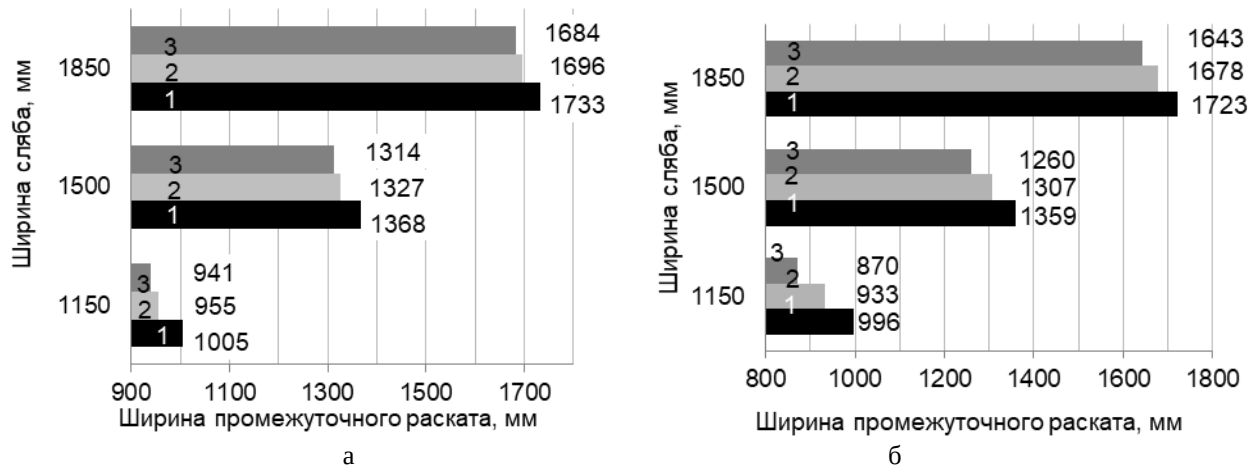


Рис. 8. Результаты деформаций слэбов по ширине в зависимости от компоновки для режимов: а – убывающая деформация по ширине от первой к шестой клет; б – оптимизация по минимуму ширины промежуточного раската при компоновках; 1 – вариант А, 2 – вариант Б, 3 – вариант В; 941 – 1733 – наименьшие значения ширины (мм), которые могут быть достигнуты в соответствующих случаях

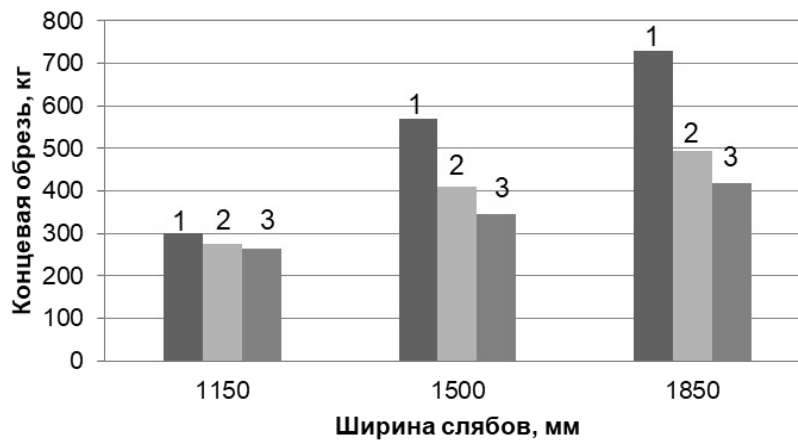


Рис. 9. Концевая обрезь при различных вариантах компоновок применения вертикальных валков: 1 – вариант А; 2 – вариант Б; 3 – вариант В

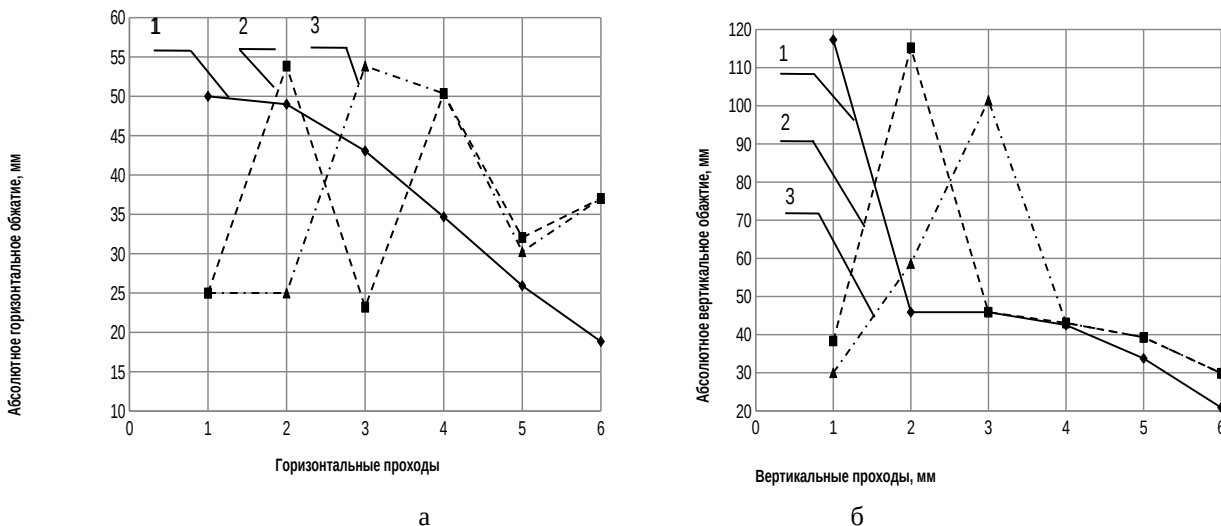


Рис. 10. Результаты абсолютных обжатий по клетям для каждого из вариантов при прокатке слэба 1150: а – горизонтальные обжатия; б – вертикальные обжатия: 1 – вариант А, 2 – вариант Б, 3 – вариант В

