

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 4 (43) 2022

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

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

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

Члены ред. совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Научный редактор:

Н.Ш. Тютерьяков – 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», 2022

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

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

Адрес редакции:

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

Адрес типографии:

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

Адрес издателя:

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

Выход в свет 23.12.2022. Заказ 298. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 4 (43) 2022

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

Editorial Board Members

Chairman:

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

Honorary Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

Scientific Editor:

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

Technical Editor:

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

K.I. Rud

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2022

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

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

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

Editorship address:

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

Printing office:

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

Editorial office:

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

Publication date 23.12.2022. Order 298. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Посохин М.А., Кургузов К.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДОЛИ БЕДНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД В ИСХОДНОЙ ШИХТЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА	4
Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА ПРИ ПОРЦИОННОМ СМЕШИВАНИИ ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ-СЫРЦА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА.....	9
Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	15
Завалишина А.Н., Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В., Чернов В.П. О ВЫХОДЕ ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ.....	23
Женин Е.В., Шаповалов А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ЧУГУНА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ	27
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	31
Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Михалкина И.В., Ступак А.А., Осипова О.А., Рудь К.И., Элиджарова К.С. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗОНЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В СТЕНКЕ ОТЛИВКИ ИЗ СТАЛИ 150ХНМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ.....	31
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	37
Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М. КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	37
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/1070 И 5083/2024	43

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Posokhin M.A., Kurguzov K.V. DETERMINATION OF THE RATIONAL SHARE OF POOR MANGANESE ORES IN THE CHARGE FOR FERROSILICOMANGANESE MANUFACTURING	4
Martusevich E.A. Rybenko I.A. A DETERMINISTIC MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE OF A MELTING DURING BATCH MIXING OF PRIMARY RAW ALUMINUM IN THE PROCESS OF PRODUCING LUMINUM ALLOYS IN ELECTRIC RESISTANCE MIXERS TO DETERMINE THE OPTIMUM PRODUCTION CONDITIONS	9
Tyutrin A.A., Nemchinova N.V., Hoang V.V., Savchenko E.I. ANALYSING THE RESULTS OF SILICON PROCESSING REFINERY SLAG TREATMENT EXPERIMENT STATISTICALLY.....	15
Zavalishina A.N., Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V., Chernov V.P. ABOUT BOF METAL YIELD	23
Zhenin E.V., Shapovalov A.N. INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF LIQUID PIG IRON IN STEEL MELTING.....	27
FOUNDRY	31
Feoktistov N.A., Savinov A.S., Mikhalkina I.V., Stupak A.A., Osipova O.A., Rud K.I., Elidzharova K.S. FORECASTING THE GEOMETRY AND LOCATION OF THE HIGH-PERFORMANCE ZONE IN THE WALL.....	31
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	37
Lopatina E.V., Polyakova M.A., Voronin K.M. CELLULAR AUTOMATA AS A PROMISING METHOD FOR MODELING METALWORKING PROCESSES BY PRESSURE.....	37
Pesin A.M., Pustovoirov D.O., Biryukova O.D., Nosov L.V., Pivovarova K.G., Pesin I.A. DEVELOPMENT OF RATIONAL TECHNOLOGICAL MODES OF PROCESSING SHEET LAMINATED ALUMINUM COMPOSITES 5083/1070 AND 5083/2024	43

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.12.094.1

Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Посохин М.А., Кургузов К.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДОЛИ БЕДНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД В ИСХОДНОЙ ШИХТЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА

Аннотация. РФ имеет многочисленные месторождения марганцевых руд, отличающихся низким содержанием марганца (10-30%) и плохой обогащаемостью. Поэтому отечественная ферросплавная промышленность вынуждена работать на импортном сырье. Для удовлетворения потребностей отечественной металлургии в марганцевых ферросплавах в данной работе рассмотрена возможность получения силикомарганца из смеси бедного отечественного и богатого привозного сырья. В качестве примера выбрано два месторождения марганцевой руды: на Южном Урале – Ниязгулово-1 и габонский концентрат – Республика Габон, Центральная Африка. Было выполнено два варианта расчета углетермического восстановления и получения силикомарганцевых сплавов. В первом варианте расчета в качестве моносырья принималась ниязгуловская руда, а кварцит и железосодержащий материал, в отличие от традиционных промышленных технологий, не использовали. В результате получили расчётный сплав, несоответствующий стандартным маркам ферросиликомарганца. Но, не смотря на это, представляется возможным рассмотреть его использование в качестве раскислителя углеродистых спокойных марок стали. Во втором варианте расчета в качестве рудной части шихты для выплавки ферросиликомарганца была принята смесь габонского концентрата (основного источника марганца) и ниязгуловской руды (основного источника кремния и железа, дополнительного – марганца). Рациональная доля ниязгуловской руды в исходной шихте составляет 55 %, габонского концентрата – 45 % соответственно. При таком соотношении компонентов возможно получение марочного ферросиликомарганца марки FeMnSi22.

Ключевые слова: марганец, силикомарганец, месторождения, руда, ферросплав

Введение

Ресурсы марганцевых руд выявлены в 56 странах мира и составляют 21,27 млрд т, в том числе в Африке – 14,33 млрд т (67,4% мировых) и Европе – 3,44 млрд т (16,2%). Подтвержденные запасы марганцевых руд составляют 5,4 млрд т. До 90% общемировых подтвержденных запасов марганца заключено в стратиформных месторождениях, около 8% – в корях выветривания и 2% – в месторождениях гидротермального типа. Главными держателями запасов марганца являются 11 стран, владеющих примерно 95% мировых подтвержденных запасов (5,1 млрд т). Это ЮАР, Габон, Украина, Болгария, Грузия, Россия, Австралия, Казахстан, Бразилия, Китай, Индия. К уникальным относится месторождения с запасами марганцевых руд более 1 млрд т, к крупным – с запасами в сотни миллионов тонн и мелким – с запасами в десятки миллионов тонн [1].

В России марганцевые руды в основном находятся в мелких месторождениях, поэтому являются остродефицитным стратегическим видом минерального сырья, что вызывает интерес поиска его новых источников. В то же время на Южном Урале разведано несколько месторождений и рудопроявлений марганецсодержащего сырья [2].

В табл. 1 по результатам геологоразведочных работ (Павлов В.В. и Черенцов Ю.Л.) представлены сведения о некоторых месторождениях марганцевых руд Баймакского, Абзелиловского и Учалинского районов Республики Башкортостан [3].

© Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Посохин М.А., Кургузов К.В., 2022

Таблица 1

Характеристика марганцевых руд месторождений Баймакского, Абзелиловского и Учалинского районов Республики Башкортостан

Наименование месторождений	Содержание, %			
	Mn	Fe	SiO ₂	CaO
Баймакский район				
Асылловское	20	5,46	9,18	2,04
Сев.Файзуллинское	25	3,1	43,58	нет св.
Юж.Файзуллинское	14,21-55,82	1,75	29,65	нет св.
Янзигитовское	15-40	11-52	30-70	нет св.
Юмагужинское	13-22	нет св.	нет св.	нет св.
Исяновское	14,4	16,4	36,8	нет св.
Губайдуллинское	22,9	2,09	54,09	нет св.
Ишбердинское	>20	нет св.	нет св.	нет св.
Мамилинское	12,5-29,5	2,1-4,5	38-62	нет св.
Абзелиловский район				
Кызыл-Таш	37,3	3,6	24,6	нет св.
Ялимбетавское	24-25	5	35	0,73
Аумышевское	25,53	4,68	33,65	нет св.
Аюсазовское	16-39	3,2-9,8	19,50	нет св.
Кусимовское	36	3,2	30	нет св.
Казган-Таш	27,84	нет св.	28,05	нет св.
Ниязгулово-2	10-25	2,6	16-60	нет св.
Биккуловское	13,4	10	36,3	нет св.
Ниязгулово-1	19	15	45	нет св.
Габдиновское	18,6	2,61	64,5	нет св.
Рахметовское	8,1-28,8	нет св.	нет св.	нет св.
Учалинский район				
Уразовское	38	2,5	33,24	нет св.
Тетраук	38-43	4,87	11,4	нет св.
Никольское	26,6	3,5	26,9	нет св.
Сар-Бай	24-41	3,6-6,0	18-33	нет св.
Бай-Султан	21-24	8,3	43,4	нет св.
Кожасевское	24,9	9,99	42,33	7,02
Северо-Кураминское	12,53	15,74	54,4	12

Наибольший интерес представляют месторождения, расположенные вблизи крупных металлургических предприятий, заинтересованных в запуске и развитии собственного производства марганецсодержащих ферросплавов. Примером такого предприятия может служить АО «Уральская Сталь», где в ближайшее время планируется организация производства ферромарганца и ферросиликомарганца.

Одним из перспективных источников марганцевого сырья является Ниязгуловское месторождение (Абзелюловский район Башкортостана, около 40 км от г. Магнитогорска), на котором с 2017 года была возобновлена добыча марганцевой руды. Запасы марганцевой руды этого, одного из самых больших месторождений южно-уральской группы составляют около 2 млн т. В настоящее время проведены вскрышные работы объемом более 200 тыс. м³ и получен доступ к основному рудному телу, запасы которого оцениваются в 1,5 млн т. Прямо в карьере добытая руда подвергается дроблению и грохочению (выделяются фракции 10–60 и 0–10 мм) с помощью двух мобильных автономных дробильно-сортировальных комплексов общей потенциальной производительностью 30 тыс. т в месяц. Основным минералом этой руды является кварцит марганца, поэтому при содержании от 14 до 22% Mn (иногда достигает 30%), концентрация кремнезема SiO₂ составляет от 35 до 51%, железа – 10–15%. Содержание фосфора не превышает 0,030%.

Эта руда используется для промывки горнов доменных печей ПАО «ММК» [4–6]. Следует отметить, что при промывке доменных печей положительное значение имеет относительно высокое содержание в этой руде кремнезема и железа. Также были проведены испытания в качестве шлакообразующего материала в конвертерном производстве ОАО «ЕВРАЗ-НТМК».

Методы и результаты

В работе ставилась задача определить перспективность использования Ниязгуловской руды в качестве составляющей шихты при выплавке ферросиликомарганца. Было принято, что в качестве другого источника марганца в исходном сырье будет применяться богатый габонский концентрат.

По методике [7] были выполнены расчеты углетермического восстановления и получения железо-марганецкремниевых сплавов при использовании моносырья, состоящего только из Ниязгуловской руды и при соотношении габонского концентрата и ниязгуловской руды 1:1. В табл. 2 приведены составы исходных материалов.

Распределение элементов в процессе плавки между сплавом и шлаком представлено в табл. 3 [8].

Химические составы марочного ферросиликомарганца, а также расчетные химические составы сплавов из моносырья и двух компонентов приведены в табл. 4.

Таблица 2

Химический состав шихтовых материалов

Материалы	Mn	MnO ₂	Fe	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Ниязгуловская руда	19,20	24,80	9,58	13,70	2,90	0,38	0,12	48,8	8,73	0,32
Габонский концентрат	42,99	68,00	4,08	5,83	1,80	0,71	-	6,43	9,60	0,08
Рудная смесь 50/50	31,09	49,18	6,83	9,76	2,32	0,55	0,06	27,61	9,16	0,20
Зола коксика	0,62	0,85	16,1	23	5,5	0	0	41,5	26,4	0,07

Таблица 3

Распределение элементов между продуктами плавки

Элемент	Распределение, %		
	в металл	в шлак	в газовую фазу
Mn	80	12	8
P	70	4	26
Si	53	40	7
Fe	95	5	0
S	2	56	42

Таблица 4

Химический состав некоторых марок ферросиликомарганца и расчетных сплавов, %

Элемент	Состав по ГОСТ 4755-91(ИСО 5446-80)		Расчетный сплав	
	FeMnSi30LP	FeMnSi22LP	из ниязгуловской руды	из рудной смеси(1:1)
Mn	57–67	60–75	41,50	63,1
Si	28–35	20–25	31,33	17,8
Fe	Остальное	Остальное	Остальное	17,3
P	Не более 0,10	Не более 0,10	0,26	0,16
C	Не более 0,10	Не более 1,60	0,71	1,58
S	Не более 0,030	Не более 0,030	0,003	0,003

В первом варианте расчета в качестве моносырья принималась ниязгуловская руда без использования кварцита и железосодержащего материала в отличие от традиционных промышленных технологий. Как видно из табл. 4, полученный расчетный сплав из-за относительно низкого содержания марганца не соответствует стандартным маркам силикомарганца. Но, несмотря на это, представляется возможным рассмотреть его использование в качестве раскислителя углеродистых спокойных марок стали [9-11].

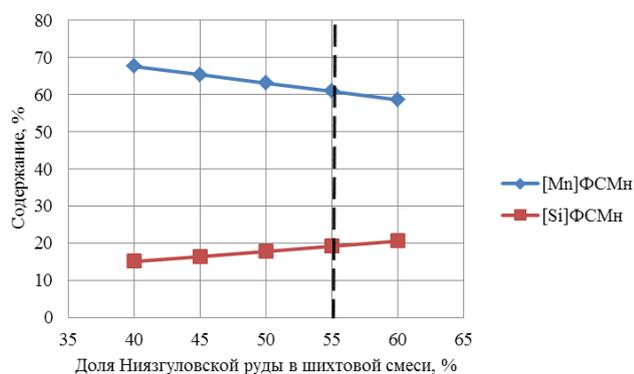
Расчетный сплав с применением габонского концентрата по химическому составу практически соответствует стандартному силикомарганцу марки FeMnSi22LP.

В табл. 5 и на рисунке представлено изменение содержания элементов в ферросиликомарганце в зависимости от доли ниязгуловской руды в исходной шихте.

Таблица 5

Состав силикомарганца при различной шихтовке

Доля ниязгуловской руды в шихте, %	Mn	Si	Fe	S	P
40	67,6	15,1	15,9	0,003	0,14
45	65,4	16,4	16,6	0,003	0,15
50	63,1	17,8	17,3	0,003	0,16
55	60,9	19,2	18,1	0,003	0,17
60	58,6	20,6	18,8	0,003	0,18



Изменение содержания марганца и кремния в ферросплаве в зависимости от доли ниязгуловской руды в исходной шихте

Рациональная доля ниязгуловской руды составляет 55%, габонского концентрата – 45% соответственно. При таком соотношении компонентов возможно получение марочного ферросиликомарганца марки FeMnSi22.

Заключение

Использование многочисленных, но малых по запасам и бедных по содержанию марганца месторождений марганцевых руд Южного Урала возможно в качестве сырья для получения ферросиликомарганца с последующим применением в сталеплавильном

производстве. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что использование бедной марганцевой руды в смеси с более богатыми концентратами позволяет получить ферросплавы, соответствующие требованиям ГОСТ, что позволит удешевить получаемую продукцию значительно, а также достигнуть частичного импортозамещения.

Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-1064.2022.4.

Список источников

1. Технология марганцевых ферросплавов Ч.1. Высокоуглеродистый ферромарганец / В.И. Жучков, Л.А. Смирнов, В.П. Зайко, Ю.И. Воронов. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 415 с.
2. Минеральное сырье. Марганец: справочник / Н.И. Потконен, А.С. Столяров, А.А. Шарков и др. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. 51 с.
3. Полезные ископаемые республики Башкортостан (марганцевые руды) / Д.Н. Салихов, С.Г. Ковалев, А.И. Брусницын, Г.И. Беликова, П.Г. Бердников, Е.А. Сергеева, Т.А. Семкова. Уфа: Изд-во «Экология», 2002. 242 с.
4. Промывка горна доменной печи кремнеземо-марганцевистой рудой Ниязгуловского месторождения / В. А. Бигев [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2018. № 3(26). С. 12–16.
5. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 46-56.
6. Перспективы использования марганцевых руд Южного Урала / В.А. Бигев [и др.] // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: «Ферросплавы» «НИОКР-2018»: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых, 29 октября – 2 ноября 2018. Екатеринбург, 2018. С. 196–199.
7. Состояние и перспективы переработки природно-легированного железорудного сырья Южного Урала / В.А. Бигеев, М.В. Потапова, И.А. Гришин, А.Н. Смирнов // Физико-химические основы металлургических процессов: сб. тр. Междунар. науч. конф., посвященной 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина. М.: Изд-во ООО «Интерконтакт Наука», 2017. С. 48.
8. Мысик В.Ф., Жданов А.В., Павлов В.А. Металлургия ферросплавов: технологические расчеты: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018. 534 с.

9. Новый способ получения марганцевых сплавов / Н.В.Панишев, В.А. Бигеев, М.В. Потапова, Л.А. Закуцкая // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 10 (1426). С. 45-50.
10. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Южного Урала / Н.В. Панишев, А.С. Харченко, В.А. Бигеев, М.В. Потапова, Л.А. Закуцкая // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 7 (230). С. 31-37.
11. Исследование процесса получения марганцевых сплавов из руд Жайремского месторождения / Л.А. Закуцкая, Н.В. Панишев, М.В. Потапова, У.Д. Лулев, А.А. Фахрисламов // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2021. № 20. С. 29-33.

Сведения об авторах

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

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Потапова Марина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

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

Посохин Михаил Андреевич – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: mcm@magtu.ru

Кургузов Константин Вячеславович – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: mcm@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF THE RATIONAL SHARE OF POOR MANGANESE ORES IN THE CHARGE FOR FERROSILICOMANGANESE MANUFACTURING

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

Kharchenko Alexander S. – Dr. Sci. (Eng.), Head of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Potapova Marina V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

Zakutskaya Lyubov A. – postgraduate student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zakutskayalyuba@gmail.com

Posokhin Mikhail A. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

Kurguzov Konstantin V. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

Abstract. The Russian Federation has numerous deposits of manganese ores, which are characterized by low manganese content (10-30%) and poor enrichment. Therefore, the domestic ferroalloy industry has to work on imported raw materials. The possibility of obtaining silicomanganese from a mixture of poor domestic and rich imported raw materials is considered in this work to meet the needs of domestic metallurgy in manganese ferroalloys. Two deposits of manganese ore in the Urals - Niyazgulovo-1 and Gabon concentrate were selected as an example. Two calculations of carbon reduction and production of ferromanganese-silicon alloys were performed. In the first version of the calculation, Niyazgulovskaya ore was taken as a mono-raw material, and quartzite and iron-bearing material, unlike traditional industrial technologies, were not used. As a result, a calculated alloy does not correspond to the standard grades of ferrosilicomanganese. But, despite this, it seems possible to use it as a deoxidizer for killed carbon steel grades. In the second version of the calculation, a mixture of Gabon concentrate (the main source of manganese) and Niyazgulovskaya ore (the main source of silicon and iron, additional - manganese) was taken. The rational share of Niyazgulovskaya ore in the initial charge is 55% and Gabon concentrate is 45%. It is possible to produce FeMnSi22 grade ferrosilicomanganese with this ratio of components.

Key words: manganese, ferrosilicomanganese, deposits, ore, ferroalloy.

Ссылка на статью:

Определение рациональной доли бедных марганцевых руд в исходной шихте при получении ферросиликомарганца / Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Посохин М.А., Кургузов К.В. // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 4-8.

Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Posokhin M.A., Kurguzov K.V. Determination of the rational share of poor manganese ores in the charge for ferrosilicomanganese manufacturing. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 4-8.

УДК 669.2

Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А.

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА ПРИ ПОРЦИОННОМ СМЕШИВАНИИ ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ-СЫРЦА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

Аннотация. Формирование алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления является сложным физико-химическим процессом, который характеризуется последовательным смешиванием алюминия-сырца, полученного методом электролиза и его взаимодействием с различными лигатурами и флюсами. На этой стадии происходит формирование заданного химического состава и качества алюминиевых сплавов посредством рафинирования и легирования расплава. Этот этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий в связи с многозадачностью и многофакторностью металлургического процесса, что приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности электрического миксера сопротивления и повышению затрат на единицу готовой продукции. Следовательно, совершенствование технологии формирования алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления и разработка оптимальных ресурсосберегающих режимов на основе математических моделей является актуальной научно-практической задачей современной металлургии. В связи с этим важное значение приобретает математическое моделирование металлургических процессов с применением программно-инструментальных систем, обеспечивающее высокое качество алюминиевых сплавов в результате прогнозирования конечных параметров химического состава с учетом свойств исходного сырья. Поэтому в рамках интенсивной цифровой трансформации металлургической отрасли актуальна разработка и промышленное применение математических моделей, позволяющих оптимизировать технологический процесс получения алюминиевых сплавов, снизив энергетические и материальные затраты, а также повысить производительность миксеров литейных отделений.