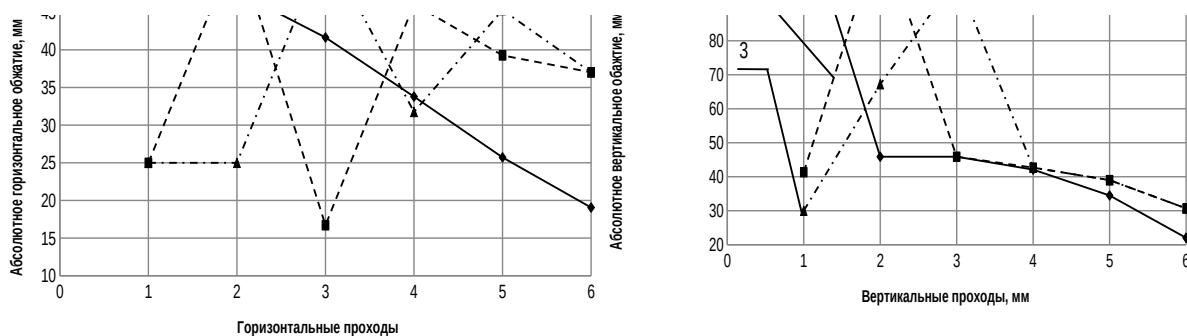


Рис. 11. Результаты абсолютных обжатий по клетям для каждого из вариантов при прокатке сляба 1500: а – горизонтальные обжатия; б – вертикальные обжатия, 1 – вариант А, 2 – вариант Б, 3 – вариант В

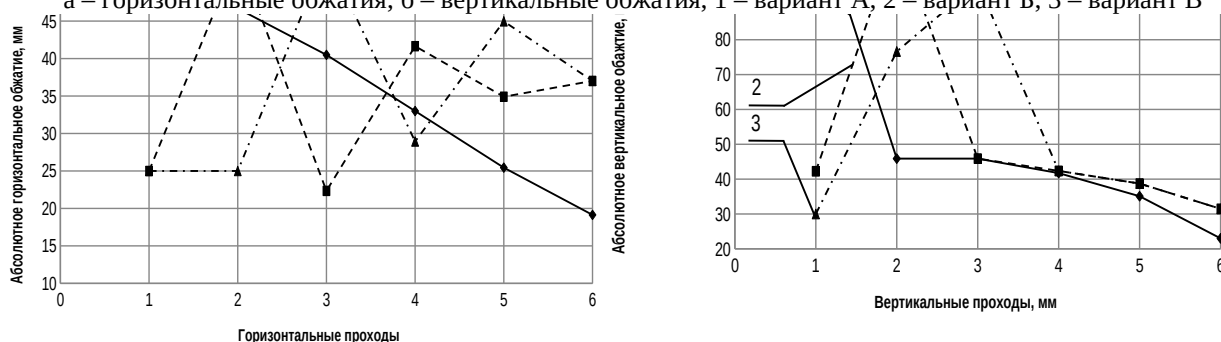


Рис. 12. Результаты абсолютных обжатий по клетям для каждого из вариантов при прокатке сляба 1850: а – горизонтальные обжатия; б – вертикальные обжатия, 1 – вариант А, 2 – вариант Б, 3 – вариант В

Из режимов прокатки видно, что для уменьшения концевой обрезки в первом вертикальном проходе не следует производить максимально возможное обжатие по ширине (варианты Б и В), а перераспределить его на второй или третий проход, что в принципе согласуется с работами [6, 10-12]. В этом случае создаются минимальные возможные длины утянутых передних и задних концов раската, которые при дальнейшем вертикальном обжатии выступают жёсткими концами [3], а утяжка переднего и задних концов выступают своего рода «фасками» и препятствуют увеличению концевой обрезки [3, 13]. Прокатка по вариантам Б и В позволяет снизить концевую обрезку и увеличить эффективность обжатия по ширине без оснащения вертикальных клетей гидронажимными устройствами для переменного обжатия по ширине [13, 14].

Закключение

1. Черновая группа широкополосного стана третьего поколения имеет резерв обжимной способности по толщине, который можно использовать за счёт перераспределений обжатий для максимального редуцирования ширины сляба и

минимизации концевой обрезки.

2. Для увеличения редуцирующей способности черновой группы по ширине сляба возможно оснастить первую и вторую универсальные клетки вертикальными валками с ящичными калибрами высотой 225 мм в первой и 200 мм во второй клетях. Данное решение также позволит производить прокатку по режимам деформации, которые способствуют уменьшению концевой обрезки при условии, что обжимная способность черновой группы по ширине используется не полностью.

3. Разработаны режимы прокатки в черновой группе при использовании впервой и второй универсальных клетях вертикальных валков с ящичными калибрами, которые будут способствовать повышению энергоэффективности технологической системы «МНЛЗ-ШСП» за счёт сокращения требуемого количества типоразмеров слябов по ширине, снижения концевой обрезки, а также создания условий для подачи к нагревательным печам стана слябов с максимальным теплосодержанием.

Список источников

1. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособ. СПб.: Наука, 2005. 540 с.
2. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Кн. 1: Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехника, 2008. 640 с.
3. Павельски О., Пибер В. Возможности и пределы деформации по ширине при плоской горячей прокатке // Чёрные металлы. 1980. № 17. С. 3-11.
4. Салганик В.М., Кульпин Е.В. Формирование ширины полос при горячей прокатке // Обзор. Информ. М.: Ин-т «Черметинформация». Сер. Прокатное производство, 1989. Вып. 2. 24 с.
5. Моделирование изменения ширины раската и алгоритмизация задачи выбора режима обжатий вертикальными валками в черновой группе ШСПП / В.М. Салганик, М.И. Румянцев, А.Г. Соловьев, Д.С. Цыбров // Неделя металлов в Москве: сборник трудов конференции, Москва, 09-13 ноября 2009 г. М., 2010. С. 581-588.
6. Салганик В.М., Румянцев М.И. Технология производства листовой стали: учеб. пособ. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 320 с.
7. Литовченко Н.В. Станы и технология прокатки листовой стали. М.: Металлургия, 1979. 272 с.
8. Шитов М.В. Изменения ширины сляба валками: область применения и направления развития // Калибровочное бюро. 2014. № 3. С. 91-111.
9. Совершенствование формы калибра эджерного валка черновой группы широкополосного стана литейно-прокатного комплекса / А.В. Даниленко, А.В. Мунтин, В.В. Науменко, В.М. Максимов // Сталь. 2021. № 4. С. 18-23.
10. Васекин А.В. Модели формоизменения концов толстых широких раскатов в плане при прокатке в системе горизонтальных и вертикальных валков // Металлургия и литьё Украины. 2009. № 9. С. 14-18.
11. Коновалов Ю.В., Руденко Е.А., Фролова М.О. Возможные технологии редуцирования непрерывнолитых слябов по ширине на широкополосных станах. Сообщение 2. Разработка и исследование схем редуцирования в универсальных клетях широкополосных станов // Производство проката. 2014. № 8. С. 3-13.
12. Анисочкина Е.А., Руденко Е.А., Полухина С.В. Распределение обжатий по вертикальным валкам черновых универсальных клеток широкополосного стана // Металлургия XXI столетия глазами молодых: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 28-29 мая 2024 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. С. 166-170.
13. Болобанова Н.Л., Антонов П.В., Котов К.А. Моделирование и исследование формообразования стального листового проката и совершенствование процессов его производства: монография. Череповец: ЧГУ, 2023. 262 с.
14. Болобанова Н.Л., Шаталов Р.Л., Болобанов М.А. Численное моделирование переменного бокового обжатия полосы в черновой группе широкополосного стана горячей прокатки // Черные металлы. – 2026. № 2. С. 4-9.

Сведения об авторах

Шитов Михаил Викторович – магистрант кафедры ОМД им. М. И. Бояршинова, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mihailschitov@mail.ru. Author ID: 845569

Соловьев Александр Геннадьевич – директор ООО «ПРОМЕЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: sag71mgn@yandex.ru.

Румянцев Михаил Игоревич – профессор кафедры обработки материалов давлением им. М.И. Бояршинова, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. Author ID: 423777. ORCID: 0000-0003-0608-0446

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

UNIFICATION OF DEFORMATION MODES IN THE HSM ROUGHING GROUP TO INCREASE EFFICIENCY OF SLABS WIDTH REDUCTION BY VERTICAL ROLLS

Shitov Mikhail V. – Master of the Department of Material Processing by Pressure named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mihailschitov@mail.ru. Author ID: 845569

Solov'ev Alexander G. – Director of LLC “PROMEZ”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sag71mgn@yandex.ru.

Rumyantsev Mikhail I. – Department of Material Processing by Pressure named after M.I. Boyarshinov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. Author ID: 423777. ORCID: 0000-0003-0608-0446

Abstract. For the production of hot-rolled strips at wide-strip hot rolling mills (HSM), it is an urgent task to decreasing the number of standard sizes of cast slabs by width. Analysis of the reduction ability for thickness and width into the six-stand roughing group of the third generation HSM revealed a reserve for increasing the thickness reduction of the slab and limited possibilities for width reduction. To study the slab forming process in the roughing group of HSM, finite element modeling was used using the “Deform” software complex. Based on the results of finite element modeling, regression dependencies of the width and end edges of the unwinds from the distribution of transverse and height deformation by the rolling stands were constructed. These dependencies were used to optimize deformation modes according to the criterion of maximum reduction of slab width, as well as according to the criterion of minimum end cutting of the strips specified width. As a result of the search for optimal solutions, it was found that in order to increase the reduction along the width of the slab, it is advisable vertical rolls with a smooth barrel in the first and second universal stands to replace at rolls with box gauges similar to the rolls of a separate vertical stand, as well as redistribute the reductions through the thickness. Unified modes of slabs reduction by thickness and width in roughing group are proposed, which make it possible to reduce the number of standard sizes of slabs poured on Continuous Casting Machine (CCM), as well as to reduce the number of end trimmings on HSM, which contributes to improvement of energy efficiency of system “CCM-HSM”

Keywords: «Continuous Casting Machine - Wide-Strip Hot Rolling Mill» system, slab width, HSM roughing group, width reduction, thickness reduction, end waste of the strips, unified deformation modes

References

1. Rudskoy A.I., Lunev V.A. Theory and technology of rolling production: Training. Method. St. Petersburg: Science, 2005. 540 s.
2. Kononov Yu.V. Distributor's Handbook. Kn. 1: Production of hot-rolled sheets and strips. M.: Heat engineering, 2008. 640 s.
3. Pavelski O., Pieber V. Possibilities and limits of deformation in width during flat hot rolling // Ferrous metals. 1980. № 17. S. 3-11.
4. Salganik V.M., Kulpin E.V. Formation of strip width during hot rolling // Overview. Inform. M.: Institute "Chermetinformatsiya." Ser. Rolling production, 1989. No. 2. 24 pp.
5. Modeling the change in the width of the roll and algorithmization of the task of choosing the reduction mode by vertical rolls in the draft group of ShSGP/V.M. Salganik, M.I. Rumyantsev, A.G. Soloviev, D.S. Tsybrov // Week of Metals in Moscow. November 09-13, 2009. Collection of proceedings of the conference. M., 2010. S. 581-588.

6. Salganik V.M., Rumyantsev M.I. Sheet steel production technology: training method. Magnitogorsk: GOU HPE "MSTU." 2007. 320 s.
7. Litovchenko N.V. Mills and sheet steel rolling technology. M.: Metallurgy, 1979. 272 p.
8. Shitov M.V. Changes in the width of the slab with rollers: area of application and direction of development // Calibration bureau. 2014. № 3. С. 91–111.
9. Improving the shape of the edger roll gauge of the draft group of the wide-strip mill of the foundry and rolling complex / A.V. Danilenko, A.V. Muntin, V.V. Naumenko, V.M. Maksimov // Steel. 2021. № 4. S. 18-23.
10. Vasekin A.V. Models of shaping the ends of thick wide braces in plan during rolling in the system of horizontal and vertical rolls // Metallurgy and casting of Ukraine. 2009, no. 9, pp. 14-18.
11. Konovalov Yu.V., Rudenko E.A., Frolova M.O. Possible technologies for reducing continuously cast slabs in width at broadband mills. Message 2.[†]
12. Anisochkina, E. A. Distribution of crimps on vertical rolls of rough universal stands of the broadband mill / E. A. Anisochkina, E. A. Rudenko, S. V. Polukhina // Metallurgy of the XXI century through the eyes of young people: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of young scientists and students, Donetsk, May 28-29, 2024. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2024. S. 166-170.
13. Bolobanova N.L., Antonov P.V., Kotov K.A. Modeling and study of steel sheet formation and improvement of its production processes. Monograph. Cherepovets: ChSU, 2023. 262 pp.
14. Bolobanova, N. L. Numerical simulation of variable lateral reduction of strip in the roughing group of wide-strip hot rolling mill / N. L. Bolobanova, R. L. Shatalov, M. A. Bolobanov // Ferrous metals. 2026. № 2. S. 4-9.