Ключевые слова: алюминиевый расплав, электрический миксер сопротивления, литейный ковш, математическая модель, задача оптимизации

Выделение объекта исследования

Объектом исследования является технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения, который относится к сложным многопараметрическим объектам [1–4]. При выделении объекта исследования можно выделить следующие параметры: входных потоков, выходных потоков, технологические параметры и технико-экономические показатели (рис. 1).

При формировании алюминиевого расплава в миксере параметрами входного потока являются: K – количество литейных ковшей с алюминием-сырцом из электролизного цеха; L – количество легирующих добавок; F – количество флюсовых добавок; m_k – масса расплава алюминия-сырца из k -го литейного ковша ($k = 1 \div K$), кг; m_l – масса l -й легирующей добавки ($l = 1 \div L$), кг; m_f – масса f -й флюсовой добавки для коррекции текущего химического состава расплава ($f = 1 \div F$), кг; $[R]_{ik}$ – исходный химический состав алюминия-сырца в k -м литейном ковше, %; $[R]_{il}$ – химический состав l -й лигатуры, %; $[R]_{if}$ – химический состав f -го флюса, %; m_M^0 – исходная масса расплава в миксере перед началом выполнения технологической операции формирования расплава, кг; m_k^0 – исходная масса расплава алюминия-сырца в k -м литейном ковше, кг; t_M^0 – температура исходного расплава алюминия-сырца в миксере, °С; t_k – температура алюминия-сырца в k -м литейном ковше, °С.

К параметрам выходного потока относятся: m_M – масса сформированного расплава в миксере с учетом легирующих и флюсовых добавок, кг; $[R]_i$ – химический состав расплава в миксере согласно заданным требованиям установленного заказа, %; t_M – температура расплава в миксере, °С. К технологическим показателям и технико-экономическим показателям относятся: $\tau_{\text{общ}}$ – общее время формирования алюминиевого расплава в миксере, с; C_M – затраты на формирование алюминиевого расплава в миксере, руб; C_k – стоимость исходного алюминия-сырца в k -м литейном ковше, руб/кг; C_l – стоимость l -й лигатуры, руб/кг; C_f – стоимость f -го флюса, руб/кг; $C_{\text{эл}}$ – стоимость тарифа электроэнергии, руб./кВт·ч.

Разработка математической модели

Процесс получения алюминиевого расплава в миксере можно разделить на два последовательных этапа: формирование основы расплава путем смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и последующая корректировка расплава легирующими добавками и флюсами. Первый этап процесса формирования алюминиевого расплава заключается в смешивании исходного алюминия-сырца из k -х литейных ковшей и его дальнейшем перемешивании в миксере [5, 6]. Полученная масса расплава m_M в миксере определяется количеством перелитого алюминия-сырца из литейных ковшей:

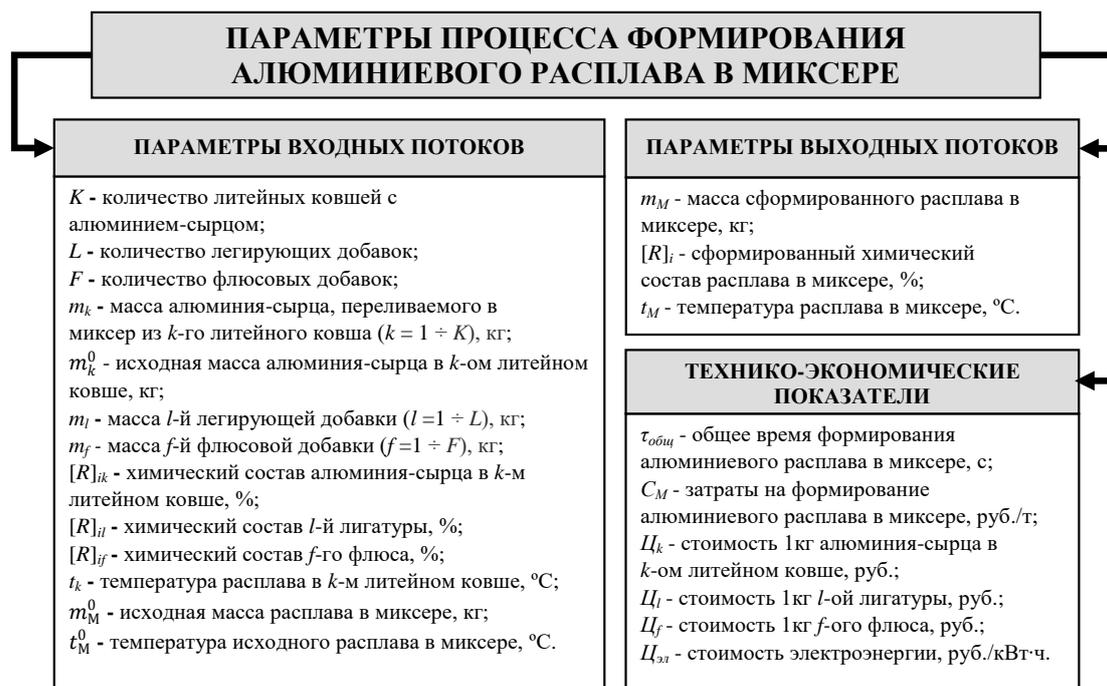


Рис. 1. Параметры технологического объекта

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k, \quad (1)$$

где *K* – количество литейных ковшей;

m_M⁰ – исходная масса расплава в миксере перед началом технологической операции формирования расплава, кг;

m_k – масса алюминия-сырца, поступающего из *k*-го литейного ковша, кг.

Масса *i*-го вещества в миксере рассчитывается с учетом массы и химического состава алюминия-сырца из литейных ковшей, а также угара элементов:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0 [R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k [R]_{ik}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2)$$

где *K* – количество литейных ковшей;

m_M⁰ – исходная масса расплава в миксере, кг;

m_k – масса алюминия-сырца, поступающего из *k*-го литейного ковша, кг;

[R]_i – химический состав алюминиевого расплава в миксере, оставшегося с предыдущего технологического этапа плавки, %;

[R]_{ik} – химический состав алюминия-сырца в *k*-м литейном ковше, %;

η_i – коэффициент угара *i*-го элемента.

Скорости изменения масс химических веществ при формировании алюминиевого расплава в миксере можно представить в виде задачи Коши, определяемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно скоростей изменения масс

расплавов алюминия-сырца из *k*-х литейных ковшей и их начальными значениями:

$$\{v_k = \frac{dm_k}{dt} = -\gamma m_k ;$$

$$v_M = \frac{dm_M}{dt} = \gamma(m_M^0 + m_k^0 - m_M), m_k(0) = m_k^0 ;$$

$$m_M(0) = m_M^0, \quad (3)$$

где *v_k* – скорость расхода массы (истечения) расплава из литейного ковша, кг/с;

v_M – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с;

m_k – текущая масса расплава в *k*-м литейном ковше, кг;

m_k⁰ – начальная масса расплава в *k*-м литейном ковше, кг;

m_M – текущая масса расплава в миксере, кг;

m_M⁰ – начальная масса расплава в миксере, кг;

τ – текущее время, с;

γ – постоянная времени запаздывания инерционного процесса, 1/с.

При этом *v_M* = –*v_k*, то есть прирост массы формируемого расплава в миксере равен расходу массы алюминия-сырца в *k*-м литейном ковше, что соответствует соотношению *m_M* + *m_M⁰* = *m_k⁰* – *m_k*. Прирост масс *i*-го вещества в миксере при переливании исходного алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом начальных условий можно представить в следующем виде:

$$\frac{dm_M^x}{d\tau} = \gamma(m_M^{x_0} + m_k^{x_0} - m_M^x); m_M^x(0) = m_M^{x_0}. \quad (4)$$

Уменьшение массы i -го вещества из k -х литейных ковшей при переливании расплава алюминия-сырца в миксер с учетом начальных условий можно представить уравнением:

$$\frac{dm_k^X}{d\tau} = -\gamma m_M^X; m_k^X(0) = m_k^{X_0}. \quad (5)$$

Математическая модель динамики изменения концентрации химических элементов в миксере и литейных ковшах соответственно определяется системой обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{dm_M^{Fe}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Fe_0} + m_k^{Fe_0} - m_M^{Fe}); m_M^{Fe}(0) = m_M^{Fe_0} \\ \frac{dm_M^{Si}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Si_0} + m_k^{Si_0} - m_M^{Si}); m_M^{Si}(0) = m_M^{Si_0} \\ \frac{dm_M^{Ti}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Ti_0} + m_k^{Ti_0} - m_M^{Ti}); m_M^{Ti}(0) = m_M^{Ti_0} \\ \frac{dm_M^{Al}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Al_0} + m_k^{Al_0} - m_M^{Al}); m_M^{Al}(0) = m_M^{Al_0} \\ \frac{dm_M^{Cu}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Cu_0} + m_k^{Cu_0} - m_M^{Cu}); m_M^{Cu}(0) = m_M^{Cu_0} \\ \frac{dm_M^{Zn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Zn_0} + m_k^{Zn_0} - m_M^{Zn}); m_M^{Zn}(0) = m_M^{Zn_0} \\ \frac{dm_M^{Mn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mn_0} + m_k^{Mn_0} - m_M^{Mn}); m_M^{Mn}(0) = m_M^{Mn_0} \\ \frac{dm_M^{Mg}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mg_0} + m_k^{Mg_0} - m_M^{Mg}); m_M^{Mg}(0) = m_M^{Mg_0} \\ \frac{dm_M^{Pb}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Pb_0} + m_k^{Pb_0} - m_M^{Pb}); m_M^{Pb}(0) = m_M^{Pb_0} \\ \frac{dm_M^{Sn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Sn_0} + m_k^{Sn_0} - m_M^{Sn}); m_M^{Sn}(0) = m_M^{Sn_0}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dm_k^{Fe}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Fe}; m_k^{Fe}(0) = m_k^{Fe_0} \\ \frac{dm_k^{Si}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Si}; m_k^{Si}(0) = m_k^{Si_0} \\ \frac{dm_k^{Ti}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Ti}; m_k^{Ti}(0) = m_k^{Ti_0} \\ \frac{dm_k^{Al}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Al}; m_k^{Al}(0) = m_k^{Al_0} \\ \frac{dm_k^{Cu}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Cu}; m_k^{Cu}(0) = m_k^{Cu_0} \\ \frac{dm_k^{Zn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Zn}; m_k^{Zn}(0) = m_k^{Zn_0} \\ \frac{dm_k^{Mn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mn}; m_k^{Mn}(0) = m_k^{Mn_0} \\ \frac{dm_k^{Mg}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mg}; m_k^{Mg}(0) = m_k^{Mg_0} \\ \frac{dm_k^{Pb}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Pb}; m_k^{Pb}(0) = m_k^{Pb_0} \\ \frac{dm_k^{Sn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Sn}; m_k^{Sn}(0) = m_k^{Sn_0}. \end{cases} \quad (7)$$

В результате исходная задача Коши в векторной форме имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_k}{d\tau} = -\gamma X_k & \frac{dX_M}{d\tau} = \gamma(X_M^0 + X_k^0 - X_M) X_k(0) = X_k^0 \\ X_M(0) = X_M^0 \end{cases}, \quad (8)$$

где X_M – градиент изменения концентраций химических элементов в миксере;

X_k – градиент изменения концентраций химических элементов в k -м ковше.

Последующий этап корректировки расплава с использованием флюсов и лигатур можно представить в виде уравнения

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k + \sum_{l=1}^L m_l + \sum_{f=1}^F m_f, \quad (9)$$

где K – количество литейных ковшей;

L – количество применяемых лигатур;

F – количество применяемых флюсов;

m_M^0 – исходная масса расплава в миксере, кг;

m_k – масса расплава, поступающего из k -го литейного ковша, кг;

m_l – масса l -й лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав, кг;

m_f – масса f -го флюса, добавляемого в алюминиевый расплав, кг.

Тогда масса i -го вещества в миксере будет определяться количеством алюминия-сырца из литейных ковшей и введенных в расплав лигатур и флюсов:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0 [R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k [R]_{ik}}{100} + \sum_{l=1}^L \frac{m_l [R]_{il}}{100} + \sum_{f=1}^F \frac{m_f [R]_{if}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (10)$$

где K – количество литейных ковшей;

L – количество применяемых лигатур;

F – количество применяемых флюсов;

m_M^0 – исходная масса алюминиевого расплава в миксере, кг;

m_k – масса жидкого алюминия-сырца, поступающего из k -го ковша в миксер, кг;

m_l – масса l -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав в миксере, кг;

m_f – масса f -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав в миксере, кг;

$[R]_i$ – химический состав алюминиевого расплава в миксере с предыдущей плавки, %;

$[R]_{ik}$ – химический состав алюминия-сырца в k -м литейном ковше, %;

$[R]_{il}$ – химический состав l -й лигатуры, %;

$[R]_{if}$ – химический состав f -го флюса, %;

η_i – коэффициент угара i -го элемента.

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава реализуется в заданном температурном режиме 900–1000°C. Для расчета текущей температуры формируемого алюминиевого расплава в результате смешивания исходного алюминия-сырца с разной температурой используется уравнение

$$t_M = \frac{(m_M^0 t_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k t_k) C_M}{m_M C_M} + \Delta t, \quad (11)$$

где C_M – теплоемкость расплава в миксере, кДж/(кг·град);
 t_M – текущая температура алюминиевого расплава в миксере, °С;

t_M^0 – исходная температура алюминиевого расплава в миксере перед началом смешивания алюминия-сырца, °С;

t_k – температура жидкого алюминия-сырца в k -м литейном ковше, °С;

Δt – приращение температуры в миксере за счет нагревательных элементов, °С.

Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава представлена на рис. 2.

Решение задачи оптимизации

Для определения оптимальных расходов алюминия-сырца, поступающего из литейных ковшей, и корректирующих добавок была поставлена задача оптимизации, которая заключается в минимизации затрат на формирование алюминиевого расплава в миксере с заданными свойствами при соблюдении всех технологических ограничений и выполнении условий

$$K, L, F, m_k^0, m_M^0, m_k, m_r, m_f, [R]_{ik}, [R]_{ir}, [R]_{if}, t_k, t_M^0$$



Рис. 2. Блок-схема математической модели процесса формирования расплава в миксере

материального и теплового балансов [7, 8]. Целевая функция представляет собой суммарные затраты на получение единицы продукции:

$$C = \frac{(\sum_{k=1}^K m_k \Pi_k + \sum_{l=1}^L m_l \Pi_l + \sum_{f=1}^F m_f \Pi_f + \Pi_{эл})}{m_M} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где Π_k, Π_l, Π_f – стоимость алюминия-сырца, лигатур и флюсов соответственно, руб./т; $\Pi_{эл}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

Решение задачи оптимизации заключается в определении минимума целевой функции при соблюдении следующих ограничений:

а) масса формируемого алюминиевого расплава в миксере должна не превышать полезную емкость миксера:

$$m_{min} \leq m_M \leq m_{max}, \quad (13)$$

б) масса алюминия-сырца, переливаемая в миксер из k -го литейного ковша, должна не превышать исходную массу алюминия-сырца в k -м литейном ковше:

$$0 \leq m_k \leq m_k^0, \quad (14)$$

в) массы лигатур и флюсов должны не превышать массы имеющихся в наличии корректирующих материалов:

$$\begin{aligned} m_{l \min} &\leq m_l \leq m_{l \max}, \\ m_{f \min} &\leq m_f \leq m_{f \max}; \end{aligned} \quad (15)$$

г) формируемый химический состав алюминиевого расплава должен соответствовать заданному химическому составу установленной марки сплава:

$$[R]_{i \min} \leq [R]_i \leq [R]_{i \max}; \quad (16)$$

д) температура формируемого расплава должна соответствовать заданному диапазону значений согласно требованиям технологической инструкции:

$$t_{\min} \leq t_M \leq t_{\max}. \quad (17)$$

При такой постановке задачи применение формальных методов оптимизации не всегда позволяет получить решение при соблюдении всех ограничений. При этом возможно несколько вариантов. В первом случае оптимальное решение по формированию расплава со всеми необходимыми характеристиками может быть получено при заданных начальных условиях, то есть при исходном наборе литейных ковшей с алюминием-сырцом с учетом лигатур и флюсов. Ко второму случаю относится ситуация, когда можно получить лишь неполное решение, например сформировать заданный химический состав алюминиевого расплава в миксере в соответствии с установленной маркой, но меньшей массы. К третьему случаю относится ситуация, когда оптимальное решение, исходя из заданных начальных условий, получить невозможно.

Однако в связи с тем, что в литейный цех непрерывно поступают новые литейные ковшки с алюминием-сырцом, имеется возможность скорректировать начальные условия и добиться полного решения поставленной задачи, то есть получить алюминиевый расплав заданной массы, химического состава и температуры. Такую задачу можно решить методом динамического программирования, который применяется для определения оптимальных параметров объекта при постоянно изменяющихся начальных условиях. Для поиска оптимального решения в рамках метода динамического программирования на каждом этапе предлагается использовать метод линейного программирования, который обеспечивает решение задач, где целевая функция и ограничения имеют линейный вид.

Выводы

Для решения задачи определения оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере выделен объект исследования, определены параметры входных-выходных потоков и выбраны технико-экономические показатели. Разработана математическая модель технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, позволяющая рассчитывать пара-

метры смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере с учетом присадок лигатур и флюсов. Математическая модель включает в себя уравнения материального и теплового балансов, динамические уравнения скоростей изменения масс и химического состава расплава при смешивании алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере, что позволяет определить необходимое количество алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом расходов лигатур и флюсов для формирования расплава с заданной массой, химическим составом и температурой. Поставлена и решена задача оптимизации, заключающаяся в минимизации затрат на получение необходимого количества алюминиевого расплава в миксере с заданным химическим составом и температурой при ограничениях на параметры входных-выходных потоков и технологические параметры. В связи с тем, что решение оптимизационной задачи невозможно получить формальными методами условной оптимизации из-за постоянно меняющихся начальных условий, для поиска решения предложен метод динамического программирования с использованием симплекс-метода линейного программирования.

Разработанная математическая модель предназначена для определения оптимального количества используемого алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом введения лигатур и флюсов, обеспечивающего формирование алюминиевого расплава заданной массы, химического состава и температуры.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ («Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре», договор № 19-37-90087\19), а также в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Список литературы

1. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2016. 108 с.
2. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов. М.: Ленанд, 2015. 416 с.
3. Лаврентьев Г.В., Лаврентьева Н.Б., Неудахина Н.А. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов. Барнаул: Изд-во АГТУ, 2009. 203 с.
4. Митришкин Ю.В. Линейные математические модели динамических систем с управлением. М.: Ленанд, 2019. 464 с.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов [и др.]. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
6. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. М.: Изд-во «Интермет инжиниринг». 2004. 442 с.
7. Математическое моделирование действующего технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения / С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В.

Мартусевич, И.А. Рыбенко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 56. С. 20–28.

8. Проектирование и реализация комплекса программ для моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов

на основе объектно-ориентированного подхода / С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В. Мартусевич, В.Н. Буинцев, И.А. Рыбенко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 57. С. 110–117.

Сведения об авторах

Мартусевич Ефим Александрович – старший преподаватель кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет «СибГИУ», г. Новокузнецк, Россия. E-mail: science_nvzk@mail.ru

Рыбенко Инна Анатольевна – доктор технических наук, доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет «СибГИУ», г. Новокузнецк, Россия. E-mail: rybenkoi@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A DETERMINISTIC MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE OF A MELTING DURING BATCH MIXING OF PRIMARY RAW ALUMINUM IN THE PROCESS OF PRODUCING ALUMINUM ALLOYS IN ELECTRIC RESISTANCE MIXERS TO DETERMINE THE OPTIMUM PRODUCTION CONDITIONS

Martusevich Efim A. – Senior Lecturer, Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuzneck, Russia. E-mail: program.pro666@yandex.ru.

Rybenko Inna A. – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming; Siberian State Industrial University, Novokuzneck, Russia. E-mail: rybenkoi@mail.ru.