[†]Ссылка на статью:

Шитов М.В., Соловьев А.Г., Румянцев М.И. Унификация режимов деформации в черновой группе ШСГП для повышения эффективности бокового обжатия слэбов вертикальными валками // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 47-55. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-47-55](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-47-55)
 Shitov M.V., Solov'ev A.G., Rumyantsev M.I. Unification of deformation modes in the hsm roughing group to increase efficiency of slabs width reduction by vertical rolls. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 47-55. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-47-55](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-47-55)

ПОДГОТОВКА СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

УДК 669.743.27: 669.054.83

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-56-62](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-56-62)

Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Абдулгазина Н.М., Крюкова Е.Д., Топоркова А.Е., Сапрыкина П.И., Муллина Д.Д.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования возможности комплексной селективной переработки гидротехногенных сульфатных растворов с высоким содержанием ионов меди и железа с применением гидрометаллургических процессов. В работе рассмотрены природные и техногенные факторы, влияющие на процесс формирования техногенных вод на территории горных предприятий медноколчеданного комплекса. В работе рассмотрены основные способы селективного выделения меди из сульфатных растворов с показателями значений pH менее 2,5. Приведены результаты технологических аспектов селективного разделения меди и железа при переработке кислых подотвальных вод горных предприятий медноколчеданного комплекса. На основании результатов эксперимента обоснована возможность получения металлосодержащих продуктов, пригодных для дальнейшей переработки на металлургических предприятиях. Для извлечения меди, с учетом специфики матричного состава исследуемых водных объектов, наиболее целесообразно применение гидрометаллургического метода – цементации (на железном носителе). Экспериментальные исследования процесса цементации проводились с использованием лабораторного цементатора, загруженного железной стружкой. Использование железа в качестве цементатора обусловлено его активными восстановительными свойствами (в сравнении с медью). При протекании данного гидрометаллургического процесса был получен кондиционный медьсодержащий продукт ($\beta_{Cu} = 66,5\%$), который можно классифицировать как кондиционный медный концентрат I сорта. Полученный медьсодержащий продукт может быть востребован в электротехнике в качестве полупроводника, а также для производства труб в металлургической промышленности. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по извлечению железа в виде кондиционного сырья, с содержанием чистого железа более 52 %. Полученный продукт может применяться для изготовления агломерационных и брикетированных форм сырья, идущего на переплавку в доменных печах, а также для переплавки в индукционных печах при получении литейного чугуна. Все технологические решения разрабатывались с учетом требований экологической безопасности, технико-экономической эффективности и чистоты товарной продукции.

Ключевые слова: гидротехногенное сырьё, сульфатные растворы, металлы, медь, железо, гидрометаллургия цементация, осаждение

Введение

Актуальная проблема истощения запасов минерального сырья приводит к необходимости вовлечения в производство нетрадиционных источников черных и цветных металлов. Учитывая простоту аппаратного оформления, доступность и экономическую рентабельность, наиболее перспективными являются технологии, основанные на гидрометаллургических процессах переработки вторичных технологических растворов [1, 2].

Перспективы переработки вторичных технологических растворов горных предприятий связаны с актуальной тенденцией перехода экономики к замкнутости технологических процессов при переработке первичного сырья, а также с повышением эффективности действующих технологий. По совокупности это позволяет решить экологические проблемы действующих предприятий, а также повысить их рентабельность в современных условиях [3-6].

Горнопромышленный регион Южного Урала широко представлен горнорудными предприятиями медноколчеданного комплекса. Результаты работы горных предприятий приводят к образованию специфического сернокислого гидротехногенного комплекса, характеризующегося высоким содержанием катионных форм металлов [5, 6].

Проведённые исследования ионного состава, гидротехногенных образований на территории горных предприятий Урала показали, что концентрации растворённых форм меди и железа в них близки к показателям в гидроминеральном сырье, что указывает на высокую рентабельность их переработки (табл. 1, 2). Отмечено, что наиболее высокоминерализованными растворами являются подвальные воды.

Таблица 1

Химический состав гидротехногенных образований
АО «Бурибаевский ГОК»

Техногенные воды горных предприятий Южного Урала	Содержание, мг/дм ³				
	pH	Fe _{общ}	Cu ²⁺	Mn ²⁺	SO ₄ ²⁻
Подотвальные воды	2,3	901,6	284,3	197,3	5708
Карьерные воды	5,4	0,54	1,93	3,82	634
Шахтные воды	6,1	1,43	3,15	1,96	745

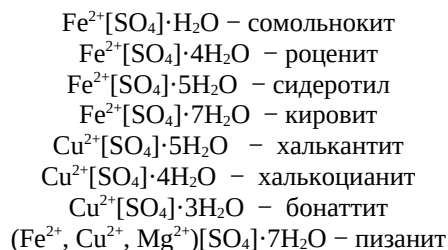
Таблица 2

Химический состав подотвальных вод горных
предприятий Южного Урала
(медноколчеданного комплекса)

С, мг/дм ³	ОАО «Башкирский медно-серный комбинат»	АО «Бурибаевский ГОК»	АО «Учалинский ГОК»
pH	2,65	2,36	2,94
Cu ²⁺	432,7	284,3	182,6
Fe _{общ}	280,35	901,6	174,26
SO ₄ ²⁻	29426,8	5708,2	10596,2

Выбор эффективного метода извлечения напрямую зависит, прежде всего, от формы нахождения металлов в перерабатываемых растворах [7-9].

Исследования специфики формирования медноколчеданных месторождений Южного Урала показали что, гипергенезис сульфатных форм минералов рудных месторождений характеризуется значительным многообразием, при этом больше одной трети сульфатов относится к солям железа, как более типичным в составе окисленных руд [10, 11]. Основная группа сульфатов – это купоросы, водные сульфаты Fe²⁺ и Cu²⁺, или разности с изоморфной примесью железа, меди и магния (пизанит) [11]:



Растворимость сульфатов железа и меди в воде очень высокая, что является основным из условий устойчивости купоросов – высокая кислотность растворов (pH < 3) и низкий окислительный потенциал среды (< 0,2 В). При формировании гидротехногенных образований следует учитывать, что катионы Fe²⁺ под действием кислорода воздуха и других окислителей в техногенных растворах находятся преимущественно в устойчивой трехвалентной форме (Fe³⁺). Анализ химического состава техногенных вод горнорудных предприятий Южного Урала показал, что медь содержится в основном в ионной форме преимущественно в виде сульфатов в устойчивой степени окисления Cu²⁺ [9-11].

Технологические решения по выделению и концентрированию меди из растворов на практике предполагают использование трех основных гидрометаллургических процессов: электролиз, химическое осаждение в результате реакций ионного обмена и цементация.

Метод электролиза позволяет достигать максимально высоких показателей извлечения меди – до 99,6% в готовом продукте (минуя стадию плавки). Эффективность проведения процесса электроэкстракции зависит от состава и концентрации сульфатных растворов. Так, концентрация ионов меди (Cu²⁺) должна варьироваться в диапазоне от 40 до 60 г/дм³ (что в пересчете на купоросную форму составит 150 – 200 г/дм³) и концентрация серной кислоты в диапазоне концентраций от 135 до 200 г/дм³ [12, 13].

Учитывая исходную концентрацию ионов меди в гидротехногенных образованиях горнорудных предприятий Южного Урала (табл. 1, 2), применение метода электроосаждения нецелесообразно. Кроме того, основным недостатком практического применения электролизного способа выделения и концентрирования меди из сульфатных растворов является его высокая энергозатратность и сложность аппаратного оформления, что значительно снижает рентабельность внедрения данных технологических решений для переработки гидротехногенных образований.

Химическое осаждение катионов двухвалентной меди возможно с использованием сульфид-анионов (S²⁻) и гидроксид-анионами (OH⁻). Метод химического осаждения растворимыми сульфидами (Na₂S, K₂S, (NH₄)₂S и др.) находит широкое практическое применение для извлечения металла благодаря крайне низкой растворимости образующегося сульфида меди (P_{рCuS} ≈ от 10⁻³⁶ до 10⁻⁴⁸) в зависимости от pH растворов. Рабочий рациональный диапазон кислотности растворов составляет pH от 2,0 до 6,0. При снижении значений pH растворов будет наблюдаться резкое снижение концентрации свободного сульфид-иона, а при переходе в щелочную зону медь начинает образовывать гидроксиды [12, 14].

Традиционные способы переработки гидротехногенных образований горных предприятий медно-колчеданного комплекса предполагают широкое применение метода нейтрализации. Однако данный метод не характеризуется для исследуемой категории вод как высокоселективный, так как в рабочем диапазоне pH (от 3,9 до 7,0) возможно образование нерастворимых форм гидроксидов как меди, так и железа. Известно, что начальные значения pH начала осаждения ионов меди в виде дисперсий варьируется в диапазоне от 4,2 до 6,2 (в зависимости от исходной концентрации катионов Cu²⁺ в сульфатных растворах). При этом следует отметить что начальные значения pH, при которых фиксируются первые признаки осаждения железа в

виде гидроксидных дисперсий составляет: для Fe^{3+} – от 3,7 до 4,1, для Fe^{2+} – от 7,1–7,5 (в зависимости от исходной концентрации железа в перерабатываемых растворах) [15–17].

Кинетика процесса осаждения ионов меди при разных значениях pH, а также с учетом исходной концентрации катионов Cu^{2+} (в присутствии мешающего фактора – катионов железа Fe^{2+} и Fe^{3+}) представлена на рис. 1.

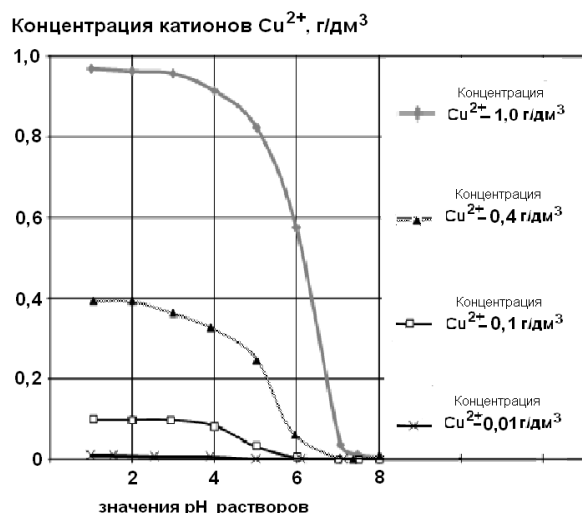


Рис. 1. Влияние значений pH на остаточное содержание ионов Cu^{2+} в растворах в присутствии катионов Fe^{3+}

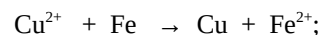
Представленные зависимости на рис. 1 позволяют утверждать что, в присутствии катионных форм железа Fe^{3+} остаточная концентрация ионов меди (раствор с наибольшей концентрацией) до pH 5,0 имеет тенденцию монотонного незначительного изменения. При этом значительное снижение значений остаточных концентраций ионов Cu^{2+} с меньшей концентрацией отмечается уже по достижении показателя pH от 3,0 (концентрация ионов Cu^{2+} 0,1–0,4 г/дм³) и после pH 4,0 (в растворе с концентрацией ионов Cu^{2+} 0,01 г/дм³).

Дальнейшее повышение pH не приводит к резким скачкам изменения концентрации ионов Cu^{2+} модельных в растворах. Данная зависимость может быть обусловлена протеканием побочного процесса соосаждения ионов меди с объемными рыхлыми осадками $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Отсюда использование процессов химического осаждения (как сульфидами, так и гидроксидами) на практике не даёт возможности селективно выделить медь и железо в виде самостоятельных продуктов из кислых сульфатных растворов.

Анализ литературных данных, а также результаты проведенных предварительных исследований показали, что для извлечения ионов меди из кислых сульфатных растворов (с учетом всех исходных параметров системы: концентрация, значения pH,

катионная и анионная матрица растворов) на практике наиболее целесообразно будет использование процесса цементации меди на железе как частный случай гидрометаллургического процесса переработки растворов [10, 18].

Общая схема процесса цементации ионов меди на железных стружках представлена следующими химическими реакциями:



Эффективность процесса цементации на практике обусловлена следующим рядом факторов: показатель среды раствора – pH, расхода осадителя, концентрация ионов меди и длительность обработки растворов в цементаторе. В работе в качестве осадителя была использована железная стружка [19, 20].

Лабораторные исследования процесса цементации проводили на модельных растворах с различной исходной концентрацией ионов меди в растворе. Длительность процесса цементации исследовалась при продолжительности обработки растворов от 1 до 20 мин, при температуре 20°C.

Полученные результаты исследований представлены на рис. 2 и 3.