Annotation. The formation of aluminum melt in electric resistance mixers is a complex physical and chemical process, which is characterized by sequential mixing of raw aluminum obtained by electrolysis and its interaction with various master alloys and fluxes. At this stage, the formation of a given chemical composition and quality of aluminum alloys occurs through refining and alloying of the melt. This stage of production is associated with the presence of an excessive number of corrective actions due to the multitasking and multifactorial nature of the metallurgical process, which leads to an increase in the melt preparation time, a decrease in the productivity of the electric resistance mixer and an increase in costs per unit of finished product. Therefore, the improvement of the technology of aluminum melt formation in electrical resistance mixers and the development of optimal resource-saving modes based on mathematical models is an urgent scientific and practical task of modern metallurgy. In this regard, mathematical modeling of metallurgical processes using software and instrumental systems is of great importance, which ensures high quality of aluminum alloys as a result of predicting the final parameters of the chemical composition, taking into account the properties of the feedstock. Therefore, within the framework of the intensive digital transformation of the metallurgical industry, it is relevant to develop and industrially apply mathematical models that allow optimizing the technological process for producing aluminum alloys, reducing energy and material costs, as well as increasing the productivity of foundry mixers.

Key words: aluminum melt, electric resistance mixer, casting ladle, mathematical model, optimization problem.

Ссылка на статью:

Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. Детерминированная математическая модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия-сырца в процессе получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления для определения оптимальных условий реализации процесса // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 9-14.

Martusevich E.A., Rybenko I.A. A deterministic mathematical model of the dynamics of changes in the chemical composition and temperature of a melting during batch mixing of primary raw aluminum in the process of producing aluminum alloys in electric resistance mixers to determine the optimum production conditions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 9–14.

УДК 669.782; 669.054.82

Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Проблема образования и накопления рафинировочного шлака кремниевого производства является актуальной для отрасли. Исследуемые шлаки содержат до 70% элементного кремния, что снижает эффективность производства Si за счет низкого извлечения целевого продукта в целом. Поэтому одним из возможных путей утилизации шлаков является их переработка с целью доизвлечения Si с получением алюмокремниевых сплавов. Показано, что основными компонентами шлака являются карбид кремния, кварц и кристобалит, аморфный кремнезем, оксиды кальция, алюминия, включения углерода и элементного кремния. Предложена методика переработки шлака, включающая плавку шихты, состоящую из шлака, металлического алюминия и флюсов, при температуре 1250-1350°C. В качестве флюсов применялись оксид и фторид кальция. Изучено влияние различных факторов процесса переработки кремнийсодержащего шлака (температуры плавки, содержания CaF_2 в составе флюсовой смеси CaF_2 и CaO и крупности частиц шлака) на извлечение кремния в сплав. Получено уравнение математической модели, описывающей процесс извлечения кремния из рафинировочного шлака в виде сплава с алюминием, и установлено, что данная математическая модель является адекватной. Максимальное извлечение кремния из шлака в сплав составило в среднем 51,43% и было достигнуто при температуре 1350°C, содержании CaF_2 в составе ($\text{CaF}_2 + \text{CaO}$) 20% и крупности частиц шлака 1,21 мм.

Ключевые слова: производство кремния, рафинировочный шлак, переработка шлака, извлечение кремния, Al-Si-сплавы

Введение

Ресурсо- и энергосбережение является одной из основных стратегических целей развития металлургической отрасли нашей страны на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года*. В настоящее время продвижение технологических инноваций и расширение сырьевой базы за счет вовлечения новых месторождений и отходов производства является определяющим фактором в поддержании конкурентоспособности отечественной металлургии на мировом рынке [1–8].

Согласно данным [9], мировой объем рынка кремния увеличился до 10,2 млрд долл. в 2021 году, что было на 4,1% больше по сравнению с предыдущим годом. В 2021 году объем производства кремния сократился на 4,7% до 3,4 млн т, прервав семилетнюю тенденцию роста. За рассматриваемый период общий объем производства увеличивался с 2007 по 2021 годы: он рос в среднем на +3,8% в год за последние четырнадцать лет. Китай, Бразилия, Норвегия, Франция и США являются крупнейшими в мире производителями кремния, на долю которых приходится более 90% мирового объема производства.

Россия также относится к крупным производителям кремния металлургических марок. В нашей стране кремний производится в АО «Кремний», входящее в компанию «РУСАЛ».

Получение кремния осуществляется в руднотермических печах (РТП) его восстановлением из кремнеземсодержащего сырья углеродными восстановителями (смесью нефтехкокса, древесного и камен-

ного углей) [10–12]. В качестве рудного сырья используется кварцит Черемшанского рудника, входящего в состав завода.

После плавки расплав кремния направляется в ковш для рафинирования. В промышленных условиях применяют окислительный способ – продувкой воздухом при использовании кварцевого песка в качестве флюса. Данная технологическая операция предназначена в основном для очистки кремния от кальция и алюминия. Основной продукцией предприятия является рафинированный кремний, соответствующий ТУ 1711-004-49421724-16. Отходом рафинирования является рафинировочный шлак, который явился объектом наших исследований

Объект исследований

Количество образующегося рафинировочного шлака в АО «Кремний» составляет приблизительно 10% от массы кремния (при этом учитывается и масса вводимого флюса – кварцевого песка). Общий объем шлака составляет ~ 3900 т в год. Рафинировочный шлак относится к довольно плотным материалам с характерными включениями кремния и карборунда (стекловидной с зеленоватым оттенком фазой) (рис. 1).

Согласно проведенному рентгенофазовому анализу, выполненному на дифрактометре ДРОН-7 (Россия), образцов рафинировочного шлака [13], основными компонентами шлака являются карбид кремния, кварц и кристобалит, аморфный кремнезем, оксиды кальция, алюминия, включения углерода и элементного кремния, а также сложные оксиды как продукты недовосстановления карботермического процесса (в частности, анортит [14]).

Содержание элементного кремния в шлаке после рафинирования составляет от 40 до 70%. Кремний из-за значительной вязкости шлака запутывается в нем, что ведет к снижению общего извлечения кремния

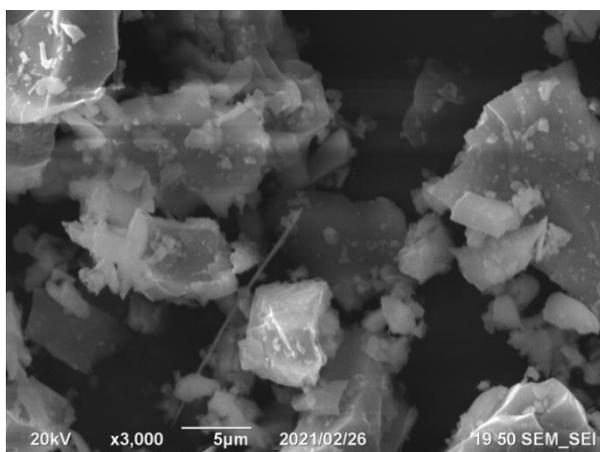
© Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И., 2022

*Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года»

при плавке. В связи с этим нами проведены исследования по извлечению кремния из данного техногенного продукта.



а



б

Рис. 1. Рафинировочный шлак АО «Кремний»: а – общий вид; б – фото измельченного образца шлака (сканирующая электронная микроскопия, увеличение $\times 3000$, микроскоп JIB-Z4500 («Jeol», Япония))

Эксперименты по извлечению кремния из рафинировочного шлака

Нами предложен способ переработки рафинировочного шлака с извлечением кремния в виде сплава с алюминием – силумина (заявка на изобретение № 2022112286 от 06.05.2022). Для определения оптимального температурного режима переработки шихты на основе кремнийсодержащего шлака необходимо учитывать температуру его плавления и вязкость. Поэтому для получения шлака с оптимальной вязкостью в шихту необходимо вводить шлакообразующие компоненты (флюсы): CaO и CaF_2 [15].

Для снижения потерь алюминия в результате окисления кислородом воздуха применяется покровный флюс, состоящий из смеси KCl и NaCl [16, 17]. Крупность частиц шлака варьировалась от 0,5 до 2,5 мм. В качестве источника алюминия использовалась алюминиевая катанка марки А5Е, порезанная на

прутки длиной 20 мм. Температура переработки шлака была принята в диапазоне $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$. Был проведен ряд поисковых экспериментов переработки шлака в высокотемпературной печи Nabertherm («Nabertherm GmbH», Германия) (рис. 2) с целью доизвлечения кремния в виде Al-Si-сплавов и подбора оптимальных параметров переработки.



а



б

Рис. 2. Высокотемпературная печь (а) и тигли с шихтой (б)

Химический состав полученных Al-Si-сплавов изучали спектральным методом анализа в центральной заводской лаборатории филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутском алюминиевом заводе) компании «РУСАЛ».

Спектральный анализ проводится в соответствии с нормативными документами: ГОСТ 3221-85 «Алюминий первичный. Методы спектрального анализа»; СТО 06-2016, разработанный центральной заводской лабораторией ПАО «РУСАЛ Братск». Спектральный анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре Spectrolab (Spectrolab, Германия). Согласно полученным данным, в 4-х образцах силумина содержа-

ние кремния составило соответственно, мас. %: 6,69, 5,13, 4,86 и 4,02.

Структура экспериментальных образцов Al-Si-сплавов была изучена металлографическим методом анализа в научно-исследовательской лаборатории кафедры металлургии цветных металлов ИРНИТУ.

Для определения микроструктуры полученных экспериментальных образцов Al-Si-сплавов были подготовлены шлифы (рис. 3) и проведены металлографические исследования.



а



б

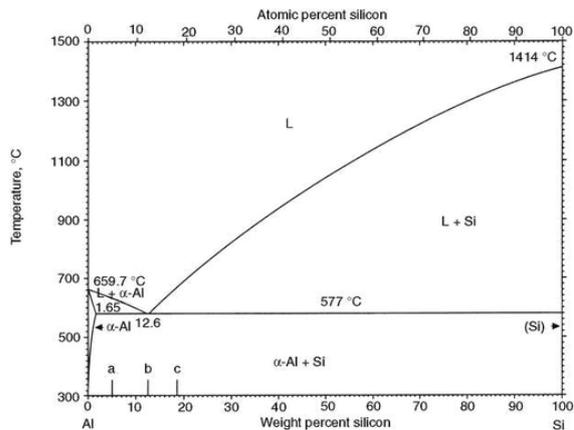
Рис. 3. Экспериментальные Al-Si-сплавы:
а – общий вид сплава;

б – шлифы для металлографических исследований

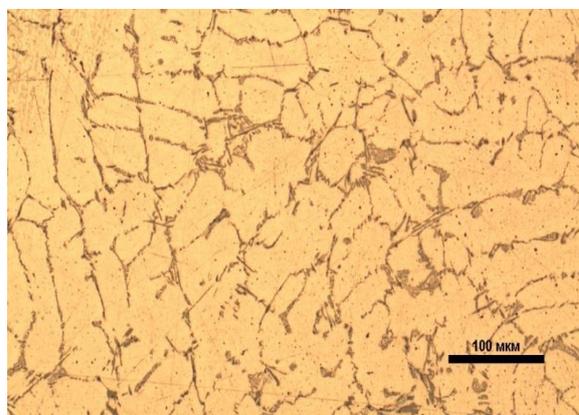
Для изучения микроструктуры экспериментальных сплавов пробоподготовка к металлографическим исследованиям включала в себя получение среза от общего куска сплава с помощью отрезного станка Labotom-15 фирмы «Struers» (Дания). Далее обрезанные по требуемым размерам куски сплава для последующей шлифовки заливались акриловой смолой DuroCit, обладающей коротким временем затвердевания и незначительной усадкой. Шлифование и полировка образцов сплава осуществлялась на шлифовально-полировальном станке Tegramin-25 («Struers», Дания). В наших исследованиях при шлифовании были использованы 3 режима работы с различными лубрикантами: Piano 220 – вода; Largo – DiaPro All/Lar (9 мкм); Mol – DiaDuo-2 (3 мкм).

Микроструктуру шлифов изучали с помощью микроскопа Olympus GX-51 («Olympus», Япония),

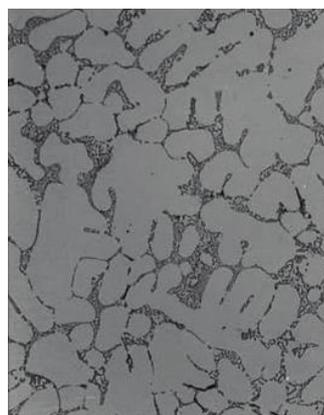
оснащенного цифровой камерой Altera20. Согласно известным литературным данным, данной структуре экспериментальных сплавов соответствует доэвтектический силумин (рис. 4).



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура алюмо-кремниевых сплавов:

а – диаграмма равновесия Al-Si;

б – экспериментальный Al-Si-сплав (металлографическое исследование);

в – промышленный литейный доэвтектический сплав (1,65–12,6 мас. % Si) [18]

Математическая обработка экспериментальных данных по переработке кремнийсодержащего рафинировочного шлака

Результаты эксперимента по переработке шлаков были обработаны с помощью компьютерной программы «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Программа ориентирована на работу с трехфакторным планом эксперимента B-D13, который позволяет получать нелинейные квадратичные модели технологических процессов [19]. При построении математической модели эксперимента по извлечению кремния из рафинировочного шлака в виде сплава (силумина) в качестве основных параметров (факторов варьирования), которые влияют на извлечение кремния в сплав, были выбраны: температура проведения процесса (x_1); содержание CaF_2 в составе флюсовой смеси CaF_2 и CaO (x_2); крупность частиц кремниевого шлака (x_3).

За основной уровень и интервалы варьирования были приняты: температура, °С – 1300 и 50; содержание CaF_2 в составе флюсовой смеси фторида и оксида кальция ($\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$), % – 15 и 5; крупность кремниевого шлака, мм – 1,5 и 1. За выходной параметр (y) было принято извлечение кремния из шлака в Al-Si-сплав. Было проведено два параллельных измерения для определения воспроизводимости выходного параметра, составлена матрица планирования (табл. 1).

Для того чтобы проверить значимость коэффициентов уравнения математической модели, использовался критерий Стьюдента (его значение – 2,23). Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах составила 0,702. Уравнение математической модели, описывающей процесс извлечения кремния из кремниевого шлака в виде сплава с алюминием, имеет вид

$$y = 28,475 + 8,265x_1 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 + 2,266x_2x_3. \quad (1)$$

Адекватность математической модели оценивалась по критерию Фишера (F -критерию). Для этого в программе «PlanExp B-D13» были определены основные показатели для оценки адекватности математической модели (дисперсия воспроизводимости в парал-

лельных опытах, число степеней свободы, табличное значение критерия Стьюдента, дисперсия адекватности математической модели, число степеней свободы при значимых коэффициентах, табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$), расчетное значение критерия Фишера ($F_{\text{расч}}$).

Согласно расчетам выполняется условие

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}} = 1,63 < 4,1.$$

Следовательно, данная математическая модель является адекватной и применима для решения производственных задач.

Поскольку для графического представления функции трех переменных (см. уравнение (1)) требуется четырехмерное пространство, с целью визуального упрощения и удобства работы с математической моделью данную функцию трех переменных преобразовали в функцию двух переменных, поочередно принимая константой один из факторов. В результате преобразования получаются 3 варианта математической модели: $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$, $y = f(x_1, x_3)$ при $x_2 = \text{const}$ и $y = f(x_1, x_2)$ при $x_3 = \text{const}$. Для визуализации влияния факторов на выходной параметр с помощью программы были построены диаграммы линий равного уровня (изолиний), представляющие собой проекции трехмерных поверхностей на плоскости (x_2, x_3), (x_1, x_3) и (x_1, x_2).

На рис. 5 представлены изолинии, характеризующие зависимость извлечения кремния в сплав от температуры процесса и крупности частиц шлака, а содержание CaF_2 во флюсовой смеси (CaF_2+CaO) принято в качестве постоянного фактора. Уравнения математической модели с учетом принятого данного постоянного фактора было преобразовано:

$$y = 21,976 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 - 2,266x_3, \quad \text{при } x_2 = -1 \text{ (10 \%);}$$

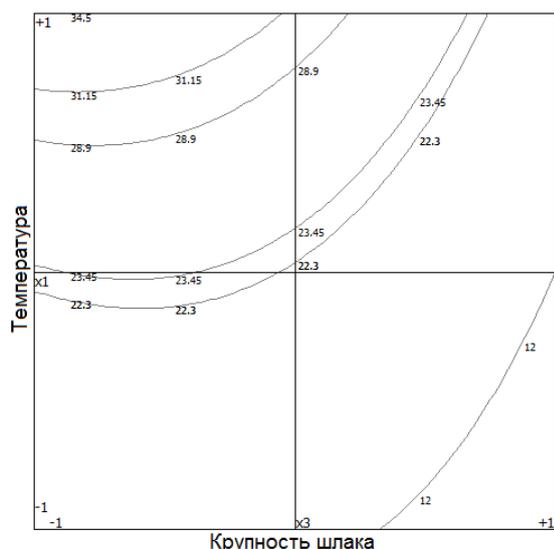
$$y = 28,475 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3, \quad \text{при } x_2 = 0 \text{ (15 \%);}$$

$$y = 42,578 + 8,265x_1 - 3,341x_3 - 4,451x_3^2 - 2,578x_1x_3 + 2,266x_3, \quad \text{при } x_2 = 1 \text{ (20 \%)}.$$

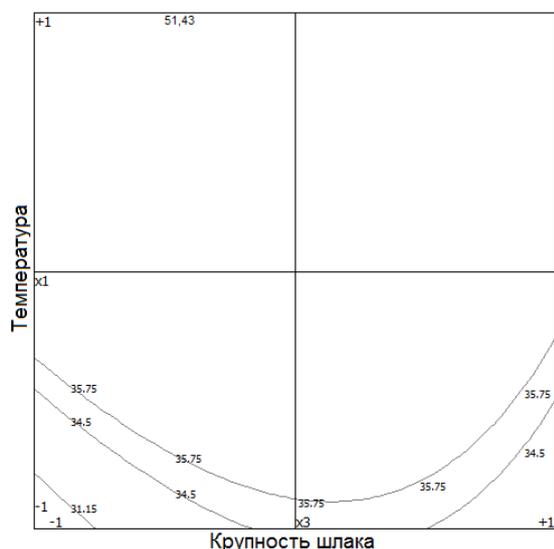
Таблица 1

План эксперимента и значение выходного параметра

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Извлечение Si в сплав (y – выходной параметр), %	
	x_1	x_2	x_3	Температура, °С	$\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$, %	Крупность частиц шлака, мм	$y(1)$	$y(2)$
1	-1	-1	-1	1250	10	0,5	12,2	11,8
2	+1	-1	-1	1350	10	0,5	33,7	35,3
3	-1	+1	-1	1250	20	0,5	28,2	29,6
4	-1	-1	+1	1250	10	2,5	5,9	5,8
5	-1	0,19	0,19	1250	15,95	1,69	23,1	21,5
6	0,19	-1	0,19	1309,5	10	1,69	22,4	22,2
7	0,19	0,19	-1	1309,5	15,95	0,5	31,2	31,1
8	-0,29	+1	+1	1285,5	20	2,5	35,8	35,7
9	+1	-0,29	+1	1350	13,55	2,5	23,8	23,1
10	+1	+1	-0,29	1350	20	1,21	50,2	52,7



а



б

Рис. 5. Зависимость извлечения кремния в сплав от температуры (x_1) и крупности шлага (x_3) при $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$ (x_2) 10% (а) и 20% (б)

Как видно из рис. 5, в пределах варьирования переменных факторов x_1 и x_3 (температуры плавки и крупности частиц шлага) при принятом постоянном факторе x_2 (содержании фторида кальция во флюсовой смеси) повышение температуры плавки оказывает положительное влияние на процесс извлечения кремния из шлага в сплав, при этом экстремум функции отклика отсутствует и смещен в область более высоких температур. Наибольшее значение извлечения кремния составило 51,45% при температуре 1350°C. Оптимальная крупность частиц шлага x_3 из данных рис. 5, а, б находится в диапазоне от 0,6 до 1,7 мм.

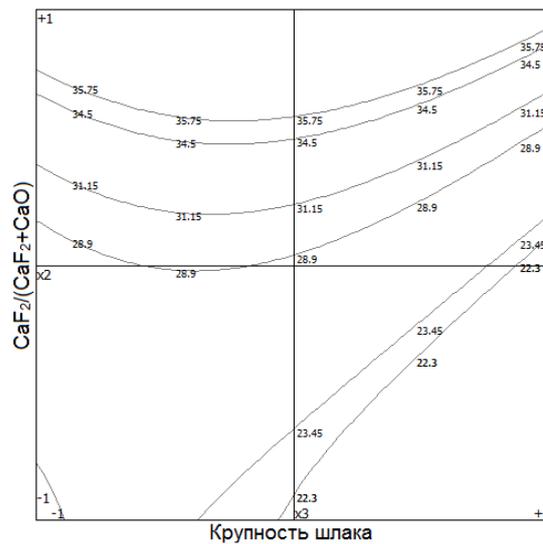
В результате анализа построенных диаграмм $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$ (температура процесса) (рис. 6) уравнение математической модели с учетом приня-

того постоянного фактора было преобразовано и принято следующий вид:

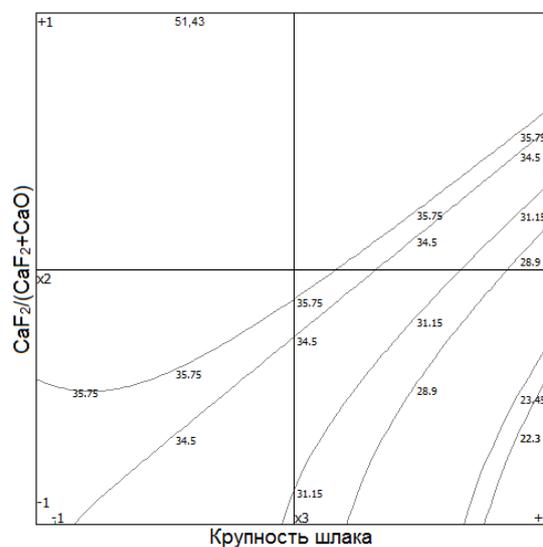
$$y = 20,210 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 + 2,578x_3 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = -1 \text{ (1250}^\circ\text{C);}$$

$$y = 28,475 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = 0 \text{ (1300}^\circ\text{C);}$$

$$y = 36,740 + 10,301x_2 - 3,341x_3 + 3,802x_2^2 - 4,451x_3^2 - 2,578x_3 + 2,266x_2x_3, \text{ при } x_1 = 1 \text{ (1350}^\circ\text{C).}$$



а



б

Рис. 6. Зависимость извлечения кремния в сплав от содержания $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$ (x_2) и крупности шлага (x_3) при температуре (x_1) 1300°C (а) и 1350°C (б)

Оптимальная крупность частиц шлага из данных рис. 6 находится в области 1,3 мм при температуре 1300°C и 0,8 мм при температуре 1350°C. Добавка CaF_2 способствует повышению извлечения кремния в Al-Si-сплав, однако оптимальное ее содержание не

определено и выходит за пределы варьирования переменных факторов.

В третьем случае в результате построения изолиний (рис. 7) и определения $y = f(x_1, x_2)$ при x_3 (крупность частиц шлака) = const экстремум функции отсутствует (в пределах варьирования факторов – температуры процесса и содержания CaF_2 в шихте). С учетом данного выбранного постоянного фактора уравнение математической модели было преобразовано:

$$y = 27,365 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2 + 2,578x_1 - 2,266x_2,$$

при $x_3 = -1$ (0,5 мм);

$$y = 28,475 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2,$$

при $x_3 = 0$ (1,5 мм),

$$y = 20,683 + 8,265x_1 + 10,301x_2 + 3,802x_2^2 - 2,578x_1 + 2,266x_2,$$

при $x_3 = 1$ (2,5 мм).

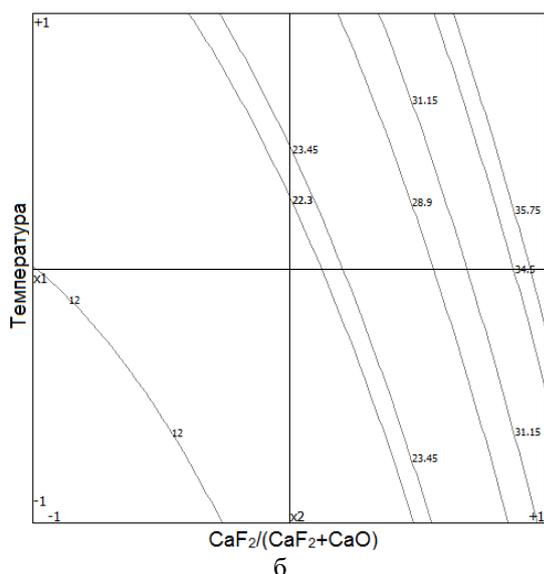
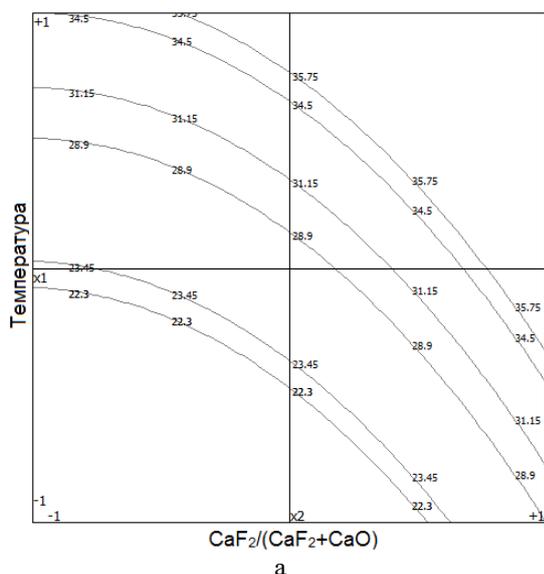


Рис. 7. Зависимость извлечения кремния в сплав от температуры (x_1) и содержания $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO})$ (x_2) при крупности шлака (x_3) 0,5 мм (а) и 2,5 мм (б)

Полученные зависимости также подтверждают положительное влияние температуры процесса и содержания CaF_2 во флюсовой смеси с CaO на извлечение кремния, оптимальное их значение не определено.

По результатам проведенного трехфакторного эксперимента из полученных данных коэффициентов регрессии и уравнения математической модели следует, что температура проведения процесса и содержание CaF_2 оказывают наибольшее положительное влияние на извлечение кремния из шлака в Al-Si-сплав. Наибольшее извлечение кремния из шлака было достигнуто при содержании CaF_2 в смеси (CaF_2+CaO) 20% и температуре 1350°C.

Крупность частиц шлака также является немаловажным параметром процесса переработки кремнийсодержащих шлаков с получением силуминов. Согласно уравнению математической модели увеличение крупности частиц шлака снижает извлечение кремния. Однако согласно данным рис. 5, 6 оптимальная крупность шлака находится в пределах от 0,6 до 1,7 мм и зависит от температуры процесса и содержания фторида кальция.

Таким образом, максимальное извлечение кремния из шлака в сплав составило 51,43 %, которое было достигнуто при температуре 1350°C, содержании $\text{CaF}_2/(\text{CaF}_2+\text{CaO}) - 20$ % и крупности частиц кремниевых шлаков 1,21 мм. Однако полученные параметры не являются оптимальными, так как не были найдены экстремумы функций. Поэтому следует изменить диапазоны факторов: температуры и содержания CaF_2 в составе флюсовой смеси (CaF_2+CaO) в сторону увеличения значений до 1400°C и 25 %, соответственно.

Заключение

В результате проведенных экспериментов по переработке рафинировочных кремнийсодержащих шлаков с целью извлечения кремния в виде Al-Si-сплавов были получены экспериментальные образцы, отвечающие по структуре доэвтектическому силумину.

При математической обработке экспериментальных данных 10-ти различных опытов при двух параллельных определениях (с помощью компьютерной программы «PlanExp B-D13»), было получено уравнение зависимости содержания кремния в сплаве (выходной параметр) от трех переменных факторов: температуры плавки (в интервале 1250–1300°C), содержание CaF_2 в составе смеси CaF_2 и CaO (в диапазоне 10–20 мас. %) и крупности частиц шлака (от 0,5 до 1,5 мм). Установлено, что данная математическая модель является адекватной.

При графическом изображении влияния на выходной параметр двух варьируемых факторов при принятом постоянном одном из трех оптимального значения не выявлено. Как правило, проблема может заключаться в том, что область оптимума определить невозможно. Это может происходить из-за недостаточного диапазона выбранных факторов. В связи с этим задачей наших дальнейших экспериментов будет

являться расширение диапазона принятых значений параметров и увеличение числа опытов: температуры и содержания CaF_2 в составе флюсовой смеси ($\text{CaF}_2 + \text{CaO}$) в сторону увеличения значений до 1400°C и 25% соответственно.

Список литературы

- Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>.
- Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // Metallurgist. 2017. Т. 61. No. 7-8. P. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
- Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>.
- Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>.
- Утилизация отходов металлургического производства: монография / Панишев Н.В., Бигеев В.А., Потапова М.В., Макарова И.В., Гаврилова Т.О. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 69 с.
- Перспективные способы утилизации и использования отходов газоочистных сооружений глиноземного производства / Шепелев И., Жуков Е., Еськова Е., Кирюшин Е., Пиляева О. // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 6. С. 4–9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-6-4-9>.
- Переработка глиноземсодержащего смета для использования в производстве первичного алюминия / Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Немчинова Н.В., Новиков Ю.В. // Цветные металлы. 2022. № 8. С. 15–22. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.08.02>.
- Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / Бельский С.С., Зайцева А.А., Тютрин А.А., Исмоилов З.З., Баранов А.Н., Сокольников Ю.В. // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 782–794. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.
- Сергеева А. Мировой рынок кремния составил 10 млрд долл. URL: <https://www.indexbox.ru/news/Mirovoj-rynok-kremniya-> (дата обращения 19.09.2022)
- Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных руднотермических печах. Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. 237 с.
- Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
- Ringdalen E., Tangstad M. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions // International smelting technology symposium: incorporating the 6TH advances in sulfide smelting symposium (Orlando (USA), 11-15 march 2012). Orlando, 2012. P. 195–203.
- Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 2. С. 252–263. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>.
- Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 4. С. 457–467.
- Хоанг В.В. Подбор флюсов для переработки шлаков кремниевого производства // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2022. С. 18–22.
- Ракипов Д.Ф., Бардин Н.М., Жуков В.П. Физико-химические основы и технология переплава алюминиевого лома и сплавов в среде расплавленных хлоридов. Екатеринбург: Изд. дом «Изд-во НаукаСервис», 2009. 194 с.
- Фомин Б.А., Москвитин В.И., Махов С.В. Металлургия вторичного алюминия. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 240 с.
- Małgorzata W. Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys. In: Alloys Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs. Ch. 1. ASM International, 2004. 124 p.
- Ординарцева Н.П. Планирование эксперимента в измерениях. Заводская лаборатория // Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 3. С. 72–76.

Сведения об авторах

Тютрин Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МЦМ, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: an.tu@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Немчинова Нина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: ninavn@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Хоанг Ван Виен – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Савченко Екатерина Игоревна – студентка кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия. E-mail: katya0501200361@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSING THE RESULTS OF SILICON PROCESSING REFINERY SLAG TREATMENT EXPERIMENT STATISTICALLY

Tyutrin Andrey A. – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: an.tu@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Nemchinova Nina V. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: ninavn@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Hoang Vien V. – Postgraduate Student of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Savchenko Ekaterina I. – Student of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: katya0501200361@gmail.com

Abstract. The generation and accumulation of refinery slag in silicon processing is a matter of high importance. The slags researched in the paper contain up to 70% of Si elements. This negatively affects the efficiency of Si production due to lower product recovery. Hence, one of the possible ways to dispose of the slags is to process them aiming to produce additional Si and aluminium-silicon alloys. The paper shows that the slag main components are carbon silicide, quartz and cristobalite, amorphous silica, calcium and aluminum oxides, carbon and element silicon inclusions. It suggests a slag processing method that includes melting the infeed that contains slag, metallic aluminum, and flux at 1250-1350 °C. The flux used was calcium oxide and calcium fluoride. The paper covers the influence of various factors of silicon-containing slag processing (melting temperature, CaF₂ content in the CaF₂ and CaO flux, the size of the slag particles) on the silicon extraction. The resulting mathematical model equation, proven to be accurate, describes the extraction of silicon in the form of Al-Si alloy from the refinery slag. The max silicon to alloy extraction rate equaled 51.43 % and was obtained at 1350 °C, the CaF₂ content in (CaF₂+CaO) equaled 20% with the slag particle size of 1.21 mm.

Key words: silicon production, refining slag, slag processing, silicon extraction, Al-Si alloys

Ссылка на статью:

Математическая обработка результатов эксперимента по переработке рафинировочного шлака кремниевого производства / А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг, Е.И. Савченко // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 15-22.
Tyutrin A.A., Nemchinova N.V., Hoang V.V., Savchenko E.I. Analysing the results of silicon processing refinery slag treatment experiment statistically. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 15-22.

УДК 669.184.14

Завалишина А.Н., Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В., Чернов В.П.

О ВЫХОДЕ ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ

Аннотация. В проектируемом кислородно-конвертерном цехе Магнитогорского металлургического комбината выплавка стали в кислородных конвертерах вместимостью 370 т должна была осуществляться с комбинированной продувкой металла: сверху – кислородом, снизу – нейтральными газами. Однако в течение вот уже более тридцати лет в цехе применяется только верхняя продувка кислородом. Комбинированная продувка имеет целый ряд преимуществ перед верхней продувкой, которые позволяют повысить как качество, так и выход годного производимого металла.

В работе проанализированы два массива данных, полученных при производстве низкоуглеродистой конвертерной стали марки 08Ю в конвертерах вместимостью 370 и 350 т соответственно с верхней и комбинированной продувкой, реализованной на разных предприятиях. Технология ковшевой обработки и непрерывной разливки металла не имели существенного различия. При комбинированной продувке металла в конвертере вследствие интенсивного перемешивания расплава инертными газами, подаваемыми через донные блоки, окисленность металла снижается в среднем с 1179 до 649 ppm — в 1,8 раза. Установлена криволинейная убывающая зависимость окисленности металла при комбинированной продувке от содержания углерода в расплаве перед выпуском из конвертера. С увеличением окисленности металла возрастают потери железа и выход годных слэбов снижается. Переход от верхней к комбинированной продувке позволяет увеличить выход годных слэбов в среднем с 87,6 до 89,6 % — на оцененную с вероятностью 99 % величину, равную 2 % (абс.).

Рекомендуется осуществить модернизацию оборудования для внедрения в ККЦ ПАО «ММК» запланированной еще при проектировании цеха технологии комбинированной продувки металла в кислородных конвертерах.

Ключевые слова: сталь, конвертер, способ продувки, производство, выход годного

В проектируемом кислородно-конвертерном цехе Магнитогорского металлургического комбината выплавка стали в кислородных конвертерах вместимостью 370 т должна была осуществляться с комбинированной продувкой металла: сверху – кислородом, снизу – нейтральными газами. Однако в течение вот уже более тридцати лет в цехе применяется только верхняя продувка кислородом. Известно [1–5], что комбинированная продувка имеет целый ряд преимуществ перед верхней продувкой, которые позволяют повысить как качество, так и выход годного производимого металла. В настоящей работе произведен сравнительный анализ оценки влияния способа подачи дутья в конвертер на выход годного металла. Для этого рассмотрено производство низкоуглеродистой стали в ККЦ ПАО «ММК» и в ККЦ другого металлургического предприятия с конвертерами вместимостью 350 т и комбинированной продувкой. После выпуска металла из конвертеров технологическая схема производства в данных цехах была схожей: обработка на агрегате «печь-ковш», вакуумная обработка или без нее, разливка стали на двухручьевого МНЛЗ криволинейного типа [6, 7]. Выход годного металла определялся как отношение массы отлитых слэбов к массе металлической шихты в конвертере, выраженное в процентах.

Массивы производственных данных с верхней продувкой (массив А) и комбинированной продувкой (массив Б) имели следующую характеристику (усредненные данные в табл. 1).

Сравнение приведенных в таблице данных свидетельствует о том, что удельная интенсивность продувки металла кислородом сверху была выше для мас-

сива А, а при продувке снизу для массива Б использовались азот и аргон. Усредненный химический состав металла обоих массивов был примерно одинаковым и соответствовал требованиям к стали марки 08Ю.

Таблица 1

Характеристика массивов

Параметр	Массив	
	А	Б
Количество плавок, шт.	93	49
Масса металлической шихты, т	396	408
Доля жидкого чугуна, %	79,1	78,6
Удельная интенсивность продувки кислородом, м ³ /(т · мин)	2,90	2,78
Расход азота на продувку, м ³	—	133
Расход аргона на продувку, м ³	—	349
Содержание в металле перед выпуском из конвертера, %:		
C	0,043	0,047
Si	0,002	0,008
Mn	0,120	0,175
S	0,013	0,011
P	0,006	0,009
Cr	0,019	0,030
Ni	0,016	0,020
Cu	0,039	0,024
N	0,004	0,004
Al	0,040	0,036

Однако содержание растворенного в металле кислорода (окисленность металла) оказалось существенно различающимся (рис. 1).

При комбинированной продувке металла в конвертере вследствие интенсивного перемешивания расплава инертными газами, подаваемыми через донные блоки, окисленность металла снижается в среднем с 1179 до 649 ppm — в 1,8 раза.

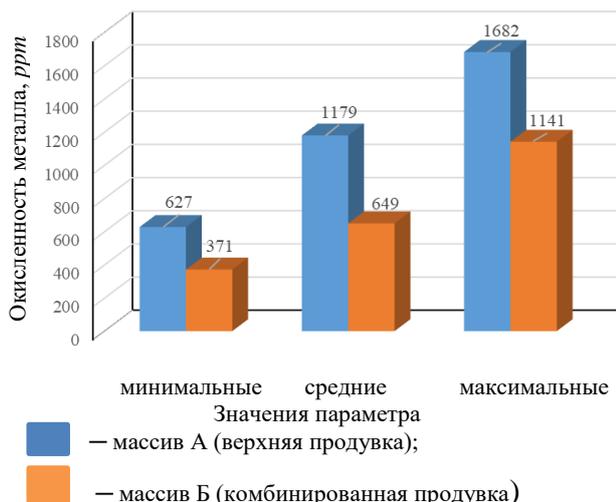


Рис. 1. Информация об окисленности металла перед выпуском из конвертера с разными вариантами продувки

В работе оценено влияние на окисленность металла при разных способах продувки в конвертере различных параметров: массы металлической шихты, доли жидкого чугуна в шихте, удельной интенсивности продувки кислородом, расхода инертных газов, содержания углерода в металле. Выявлена только криволинейная убывающая зависимость содержания растворенного в металле кислорода ($[O]$, ppm) при комбинированной продувке от содержания углерода ($[C]$, %)

$$[O] = 30,057 / [C]^{0,911} \quad \eta = -0,681,$$

представленная на рис. 2.

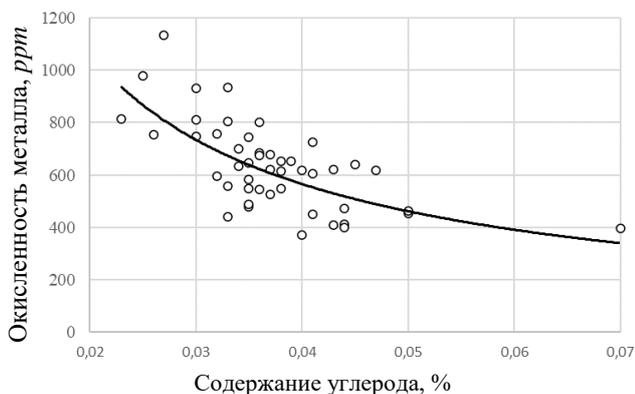


Рис. 2. Зависимость окисленности металла перед выпуском из конвертера от содержания углерода при комбинированной продувке

С увеличением окисленности металла возрастают потери железа и выход годных слэбов снижается, что видно из рис. 3 для условий верхней продувки. При росте окисленности металла с уровня менее 1000 ppm до величин выше 1200 ppm выход годных слэбов уменьшается от 88,0 до 87,3 %.