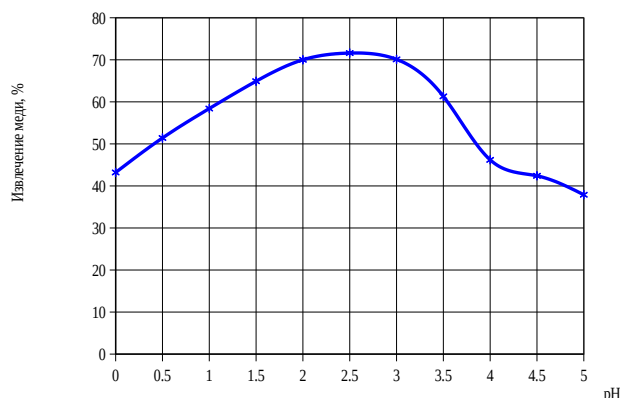


Рис. 2. Влияние кислотности раствора на извлечение меди из сульфатных растворов методом цементации на железе

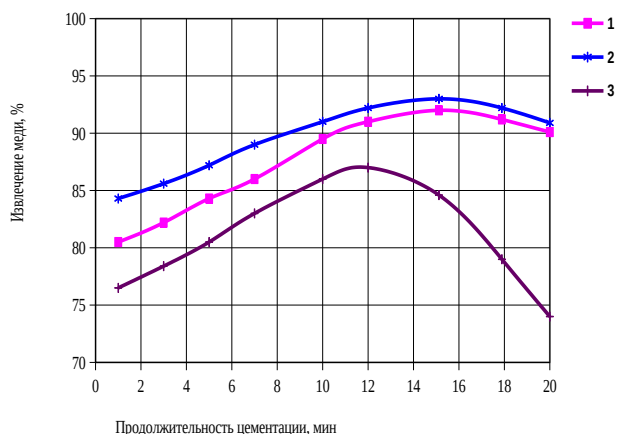


Рис. 3. Кинетика цементации меди из кислых сульфатных растворов при различных сочетаниях ионов меди и железа:

- 1 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2,5;
- 2 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2;
- 3 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 1,5

Анализ полученных зависимостей, представленных на рис. 2, показал что, в диапазоне значений pH от 1 до 3 наблюдается наиболее полное осаждение меди на железной стружке. В диапазоне значений $\text{pH} < 2,0$ показатели количественного извлечения ионов меди из сильнокислых растворов (pH) значительно снижаются. Данная тенденция может быть обусловлена увеличением одноименно заряженных катионов H^+ , что может снизить скорость электромиграции ионов меди к катоду. В случае увеличения pH обрабатываемых растворов более 3 возможно частичное формирование нерастворимых форм гидроксида железа (III), который будет активизировать процесс пассивации поверхности осадителя (железа) и, как следствие, задерживать скорость цементации меди.

На скорость процесса цементации меди значительное влияние оказывает расход осадителя. На рис. 3 отображены кинетические зависимости процесса цементации ионов меди из кислых сульфатных растворов при различных количественных соотношения ионов Cu^{2+} и Fe .

Анализ полученных результатов эксперимента (см. рис. 3) показал что, максимальные показатели осаждения цементационной меди фиксируются после 15-минутной обработки сульфатных растворов в цементаторе. Рациональные количественные соотношения ионов меди и железа-осадителя составили 1:2. Максимальные показатели извлечения меди в данном случае достигают 94,3%.

В процессе проведения эксперимента было установлено, что при обозначенном количественном соотношении ионов меди и железа-осадителя обработку одной и той же железной загрузкой можно проводить до 12 раз. После этого оставшееся

отработанное железо необходимо удалить, а осевшую на дне цементную медь выгрузить из цементатора.

Таким образом, на основании полученных результатов эксперимента (рис. 2, 3) можно сделать вывод о рациональных технологических параметрах осуществления гидрометаллургического процесса (цементации) меди: значения pH 2–3; длительность обработки – 15 мин; количественное соотношение ионов меди и железа (осадителя) 1 : 2.

Выводы:

– представленные в работе технологические решения селективной переработки кислых сульфатных растворов в условиях горнорудных предприятий медно-колчеданного комплекса позволяют получать кондиционное медьсодержащее сырье – до 66,5% основного металла;

– получаемый в работе железосодержащий продукт достигает значений чистого железа более 52%;

– полученный железосодержащий продукт может применяться для изготовления агломерационных и брикетированных форм сырья, идущего на переплавку в доменных печах, а также для переплавки в индукционных печах при получении литейного чугуна;

– все технологические решения разрабатывались с учетом требований экологической безопасности, технико-экономической эффективности и чистоты товарной продукции.

Список источников

1. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г.: гос. доклад / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) / гл. ред. Д.Д. Тетенькин, Е.И. Петров. М., 2022. 622 с. (дата обращения: 27.08.2026).
2. Мишурина О.А. Влияние природных и техногенных факторов на формирование гидротехногенных образований на территории ГОКов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-1. С. 82–85. (дата обращения: 27.08.2026).
3. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и природа глубинных маломинерализованных вод Урала и Предуралья // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 72–82. EDN TNACKF (дата обращения: 27.08.2026).
4. Абдрахманов В.Ф., Попов В.Г. Геохимические особенности подземных вод Южного Урала // Геологический сборник. 2008. № 7. С. 219–232 (дата обращения: 27.08.2026).
5. Никонов В.Н., Белан Л.Н., Хайрулина Л.А. Геология, геохимия и геоэкология Башкирского Зауралья. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2022. 158 с. ISBN 978-5-7477-5652-6. EDN WNUDFU (дата обращения: 27.08.2026).