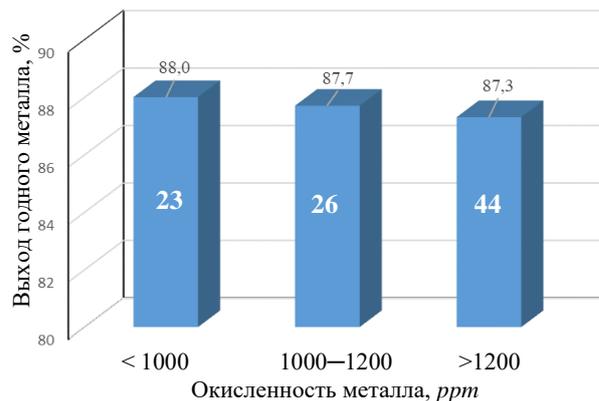


Рис. 3. Данные о выходе годных слэбов при разной окисленности металла в конвертере с верхней продувкой (цифры внутри столбиков – количество плавок)

На рис. 4 представлены данные о влиянии способа продувки металла в конвертере на выход годного металла. Диапазон изменения выхода годного металла при верхней продувке составляет 28,3%, что в 2,8 раза больше, чем при комбинированной продувке (10,2%). Средние значения различаются на 2% (абс.). Оценка случайности или неслучайности такого различия произведена путем проверки нулевых гипотез при сравнении дисперсий и средних значений двух выборок.

Результаты этой оценки приведены в табл. 2.

Расчетные значения критериев F и t -статистики превышают их критические значения. Это свидетельствует о том, что нулевые гипотезы равенства как дисперсий, так и средних значений двух выборок отвергаются. Значит, с вероятностью 99% можно утверждать, что различие между средними значениями выхода годного металла не является случайным и лимитируется способом продувки металла в конвертере.

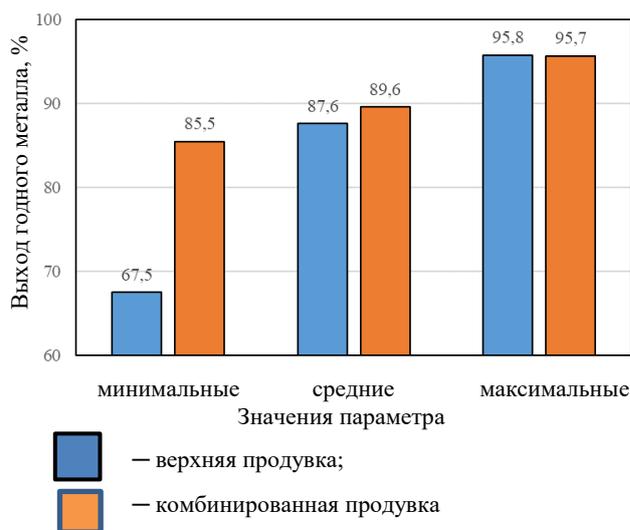


Рис. 4. Сравнение выхода годного металла при верхней и комбинированной продувке

Таблица 2
Результаты сравнения двух выборок

Параметр	Вид продувки	
	Верхняя	Комбинированная
Количество плавов, шт.	93	49
Среднее значение выхода годного металла, %	87,6	89,6
Дисперсия, % ²	27,79	4,86
<i>F</i>	5,71	
<i>F</i> критическое при вероятности 99 %	1,85	
<i>t</i> -статистика	3,21	
<i>t</i> критическое при вероятности 99 %	2,35	

Заключение

В работе проанализированы два массива данных, полученных при производстве низкоуглеродистой конвертерной стали марки 08Ю в конвертерах вместимостью 370 и 350 т соответственно с верхней и комбинированной продувкой, реализованной на разных предприятиях. Технология ковшевой обработки и непрерывной разливки металла не имели существенного различия. При комбинированной продувке металла в конвертере вследствие интенсивного перемешивания расплава инертными газами, подаваемыми через донные блоки, окисленность металла снижается в среднем с 1179 до 649 ppm — в 1,8 раза. Установлена криволинейная убывающая зависимость окисленности металла при комбинированной продувке от содержания углерода в расплаве перед выпуском из конвертера. Применение комбинированной продувки позволяет увеличить выход годных слябов в среднем на статистически значимые 2 % (абс.). Рекомендуется

Сведения об авторах

Завалишина Александра Николаевна – магистрант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

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

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

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

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

осуществить модернизацию оборудования для внедрения в ККЦ ПАО «ММК» запланированной еще при проектировании цеха технологии комбинированной продувки металла в кислородных конвертерах.

Список литературы

1. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: учебник для вузов. 3-е изд. перераб и доп. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир, 2003. 528 с.
3. Поволоцкий Д.Я. Основы технологии производства стали: учебное пособие для вузов. Челябинск: ЮУрГУ, 2004. 191 с.
4. Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А. Основы производства и обработки металлов: учебник. М.: МГВМИ, 2005. 416 с.
5. Рощин В.Е., Рощин А.В. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. 572 с.
6. О возможности корректировки места приложения мягкого обжатия слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали / Бунеева Е.А., Мошкунов В.В., Столяров А.М., Потапова М.В. // Теория и технология металлургического производства. 2020. № 1 (32). С. 4-10.
7. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Столяров А.М., Сомнат Б., Потапова М.В., Дидович С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 24-27.

ABOUT BOF METAL YELD

Zavalishina Alexandra N. – master degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

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

Potapov Ivan M. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: potapivan14@gmail.com

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

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

Abstract. According to the project in the oxygen-converter shop of the Magnitogorsk Iron and Steel Works, melting in 370 t oxygen converters was to be carried out with combined blowing: top - with oxygen, - with neutral gases. However, during more than thirty years, the shop has been using only top blowing with oxygen. But combined blowing has a number of advantages, which improve both the quality and the yield of produced metal.

In the frame of this paper two data arrays obtained during the production of low-carbon converter 08U grade steel in converters with a capacity of 370 and 350 tons, with top and combined blowing correspondently, implemented at different enterprises were analyzed. The technology of ladle processing and continuous casting of metal did not have a significant difference for this two arrays. The oxidation of the metal decreases on average from 1179 to 649 ppm – 1.8 times at combined blowing with inert gases supplied through the bottom blocks. A curvilinear decreasing dependence of the metal oxidation during combined blowing on the carbon content in the melt before taping has been established. With an increase in the oxidation of the metal, iron losses increase and the yield of suitable slabs decreases. The transition from the upper to the combined blowing makes it possible to increase the slabs yield from 87.6% to 89.6% on average, by a value estimated with a probability of 99%, equal to 2% (abs.).

It is recommended to upgrade the equipment in order to introduce the technology of combined blowing in oxygen converters, which was planned during the design of BOF shop, at MMK.

Key words: steel, converter, blowing method, production, yield.

Ссылка на статью:

О выходе годного металла при производстве конвертерной стали / А.Н. Завалишина, А.М. Столяров, И.М. Потапов, Д.В. Юдин, В.П. Чернов // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 23-26.
Zavalishina A.N., Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V., Chernov V.P. About bof metal yeld. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 23-26.

УДК 669.18

Женин Е.В., Шаповалов А.Н.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ЧУГУНА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ

Аннотация. Выполнен анализ условий и показателей работы гибкой модульной печи (ГМП) в различных режимах работы. Показано влияние доли жидкого чугуна в составе металлошихты на показатели выплавки стали в ГМП. Установлены причины, ограничивающие эффективность использования жидкого чугуна при выплавке стали: значительные колебания химического состава и температуры заливаемого чугуна; отсутствие достоверной информации о массе залитого чугуна. Результатом является невозможность проведения корректных балансовых расчетов, что осложняет ведение плавки и приводит к перерасходу кислорода, и получению переокисленного стального полупродукта. Сформулированы первоочередные мероприятия по повышению эффективности выплавки стали в результате стабилизации температуры и химического состава жидкого чугуна.

Ключевые слова: гибкая модульная печь, жидкий чугун, длительность плавки, расход кислорода, температура чугуна, однородность химического состава.

Введение

Одним из направлений повышения эффективности сталеплавильного производства является увеличение доли жидкого чугуна в составе металлошихты, что подтверждается тенденциями развития электросталеплавильного производства [1, 2]. При этом эффективность применения чугуна определяется как параметрами самого чугуна, так и конструктивными и технологическими особенностями сталеплавильного агрегата. С точки зрения вариативности доли чугуна в металлошихте, наиболее универсальным сталеплавильным агрегатом является гибкая модульная печь (ГМП) от компании «Тепова». Конструктивные особенности позволяют ГМП работать как в режиме дуговой печи с минимальным расходом чугуна, так и в режиме кислородного конвертера (с нулевым расходом электроэнергии) с использованием жидкого чугуна с расходом не менее 80 %. Такие возможности позволяют оптимизировать издержки производства в зависимости от конъюнктуры рынка чугуна и лома, добиваясь повышения эффективности производства. С 2019 года ГМП успешно эксплуатируются в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) одного из комбинатов Южного Урала [3].

Усредненные показатели работы ГМП в различных режимах работы представлены в табл. 1.

Разнообразие условий проведения плавки стали (см. табл. 1) позволяет исследовать влияние доли жидкого чугуна в широком диапазоне значений.

Анализ производственных данных и их обсуждение

За исследованный период (2019 год) при работе ГМП в режиме ДСП расход жидкого чугуна в среднем составлял 48,6%, изменяясь в широком диапазоне от 19,8 до 78,9%. При работе ГМП с нулевым электропотреблением (режим конвертера) доля жидкого чугуна в металлошихте превышала 90% при минимальном расходе в 84,1%.

Статистический анализ производственных данных за 2019 год позволил установить, что с увеличением расхода жидкого чугуна, несмотря на значительное поступление тепла в печь, продолжительность плавки в режиме ДСП достигает минимума (рис. 1) при расходе чугуна 60 т/плавку, а при работе в режиме кислородного конвертера наблюдается устойчивое увеличение продолжительности плавки (рис. 2), что, очевидно, связано с увеличением длительности окислительного рафинирования при ограниченной мощности кислородных фурм.

Таблица 1

Усредненные показатели работы ГМП

Показатели		Режим ДСП		Режим конвертера	
		диапазон	среднее	диапазон	среднее
Длительность плавки, мин	всего	40–70	55	30–70	56
	под током	11–37	26	0	0
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т		102–314	214	0	0
Расход металлошихты на плавку, т		91,8–160,0	129,3	80,7–168,0	128,3
Доля чугуна, %		19,8–78,9	48,6	84,1–99,3	90,5
Содержание кремния в чугуне, %		0,34–1,25	0,71	0,41–1,16	0,66
Расход кислорода на плавку, м ³		4603–9901	6619	4120–10550	7168,7
Содержание углерода в стальном полупродукте, %		0,02–0,13	0,05	0,02–0,14	0,05

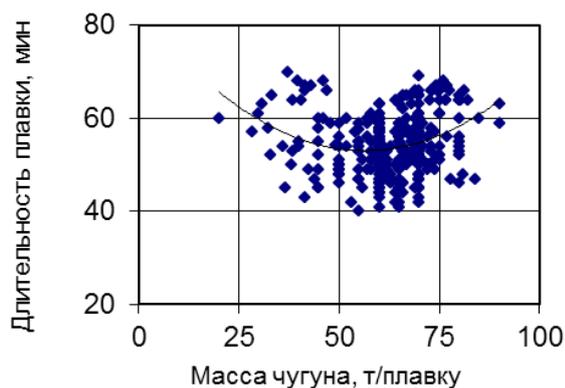


Рис. 1. Влияние расхода жидкого чугуна на продолжительность плавки стали в режиме ДСП

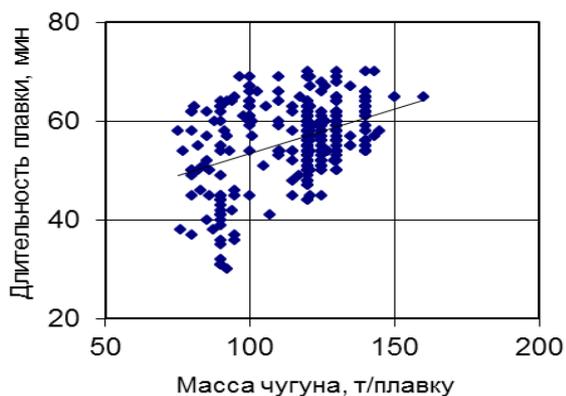


Рис. 2. Влияние расхода жидкого чугуна на продолжительность плавки стали в режиме конвертера

Дополнительным фактором, способствующим увеличению длительности плавки при повышенной доле чугуна в составе металлошихты является сопутствующий рост расхода флюсов, вызванный повышенным содержанием кремния в чугуне.

Очевидно, что с ростом расхода чугуна на плавку увеличивается количество окисляющихся примесей [4-6]. Однако анализ производственных данных свидетельствует об отсутствии статистически значимой взаимосвязи между расходами жидкого чугуна и кислорода на плавку стали как в режиме ДСП, так и в режиме кислородного конвертера (рис. 3 и 4). Одной из причин является нестабильность химического состава чугуна (см. табл. 1), который поступает в ЭСПЦ без усреднения. Другой причиной является неудовлетворительное состояние чугуновозных ковшей (наличие донных «козлов» и частичное зарастание горловины), не обеспечивающее полный слив чугуна. Последнее ведет к значительным колебаниям расхода металлошихты на плавку. Кроме того, вследствие несовершенства логистических схем транспортировки чугуна и значительных простоев ковшей, наблюдаются значительные колебания температуры заливаемого чугуна [7], что отражается на тепловых условиях плавки [8] и подтверждается широким диапазоном расхода электроэнергии на плавку.

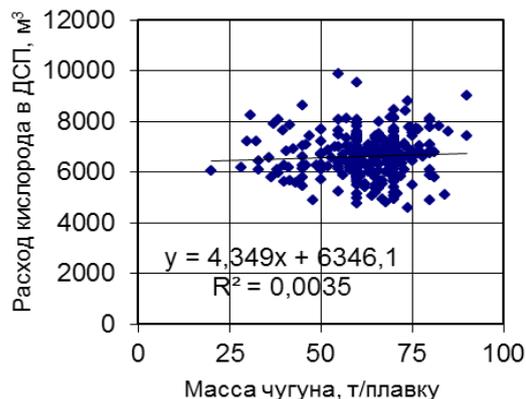


Рис. 3. Взаимосвязь расходов жидкого чугуна и кислорода на плавку стали в режиме ДСП

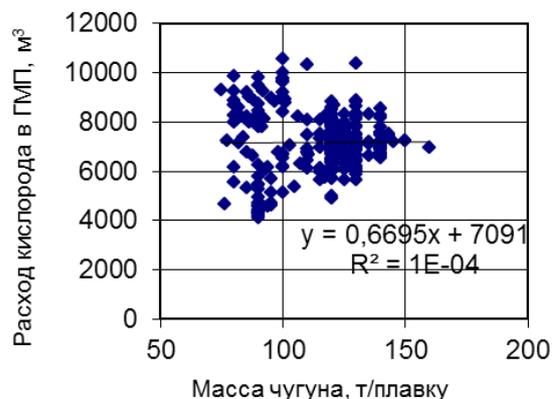


Рис. 4. Взаимосвязь расходов жидкого чугуна и кислорода на плавку стали в режиме конвертера

В условиях значительных колебаний химического состава чугуна и отсутствия достоверной информации о массе залитого чугуна технологический персонал ведет продувку с перерасходом кислорода до остаточного содержания углерода в стальном полупродукте 0,05 %. Такая технология гарантированно обеспечивает требуемый уровень дефосфорации металла, однако требует дополнительного перегрева металла, а также проведение его науглероживания. Кроме того, побочным результатом перерасхода кислорода на плавку является переокисление металла, следствием чего является увеличение расхода раскислителей и повышение загрязненности стали неметаллическими включениями [9]. Также следует учитывать, что получение низкоуглеродистого полупродукта не только требует дополнительного перегрева металла, но и сопровождается формированием шлака с повышенной окисленностью, что в совокупности приводит к снижению стойкости футеровки печи [10-12].

Таким образом, проведенный анализ производственных данных о работе ГМП с повышенной долей жидкого чугуна показал, что эффективность его применения сдерживается рядом обстоятельств:

- нестабильный химический состав чугуна, поступающего в ЭСПЦ в чугуновозных ковшах без усреднения;

– нестабильная температура чугуна вследствие несовершенства логистических схем транспортировки чугуна и значительных простоев чугуновозных ковшей в ЭСПЦ;

– отсутствие точной информации о массе чугуна в чугуновозных ковшах вследствие значительных колебаний массы порожнего ковша из-за наличия донных «козлов»;

– отсутствие точной информации о массе залитого в ГМП чугуна вследствие частичного зарастания горловины, не обеспечивающего полный слив чугуна.

Решение указанных проблем и, соответственно, повышения эффективности использования жидкого чугуна обеспечивается при наличии в ЭСПЦ миксера для промежуточного хранения и усреднения чугуна. Оценочные данные по эффективности установки миксера в ЭСПЦ приведены в табл. 2.

Таким образом, оснащение ЭСПЦ миксером для хранения чугуна обеспечит стабильность и повысит управляемость работы ГМП, а также улучшит условия эксплуатации чугуновозных ковшей, сократит количество их капитальных ремонтов и потери чугуна в виде скрапа. Подача в ГМП чугуна известной температуры и состава обеспечит стабильные условия плавки, а также позволит завершать продувку при требуемом остаточном содержании углерода, исключая «передувы» и связанные с этим негативные последствия. В результате повышения температуры заливаемого чугуна улучшится тепловой баланс плавки как в режиме дуговой печи, так и в режиме кислородного конвертера с нулевым расходом электроэнергии.

Список литературы

1. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2015. Т.15. № 3. С.70-79.
2. Сериков В.А. Современное состояние и пути развития сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей // Главный энергетик. 2017. № 3. С. 21-30.
3. Егорова А.Н. Выплавка стали в гибкой модульной печи // Наука и производство Урала. 2020. №16. С.27-29.
4. Совершенствование технологии выплавки стали в ДСП ЭСПЦ ОАО «ММК» / Сарычев А.В., Бигеев В.А., Ивин Ю.А., Алексеев Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1 (21). С. 71-73.
5. Особенности работы дуговых сталеплавильных печей с применением жидкого чугуна (ОАО «ММК») / Ю.А. Ивин, А.Б. Великий, Н.В. Саранчук и др. // Сталь. 2008. № 7. С. 49-50.
6. Алексеев Л.В., Столяров А.М. Особенности выплавки полупродукта в сверхмощной дуговой сталеплавильной печи с различным расходом жидкого чугуна // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 4 (24). С. 69-72.
7. Данильченко Е.Ю., Шаповалов А.Н. Оценка динамики тепловых потерь при транспортировке жидкого чугуна // Наука и производство Урала. 2015. №11. С.47-50.
8. Сергеев Д.Ю., Колесников Ю.А. Структура теплового баланса кислородно-конвертерной плавки при различной доле чугуна в металлошихте // Теория и технология металлургического производства. 2017. №2(21). С. 4-6.
9. Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А., Басков С.Н. Совершенствование технологии предварительного раскисления стали в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы, 2019. №8(1052). С.10-16.
10. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Братковский Е.В. Повышение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей путем совершенствования шлакового режима с применением магнийсодержащих материалов // Черные металлы, 2018. №9(1041). С.16–21.
11. Влияние технологических параметров плавки на стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи в условиях АО «Уральская Сталь» / Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Дёма Р.Р., Колодин А.В. // Новые огнеупоры. 2019. №7. С.3-7.
12. О влиянии способов интенсификации электроплавки на стойкость футеровки ДСП-135 ОАО «Северский трубный завод» / М.В. Зуев, О.Ю. Шешуков, А.И. Степанов и др.//Сталь. 2011. № 7. С. 46-48.

Таблица 2

Показатели оценки эффективности

Показатели	До внедрения миксерного отделения	После внедрения миксерного отделения
Простои ГМП по подаче чугуна	Имеет риски	Отсутствуют
Простои чугуновозных ковшей в ЭСПЦ, ч	До 4,5	Отсутствуют
Однородность химического состава чугуна	Низкая	Высокая
Температура заливаемого чугуна, °С	1250–1320	Не менее 1350
Образование скрапа в чугуновозном ковше, кг/т чугуна	Более 15	До 7,5
Количество капитальных ремонтов чугуновозных ковшей, шт./год	13	6
Снижение расхода электрической энергии при выплавке стали в режиме ГМП, кВт·ч/т	–	5-10

Сведения об авторах

Женин Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF LIQUID PIG IRON IN STEEL MELTING

Zhenin Evgeniy V. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Shapovalov Alexey N. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Annotation. The analysis of the conditions and performance indicators of the flexible modular furnace (FMF) is carried out. The effect of liquid pig iron consumption on the indicators of steelmaking in the FMF is shown. The problems in the effective use of liquid pig iron in steelmaking have been established. One of the main problems is the unstable composition and temperature of pig iron due to the lack of homogenizing equipment and the different duration of storage of pig iron in ladles. Another problem is that the pig iron is not completely drained from the ladle due to the overgrowth of the neck, which makes it difficult to make steel due to the lack of accurate information about the mass of pig iron. A set of measures has been developed to improve the efficiency of steel smelting as a result of stabilization of the temperature and chemical composition of liquid iron.

Key words: flexible modular furnace, liquid iron, melting time, oxygen consumption, iron temperature, chemical composition homogeneity.

Ссылка на статью:

Женин Е.В., Шаповалов А.Н. Повышение эффективности использования жидкого чугуна при выплавке стали // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 27-30.
Zhenin E.V., Shapovalov A.N. Increasing the efficiency of the use of liquid pig iron in steel melting. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 27-30.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Михалкина И.В., Ступак А.А., Осипова О.А., Рудь К.И., Элиджарова К.С.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗОНЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В СТЕНКЕ ОТЛИВКИ ИЗ СТАЛИ 150XHM ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос моделирования геометрии и расположения слоя металла с требуемыми эксплуатационными характеристиками для отливки из стали 150XHM. Математический расчет проведен с использованием численного решения задачи теплопроводности методом конечных разностей. Исследование проведено на плоской стенке отливки при ее кристаллизации и охлаждении в металлической форме. Исследовали влияние теплофизических свойств отливки и формы на размер и положение зоны с высокими эксплуатационными характеристиками. Качество требуемого слоя определялось требуемыми скоростями охлаждения, составляющими 3–7°C в температурном интервале кристаллизации 1383–1223°C и со скоростями охлаждения 0,6–2°C в области образования карбидов в интервале температур 607–801°C. Величины рассматриваемых скоростей охлаждения определялись из литературных данных. Установлено, что повышение теплопроводности как отливки, так и стенки стальной формы (кокиля) приводит к экстремальному росту величины слоя с высокими эксплуатационными свойствами с максимумами при 40 Вт/мК и 25 Вт/мК соответственно. Влияние объемной теплоемкости C_v отливки выражено уменьшением зоны высоких скоростей с формированием максимального значения величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами, равной 12,7 мм. При этом рост объемной теплоемкости формы увеличивает зону высоких скоростей при максимальном значении размера слоя с требуемыми эксплуатационными характеристиками, равной 13,2 мм.

Ключевые слова: скорость охлаждения, теплофизические свойства, литейная форма, эксплуатационные свойства, сталь 150XHM

Введение

Литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения. К фасонным литым изделиям зачастую предъявляются высокие требования, выполнение которых невозможно без тщательной проработки технологического процесса. Следует отметить, что высокие эксплуатационные свойства отливок в первую очередь зависят от микроstructures в литом состоянии. Структурообразование литого изделия зависит от химического состава сплава, а также от его скорости кристаллизации и охлаждения в литейной форме. Немалое значение на формирование необходимой микроstructures и, как следствие, получение высокого уровня свойств оказывает интенсивность теплообмена, протекающего между литейной формой и изделием.

В работах [1-3] был рассмотрен процесс кристаллизации сплава и связанный с ним процесс формирования микроstructures при охлаждении изделия. Объектом исследования была валковая сталь марки 150XHM, имеющая следующий химический состав, мас. %: С 1,5; Si 0,4; Mn 0,8; S 0,02; P 0,04; Cr 1,1; Ni 1,1; Mo 0,35. Была установлена взаимосвязь микроstructures с требуемым уровнем эксплуатационных свойств. Анализ данных зависимостей позволил определить, что благоприятная первичная литая структура, обеспечивающая получение высоких требуемых эксплуатационных свойств, формируется при скоро-

стях охлаждения 3–7°C в температурном интервале кристаллизации 1383–1223°C и со скоростями охлаждения 0,6–2°C в области образования карбидов в интервале температур 607–801°C. Микроstructure стали марки 150XHM в литом состоянии, сформировавшаяся при скорости охлаждения 5,98 °C/c в температурном интервале кристаллизации, представлена на рис. 1.

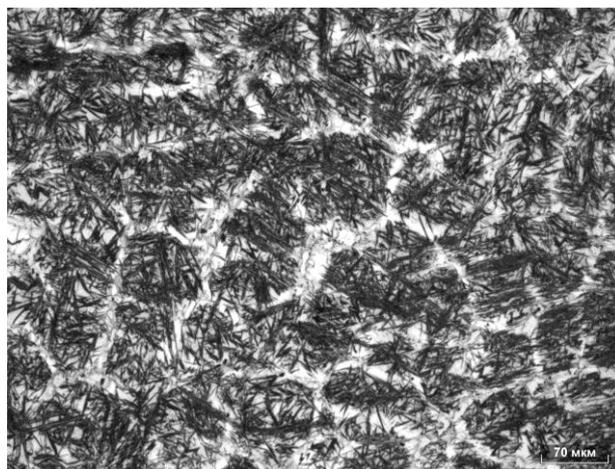


Рис. 1. Микроstructure стали марки 150XHM в литом состоянии, сформировавшаяся при скорости охлаждения в температурном интервале кристаллизации 5,98 °C/c ($\times 200$)

Литая структура стали марки 150ХНМ состоит из остаточного аустенита, мартенсита, а также карбидов, располагающихся по границам действительного зерна. Карбидная фаза представлена цементитом, в котором содержатся хром (от 2,9 до 16,6 %) и молибден (от 1,46 до 5,13 %). Количество остаточного аустенита не превышает 1 %.

Математическое моделирование и обсуждение результатов

С целью изучения влияния теплофизических свойств системы «отливка-форма» на получение изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами было проведено математическое моделирование скоростей охлаждения стенки литого изделия. Моделирование проводилось с применением программы «Расчет температурных полей системы «отливка-форма»» [4-6]. Рассматривалось влияние таких параметров, как теплопроводность и объемная теплоёмкость отливки и формы на геометрию и расположение зоны отливки с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Исследуемые образцы представляли собой отливку в виде пластины с толщиной стенки $\delta_{отл} = 50$ мм. Теплофизические характеристики стали марки 150ХНМ: теплопроводность $\lambda = 38,5$ Вт/м·К; теплоёмкость $C = 853$ Дж/кг; плотность $\rho = 7800$ кг/м³; теплота кристаллизации $Q_{крист} = 222,74$ Дж/кг; температура ликвидус $T_{л} = 1383^{\circ}\text{C}$; температура солидус $T_{с} = 1223^{\circ}\text{C}$; температура заливки $T_{зал} = 1413^{\circ}\text{C}$. В качестве формообразующей среды принимаем металлическую форму со следующими характеристиками: $\lambda = 28$ Вт/м·К; $C = 650$ Дж/кг; $\rho = 7800$ кг/м³; $\delta_{ф} = 100$ мм; начальная температура $T_{нач} = 20^{\circ}\text{C}$.

Учитывая, что условием формирования зоны с требуемыми эксплуатационными характеристиками является скорость охлаждения материала, очевидно, что в зависимости от толщины стенки литой заготовки могут формироваться как зоны переохлажденного сплава, так и зоны со скоростями охлаждения ниже требуемых. Схема формирования зон стенки отливки в зависимости от скоростей охлаждения сплава при кристаллизации и охлаждении сплава в форме представлена на рис. 2.

При высоких скоростях охлаждения формируются зона величиной $h_{в}$, при низких скоростях охлаждения – величиной $h_{н}$ и со скоростями охлаждения, при которых образуется микроструктура, позволяющая получить требуемые эксплуатационные свойства, составляет $h_{треб}$.

Было изучено влияние изменения теплопроводности отливки на геометрию, расположение и размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 3 а, б). Рассматриваемый интервал варьирования теплопроводности отливки находился в пределах 25–50 Вт/мК.

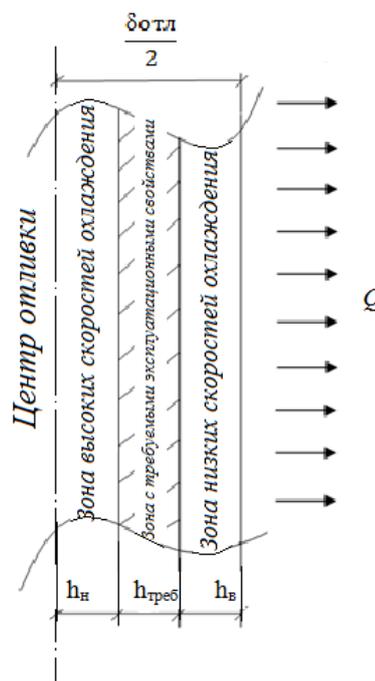


Рис. 2. Схема формирования зон отливки в зависимости от скоростей охлаждения сплава при кристаллизации и охлаждении сплава в форме

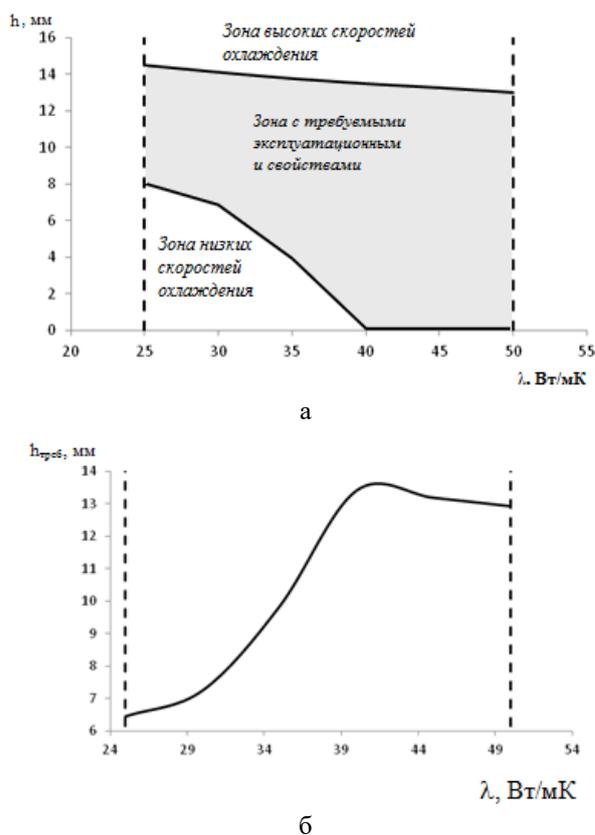


Рис. 3. Влияние теплопроводности отливки на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

На рис. 3, а – б, сплошными линиями обозначена зона, формирующаяся в температурном интервале кристаллизации при выполнении требуемых значений скоростей охлаждения. Штриховыми линиями (рис. 3–б) обозначена область, обеспечивающая требуемое условие скорости охлаждения сплава для карбидообразования с требуемой морфологией.

Анализ зависимости, представленной на рис. 3, а, показал, что увеличение теплопроводности отливки ускоряет отвод тепла центра стенки литой заготовки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению зоны быстрого переохлаждения и смещению зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами к центру отливки.

Увеличение теплопроводности материала отливки расширяет зону с требуемыми эксплуатационными свойствами $h_{\text{треб}}$ за счёт ускорения отвода тепла от центра отливки. Зона со скоростью охлаждения ниже требуемой – уменьшается.

Размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами $h_{\text{треб}}$ увеличивается с повышением теплопроводности отливки до значений 40 Вт/мК (рис. 3, б). При данном значении теплопроводности размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами максимален и составляет 13,41 мм. Увеличение теплопроводности свыше 40 Вт/мК приводит к увеличению переохлаждённой зоны и, как следствие, снижению величины требуемого слоя. Скорости охлаждения, обеспечивающие условия для образования карбидов с требуемой морфологией, находились на всей протяженности исследуемого интервала.

Следующим этапом работы было рассмотрено влияние теплопроводности формы на геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 4). Исследования проводились в интервале изменения теплопроводности 15–45 Вт/мК.

При увеличении теплопроводности происходит интенсификация теплоотвода от стенки отливки и, как следствие, увеличение переохлаждённой зоны высоких скоростей. При этом снижается зона низких скоростей, переходя в центр стенки отливки при 25 Вт/мК. Рост зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами происходит при увеличении теплопроводности до 25 Вт/мК. Максимум размера зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами составляет 14,2 мм. Увеличение теплопроводности свыше 25 Вт/мК приводит к повышению зоны высоких скоростей охлаждения и, как следствие, к уменьшению зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Представляет интерес исследование влияния теплоёмкости отливки и формы на геометрию, размер и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 5.). В ходе исследования рассматривали объёмную теплоёмкость C_v , выраженную произведением теплоёмкости на плотность материала. Исследования проводились в интервале C_v , равной 33–111 МДж/м³.

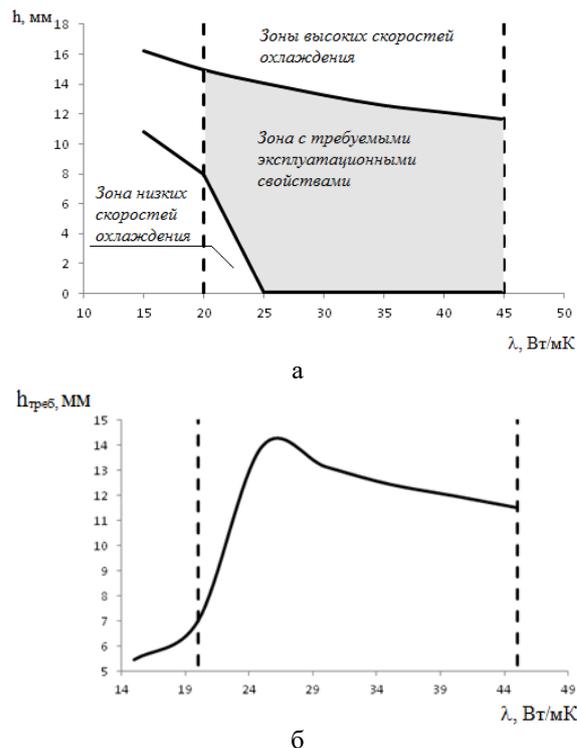


Рис. 4. Влияние теплопроводности формы на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

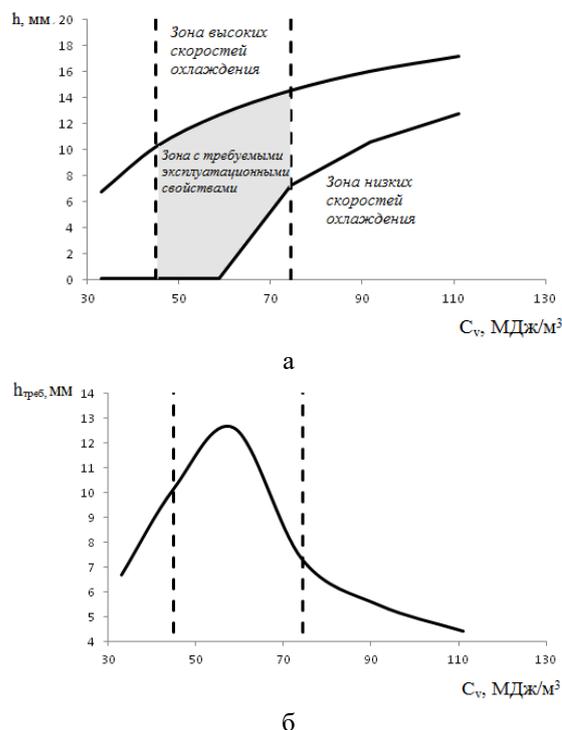


Рис. 5. Влияние объёмной теплоемкости отливки на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

Анализ представленных зависимостей показал, что увеличение объёмной теплоёмкости отливки приводит к уменьшению размера зоны высоких скоростей (см. рис. 5, а). Это связано с увеличением запаса тепла в отливке. С другой стороны, это увеличение приводит к росту зоны с низкими скоростями охлаждения. При этом начало появления такой зоны фиксируется при величине 58 МДж/м³. Данному значению объёмной теплоёмкости соответствует максимальное значение величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами, равное 12,7 мм.

Исследования показали, что область образования карбидов с требуемой морфологией соответствует изменению объёмной теплоёмкости стенки отливки в пределах 44,94 - 74,34 МДж/м³ (см. рис. 5, б).

Расположение и геометрия величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами в зависимости от изменения объёма теплоёмкости стенки формы представлен на рис. 6.

Область требуемого карбидообразования соответствует изменению объёмной теплоёмкости стенки формы, находящейся выше в пределах 44,85 МДж/м³.

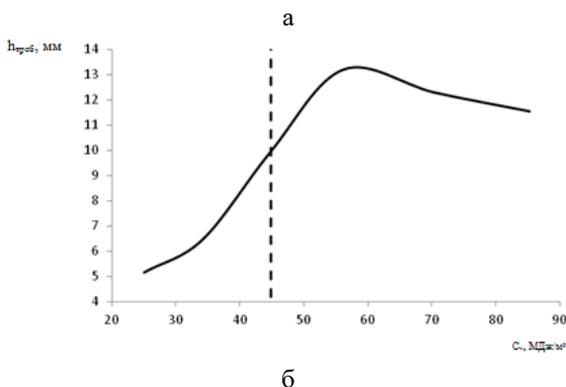
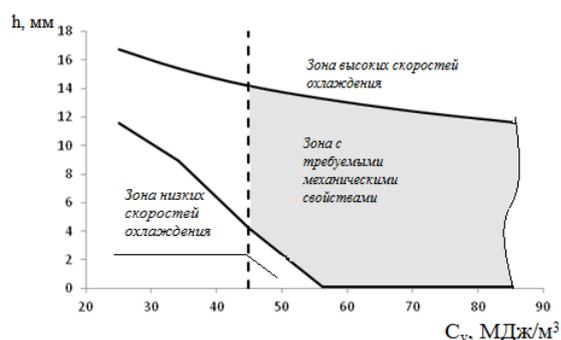


Рис. 6. Влияние объёмной теплоёмкости материала формы на:

- а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

Установлено, что при низкой теплоёмкости материала формы образуется достаточно узкая зона с требуемыми эксплуатационными свойствами литой заготовки, которая расширяется с увеличением объёмной теплоёмкости материала формы.

Это связано с тем, что при низкой теплоёмкости материала формы требуется незначительное количество тепла от стенки отливки, затраченное на ее нагрев. После чего потеря тепла от стенок отливки происходит за счет излучения с поверхности металлической формы в окружающую среду.

Теплоотвод из стенки отливки в форме осуществляется теплопередачей. При этом тепло расходуется в основном на прогрев стенки кокиля. Как следствие, на графике (рис. 6, а) наблюдается увеличение зоны высоких скоростей и уменьшение области низких скоростей. При этом величина зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами достигает своего максимума, равного 13,2 мм при значении объёмной теплоёмкости материала формы 56,22 МДж/м³.

Заключение

1. Проведен анализ и представлены графические зависимости влияния теплофизических характеристик отливки и материала формы на формирование зоны с высокими эксплуатационными свойствами в отливке из стали 150ХНМ.
2. Получена количественная оценка влияния теплофизических характеристик отливки и материала формы на геометрию и расположение зоны с требуемыми высокими эксплуатационными свойствами отливки из стали 150ХНМ.
3. Разработан подход, направленный на расширение теории управления эксплуатационными свойствами отливки из стали 150ХНМ за счет ее структурообразования.

Список источников

1. Исследование процесса формирования литой структуры валковой стали / Н.А. Феоктистов, К.Н. Вдовин, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 7 (242). С. 36-40.
2. Оценка влияния углерода на эксплуатационные свойства и микроструктуру валковой стали/ Н.А. Феоктистов, В.П. Чернов, А.С. Савинов, Д.А. Горленко, И.В. Михалкина // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 7 (254). С. 35-40.
3. Каипов В.Р., Феоктистов Н.А., Савинов А.С. Оценка влияния углерода на свойства заэвтектоидных валковых сталей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. тез. докл. 79-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. Т.1. С. 107.
4. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
5. Савинов А.С. Расчет теплоемкости затвердевающей стенки отливки // Теория и технология ме-

таллургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2011. Вып. 11. С. 130–133.

6. Расчет температурного поля системы «отливка-форма»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.С. Савинов,

С.М. Андреев, А.С. Тубольцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). № 2012616405; опубл. 13.07.12, ОБПБТ № 4 (I ч.). С. 97.