6. Горбатова Е.А. Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала: специальность 25.00.05 «Минералогия, кристаллография»: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / Горбатова Елена Александровна. Москва, 2013. 41 с. EDN ZPDSOT (дата обращения: 27.08.2026).
7. Воропанова Л.А. Теория, методы и практика извлечения цветных металлов из слабоконцентрированных растворов при комплексной переработке руд: дис. ... д-ра техн. наук. Владикавказ, 2003. 365 с. (дата обращения: 27.08.2026).
8. Смирнов А.В. Осаждение железа и марганца из сульфатных растворов с применением газового реагента при переработке марганецсодержащих материалов: специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: дис. ... канд. техн. наук / Смирнов Александр Всеволодович. Санкт-Петербург, 2010. 140 с. EDN QEUOJB (дата обращения: 27.08.2026).
9. Луцкий Д.С., Игнатович А.С. Исследование гидрометаллургического извлечения меди и рения при переработке медных некондиционных концентратов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 723-729. DOI 10.31897/PMI.2021.5.11. EDN AIYHVV (дата обращения: 27.08.2026).
10. Мишурина О.А., Чупрова Л.В. Химические аспекты извлечения ионов меди из технических растворов гальваническими методами // Успехи современного естествознания. 2016. № 12-2. С. 428-432. EDN XIQETT (дата обращения: 27.08.2026).
11. Мишурина О.А. Технология электрофлотационного извлечения марганца в комплексной переработке гидротехногенных георесурсов медноколчеданных месторождений: специальность 25.00.13 «Обогащение полезных ископаемых»: дис. ... канд. техн. наук / Мишурина Ольга Алексеевна. Магнитогорск, 2010. 153 с. EDN QEVTBX (дата обращения: 27.08.2026).
12. Должийн Цогтхангай. Гидрометаллургическая переработка медного концентрата КОО «Эрдэнэт»: специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: дис. ... канд. техн. наук / Должийн Цогтхангай. Екатеринбург, 2011. 120 с. EDN QFQYQH (дата обращения: 27.08.2026).
13. Корниенко А.А., Павленко Е.Н. Совершенствование процесса кристаллизации в производстве медного купороса // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2025. № 1. С. 30-38. EDN ANOWZK (дата обращения: 27.08.2026).
14. Экстракция соединений цинка и меди из шлака бронзы гидрометаллургическим методом / А.И. Хацринов, С.В. Водопьянова, С.Т. Ермуханова, А.З. Сулейманова // Бутлеровские сообщения. 2025. Т. 83, № 7. С. 20-26. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/25-83-7-20. EDN OARNAS (дата обращения: 27.08.2026).
15. Моделирование процессов осаждения меди и железа из растворов выщелачивания / С.И. Мазухина, А.В. Светлов, Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев // Минералогия техногенеза. 2011. № 12. С. 174-185. EDN UYALSV (дата обращения: 27.08.2026).
16. Modern methods of investigation of surfaces, interfaces, and mechanisms in the mineral processing and hydrometallurgy / Yu.L. Mikhlin, Ye.V. Tomashevich, A.S. Romanchenko [et al.] // Цветные металлы и минералы - 2018 : сборник докладов Десятого международного конгресса. В рамках конгресса - три отраслевые конференции, Красноярск, 10-14 сентября 2018 года. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2018. Р. 1278-1279. EDN BOUNGJ (дата обращения: 27.08.2026).
17. Мишурина О.А., Муллина Э.Р. Химические аспекты процесса деферритизации кислых рудничных вод // Успехи современного естествознания. – 2016. № 12. С. 194-198. EDN XHSLKZ (дата обращения: 27.08.2026).
18. Singh V., Chakraborty T., Tripathy S. K. A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 41. Issue 6. P. 417-438 (дата обращения: 27.08.2026).
19. Liu B., Zhang Y., Lu M., Su Z., Li G., Jiang T. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 286-303 (дата обращения: 27.08.2026).
20. Improvement of the technological scheme for processing zinc concentrates by hydrometallurgical method at JSC Almalyk MMC / M.M. Yakubov, D.B. Kholikulov, M.S. Maksudhodjaeva, O.M. Yoqubov // Комплексное использование минерального сырья. 2025. No. 2(333). P. 89-96. DOI 10.31643/2025/6445.21. EDN ZZKHBJ (дата обращения: 27.08.2026).

Сведения об авторах

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

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

Абдулгазина Нурида Мавлитовна – преподаватель, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: gepod@inbox.ru.

Крюкова Елизавета Дмитриевна – студент гр. ТПО6-25-3, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru

Топоркова Анастасия Евгеньевна – студент гр. ТПО6-25-3, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru

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

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

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE HYDROMETALLURGICAL PROCESS FOR THE SELECTIVE RECOVERY OF METALS FROM SULFURIC ACID SOLUTIONS

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

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

Nurida M. Abdulgazina – PhD Lecturer Researcher; Magnitogorsk Pedagogical College, Magnitogorsk, Russia. Email: gepod@inbox.ru ORCID 0000-0002-4254-3260

Elizaveta D. Kryukova – student gr. ТПО6-25-3; Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: chem@magtu.ru

Anastasia E. Toporkova – student gr. ТПО6-25-3; Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: chem@magtu.ru

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

Diana D. Mullina – student gr. САР6-22, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: moonpoet0@mail.ru

Abstract. This paper presents the results of a study on the feasibility of the integrated, selective processing of sulfate-rich process waters containing high concentrations of copper and iron ions—using hydrometallurgical methods. It also examines the natural and anthropogenic factors influencing the formation of such waters at mining sites within the copper-pyrite complex. This paper examines the primary methods for the selective recovery of copper from sulfate solutions with a pH of less than 2.5. It presents findings regarding the technical aspects of selectively separating copper and iron during the processing of acidic drainage waters from copper-pyrite mining operations. Based on the experimental results, the study substantiates the feasibility of producing metal-bearing products suitable for further processing at metallurgical facilities. To extract copper, given the specific matrix composition of the water bodies under study, the most suitable approach is the hydrometallurgical method of cementation (using an iron substrate). Experimental studies of the cementation process were conducted using a laboratory cementation unit charged with iron filings. Iron was selected as the cementation agent due to its strong reducing properties (relative to copper). This hydrometallurgical process yielded a marketable copper-bearing product ($\beta_{\text{Cu}} = 66.5\%$) that can be classified as a Grade I copper concentrate. This product is suitable for applications in electrical engineering (as a semiconductor material) and in the metallurgical industry for pipe manufacturing. The paper presents the results of experimental studies on the recovery of iron in the form of marketable-grade feedstock with a pure iron content exceeding 52%. The resulting product is suitable for the manufacture of sinter and briquettes for blast furnace smelting, as well as for melting in

induction furnaces to produce foundry pig iron. All process solutions were developed with due regard for environmental safety requirements, techno-economic efficiency, and product purity

Keywords: hydrotechnogenic raw materials, sulfate solutions, metals, copper, iron, hydrometallurgy, cementation, precipitation