Сведения об авторах

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

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, директор института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru

Михалкина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

Ступак Александра Алексеевна – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: aleksandra.stupak@mail.ru

Осипова Ольга Александровна – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ocipova_1977@mail.ru

Рудь Ксения Игоревна – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: koks1690@mail.ru

Элиджарова Ксения Святославовна – магистрант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: darkelfie4ka@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FORECASTING THE GEOMETRY AND LOCATION OF THE HIGH-PERFORMANCE ZONE IN THE WALL

Feoktistov Nikolay A. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the department of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru

Savinov Alexander S. – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov_nis@mail.ru

Mikhalkina Irina V. – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor of cast process and material science department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

Stupak Aleksandra. A. – senior lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra.stupak@mail.ru

Osipova Olga A. – senior lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ocipova_1977@mail.ru

Rud Ksenia I. – postgraduate student of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: koks1690@mail.ru

Elidzharova Ksenia S. – student of machines and Technologies of processing by pressure and Engineering Technologies Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: darkelfie4ka@mail.ru

Abstract. The article considers the issue of modeling the geometry and location of the metal layer with the required performance characteristics for casting from steel 150KhNM. Mathematical calculation was carried out using the numerical solution of the heat conduction problem by the finite difference method. The study was carried out on a flat wall of the casting during its crystallization and cooling in a metal mold.

The influence of the thermophysical properties of the casting and the mold on the size and position of the zone with high performance characteristics was studied. The quality of the required layer was determined by the required cooling rates of 3-7 °C in the crystallization temperature range of 1383-1223 °C and with cooling rates of 0.6 - 2 °C in the region of carbide formation - in the temperature range of 607 - 801 °C. The values of the considered cooling rates were determined from the literature data. It has been established that an increase in the thermal conductivity of both the casting and the wall of the steel mold (mould mold) leads to an extreme increase in the size of the layer with high performance properties with maxima at 40 W/mK and 25 W/mK, respectively.

The influence of the volumetric heat capacity C_v of the casting is expressed by a decrease in the zone of high speeds with the formation of the maximum value of the zone with the required operational properties, equal to 12.7 mm.

At the same time, an increase in the volumetric heat capacity of the mold increases the zone of high speeds at the maximum value of the layer size with the required performance characteristics, equal to 13.2 mm.

Keywords: rate of cooling, thermophysical properties, casting mold, operational properties, steel 150KhNM.

Ссылка на статью:

Прогнозирование геометрии и расположения зоны с высокими эксплуатационными свойствами в стенке отливки из стали 150ХНМ при изменении тепловых условий ее формирования / Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, И.В. Михалкина, А.А. Ступак, О.А. Осипова, К.И. Рудь, К.С. Элиджарова // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 31-36.
Feoktistov N.A., Savinov A.S., Mikhalkina I.V., Stupak A.A., Osipova O.A., Rud K.I., Elidzharova K.S. Forecasting the geometry and location of the high-performance zone in the wall. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 31-36.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 001.891.573

Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М.

КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация. Постановка задачи. Программные комплексы, используемые для моделирования, позволяют решать технические и технологические задачи любой сложности. Перспективными с точки зрения экономических показателей остаются решения задач напряженно-деформированного состояния в условиях технологического цикла с использованием различных методов моделирования. Аналитическая информация, получаемая в ходе моделирования, является основанием для разработки технологических процессов, совершенствования режимов технологических операций, позволяет оперативно корректировать настройки оборудования. **Цель исследования.** Провести сравнительный анализ известных инструментов моделирования процессов обработки металлов давлением. **Используемые методы.** В статье проведен анализ существующих методов моделирования, широко применяемых как в производственной практике, так и для решения научных задач. Особое внимание уделено клеточным автоматам как перспективному методу моделирования, позволяющему получать аналитическую информацию в процессе развития объекта моделирования. **Новизна.** Выявлены достоинства и недостатки существующих инструментов для моделирования процессов обработки металлов давлением. Приведены примеры применения различных методов и инструментов предиктивной аналитики, применяемых для моделирования горячей и холодной прокатки при решении задач напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки. **Направления развития.** Программные комплексы, используемые для моделирования процессов обработки металлов давлением, являются неотъемлемой частью работ, проводимых в рамках цифровизации производственных процессов. Использование клеточных автоматов позволяет исследовать поведение объекта с учетом динамики его изменения во времени. Получаемую в результате информацию можно использовать для прогнозирования изменения моделируемого объекта в процессе его обработки, что является неотъемлемой частью управления технологическим процессом.

Ключевые слова: моделирование, клеточные автоматы, обработка металлов давлением, горячая прокатка, холодная прокатка, напряженно-деформированное состояние

Введение

Моделирование является одним из основных инструментов, используемых при создании новых и совершенствовании существующих технологий производства прокатной продукции. Используя различные методы моделирования, можно получать теоретические сведения об энергосиловых параметрах различных процессов обработки металлов давлением, изучать особенности структурообразования в обрабатываемых металлах и сплавах, определять закономерности формирования и формоизменения различных дефектов металлопродукции, что является теоретической базой для разработки направлений развития процессов производства и оптимизации их технологических режимов [1-4].

Существующие методы и программы, используемые для моделирования процессов горячей и холодной прокатки, имеют вполне очевидные ограничения с точки зрения сущности получаемой в ходе моделирования информации, а также точности получаемых результатов. Целью данной работы является проведение сопоставительного анализа применяемых методов компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД). При этом особое внимание было уделено тем методам, которые широко применяются для моделирования процессов горячей и холодной прокатки.

Основная часть

В табл. 1 представлены отличительные особенности применяемых методов моделирования процессов ОМД.

В связи с активным развитием цифровых технологий в рамках Индустрии 4.0 в настоящее время наблюдается тенденция по использованию комплексного подхода к моделированию технологических процессов. Данный подход включает несколько основных направлений: сквозное математическое описание всех основных стадий и процессов в соответствии с их логической последовательностью в технологических процессах производства с учетом зависимости свойств материалов от условий их обработки (температура, давление и др.), реализация с помощью математических методов и программных средств возможностей решения как прямых, так и обратных задач моделирования, решение задач оптимизации исследуемого технологического процесса или конструкции по заданной целевой функции, введение в состав программных комплексов элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов, создание на основе моделирующих программных средств САПР ТП, а также автоматизированного оборудования с гибким программным управлением [6, 7].

Методы моделирования процессов обработки металлов давлением

Метод /программа моделирования	Область применения	Достоинства	Недостатки
Deform-3D Ansys QForm	Моделирование горячей и холодной деформации	Широта охвата решаемых задач. Удобство работы с программным комплексом. Простой, интуитивно понятный интерфейс. Точность получаемых результатов, которая зависит от адекватности модели реальному процессу. Метод конечных элементов, лежащий в основе подавляющего большинства программных комплексов широкого профиля, дает точные результаты, главным образом, при моделировании процессов ОМД с небольшими значениями относительной деформации [5]	Достаточно высокие требования к параметрам компьютерной техники. Значительное время расчета и моделирования одного варианта. Сложность и низкая скорость создания файла входных данных. Длительность обучения пользователей [5]
SimufactForming	Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением и термической обработки	Моделирование всей технологической цепочки от заготовки до готового изделия. Специализированный графический интерфейс для технологов. Высокая точность результатов моделирования. Значительное сокращение времени расчетов с возможностью проведения параллельных вычислений. Моделирование реальной кинематики оборудования любой сложности и типа. Широкие возможности оптимизации [6]	Трудоемкость внесения изменений в систему расчетов. Большой объем документации. Сложность введения исходных данных [7]
Matlab	Решение задач в области технических вычислений	Автоматизация процесса вычисления. Изменения в вычислениях отображаются в результатах расчетов. Удобный интерфейс. Интеграция численных и аналитических математических инструментов. Поддержка интеллектуального автоматического управления единицами физических величин [8]	Высокая стоимость лицензии. Отсутствие развитых средств создания пользовательского интерфейса [8]
WinColdRolling	Расчет энергосиловых, кинематических, температурных и других параметров процессов многопроходной холодной прокатки и дрессировки полос. Оптимизация деформационно-скоростных и теплосиловых режимов прокатки	Оптимизация деформационно-скоростных и температурно-силовых режимов прокатки. Определение минимальной толщины прокатываемой полосы, рациональной толщины горячекатаного подката, параметров настройки непрерывного стана (скорость вращения валков, позиция нажимных устройств и др.) по технологическим параметрам процесса. Решение обратной задачи. Адаптация алгоритмов расчёта энергосиловых и кинематических параметров процесса [9]	В настоящее время разработанная система готова для опытно-промышленного опробования и внедрения в промышленные условия [9]
Клеточные автоматы	Моделирование технологического процесса в динамике с учетом происходящих в технологической системе изменений	Отсутствие ошибок в результате округления расчетов. Возможно решение для любой формы граничных условий. Вычисление параметров производится в локальном месте, эволюция каждой клетки определяется только ею самой и её ближайшими соседями. Связь с физической реальностью: благодаря своей «микроскопической природе» модели клеточных автоматов могут использоваться для явлений, имеющих место в реальных системах, но которые не могут быть получены из макроуравнений, то есть явления, которые «теряются» в результате аппроксимации при переходе от физической модели к непрерывным уравнениям [10]	Анализ явлений, обусловленных дискретной природой клеточных автоматов. Для получения количественных результатов с помощью клеточных автоматов иногда необходимо использовать ансамбль большого числа автоматов [10]

Традиционно для моделирования при решении технологических задач используются специализированные программные комплексы. К универсальным программам моделирования относятся Deform-3D, Ansys, QForm, клеточные автоматы и Simufact.forming. WinColdRolling применяется для холодных процессов обработки металлов давлением. Matlab применяется для моделирования различных устройств и систем с известными выходными данными.

Deform-3D – это специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением и термообработки. В основе расчетов используется метод конечных элементов. Программный комплекс Deform позволяет моделировать пластическое течение материала для горячих, полугорячих и холодных процессов, как изотермических, так и неизотермических. Теплопередача между объектами и внутри них может быть проанализирована как отдельный процесс или совместно с процессом деформирования по сопряженной схеме. В Deform-3D нет ограничений на количество участвующих в процессе объектов, как деформируемых, так и деформирующих. Результаты могут быть представлены в виде графиков усилия, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, также они могут быть представлены в виде таблиц [11].

Ansys представляет программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи в различных областях инженерной деятельности (расчет прочности конструкций, расчеты в области термодинамики, механики жидкостей и газов, электромагнетизма и др.), включая связанные многодисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.). Ansys состоит из различных функциональных приложений. Функциональность Ansys Mechanical характеризуется большим разнообразием связей от линейных неразрывных контактов, слияний узлов на сеточном уровне и шарниров до нелинейных контактных взаимодействий, автоматического определения и настройки контактов. Данный комплекс моделирует поведение объектов с учетом механических и тепловых свойств материалов (в том числе упругие, вязкопластичные, ортотропные, с упрочнением и разупрочнением, пористые, хрупкие (стекло, керамика) и др.). При этом имеются следующие расчетные возможности: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции, определение НДС с учетом нелинейных моделей материалов, моделирование процессов формообразования и формоизменения, определение НДС конструкций, возникающего от тепловых деформаций и т.д. [12].

Программное обеспечение QForm позволяет моделировать самые разнообразные холодные и горячие процессы ОМД: штамповку, свободную ковку, выдавливание, продольную прокатку, поперечно-клиновую прокатку, винтовую прокатку, экструзию профилей, процессы гибки, раскатку колец и колес,

ротационную вытяжку, штамповку высоким давлением, листовую штамповку, орбитальную штамповку, штамповку спеченных порошков, совместную деформацию нескольких заготовок из разных материалов и другие специальные процессы. Дополнительно возможно моделирование фазовых превращений при термообработке, решение упругопластической задачи при нагреве и охлаждении, расчет микроструктуры при деформации [13].

Simufact.forming является полнофункциональным комплексным решением для моделирования широкого спектра технологий обработки металлов давлением. Simufact.forming позволяет получить реалистичное представление технологических процессов с полноценной 3D-визуализацией всех инструментов и деталей. Высококачественное моделирование в Simufact.forming основывается на использовании лидирующих программных пакетов компании MSC Software: конечно-элементного решателя для нелинейных задач Marc и конечно-объемного решателя для нелинейных задач Dytran. Simufact.forming предлагает широкий набор инструментов для виртуального проектирования и отработки реальных технологических процессов. Используя Simufact.forming, можно моделировать как отдельные стадии технологического процесса, так и всю технологическую цепочку – от заготовки до готового изделия. Данный программный комплекс характеризуется модульной концепцией, все инструменты поделены на приложения. Приложения следует устанавливать отдельно в зависимости от поставленной задачи [14].

Программный комплекс Matlab представляет собой среду и язык для отображения технических расчетов. В данном программном комплексе нет рабочих инструментов и условий для запуска технологического процесса. Он отличается большей универсальностью по сравнению с другими программными комплексами. Matlab – это одновременно язык инженерных расчетов, графические приложения (приложения с графическим интерфейсом) и средства разработки программного обеспечения [15].

WinColdRolling используется в основном для моделирования процессов холодной прокатки и дрессировки полос из сталей и сплавов. Основное функциональное назначение данного программного комплекса заключается в расчетах энергосиловых, кинематических, температурных и других параметров процессов многопроходной холодной прокатки и дрессировки полос, а также для оптимизации деформационно-скоростных и теплосиловых режимов прокатки [16].

Особое внимание следует уделить интеллектуально-программному комплексу типа «клеточные автоматы». Интересно, что определение клеточного автомата является весьма общим, и в класс клеточных автоматов могут быть включены и объекты, изучаемые в других разделах. В соответствии с [17] под клеточными автоматами понимаются сети элементов, меняющих свое состояние в последовательные дис-

кретные моменты времени по определенному закону в зависимости от того, каким было состояние рассматриваемого элемента и его соседей в предыдущий дискретный момент времени. Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. Для каждой итерации (переход в другое состояние) используется правило перехода и состояния соседних ячеек, таким образом определяется новое состояние каждой ячейки в сетки. Реализовать моделирование технологического процесса с помощью клеточного автомата можно на ОС Windows (Visual basic), в программных комплексах MATLAB & Simulink, SIMULIA Aباqus и др. Клеточный автомат позволяет моделировать любой технологический процесс с минимальной погрешностью результатов. Методы клеточных автоматов также нашли широкое применение для решения задачи по моделированию распределения напряжений и деформаций в металлах и сплавах. Данные подходы основаны на представлении моделируемой среды в виде ансамбля взаимодействующих активных элементов (ячеек) определённого размера. Метод клеточных автоматов позволяет производить расчёт быстропротекающих динамических процессов, таких как распределение энергии в деформируемом твёрдом теле, не решая сложных дифференциальных уравнений, использование которых зачастую является весьма затруднительным. В целом клеточные автоматы можно рассматривать как машину с синхронным параллельным вычислением. Программно-интеллектуальный комплекс может состоять из целого ряда автоматов, включая одномерные, трёхмерные, с большим радиусом окрестностей, с треугольными и шестиугольными ячейками. Также имеется возможность задавать даже такие правила, в которых соседние ячейки никак не влияют на работу автомата, зато влияют находящиеся на некотором расстоянии (все или некоторые). Все итерации и запуск клеточного автомата происходит через прописанные в программе правила. Основным преимуществом клеточных автоматов является универсальность и простота. Условия вычислений можно корректировать в процессе работы программного комплекса без потери данных и дополнительных изменений в сетке вычислений.

Актуальность применения клеточных автоматов для решения задач напряженно-деформированного состояния представлена в работах [18-20]. В работе [18] описаны результаты проведенных вычислительных экспериментов для расчета сжимающих и растягивающих напряжений в движущемся стальном слитке марки 40X. Компьютерная модель задачи основана на совместном применении теории клеточных автоматов и конечно-разностных методов. Следует отметить, что конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений хорошо сочетается с парадигмой клеточного автомата. Представленная математическая модель, основанная на совместном исполь-

зовании уравнений теории упругости и нестационарной теплопроводности может быть положена в основу программных средств компьютерного моделирования термонапряженного состояния слитков при изменении граничных условий по температуре. Результаты вычислительных экспериментов показывают возможности для анализа различных режимов нагрева слитков в шаговых печах [18].

Использование дискретно-континуального метода возбудимых клеточных автоматов для моделирования напряженно-деформированного состояния в вершинах трещин и надрезов с учетом кривизны кристаллической решетки показано в работе [19]. Предлагаемая математическая модель деформации нагруженного твердого тела основана на положении, что процесс деформации является следствием перераспределения энергии между различными структурными элементами твердого тела. Разработаны алгоритмы моделирования переноса фронта неупругой деформации в зоне кривизны кристаллической решетки на базе нелинейного дискретно-континуального метода возбудимых клеточных автоматов. Построен тензор завихренности структурных трансформаций, которые возникают при последовательном развитии пластической дисторсии вдоль вершины трещины в процессе ее распространения. Показана возможность развития структурной турбулентности на фрактограммах вязкого разрушения субмикроструктурных материалов. Разработанный метод имеет широкие перспективы в моделировании нелинейных волновых процессов в полосах локализованной деформации, где возникает микропористость и распространяется трещина продольного сдвига, описании функциональных свойств наноструктурных материалов и прогнозировании механического поведения твердых тел [19].

В работе [20] описан обобщающий подход моделирования процессов ОМД с помощью клеточных автоматов. Представлены параметры технологического процесса в виде материальных точек в системе автоматов. В вычислительном плане клеточно-автоматная модель работает на порядок быстрее классических вычислительных методов (метода конечных элементов, разностных моделей), которые требуют последовательности итераций. Причем на каждой итерации происходит решение системы линейных уравнений большого порядка. Таким образом, клеточно-автоматная модель открывает широкие перспективы для разработки эффективных программ расчета НДС заготовки в процессе обработки давлением [20].

Заключение

Сравнительный анализ методов моделирования процессов ОМД позволил оценить возможности их применения для решения конкретных технологических и технических задач. Одним из перспективных методов моделирования является использование метода клеточных автоматов, который в настоящее время еще не находит широкого применения. Однако

возможность получения результатов моделирования процессов обработки «в динамике», то есть в каждый отдельный момент времени с учетом истории состояния объекта, выгодно отличает клеточные автоматы по сравнению с конечно-элементными методами моделирования. Клеточные автоматы позволяют решать задачи различной сложности, что, несомненно, соответствует основным подходам цифровизации технологических процессов производства металлоизделий.

Список литературы

1. Рудской А.И., Колбасников Н.Г. Физическое и математическое моделирование формирования структуры и свойств сталей при горячей прокатке. Разработка современных технологий горячей прокатки сталей с гарантируемым уровнем механических свойств // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. С. 331-344.
2. Коренко М.Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке в разгонных калибрах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. №4/7. С. 36-40.
3. Стоякин О.А. Исследование формирования клиновидности и серповидности горячекатаных стальных полос для повышения устойчивости процесса прокатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. М., 2019. 141 с.
4. Тарасов П.А. Исследование и моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки тонких полос для повышения эффективности работы широкополосных станов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05: Череповец, 2009. 161 с.
5. Тишук Л.И. Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Воронеж, 2018. 169 с.
6. URL: <https://mcssoftware.ru/products/simufact>
7. Яблочников Е.И., Пирогов А.В., Андреев Ю.С. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении: учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 92 с.
8. Колкер А.Б., Ливенец Д.А., Кошелева А.И. Обоснование выбора программного обеспечения для робототехники // Автоматика и программная инженерия. 2012. №1. С.51-64.
9. Приходько И.Ю., Воробей С.А., Шатохин С.Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов // Сталь. 2005. №1 С.72-77.
10. Шакаева М.С. Простейшие клеточные автоматы в математическом моделировании процессов.: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.16. М., 1995. 127 с.
11. URL:<https://sapr.ru/article/7481>
12. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/>
13. URL: <https://www.qform3d.ru/processes>
14. URL: http://www.mcssoftware.ru/docs/products/simufact/imufact_forming_rus.pdf.
15. URL: <https://exponenta.ru/matlab>
16. URL: http://metaltehnomash.com.ua/software/WinColdRolling/WinColdRolling_ru.html].
17. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М: Наука, 1974. 432 с.
18. Чичко А. Н., Бороздин А. С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2005. № 4. С.61-67.
19. Эффекты пластической дисторсии в зоне кризиса кристаллической решетки в вершине трещины / Панин В.Е., Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Панин С.В. // Физическая мезомеханика. 2017. № 3. С.40-50.
20. Исследование возможности анализа напряженно-деформированного состояния на клеточных автоматах / Рубин Г.Ш., Шишов А.А., Чукин М.В., Гун Г.С. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2012. № 39. С.114-117.

Сведения об авторах

Лопатина Екатерина Витальевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Воронин Константин Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры УиИС ИСАиИ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: voronin.km@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CELLULAR AUTOMATA AS A PROMISING METHOD FOR MODELING METALWORKING PROCESSES BY PRESSURE

Lopatina Ekaterina V. – postgraduate student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Polyakova Marina A. – Dr. Sci. (Eng.), associate professor, professor of Department of Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Voronin Konstantin M. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Urban Studies and Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: voronin.km@mail.ru

Abstract. *Problem statement:* The software complexes used for modeling allow solving technical and technological problems of any complexity. Solutions of the problems of the stress-strain state in the conditions of the technological cycle using various modeling methods remain promising from the point of view of economic indicators for the near future. The analytical information obtained during the simulation is the basis for the development of technological processes, improving the modes of technological operations, allows you to quickly adjust the settings of equipment. *The purpose of the study.* To conduct a comparative analysis of well-known modeling tools for metalworking processes by pressure. *The methods used.* The article analyzes the existing modeling methods that are widely used both in production practice and for solving scientific problems. Special attention is paid to cellular automata as a promising modeling method that allows obtaining analytical information during the development of the modeling object. *Novelty.* The advantages and disadvantages of existing tools for modeling the processes of metal working by pressure are revealed. Examples of the application of various methods and predictive analytics tools used to simulate hot and cold rolling in solving problems of the stress-strain state of the workpiece are given. *Directions of development.* Software complexes used for modeling metalworking processes by pressure are an integral part of the work carried out as part of the digitalization of production processes. The use of cellular automata makes it possible to study the behavior of an object taking into account the dynamics of its change over time. The resulting information can be used to predict changes in the simulated object during its processing, which is an integral part of process control.

Keywords: modeling, cellular automata, metal processing by pressure, hot rolling, cold rolling, stress-strain state.

Ссылка на статью:

Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М. Клеточные автоматы как перспективный метод моделирования процессов обработки металлов давлением // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 37-42.

Lopatina E.V., Polyakova M.A., Voronin K.M. Cellular automata as a promising method for modeling metalworking processes by pressure. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 37-42.

УДК 621.771

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А.

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/1070 И 5083/2024

Аннотация. На сегодняшний день листовые слоистые композиты набирают популярность при производстве ответственных деталей и конструкций в различных отраслях промышленности. В статье рассмотрены листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов 5082/1070 и 5083/2024. Среди процессов, которые позволяют достигнуть высоких значений механических свойств в длинномерной продукции, одним из перспективных методов является асимметричная аккумулярующая прокатка. В статье приведены рациональные технологические схемы и режимы асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов для их использования в космической и автомобильной отраслях. Разработано новое техническое решение, заключающееся в формировании трапециевидного или зубчатого рельефа для исключения смещения слоёв относительно друг друга в очаге деформации и улучшения прочности соединения при асимметричной аккумулярующей прокатке.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, листовые слоистые алюминиевые композиты, аккумулярующая прокатка, мозаклинивающееся соединение слоёв, механические свойства

Введение

В современном мире повышается интерес к использованию листовых слоистых композитов в различных отраслях производства. В отличие от однослойных, слоистые материалы являются более прочным, коррозионностойким и технологичным сырьём для производства деталей различного назначения. В статье рассматриваются листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов. Алюминий – это уникальный материал, который при комнатной температуре обладает высокими значениями пластичности и коррозионной стойкости. При значительных отрицательных температурах пластичность, также как и прочность, возрастает. Данные характеристики позволяют широко использовать алюминиевую продукцию в ответственных конструкциях [1, 2].

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070 предназначены для использования в космической отрасли, а именно для производства топливных баков ракет-носителей и космических кораблей для окислителя и горючего сжиженного водородного топлива. Сейчас в качестве основных материалов для производства корпусов топливных баков ракет-носителей используются алюминиевые сплавы, легированные либо магнием, либо литием (например, чаще всего АМг5, АМг6 или 1201, 1421, 1469, 8090 в некоторых конструкциях и т.д.). Данная продукция изготавливается по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN485-1,2,4. Толщина топливных баков, в зависимости от вида ракеты-носителя или космического корабля, может варьироваться от 0,4 до 2,5 мм, ширина поставляемой продукции зависит от формируемого диаметра бака и не превышает 2000 мм. Предлагаемые толщины бака составляют 0,7 – 1,5 мм. Известно, что в России ведется разработка двигателей для ракет-носителей и космических кораблей, работающих на водородном топливе. Однако существующие материалы, из кото-

рых изготавливается корпус бака, достаточно сильно подвергаются водородной коррозии. Это отражается на стойкости агрегатов хранения, взрывоопасности объектов из-за их охрупчивания водородом. Сочетание 5xxx и 1xxx серий позволит, с одной стороны, получить достаточный уровень прочности (соответствующий установленной нормативной документацией), с другой – позволит использовать водородное топливо в качестве горючего, так как алюминиевые сплавы 1xxx серии (в данном случае сплав 1070) практически не подвергаются коррозии при взаимодействии с водородом.

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/2024 предназначены для производства габаритных частей кузова легкового автомобиля (капот, крылья, крыша, двери, днище). В настоящее время в качестве конструкционного материала для автомобилестроения используются однослойные алюминиевые сплавы 5xxx и 6xxx серий (например, 5182, 6016 и т.д., изготавливаемые по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4 и т.д.), которые постепенно приходят на смену стальным материалам. Однако алюминиевые сплавы, применяемые в автомобилестроении, не обладают высокими значениями прочностных характеристик. Главная цель замены существующей алюминиевой продукции на листовую слоистый алюминиевый композит 5083/2024 заключается в первую очередь в повышении уровня прочностных характеристик. Исходя из этого, повысится эксплуатационная безопасность, кроме того, при высоком уровне прочностных характеристик снизится вероятность появления небольших повреждений после незначительных аварий. Сочетание 5xxx и 2xxx серии позволит получить удовлетворительное качество поверхности за счёт сплава 5083, сплав 2024 может применяться в конструкциях, в которых требуется высокое значение коэффициента вязкостного разрушения, более того, в совокупности они лучше выдерживают эксплуатационные нагрузки [3]. Толщина производимой продукции составит 0,7–1,5 мм, ширина не более 1800 мм.

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А., 2022

Так как продукция из листовых слоистых алюминиевых композитов предназначена для производства ответственных деталей и конструкций, это обуславливает постоянное повышение требований к качеству алюминиевой металлопродукции. Основной упор при этом делается на разработку и совершенствование технологии обработки данной продукции для повышения механических характеристик: получения высоких показателей прочности, твёрдости и удельного значения пластичности.

Технологические разработки и результаты

Асимметричная аккумулярирующая прокатка представляет собой большой интерес в качестве одного из методов интенсивной пластической деформации, с помощью которого при нужном количестве циклов возможно получить ультрамелкозернистую структуру благодаря аккумуляции напряжений после каждого цикла обработки. Большой плюс процесса состоит в том, что можно использовать разнородные материалы в качестве исходных заготовок и получать свойства, присущие как первому, так и второму сплаву.

Важно отметить, что при получении слоистого композита большую роль играет образование качественного шва. Известно, что в результате аккумулярирующей прокатки листы между собой соединяются за счет диффузионных взаимодействий, которые вызывают впоследствии измельчение микроструктуры обрабатываемого металла [4-8]. В работе предлагается новое техническое решение, заключающееся в создании прочного самозаклинивающегося соединения на контактирующих поверхностях [9]. Сущность предлагаемого способа получения слоистого проката состоит в следующем. Перед сборкой пакета осуществляют механическую обработку контактирующих между собой поверхностей заготовок, входящих в пакет, с формированием рельефа контактирующих поверхностей (рис. 1). Затем осуществляют сборку пакета, состоящего из

нескольких заготовок, совместную прокатку пакета за один проход с обжатием до 80% и термообработку. Данное решение помогает исключить смещение слоев относительно друг друга в очаге деформации, частичное сваривание и заворот передней части заготовки по типу дефекта «серповидность», улучшает плотность соединения между слоями.

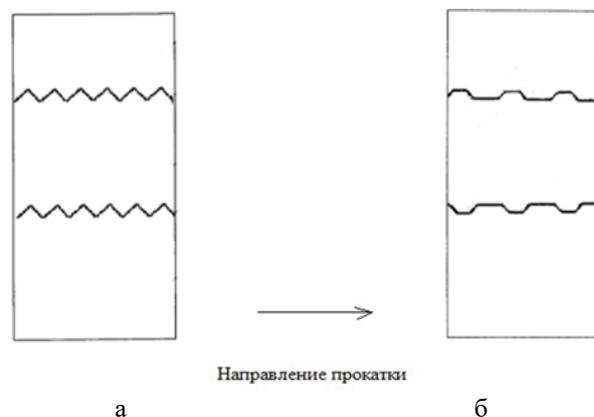


Рис. 1. Виды формируемого рельефа: а – зубчатый рельеф; б – трапециевидный рельеф

Технологическая схема производства листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 для топливных баков ракет-носителей представлена на рис. 2.

Технологическая схема включает в себя несколько этапов:

1. Проведение первого цикла асимметричной аккумулярирующей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 5xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

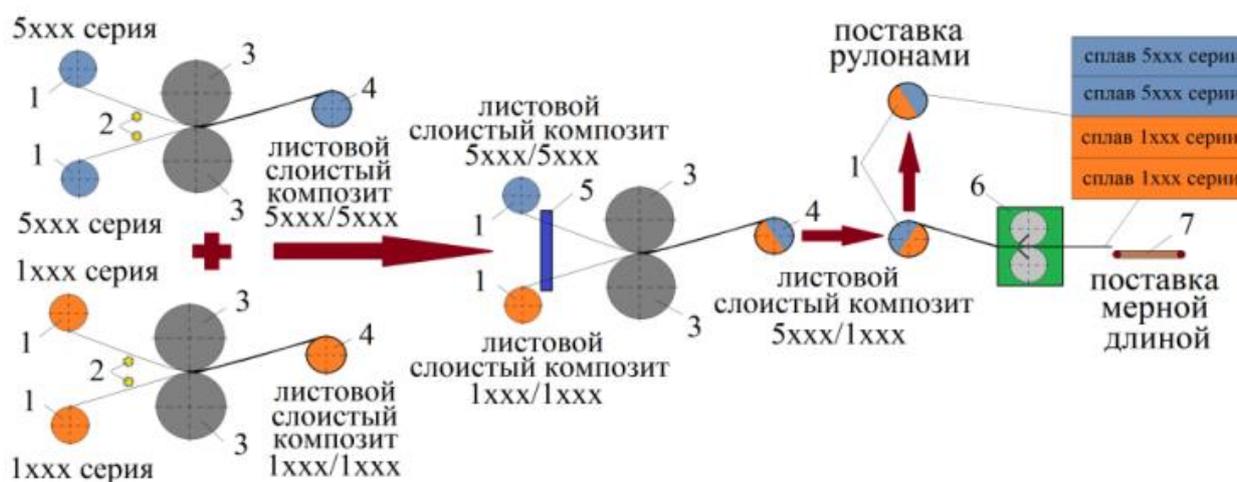


Рис. 2. Технологическая схема процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 1xxx серий):

1 – разматыватели; 2 – щётки; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – печь; 6 – ножницы; 7 – транспортер листов

2. Проведение первого цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 1xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

3. Проведение второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 1xxx и 5xxx серий, полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

4. Порезка слоистого композита 5xxx/1xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/1xxx).

В зависимости от требуемых свойств количество циклов может варьироваться.

По результатам исследований [1] предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 1070 и 5083, из которых составляется листовой слоистый алюминиевый композит 5083/1070.

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 до 4 мм.

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 до 2 мм.

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}67\%$.

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}67\%$.

6) Радиус рабочих валков 170 – 250 мм.

7) Значение отношения скоростей установить:

– не менее 1,25 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 1,7 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 58–67%;

– не менее 1,7 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 2 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 58–67%;

– не менее 2 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 2,5 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 58–67%.

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,2, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов.

9) Предварительно подготавливать поверхность металлов перед соединением зачисткой металлическими щётками и обезжириванием при холодном деформировании.

10) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании 380°C.

11) Время выдержки в печи перед процессом тепловой прокатки 5–8 мин.

12) Минимальное количество проходов – 2.

При данных параметрах прокатки в представленном композите будут появляться большие сдвиговые деформации, поэтому такое асимметричное деформирование будет способствовать повышению прочности (табл. 1). При этом температура деформационного разогрева не достигнет критического значения температуры.

Таблица 1

Сравнительные характеристики сплавов 1070, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/1070

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед.
5083	140	280	16	65
1070	–	60	20	25
5083/1070	210	304	10	132/65

Технологическая схема производства листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 для габаритных частей кузова автомобиля, представленная на рис. 3, включает следующие этапы:

1. Проведение первого цикла асимметричной аккумуляющей прокатки (дважды) при использовании алюминиевых сплавов 5xxx и 2xxx с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

2. Проведение второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 5xxx/2xxx, полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

3. Порезка слоистого композита 5xxx/2xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/2xxx).

По результатам исследований [1] предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 2024 и 5083, из которых составляется листовой слоистый алюминиевый композит 5083/2024.

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 до 4 мм.

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 до 2 мм.

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}65\%$.

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}60\%$.

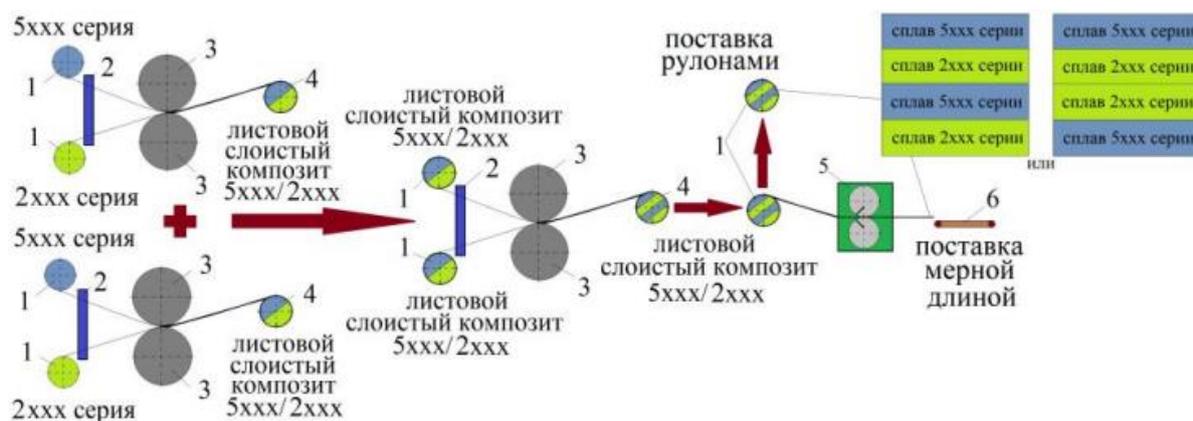


Рис. 3. Схема технологического процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 2xxx серий):

1 – размотыватели; 2 – печь; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – ножницы; 6 – транспортер листов

6) Радиус рабочих валков 170–250 мм.

7) Значение отношения скоростей установить:

- не менее 1,7 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 2 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 57–65%;
- не менее 2 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 2,5 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 57–65%;
- не менее 2,5 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 3,3 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 57–65%.

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,3, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов.

9) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании 380°C.

10) Время выдержки в печи перед процессом теплой прокатки 15 мин перед первым циклом, 8–10 мин – перед вторым циклом.

11) Минимальное количество проходов – 2.

В табл. 2 представлены характеристики исходных материалов (сплавов 5083 и 2024), а также листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024.

Таблица 2

Сравнительные характеристики сплавов 2024, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/2024

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед.
5083	140	280	16	65
2024	120	235	9	42
5083/2024	215	333	12	130/106

Полученные результаты указывают на то, что предлагаемые технологические схемы асимметричной

аккумулирующей прокатки позволяют обеспечить достижение одновременно высоких прочности и технологической пластичности листовых слоистых алюминиевых композитов за счет создания больших сдвиговых деформаций [2, 10, 11].

Заключение

Разработаны рациональные технологические режимы для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, включающие схемы технологического процесса производства мерной длины и рулонов. Данные режимы предполагают установку основных параметров процесса асимметричной аккумулярующей прокатки, в том числе определенные марки, используемые для производства листовых слоистых алюминиевых композитов (1070, 2024 и 5083), толщины исходных заготовок (от 2 до 4 мм), обжатия в первом и втором цикле (от 50 до 67%), значения отношения скоростей валков (в диапазоне 1,25–4), предварительную подготовку поверхности заготовок, режимы термической обработки (зависит от вида листового слоистого алюминиевого композита) и количество циклов.

Предложено новое техническое решение, заключающееся в создании прочной самозаклинивающейся системы в месте соединения слоев композита.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> и финансовой поддержки Челябинской области.

Список литературы

1. Бирюкова А.Д. Совершенствование процесса асимметричной аккумулярующей прокатки для улучшения механических свойств в листовых слоистых алюминиевых композитах: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2022. 143 с.

2. Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 38-46.
3. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // Машиностроение и инженерное образование. 2009. №1. С. 27-41.
4. Ершов А.А., Сычева Т.А., Засуха П.Ф. Исследование реакционной диффузии в трехслойном биметалле алюминий-латунь // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. № 5. С. 19-22.
5. Alizadeh M. Strength prediction of the ARBed Al/Al₂O₃/B₄C nanocomposites using Orowan model // Materials Research Bulletin. 2014. Vol. 59. Pp. 290-294.
6. Jamaati R. Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process // Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. 2011. Vol. 528. Pp. 2143-2148.
7. Bagherpour E.M. Tailoring particle distribution non-uniformity and grain refinement in nanostructured metal matrix composites fabricated by severe plastic deformation (SPD): a correlation with flow stress // Journal of Materials Science. 2017. Vol. 52. Pp. 3436-3446.
2. Ghalandari L. High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 506. Pp. 172-178.
3. Пат. 2762696 РФ, МПК В32В 7/02, В23К 20/04. Способ получения слоистого проката / А.М. Песин, А.Я. Белов, Е. Пастернак и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (RU). 2021101410; заявл. 22.01.2021; опубл. 22.12.2021. Бюл. № 36.
4. Obtaining laminated aluminum composites with a gradient structure based on asymmetric deformation / О. Biryukova, А. Pesin, D. Pustovoitov, А. Kozhemiakina, L. Nosov // Metal. 2021. Pp. 496-501.
5. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.

Сведения об авторах

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Бирюкова Олеся Дмитриевна – инженер лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: fimapatisonchik@inbox.ru

Носов Леонид Васильевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nosov.leopard@yandex.ru

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

Песин Илья Александрович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Пуа33392@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF RATIONAL TECHNOLOGICAL MODES OF PROCESSING SHEET LAMINATED ALUMINUM COMPOSITES 5083/1070 AND 5083/2024

Pesin Alexander M. – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

Pustovoitov Denis O. – Ph.D. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Biryukova Olesya D. – Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru

Nosov Leonid V. – Postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nosov.leopold@yandex.ru

Pivovarova Ksenia G. – D.Sc. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Pesin Ilya A. – Ph.D. (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Ilya33392@bk.ru

Annotation. Sheet layered composites are gaining popularity in the production of critical parts and structures in various industries. The article considers sheet layered composites made of aluminum alloys 5082/1070 and 5083/2024. Among the processes that make it possible to achieve high values of mechanical properties in long products, one of the promising methods is asymmetric accumulating rolling. The article presents rational technological schemes and modes of asymmetric accumulating rolling of sheet laminated aluminum composites for their use in the space and automotive industries. A new technical solution has been developed, which consists in the formation of a trapezoidal or toothed relief to eliminate the displacement of layers relative to each other in the focus of deformation and to improve the strength of the joint during asymmetric accumulating rolling.

Keywords: aluminum alloy, sheet layered aluminum composites, accumulating rolling, interlocking connection of layers, mechanical properties

Ссылка на статью:

Разработка рациональных технологических режимов обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 43-48.

Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Nosov L.V., Pivovarova K.G., Pesin I.A. Development of rational technological modes of processing sheet laminated aluminum composites 5083/1070 and 5083/2024. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 43-48.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

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

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

Журнал включает в себя следующие разделы:

1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.
3. Литейное производство.
4. Обработка металлов давлением.

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

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

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

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

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

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

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

Пример оформления литературы

Список литературы

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

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

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

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

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