References

1. O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'yevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2021 g.: gos. doklad / M-vo prirodnikh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii, Federal'noye agentstvo po nedropol'zovaniyu (Rosnedra) / gl. red. D. D. Teten'kin, Ye. I. Petrov. M., 2022. 622 s. (date of access: 27.08.2026).
2. Mishurina O.A. Vliyaniye prirodnikh i tekhnogennykh faktorov na formirovaniye gidrotekhnogennykh obrazovaniy na territorii GOKov // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2016. № 12-1. S. 82-85. (date of access: 27.08.2026).
3. Abdrakhmanov, R. F. Geokhimiya i priroda glubinnnykh malomineralizovannykh vod Urala i Predural'skogo progiba / R. F. Abdrakhmanov, V. G. Popov // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. № 1. S. 72-82. EDN TNACKF (date of access: 27.08.2026).
4. Abdrakhmanov V.F., Popov V.G. Geokhimicheskiye osobennosti podzemnykh vod Yuzhnogo Urala // Geologicheskii sbornik. 2008, № 7. S. 219–232 (date of access: 27.08.2026).
5. Nikonov, V. N. Geology, geochemistry and geocology of the Bashkir Trans-Urals / V. N. Nikonov, L. N. Belan, L. A. Khairulina. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2022. 158 p. ISBN 978-5-7477-5652-6. EDN WNUDFU (date of access: 27.08.2026).
6. Gorbatoва, E. A. Mineralogical and technological assessment of waste from the enrichment of pyrite ores of the Southern Urals: specialty 25.00.05 "Mineralogy, crystallography": abstract of the dissertation for the scientific degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences / Elena Aleksandrovna Gorbatoва. Moscow, 2013. 41 p. EDN ZPDSOT (date of access: 27.08.2026).
7. Voropanova L.A. Teoriya, metody i praktika izvlecheniya tsvetnykh metallov iz slabokontsentrirannykh rastvorov pri kompleksnoy pererabotke rud: Diss. dokt... tekhn. nauk., Vladikavkaz, 2003. 365 s. (date of access: 27.08.2026).
8. Smirnov, A. V. Osazhdeniye zheleza i margantsa iz sul'fatnykh rastvorov s primeniyem gazovogo reagenta pri pererabotke marganetsoderzhashchikh materialov : spetsial'nost' 05.16.02 "Metallurgiya chernykh, tsvetnykh i redkikh metallov" : dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Smirnov Aleksandr Vsevolodovich. – Sankt-Peterburg, 2010. 140 s. EDN QEUOJB (date of access: 27.08.2026).
9. Lutsky, D. S. Investigation of the hydrometallurgical recovery of copper and rhenium during the processing of off-grade copper concentrates / D. S. Lutsky, A. S. Ignatovich // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 251. P. 723-729. DOI 10.31897/PMI.2021.5.11. EDN AIYHVV (date of access: 27.08.2026).
10. Mishurina, O. A. Chemical aspects of copper ion recovery from industrial solutions using galvanic methods / O. A. Mishurina, L. V. Chuprova // Advances in Current Natural Sciences. 2016. No. 12-2. P. 428-432. EDN XIQETT (date of access: 27.08.2026).
11. Mishurina, O. A. Technology for the electroflotation recovery of manganese during the integrated processing of hydro-technogenic georesources from copper-pyrite deposits : specialty 25.00.13 "Mineral Processing" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Mishurina Olga Alekseevna. Magnitogorsk, 2010. 153 p. EDN QEVTBX (date of access: 27.08.2026).
12. Dolzhiin Tsogthangai. Hydrometallurgical processing of copper concentrate from Erdenet Mining Corporation : specialty 05.16.02 "Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous, and Rare Metals" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Dolzhiin Tsogthangai. Yekaterinburg, 2011. 120 p. EDN QFQYQH (date of access: 27.08.2026).
13. Kornienko, A. A. Improvement of the crystallization process in copper sulfate production / A. A. Kornienko, E. N. Pavlenko // Scientific Bulletin of the State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Nevinnomyssk State Humanitarian and Technical Institute". 2025. No. 1. P. 30–38. EDN ANOWZK (date of access: 27.08.2026).
14. Extraction of zinc and copper compounds from bronze slag using a hydrometallurgical method / A. I. Khatsrinov, S. V. Vodopyanova, S. T. Ermukhanova, A. Z. Suleymanova // Butlerov Communications. 2025. Vol. 83, No. 7. P. 20–26. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/25-83-7-20. EDN OARNAS (date of access: 27.08.2026).
15. Modeling of copper and iron precipitation processes from leaching solutions / S. I. Mazukhina, A. V. Svetlov, D. V. Makarov, V. A. Masloboev // Mineralogy of technogenesis. 2011. No. 12. Pp. 174-185. EDN UYALSV (date of access: 27.08.2026).
16. Modern methods of investigation of surfaces, interfaces, and mechanisms in the mineral processing and hydrometallurgy / Yu. L. Mikhlin, Ye. V. Tomashevich, A. S. Romanchenko [et al.] // Non-ferrous metals and minerals - 2018: Collection of reports of the Tenth international congress. The congress included three industry conferences, Krasnoyarsk, September 10-14, 2018. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Center, 2018. P. 1278-1279. EDN BOUNGJ (date of access: 27.08.2026).
17. Mishurina, O. A. Chemical aspects of the iron removal process from acidic mine waters / O. A. Mishurina, E. R. Mullina // Advances in Current Natural Sciences. 2016. No. 12. P. 194–198. EDN XHSLKZ (date of access: 27.08.2026).
18. Singh V., Chakraborty T., Tripathy S. K. A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes //

- Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 41. Issue 6. P. 417–438 (date of access: 27.08.2026)
19. Liu B., Zhang Y., Lu M., Su Z., Li G., Jiang T. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 286–303 (date of access: 27.08.2026).
 20. 20. Improvement of the technological scheme for processing zinc concentrates by hydrometallurgical method at JSC Almalıyк MMC / M. M. Yakubov, D. B. Kholikulov, M. S. Maksudhodjaeva, O. M. Yoqubov // Комплексное использование минерального сырья. 2025. No. 2(333). P. 89-96. DOI 10.31643/2025/6445.21. EDN ZZKHBH (date of access: 27.08.2026).

‡

§Ссылка на статью:

Технологические аспекты гидрометаллургического процесса селективного выделения металлов из сернокислых растворов / Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Абдулгазина Н.М., Крюкова Е.Д., Топоркова А.Е., Сапрыкина П.И., Муллина Д.Д. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 56-62. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-56-62](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-56-62)

Mishurina O.A., Mullina E.R., Abdulgazina N.M., Kryukova E.D., Toporkova A.E., Saprykina P.I., Mullina D.D. Technological aspects of the hydrometallurgical process for the selective recovery of metals from sulfuric acid solutions. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 56-62. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-56-62](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-56-62)

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

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

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

Журнал включает в себя следующие разделы:

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

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

- электронную версию статьи выслать по электронной почте;
- экспертные заключения о возможности опубликования от всех организаций, сотрудниками которых являются авторы статьи;
- контактный E-mail: , контактный телефон, почтовый адрес для получения экземпляра журнала;
- адрес редакции Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-85-18, E-mail: TTePEoMP@mail.ru; [http://magtu.ru](mailto:TTePEoMP@mail.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 (210х297мм), 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., Монастырских 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 tehniceskogo 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